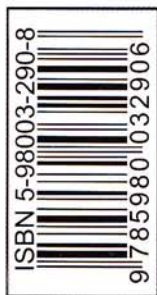


Афонский А. А., Дьяконов В. П.

Измерительные приборы и массовые электронные измерения



Специфика измерений
Современные мультиметры
Источники напряжений и токов
Все виды осциллографов
Лаборатории на компьютере
Паяльное оборудование

Находка для специалиста!



Серия «Библиотека инженера»

А. А. Афонский, В. П. Дьяконов

Измерительные приборы и массовые электронные измерения

Под редакцией проф. В. П. Дьяконова

**Москва
СОЛОН-ПРЕСС
2007**

УДК 621.38
ББК 32.85
А 94

А. А. Афонский, В. П. Дьяконов

Д93 Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Серия «Библиотека инженера». Под ред. проф. В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. — 544 с.: ил.

ISBN 5-98003-290-8

Описаны самые современные измерительные приборы: измерители R, C и L, мультиметры, измерительные ВЧ- и НЧ-генераторы, импульсные и функциональные генераторы, аналоговые и цифровые стационарные и портативные осциллографы, в том числе уникальные. Особое внимание уделено массовым дешевым (бюджетным) приборам и технике измерений, в том числе с применением виртуальных и компьютеризированных лабораторий, и их применению в практике электронных измерений. Ряд материалов посвящен работе с современными цифровыми осциллографами и функциональными генераторами. Рассмотрена современная элементная база и схемотехника измерительных устройств. В книге около шестисот иллюстраций и осциллограмм. Для работников служб ремонта и сервиса сложной электронной техники, научных работников и инженеров, студентов, аспирантов, преподавателей и лаборантов вузов и университетов, а также для подготовленных радиолюбителей.

www.solon-press.ru

E-mail: solon-avtor@coba.ru

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-ПРЕСС» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Оформить заказ можно на сайте www.solon-press.ru в разделе «Книга — почтой».

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-ПРЕСС», считав его с адреса www.solon-press.ru/kat.doc.

Интернет-магазин размещен на сайте www.solon-press.ru.

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»

Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, www.abook.ru

ISBN 5-98003-290-8

© Макет и обложка «СОЛОН-ПРЕСС», 2007

© А. А. Афонский, В. П. Дьяконов, 2007

Предисловие

82.110 ЖИУ
82.110 ЖИУ
10 А

Распад СССР и его научного приборостроения нанес непоправимый вред разработке и промышленному производству современных электронных измерительных приборов и уровню оснащения ими научных и учебных лабораторий. По некоторым оценкам в отечественном производстве осталось лишь несколько процентов из прежнего огромного парка советских измерительных приборов, составляющего основу метрологических служб оборонно-промышленного комплекса, научных и учебных организаций.

Однако, без современных измерительных приборов невозможна организация даже сервиса и ремонта сложной бытовой и промышленной аппаратуры, номенклатура которой в наши дни резко расширилась — достаточно отметить появление в продаже таких сложных бытовых устройств, как жидкокристаллические и плазменные панели и телевизоры, цифровые видеокамеры и фотоаппараты, цифровые MP3 и MP4 плееры и рекордеры, холодильники и стиральные машины с микропроцессорным управлением, микроволновые печи и т. д. Их ремонт, отладка и сервисное обслуживание во время эксплуатации невозможны без применения самой современной измерительной техники. А что говорить о научных исследованиях и опытно-конструкторских разработках в научном и оборонном секторе экономики?

Ясно, что положение с сокращением номенклатуры измерительной аппаратуры, как и отсутствие современной литературы по вопросам измерений, просто нетерпимо. Лаборатории служб сервиса и ремонта уже интенсивно переоснащаются современными зарубежными измерительными приборами. Стареющие лаборатории вузов и научных организаций также требуют оснащения новой измерительной техникой. Начала расти заинтересованность государства в научных разработках, без которых невозможно не только развитие промышленного и оборонного комплекса, но и просто выпуск современных доброкачественных бытовых приборов и устройств.

В последние годы на российский рынок стали поступать новейшие зарубежные измерительные приборы — как действительно уникальные (например, цифровые сверхскоростные осциллографы с полосой частот до 100 ГГц), так и дешевые приборы, называемые бюджетными. Последние иногда уступают по своим электрическим характеристикам добротным старым советским измерительным приборам, но легче их, меньше по размеру и удобнее в эксплуатации. Да и прежде дефицитные советские измерительные приборы неожиданно стали общедоступными — после развала многих наших НИИ и КБ и ликвидации войсковых складов, многие наши приборы появились в продаже и попали в руки специалистов из частных предприятий и радиолюбителей. В России появился ряд фирм, организовавших восстановление и складирование этих приборов и их продажу по сниженным ценам.

В результате выбор измерительных приборов сильно усложнился и многие организации, специалисты и радиолюбители испытывают трудности в их подборе для проведения исследований, наладки и тестирования всевозможных технических устройств, даже в учебной и радиолюбительской практике. Новое поколение молодых специалистов порою не знакомо с современной измерительной техникой, например с цифровыми осциллографами и виртуальными измерительными лабораториями. Ситуация осложняется тем, что давно практически прекратилось издание серьезной литературы по современным измерительным приборам. К приме-

ру, практически нет литературы по малогабаритным универсальным измерителям — мультиметрам, по аналоговым и, особенно, цифровым осциллографам, по виртуальным измерительным приборам и т. д.

Учитывая все это была подготовлена и недавно издана в издательстве «СОЛОН-Пресс» книга по современной технике осциллографирования и электронным осциллографам [1]. Однако осциллограф, хотя и важный, но далеко не единственный прибор для исследования и наладки радиоэлектронных устройств. Не менее важны и даже более популярны измерители параметров радиокомпонентов (резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности), мультиметры, измерительные и функциональные генераторы, цифровые частотомеры, лабораторные источники питания и многие другие измерительные приборы. Порою только грамотное совместное их применение позволяет решать сложные вопросы измерений в радиоэлектронике с минимальными затратами на приобретение измерительных приборов. Кроме того, за время после подготовки книги [1] к изданию заметно обновился и рынок осциллографов. Это и побудило авторов взяться за подготовку данной книги.

Хотя в книге и представлены основы теории измерений, она ориентирована в первую очередь на практическое применение самых массовых и современных измерительных приборов и связанных с измерениями средств. Значительное внимание в книге уделено новейшей элементной базе измерительных приборов, в частности микросхемам опорных источников напряжения и тока, различных преобразователей и функциональных генераторов, скоростных и широкополосных операционных усилителей и компараторов. Приведено множество примеров их применения в измерительных устройствах. Книга вполне может служить справочником по выбору измерительных приборов для разнообразных электронных измерений и практическим пособием по их применению.

Круг вопросов, затронутых в книге, очень широк и не все они отражены с одинаковой степенью полноты. Некоторые не отражены совсем. К примеру, простейшие и общеизвестные «измерения», вроде прозвона цепей, проверки диодов или транзисторов и т. д., лишь кратко описаны. Намеренно исключено описание средств измерений на сверхвысоких частотах, ввиду их специфичности. Это скорее радиоизмерения, чем электронные измерения. Зато последние описаны максимально подробно — от измерения параметров электронных компонентов (R , L , C и т. д.) до практики применения самых современных аналоговых и, особенно, цифровых электронных осциллографов и виртуальных компьютеризированных лабораторий.

Есть в книге материал по схемотехнике некоторых измерительных устройств и их компонентой и схемотехнической базе. Есть даже глава по паяльному инструментарию и современной технике пайки. Она поможет сборке заинтересованными специалистами и радиолюбителями некоторых измерительных устройств и приставок к измерительным приборам.

Книга рекомендуется работникам служб ремонта и сервиса современной электронной аппаратуры, научным работникам, инженерам, аспирантам, студентам, преподавателям и лаборантам университетов и вузов технического профиля, а также подготовленным радиолюбителям.

Глава 1. Основы электронных измерений и мультиметры

В этой главе описаны самые массовые виды электро- и радиоизмерений: измерение сопротивления R , емкости C и индуктивности L пассивных компонентов, добротности и тангенса угла потерь, измерение постоянного и переменного напряжений токов (включая истинные среднеквадратические значения переменного напряжения и тока) и частоты сигналов. Подробно описаны мультиметры — приборы для измерения этих параметров, в том числе подключаемые к компьютеру через порты RS-232 и USB. Рассмотрена их современная элементная база.

1.1. Измерения на постоянном токе

1.1.1. Источники напряжения и тока

Любое электронное устройство строится на основе электронных компонентов. Прежде всего, это источники электрической энергии, активные приборы (например, транзисторы и интегральные схемы), диоды, резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы.

Источники электрической энергии представлены источниками напряжения и тока. Реальный источник напряжения можно описать эквивалентной схемой (рис. 1.1,а), содержащей последовательно включенные источник электродвижущей силы (ЭДС) E и внутреннюю резистивность R_i . Сразу же отметим, что термин «резистивность» у нас не привился и многие предпочитают более привычный термин «сопротивление», так что R_i — внутреннее сопротивление. В тоже время «сопротивление», как деталь электронных схем, стали называть резистором.

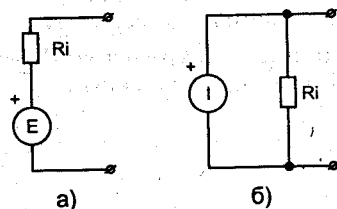


Рис. 1.1. Эквивалентные схемы реального источника постоянного напряжения (а) и тока (б)

Строго говоря, внутренне сопротивление — комплексная величина. Но пока мы ограничимся только действительными R_i , которые определяются как $R_i = dU/dI$, где dU — приращение напряжения на зажимах источника, а dI — приращение отбираемого от него тока. R_i может быть нелинейной величиной, зависящей от тока и даже отрицательной (приборы с падающей вольтамперной характеристикой — *негатроны*). Но в дальнейшем мы ограничимся представлением R_i как сопротивления постоянного (линейного).

Самое широкое распространение, особенно при питании мобильной и малогабаритной электронной аппаратуры получили первичные источники постоянного напряжения — батареи из гальванических элементов и аккумуляторные батареи. Отдельный элемент таких батарей имеет ЭДС от 1,2 до 2,5 В при R_i порядка долей — единиц Ома. Широко применяются и всевозможные вторичные источники напряжения постоянного тока — от простых нестабилизированных выпрямителей до лабораторных источников питания с регулируемыми и высокостабильными напряжениями. Они рассматриваются далее в главе 1.

Реальный источник постоянного тока состоит из идеального источника тока I и параллельно включенного внутреннего сопротивления R_i — рис. 1.1.6. Первичные источники постоянного тока хотя и существуют, но широкого практического применения не нашли. Тем не менее, с возможностью их существования (как и с необходимостью измерения их параметров) надо считаться. Если внутреннее сопротивление источников постоянного напряжения обычно очень мало, то внутреннее сопротивление источников постоянного тока весьма велико и достигает десятков-сотен кОм, а порою — и единиц-десятков МОм. У идеального источника постоянного напряжения $R_i=0$, а у реального источника тока $R_i=\infty$.

Характеристиками источников постоянного тока в некотором диапазоне напряжений обладают многие полупроводниковые приборы, например биполярные и полевые транзисторы. Выпускаются также специальные микросхемы для стабилизации малых токов, например, микросхема стабилизатора постоянного тока КЖ101А, которая позволяет стабилизировать ток от десятков до сотен мкА в диапазоне напряжений от 1,8 В до 230 В. Значение R_i у нее составляет 8 МОм. Однако не следует путать устройства с большим динамическим дифференциальным сопротивлением с реальными первичными источниками постоянного тока. Первые всегда являются потребителями электрической энергии, тогда как вторые — ее источниками.

Измерение ЭДС первичных источников напряжения (например, аккумуляторов в начале и в конце заряда, или гальванической батареи после покупки или хранения) является довольно частой и довольно простой задачей. Как видно из измерительной схемы рис. 1.2, оно сводится просто к подключению вольтметра измерительной головкой V с входным сопротивлением $R_{вх}$ к источнику напряжения. Учтите, что измерительная головка V на деле может быть измерителем тока, например, микроамперметром тестера.

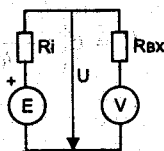


Рис. 1.2. Измерение ЭДС первичного источника напряжения постоянного тока

Любые измерения возможны с некоторой погрешностью. Обычно у измерительных приборов задается основная и дополнительная погрешности. Основная погрешность определяется для некоторых идеализированных условий, например для пренебрежительно малого влияния температуры, отсутствия влияния внешних цепей и т. д. Дополнительная погрешность определяется при наличии влияния дополнительных факторов.

Все виды погрешностей мы рассматривать не будем — в описании каждого прибора приводится их перечень. Ограничимся рассмотрением погрешностей измерения напряжений. Абсолютная погрешность задается как разность между показанием вольтметра U и идеальным значением напряжения, которое измеряется $U_{и}$:

$$\Delta U = U - U_{и}$$

Относительная погрешность есть отношение абсолютной погрешности к идеальному значению параметра — напряжение:

$$\delta_U = \frac{\Delta U}{U_{и}} = \frac{U - U_{и}}{U_{и}}$$

Однако, задание относительной погрешности таким образом неудобно, поскольку она относится к каждому конкретному значению U_i . Поэтому чаще задается погрешность относительно верхнего предела измеряемого напряжения $U_{\text{ИМАКС}}$:

$$\delta_{U_{\text{ИМАКС}}} = \frac{U - U_{\text{И}}}{U_{\text{ИМАКС}}}$$

Например, если вольтметр показывает на пределе 1 В напряжение 0,45 В при поданном на его вход напряжении 0,5 В, то погрешность составит $(0,45 - 0,5)/1 = -0,05$ или в процентах -5% . Знак погрешности указывает на то, что прибор дает заниженное показание. Часто погрешность задается в обе стороны, например $\pm 1\%$.

К сожалению, приходится считаться с тем, что погрешность возрастает при малых значениях параметра — вблизи нуля. Это может быть связано с нестабильностью нуля аналогового прибора или с дискретностью цифрового представления результата. У цифровых приборов часто такую погрешность выражают в числе знаков последнего разряда, например ± 1 или в общем случае $\pm N$, где N — целое число.

Теперь затронем немного вопрос о дополнительной погрешности, обусловленной конечными сопротивлениями — входного вольтметра и внутреннего источника напряжения. В этом случае напряжение, измеряемое вольтметром, равно

$$U = E \frac{R_{\text{вх}}}{R_i + R_{\text{вх}}}$$

а абсолютная погрешность измерения напряжения, вызванная конечным R_i ,

$$\Delta_U = E - U = E \left(1 - \frac{R_{\text{вх}}}{R_i + R_{\text{вх}}} \right)$$

Относительная погрешность,

$$\delta_U = \frac{\Delta_U}{E} = \frac{R_i}{R_i + R_{\text{вх}}} \quad (1.1)$$

Пример: электронным вольтметром с $R_{\text{вх}} = 1$ МОм измеряется ЭДС цилиндрического аккумулятора $E = 1,25$ В. Если внутреннее сопротивление аккумулятора равно $R_i = 0,25$ Ом, то показания вольтметра согласно (1.1) будут $U = 1,2499996875$ В, абсолютная погрешность из-за конечности R_i $\Delta_U = 3,125 \cdot 10^{-7}$ и относительная погрешность $\delta_U = 2,5 \cdot 10^{-7}$.

Практически у всех современных электронных вольтметров входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ больше R_i на несколько порядков (см. пример выше), так что практически $U = E$ и оценка погрешности от конечного значения $R_{\text{вх}}$ (и R_i) ныне при измерении напряжения батарей не актуальна. В данном случае эта погрешность всецело определяется погрешностью измерения напряжения электронным вольтметром. Она, как правило, гораздо выше, чем погрешность учета R_i . Таким образом, измерение ЭДС батарей с гальваническими элементами и аккумуляторных батарей, как правило, может выполняться практически без учета их внутреннего сопротивления просто подключением электронного вольтметра (мультиметра) к их выходам. Однако считать это правилом при измерениях напряжения в произвольных цепях нельзя.

1.1.2. Резисторы и резистивность

Одним из самых распространенных компонентов электрических и электронных цепей и устройств являются линейные резисторы. Они характеризуются резистивностью или сопротивлением R , которое определяется как отношение падения напряжения на резисторе U к протекающему через него току I . Таким образом, $R = U/I$.

Строго говоря, все резисторы в той или иной мере являются нелинейными. Например, проволочные резисторы при протекании через них тока разогреваются и их сопротивление незначительно меняется. У пленочных и полупроводниковых резисторов нелинейность проявляется еще сильнее. Тем не менее, здесь рассматриваются линейные резисторы у которых отклонение от линейности обычно меньше погрешности измерений.

Простейший способ измерения R основан на подключении резистора к источнику напряжения E и измерению протекающего через резистор тока. Однако шкала при этом получается нелинейной (обратно пропорциональной R , поскольку $R = U/I$). Применяются также известные мостовые схемы для измерения сопротивления. К сожалению, и они имеют нелинейную шкалу, неприемлемую для цифровых приборов.

В современных цифровых приборах измерения основаны на пропускании через резистор R неизменного и стабильного тока I . Тогда напряжение на резисторе $U = RI$ и пропорционально сопротивлению R . Напряжение обычно измеряется достаточно точным цифровым вольтметром с большим входным сопротивлением.

1.1.3. Измерения в произвольных цепях постоянного тока

Важное значение имеет измерение напряжения на резисторах произвольных электрических и электронных цепей, когда их внутреннее сопротивление сопоставимо с $R_{вх}$ (рис. 1.3). В этом случае внешняя относительно резистора R цепь характеризуется эквивалентной ЭДС E_s и эквивалентным сопротивлением R_s . Они могут быть найдены по известным законам и методам электротехники (например, по закону Кирхгофа, методам контурных токов или узловых потенциалов).

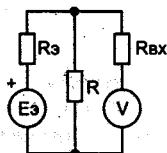


Рис. 1.3. Эквивалентная схема измерения напряжения U на резисторе R произвольной цепи постоянного тока

В данном случае важно, что эквивалентное внутреннее сопротивление внешней цепи R_s редко бывает очень малым и учет его, как и входного сопротивления вольтметра $R_{вх}$, как правило, необходим. Влияние $R_{вх}$ заключается в шунтировании сопротивления R , а влияние R_s обусловлено созданием делителя напряжения. Таким образом, для напряжения на резисторе R имеем:

$$U = E_s \frac{R \parallel R_{вх}}{R_s + R \parallel R_{вх}} = E_s \frac{R_s}{R_s + R_s}, \text{ где } R_s = R \parallel R_{вх} = \frac{R \cdot R_{вх}}{R + R_{вх}}$$

Пример: внешняя цепь имеет $E_s=10$ В и $R_s=10$ кОм. Вычислить напряжение на $R=100$ кОм, если оно измеряется электронным вольтметром с $R_{вх}=10$ МОм. Вначале вычислим $R_s=9.9 \cdot 10^{-4}$. Тогда $U=9.083$ В. Итак в данном случае напряжение на резисторе R почти на 1 В меньше напряжения E_s . Отсюда вытекает желательность применения вольтметров с как можно большим входным сопротивлением. Это обеспечивают только электронные вольтметры.

Измерители мощности постоянного тока P практического применения не нашли, поскольку такая мощность легко измеряется по проходящему через резистор R току I или по падению напряжения U на резисторе:

$$P=R \cdot I^2 \text{ или } P=U^2/R.$$

Физически мощность трактуется как скорость изменение энергии во времени. В цепях постоянного тока это изменение происходит с постоянной скоростью, так что мощность является константой.

1.2. Измерения переменного напряжения и тока

1.2.1. Параметры синусоидального напряжения и тока

Самое широкое применение нашли синусоидальные переменные напряжения (рис. 1.4) и токи:

$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \theta) \text{ и } i(t) = I_m \sin(2\pi ft + \theta).$$

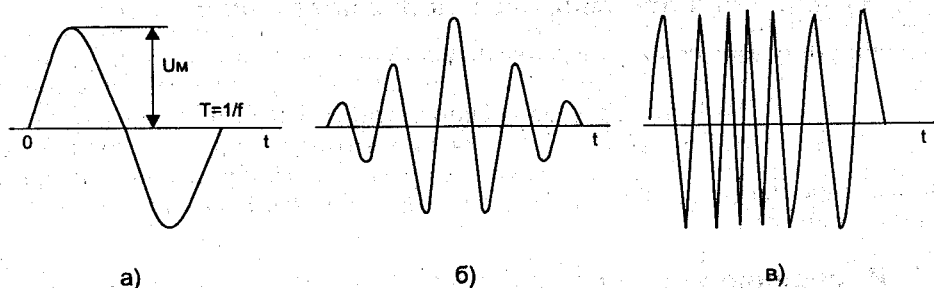


Рис. 1.4. Временная зависимость синусоидального сигнала: а — один период сигнала, б — амплитудно-модулированный сигнал и в — частотно модулированный сигнал

Их временные зависимости характеризуются тремя параметрами:

- U_m или I_m — амплитуда переменного напряжения или тока;
- f — частота (число периодов, возможно неполных) в единицу времени;
- θ — фазовый сдвиг (сдвиг зависимостей в долях периода, для рис. 1.4 фазовый сдвиг равен 0).

Синусоидальные сигналы являются периодическими, т. е. их временная зависимость повторяется, и имеют место условия $u(t)=u(t+T)$ и $i(t)=i(t+T)$, где $T=1/f$ — период повторения сигнала. Фазовый сдвиг сигналов напряжения и тока (или входного и выходного напряжений) связан с влиянием реактивных компонент (L и C) цепей, а также с работой различных фазосдвигающих цепей, например фазоинверторов и трансформаторов. Фазовый сдвиг измеряется в градусах (360° соот-

ветствуют сдвигу на период) или в радианах (2π радиан соответствуют сдвигу на период).

Поскольку все три параметра синусоидального сигнала неизменны во времени, то такие сигналы (напряжения или токи) называются *стационарными*. Если осуществляется их изменение во времени (*модуляция*), то сигналы будут *нестационарными* — см. рис. 1.4,б и 1.4,в. В большинстве случаев речь идет об измерении параметров синусоидальных сигналов или сигналов с медленно изменяющимися во времени параметрами. Это позволяет рассматривать такие сигналы как синусоидальные, хотя это и не совсем так — модулированные сигналы становятся уже не стационарными и не являются строго синусоидальными.

Временная зависимость синусоидального напряжения представлена на рис. 1.4,а. Нетрудно заметить, что напряжение плавно изменяется в пределах от $-U_M$ до $+U_M$, что создает изменение мощности во времени. Стало быть, можно говорить о мгновенной мощности

$$P(t) = u(t)i(t) = I_M^2 R \sin^2(2\pi ft + \theta) = \frac{I_M^2 R}{2} (1 + \sin(2(2\pi ft + \theta))) = \frac{U_M^2}{2R} (1 + \sin(2(2\pi ft + \theta))).$$

Она пульсирует с удвоенной частотой и достигает пиковых значений

$$P = I_M U_M = I_M^2 R = U_M^2 / R$$

в моменты времени, когда уровень сигнала равен максимальному значению во время положительной и отрицательной полуволн. Удвоение частоты пульсаций мощности легко понять — мощность не зависит от полярности полуволн синусоидального сигнала и достигает пика на каждой полуволне.

Средней или активной мощностью называют мощность, усредненную за период. Для синусоидального напряжения она равна:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{I_M U_M}{2} = \frac{I_M^2 R}{2} = \frac{U_M^2}{2R}.$$

Выделяемое нагрузкой источников переменного тока тепло пропорционально активной мощности.

1.2.2. Измерение истинного среднеквадратического значения (True RMS)

Переменные напряжения и ток могут характеризоваться различными показателями. Например, переменное периодическое напряжение произвольной формы $u(t)$, помимо амплитудных значений может характеризоваться [5]:

- средним значением (постоянной составляющей) $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$;
- среднев्यпрямленным значением $U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$;
- эффективным или действующим значением $U_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$.

Чаще всего о действии переменного напряжения или тока судят по средней за период мощности, которая разогревает активное сопротивление R , по которому проходит переменный ток (или на которое подается переменное напряжение). Процесс нагрева инерционный и обычно его время намного больше периода T

переменного напряжения или тока. В связи с этим принято пользоваться действующим значением синусоидального напряжения и тока. В этом случае:

$$I_d = I_M / \sqrt{2} \text{ или } U_d = U_M / \sqrt{2}. \quad (1.2)$$

Отсюда ясно, что для измерения действующего значения синусоидального напряжения или тока достаточно измерить их амплитудное значение и поделить на $\sqrt{2}=1.414$ (либо умножить на 0.707).

Вольтметры и амперметры переменного тока часто служат для измерения уровней переменного напряжения и тока несинусоидальной формы. При этом независимо от метода измерений они обычно градуируются в эффективных значениях синусоидального переменного напряжения или тока.

Обычно в этом случае с помощью двухполупериодного выпрямителя напряжения или тока выпрямляются и возможно измерение их средневыпрямленного напряжения (часто его называют просто средним, но это не совсем точно — см. выше). Отклонение формы переменного напряжения от синусоидальной принято учитывать коэффициентом формы:

$$k_\Phi = U_d / U_{cp}.$$

Для прямоугольного сигнала (меандра) $k_\Phi=1$, а для синусоидального $k_\Phi=\pi/2\sqrt{2}=1.1107$. Такое различие вызывает большую разницу показаний даже в этих простых случаях.

Ныне широкое применение получили персональные компьютеры, сотовые телефоны с импульсным режимом работы передатчиков, импульсные и резонансные преобразователи напряжения и источники питания, электроприводы с регулируемой скоростью и другое оборудование, потребляющее токи в виде кратковременных импульсов или отрезков синусоиды. При этом среднеквадратическое значение сигналов должно учитывать все гармоники его спектра.

К сожалению, при измерениях напряжений и токов с различными, отличными от синусоидальных, временными зависимостями возникают большие проблемы из-за нарушения соотношений между средневыпрямленными или амплитудными значениями переменного напряжения или тока и их действующими значениями. Обычные измерители напряжений и токов с усредненными показаниями в этом случае дают недопустимо большую погрешность — рис. 1.5. Упрощенное измере-

Тип измерителя	Принцип измерения	Измерение синусоиды	Измерение прямоугол. сигнала	Измерение искажённого сигн.
С усреднением показаний	Умножение среднего выпрямленного знач. на 1.1	Истинное	10% завышение	Завышение до 50%
С истинно среднеквадратическими показаниями	Расчет величины теплового эффекта по среднеквадратическому значению	Истинное	Истинное	Истинное

Рис. 1.5. Сравнение различных видов измерения меняющихся напряжений и токов

ние действующего значения токов порою может дать занижение до 50% истинных результатов.

Не знающий этого пользователь может долго удивляться, почему предохранитель в устройстве на ток 10 А регулярно сгорает, хотя по показаниям амперметра или обычного мультиметра ток составляет допустимую величину в 10 А. Надо ли говорить о нежелательности подобных грубых измерений в научных исследованиях и при испытании электротехнической аппаратуры?

При отклонении кривой измеряемого напряжения или тока от идеальной синусоидальной формы уточнение с помощью коэффициента $1,1107 \approx 1.1$ становится недопустимым. По этой причине измерители с усредненными показаниями зачастую дают неверные результаты при измерении токов в современных силовых сетях. В связи с этим были созданы приборы, измеряющие *истинное среднеквадратическое значение* переменного напряжения и тока, которое определяется по нагреву линейного резистора, подключенного к измеряемому напряжению.

В наше время современные мультиметры, измеряющие истинное среднеквадратическое значение переменного напряжения или тока (не обязательно синусоидальных), обычно помечаются лейблом «True RMS». В таких измерителях используются более совершенные схемы измерения, нередко со средствами микропроцессорного контроля и коррекции. Это позволило существенно повысить точность измерения и уменьшить габариты и массу приборов. Специализированные микросхемы для измерения истинных среднеквадратических значений переменных напряжений будут описаны в конце этой главы.

1.2.3. Советские милливольтметры с True RMS

Следует отметить, что в СССР уже давно (в 70-х годах прошлого столетия) были созданы массовые приборы, измеряющие истинное среднеквадратическое значение переменного тока. К примеру, это были милливольтметры ВЗ-42/45 (частоты до 5 МГц) и ВЗ-48 (частоты даже до 50 МГц) и др. В милливольтметрах ВЗ-48 был применен целый ряд интересных технических решений:

- входной преобразователь импеданса с полевым транзистором на входе с очень высоким входным сопротивлением и малой емкостью, практически не нагружающий исследуемые цепи;
- широкополосный многозвенный аттенуатор с релейной коммутацией звеньев;
- компенсированный делитель напряжения с коэффициентом деления в 1000 раз, превращающий прибор в вольтметр действующих значений (с пределами от 1 до 300 В);
- широкополосный (от 10 Гц до 50 МГц) линейный транзисторный усилитель входного сигнала с двумя параллельно работающими каналами для уменьшения шумов и линеаризации передаточной характеристики;
- дополнительный широкополосный усилитель, в цепь отрицательной обратной связи которого включены нагреватели термоэлементов, нагрев которых пропорционален истинному среднеквадратическому значению переменного тока;
- балансный термопреобразователь на двоянных термопарах, дающий линейную характеристику преобразования среднеквадратического значения сигнала в постоянное напряжение, выход которого предусмотрен на задней панели прибора;

- усилитель постоянного напряжения типа «модуляция-демодуляция», который измерял разность напряжений термопар, выходной ток которого проходит через нагреватели другой пары терморезисторов;
- выход переменного тока с выходным сопротивлением 50 Ом, превращающий прибор в широкополосный усилитель.

Это позволило измерять истинное среднеквадратическое, а не среднее, значения напряжения переменного тока сложной формы с гармоническими составляющими спектра, имеющими частоты вплоть до 50 МГц. Причем измерять вполне естественно — по тепловому действию его и действию равного по нагреву постоянного тока. Естественно, что советские милливольтметры тех времен были стрелочными измерителями, имели значительные габариты и вес (до 6 кг у модели ВЗ-48). Их можно встретить в продаже и сейчас. Достаточно подробное описание милливольтметров ВЗ-45/48 (на уровне функциональной схемы) можно найти в [5].

Интересно сравнить ВЗ-48 с вполне современным стрелочным милливольтметром среднеквадратического значения GVT-417В фирмы Good Will. Последний, при примерно той же погрешности измерений (основная 3%, дополнительная 0,5%) имеет дополнительный предел измерения 0,3 мВ, но полоса частот у него в 50 раз уже (от 10 Гц до 1 МГц). Верхний предел нашего прибора 300 В, у GVT-417В 100 В. Правда прибор меньше по габаритам и легче — вес 2,7 кг. А вот входной импеданс (1 МОм/50 пФ) у молодого юго-восточного собрата куда хуже, чем у советского «старца» (20 МОм и 8 пФ без делителя и 4 пФ с делителем 1/1000). Вот вам и «отсталая» советская техника!

1.2.4. Измерение тока бесконтактными методами

Необходимость контактного подключения измерителей тока в разрыв цепей (особенно под высоким напряжением) является существенным недостатком обычных методов измерения переменного тока. Однако о силе переменного тока можно судить по интенсивности магнитного поля переменного тока, которое образуется, когда через проводник протекает такой ток. На этом основана работа измерителей переменного тока с токовой петлей, реализованной с помощью токовых клещей. Они очень удобны для бесконтактного измерения тока в отдельном проводнике, находящемся в жгуте проводов. Достаточно охватить нужный проводник клещами и замкнуть их.

На основе этого принципа с середины 90-х годов выпускается целый класс ручных измерительных приборов — Clamp meter или в русской транскрипции — токовые клещи. Среди этого класса приборов можно выделить несколько типов, различающихся способом преобразования измеряемого тока.

В ранних моделях использовался захват (разъемные клещи), выполненный из пермаллоевых листов с внутренней измерительной обмоткой. Очевидно, что эта конструкция обычного разъемного трансформатора. Ограничения применения такого прибора хорошо известны.

Работа только в цепях переменного тока и сильная зависимость результатов измерений от частоты. А это, в свою очередь, влияет на диапазон рабочих частот прибора. Данный прибор подробно описан на сайте www.kipis.ru.

В настоящее время почти повсеместно используется полупроводниковый датчик Холла. Такое решение позволяет проводить измерения в цепях постоянного и переменного тока и работать в широком диапазоне частот с хорошими показателями точности измерений.

В последнее время развивается применение конструкции с постоянно открытыми токовыми клещами. Эта конструкция для проведения измерений тока не требует смыкания клещей, что очевидно увеличивает механическую надежность всей конструкции и продлевает жизнь прибору. Но погрешность измерения у таких приборов несколько выше, чем у обычных токовых клещей и обычно достигает до 3—5%.

Применение токовых клещей как конструкции в мультиметрах находится в постоянном развитии и уже вышли токовые клещи, обеспечивающие измерения контура (в т.ч. заземления) бесконтактным методом (например, в модельном ряду «АКТАКОМ» — АТК-4100). Такая конструкция имеет два разъёмных магнитопровода и отличается от других своих собратьев по классу токовых клещей тем, что через дополнительную обмотку может производить дополнительное воздействие на объект измерения, что позволяет выполнять измерения контура сопротивления. Очевидно, что частота воздействия отличается от частоты токов сетей промышленного назначения. Появляются мультиметры с тремя токовыми клещами для постоянных бесконтактных измерений в трехфазных сетях.

1.3. Измерители R, C, L и иммитанса

1.3.1. Понятие об индуктивности и емкости

Любой проводник обладает *индуктивностью* L . Она измеряется в Генри (и производных от этой величины, например, нГн= 10^{-9} Гн, мкГн= 10^{-6} Гн и мГн= 10^{-3} Гн) и является параметром, задающим пропорциональность между напряжением на ней и крутизной изменения тока, текущего через индуктивность:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}.$$

Строго говоря, индуктивность — это параметр индуктивных элементов, например, отрезков проводов, петель и колец из них и катушек из изолированного провода (их часто обобщенно именуют катушками индуктивности). К примеру, обычный проводник длиной в 5 см имеет собственную индуктивность порядка 100 нГн. Действие катушек индуктивности обусловлено созданием вокруг провода магнитного поля и появлением на индуктивности переменного напряжения при воздействии внешних переменных магнитных полей. Взаимодействие катушек характеризуется *взаимной индуктивностью*.

Катушки индуктивности (или просто индуктивности) выпускаются промышленностью с самой различной конструкцией и различными номиналами L . Они содержат от нескольких витков провода на диэлектрическом сердечнике до сотен и тысяч витков на сердечнике из феррита или стальных пластин. Однако часто разработчики вынуждены изготавливать индуктивные элементы самостоятельно, что делает остро необходимым измерение индуктивности с достаточно малой погрешностью. При оговоренных условиях эксплуатации катушки индуктивности можно считать линейными — за исключением случая размещения их на магнитном сердечнике.

Если подать на идеальную катушку индуктивности неизменное напряжение E то ток через катушку будет линейно нарастать во времени, поскольку в этом случае соблюдается следующее соотношение:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{E}{L} = \text{const.}$$

Это свойство катушки индуктивности иногда используется для построения генераторов развертки для электронно-лучевых трубок (кинескопов) с магнитным отклонением. Однако надо учесть, что если последовательно с L включено сопротивление R , то процесс нарастания тока будет экспоненциальным с постоянной времени L/R . Лишь начальная часть его будет линейной.

Емкость C также является неотъемлемым свойством любой системы проводников. Она измеряется в фарадах (Ф), миллифарадах ($1 \text{ мФ} = 10^{-3} \text{ Ф}$), микрофарадах ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$), нанофарадах ($1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$) и пикофарадах ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

Обычно конденсаторы — устройства для создания заданной емкости используются как готовые промышленные изделия. Для увеличения емкости применяются металлические обкладки достаточно большой площади, разделенные диэлектриком. На этом основано устройство конденсаторов. Физически конденсатор является устройством для накопления заряда ($Q = CU$) и емкость является мерой накопленного заряда при заданном напряжении U на конденсаторе. Для линейной емкости справедливо выражение:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

Если проинтегрировать это выражение, то можно получить выражение для напряжения на конденсаторе:

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt.$$

Если $i(t) = I = \text{const}$, то напряжение на $C = \text{const}$ возрастает по линейному закону:

$$i(t) = u(0) + \frac{I}{C} t.$$

Это положено в основу создания схем линейной развертки для осциллографов. Если параллельно C включен резистор R , то заряд емкости (конденсатора) будет происходить по экспоненциальному закону с постоянной времени RC . Начальная часть этого процесса (для $t \ll RC$) будет линейной. Это обстоятельство используется при построении простых генераторов развертки электронных осциллографов.

Существует ряд способов измерения емкости. Например, подав на конденсатор прямоугольные импульсы со стабильной амплитудой и частотой, можно измерять средний ток заряда или разряда конденсатора. Он пропорционален емкости C , что дает линейную шкалу измерителей емкости. Этот способ хорош для достаточно больших C — начиная с десятков пФ (емкость измеряется в Фарадах и производных от этой величины). Широко практикуется измерение емкости на переменном токе в мостовых и иных измерительных схемах. Для малых емкостей (от долей пФ до тысяч пФ) используются мостовые и резонансные методы измерений.

1.3.2. Эквивалентные и измерительные схемы для индуктивности и емкости

В практике работы любой научной, сервисной или радиолюбительской лаборатории почти ежедневно возникает необходимость в измерении резистивности (сопротивления) R цепей, емкости C и индуктивности L . Так, емкость бумажных и

электролитических конденсаторов сильно меняется во времени и по окончании срока хранения этих компонентов может значительно выйти за пределы приемлемых допусков. Катушки индуктивности часто используются как компоненты собственного изготовления, и их индуктивность нуждается в точном измерении. Часто необходимы точная подгонка L и C (например, для установки частоты резонанса LC -контуров или сборки фильтров), их допусковый контроль и измерения температурных зависимостей емкости и индуктивности.

Неидеальность емкости и индуктивности учитывается эквивалентными схемами, которые являются одновременно и измерительными схемами [55]. Обычно различают две эквивалентные схемы цепей LR и CR (рис. 1.6) — последовательную и параллельную (будем обозначать их индексами s от слова serial и p от слова parallel).

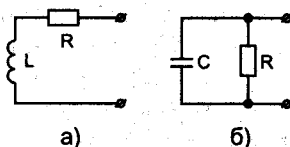


Рис. 1.6. Последовательная (а) и параллельная (б) эквивалентные схемы реальных индуктивностей и емкостей

Омическое сопротивление выводов и обкладок конденсаторов создают паразитное последовательное сопротивление, а сопротивление изоляции диэлектрика создает параллельное сопротивление. Аналогично сопротивление обмотки катушки индуктивности порождает последовательное сопротивление, а потери в сердечнике порождают параллельное сопротивление. Эти параметры могут преобразовываться, так что достаточно вести измерения по двум указанным схемам (s и p).

На высоких и сверхвысоких частотах, характерных для радиоизмерений, эквивалентные схемы приходится значительно усложнять. Например, для индуктивности надо учесть паразитную емкость монтажа и витков, для емкости — паразитную индуктивность выводов. Нередко они являются распределенными величинами. В этом случае определенными преимуществами обладают резонансные методы измерений, реализованные в некоторых радиоизмерительных приборах, например Q -метрах.

Цепи с L и C характеризуются полным сопротивлением, называемым также импедансом или импедансом. Это понятие имеет смысл только на переменном токе и характеризует комплексное отношение напряжения на измеряемой цепи к току в ней — $Z=U/I$. Полное сопротивление как комплексное число представляется в виде $Z=R_s + j \cdot X$, где R_s — активная составляющая Z , $j \cdot X$ — реактивная составляющая Z , j — мнимая единица (корень квадратный из -1). Часто вводится понятие модуля комплексного сопротивления:

$$|Z| = \sqrt{R_s^2 + X^2}, \text{ причем } R_s = |Z| \cos(\theta) \text{ и } X = |Z| \sin(\theta),$$

где θ — сдвиг фазы между переменным напряжением и током измеряемой цепи. Реактивная составляющая Z для индуктивности и емкости определяется хорошо известными выражениями:

$$X = j \cdot 2\pi f L \text{ для индуктивности и } X = 1/j \cdot 2\pi f C \text{ для емкости.}$$

Поскольку все составляющие Z зависят от частоты, то первостепенным параметром измерений является тестовая частота f . В принципе желательно испыты-

вать конденсаторы и катушки индуктивности на их рабочей частоте, например, на частоте резонанса колебательных LCR -контуров. Однако на практике, приходится ограничиваться несколькими частотами, а то и одной частотой.

Важное значение играют еще два параметра цепей на переменном токе — *тангенс угла потерь* δ — D и обратная ему величина — *добротность*. Для последовательной схемы измерений они определяются выражениями:

$$Q_L = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_s|}{R_s} = \frac{2\pi fL}{R_s} \text{ и } Q_C = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_s|}{R_s} = \frac{1}{2\pi fC_s R_s}.$$

Аналогично для параллельной схемы измерений имеем:

$$Q_L = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_p|}{R_p} = \frac{R_p}{2\pi fL} \text{ и } Q_C = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_p|}{R_p} = 2\pi fC_p R_p.$$

Параметр D обычно используется для оценки неидеальности емкостей, а Q — катушек индуктивности. Однако, в принципе, оба параметра применимы как к емкостям, так и индуктивностям.

Измерение сопротивления и емкости на низкой частоте (сопротивления на постоянном токе — DCR) в настоящее время реализуется в большинстве многофункциональных портативных измерительных приборов — *мультиметров*. Однако диапазон измерений и точность измерения этих параметров у большинства мультиметров ограничены, а измерение индуктивности предусмотрено вообще лишь у очень малой части этих приборов. Это связано с необходимостью введения в них прецизионного генератора тестовой частоты. Кроме того, у обычных мультиметров отсутствует возможность измерения таких важных параметров, как последовательного и параллельного сопротивлений на переменном токе, добротности и тангенса угла потерь.

Все это привело к разработке специализированных мультиметров и RLC -измерителей. Современные настольные лабораторные приборы этого типа (например, LCR-816, LCR-817, LCR-827, LCR-819 и LCR-829) обеспечивают высочайшую точность (погрешность до 0,2% и менее) измерений импеданса в диапазоне частот до 100 кГц. Однако это дорогие приборы. В то же время многие современные RLC -измерители выполнены в виде малогабаритных переносных приборов по конструкции и внешнему виду похожи на мультиметры (в сущности, они и являются мультиметрами, но только специализированными). Эти приборы имеют умеренную стоимость и удобны в эксплуатации. Именно они, в основном, и рассматриваются ниже.

1.3.3. Портативные измерители индуктивности и емкости

К числу простейших и дешевых (цена около 60\$) RCL -измерителей относится миниатюрный прибор LCR-9063. Он имеет пределы измерения емкости от 1 пФ до 200 мкФ, индуктивности от 1 мкГн до 20 Гн и сопротивления от 0,1 Ом до 20 МОм. Измерения производятся на одной частоте 250 Гц, погрешность измерений 2%. ЖКИ имеет 3 1/2 разряда. Питание прибор получает от батареи 9 В, габариты прибора 120×72×37 мм, масса всего 185 г.

Таковыми же пределами измерения характеризуется прибор LCR-9073 (рис. 1.7). Однако он дополнен возможностями измерения добротности от 0,0001 до 9999, тангенса угла потерь от 0,0001 до 9999, прозвоном диодов и цепей. Есть также возможность удержание показаний, фиксация максимальных и минимальных зна-

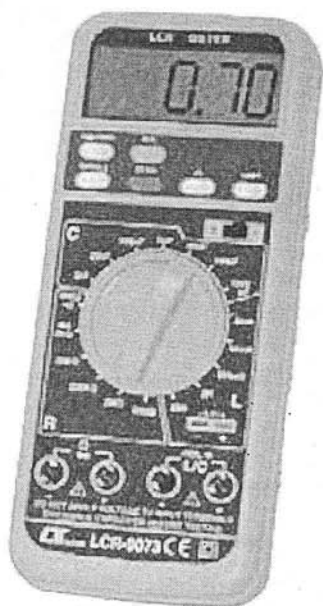


Рис. 1.7. Измеритель LCR-9073



Рис. 1.8. Измеритель емкости и индуктивности VC6243

чений, сортировка компонентов по допуску. Возможно подключение к ПК через интерфейс RS-232. Питание прибора от батареи 9 В, габариты 204×90×36 мм, вес 340 г. Цена прибора в розничной продаже около 150 \$.

Прибор VC6243 (рис. 1.8) с дисплеем 3 1/2 разряда позиционируется как LC-измеритель. Он имеет 12 диапазонов измерений, максимальное показание дисплея 1999, размер цифр на нем 26 мм. Имеется отображение единиц измерения и индикация разряда батарей. Пределы измерения индуктивности: 2/20/200 мГн 2/20 Гн, погрешность: $\pm 2,0\%$. Пределы измерения емкости: 2/20/200 нФ 2/20/200/1000 мкФ, погрешность измерения емкости: $\pm 1,0\%$ (на пределе 1000 мкФ не гарантируется). Питание от батареи 6F22 с напряжением 9 В, размер: 190×88,5×27,5 мм и вес 320 г (включая батарею).

Аналогичными возможностями обладает очень похожий прибор MV6243 фирмы MASTECH. Его внешний вид показан на рис. 1.9. Отсутствие измерений сопротивлений, добротности и тангенса угла потерь сильно снижают ценность этих приборов для серьезных пользователей.

К этому классу приборов относится и измеритель RLC ELC-131D, который продается по цене около 220 \$. Его внешний вид показан на рис. 1.10.

Прибор имеет параметры, вполне достаточные для практики:

- Дисплей: ЖКИ 4 разряда, двухстрочный;
- Переключение диапазонов: автоматическое;
- Измерение емкости: от 0,1 пФ до 10 мФ;
- Измерение индуктивности: от 0,1 мкГн до 10 кГн;
- Измерение сопротивления: от 1 МОм до 10 Мом;
- Тестовые частоты: 120 Гц и 1 кГц;
- Базовая погрешность измерения: 0,7%;

- Базовая погрешность измерения: $\pm 0,2\%$
- Частоты тест-сигнала: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц
- Выбор диапазонов: автоматический
- Связь с ПК: последовательный порт RS-232C с оптической развязкой
- Габариты: 174×86×48 мм
- Вес: 0,47 кг

К высшей категории приборов данного класса (стоимость около 1000 \$ и выше) относится высокоточный RCL-измеритель MT 4080A фирмы MO-TECH INDUSTRIES INC. Внешний вид прибора показан на рис. 1.11.

Технические характеристики этих приборов весьма впечатляют:

- Измерение емкости: от 0,159 пФ до 15,92 мФ
- Измерение индуктивности: от 0,159 мкГн до 31,83 кГн
- Измерение сопротивления: от 0,01 Ом до 20 МОм
- Базовая погрешность 0,2%
- Тест-сигнал: 100 и 120 Гц, 1, и 10 кГц (уровень 0,05, 0,25 и 1 В)
- Дополнительные возможности: измерение Z/Q/D и фазового сдвига, компенсация параметров холостого хода (XX) и короткого замыкания (K3)
- Скорость измерения 4,5 или 2,5 изм./с
- Подключение к ПК: через оптически развязанный порт RS-232C
- Вес прибора: 470 г.



Рис. 1.11. RCL-измеритель MT 4080A

1.3.5. Измеритель иммитанса E7-22 и работа с ним

Бестселлером на рынке измерителей RCL стал прибор E7-22 (в магазине «Чип и Дип» он продается по цене около 4200 руб.). Внешний вид этого изящного и удобного в работе прибора показан на рис. 1.12.

Этот измеритель имеет следующие технические характеристики:

- Дисплей: ЖКИ, 4 1/2 разряда (максимальное показание 19999), двухстрочный с возможностью подсветки
- Индикация параметров: R, C и L — основная шкала, Q, D и R — дополнительная шкала, есть индикация разряда батареи, переполнения и вывод ряда служебных символов
- Пределы измерения емкости: 2, 20 и 200 нФ, 2, 20 и 200 мкФ, 2 и 20 мФ
- Пределы измерения индуктивности: 20 и 200 мкГн, 2, 20 и 200 мГн, 2, 20, 200, 2000 Гн (и 20000 Гн без гарантии точности)
- Пределы измерения сопротивления: 20, 200 Ом, 2, 20, 200 кОм, 2 и 20 МОм,
- Пределы измерения добротности: 0,9999; 9,999; 99,99 и 999,9
- Базовая погрешность: 0,7% (детали нормировки погрешности даны в описании прибора)
- Тест-сигналы: 120 Гц и 1 кГц (уровень сигналов 0,5 В)

- Дополнительные возможности: измерение тангенса угла потерь, добротности, эквивалентного последовательного и параллельного. Сопротивлений по переменному току, одновременная индикация двух измеряемых параметров (C и $D/Q/R$, L и $D/Q/R$), автоматический/ручной выбор предела измерения, регистрация максимального, минимального и среднего значений ряда измерений, режим D -измерений, сортировка элементов по допуску 1%, 5%, 10%, измерения по параллельной и последовательной схемам
- Максимальная скорость измерения: 2,5 изм./с
- Подключение к ПК: через оптически развязанный порт RS-232C
- Питание: от батареи с напряжением 9 В и сетевого адаптера
- Габариты: 192×52,5×91 мм
- Вес 365 г
- Условия эксплуатации: температура от 0 до 50 °С, влажность менее 85%
- Производитель: фирма CHY (и Россия)
- Цена в розничной продаже: около 150 \$



Рис. 1.12. Измеритель импеданса E7-22

Конструкция и возможности прибора тщательно продуманы. Прибор обладает рядом уникальных возможностей, нередко отсутствующих даже у куда более дорогих стационарных измерителей импеданса. Разрешающая способность измерений сопротивления 1 мОм (0,001 Ом), емкости 0,1 пФ и индуктивности 0,1 мкГн вполне достаточна для большинства практических применений этих приборов. Автоматически корректируется нуль и максимальные пределы диапазонов измерений. Есть возможность и ручной установки пределов измерений, выполнения допускowego контроля и относительных измерений (с установкой опорного показания или ручной установкой параметра, относительно которого выполняется отсчет измерений).

Прибор позволяет производить последовательность до 3000 измерений с фиксацией их в памяти и вычислением максимального (MAX), минимального (MIN), разности между ними (MAX-MIN) и среднего (AVR) значений. Среднее значение вычисляется по формуле

$$AVR = (K_1 + K_2 + \dots + K_{N-1} + K_N) / N,$$

где K_i — текущее измерение, N — число измерений.

Измеритель E7-22 поддерживает связь с персональным компьютером (настольным или ноутбуком) через интерфейс RS-232 с гальванической развязкой — рис. 1.13. Компьютер используется для создания виртуального измерителя, управления самим прибором и получения данных из реального измерителя и их накопления для возможной последующей обработки.

Для этого нужна установка специальной программы Virtual Meter. Она устанавливается с входящего в комплект поставки измерителя CD-ROM. Установка программы вполне обычная. При запуске программы вначале выводится окно с функциональной схемой (рис. 1.14) подключения измерителей (не обязательно RLC) к компьютеру через сеть.



Рис. 1.13. Подключение интерфейсного кабеля с блоком оптической развязки к измерителю E7-22



Рис. 1.14. Функциональная схема компьютерной сети с измерителями — мультиметрами, измеряющими различные параметры

Основное окно программы показано на рис. 1.15 для случая измерения емкости. Нетрудно заметить, что окно практически повторяет вид экрана измерителя. В нем хорошо видны результаты измерения и данные о его условиях (тип измерительной схемы, частота и др.). Окно имеет довольно простое меню, в возможностях которого нетрудно разобраться.

Программа обеспечивает запись последовательности измерений и представление их в виде графической диаграммы или списка. На рис. 1.16 показано окно формирования списка с результатами измерений.

Возможно программное управление измерителем. Установка его параметров задается в окне инициализации Initial Setup, показанном на рис. 1.17. Установки в этом окне вполне очевидны и выполняются с помощью кнопок, открывающих списки с возможными значениями параметров. После установки нужных параметров достаточно активизировать кнопку Set Instrument.

При необходимости можно вывести окно установки параметров порта RS-232, показанное на рис. 1.18. Здесь установки также вполне обычные: установка номера коммутационного порта COM, скорости передачи данных Baud Rate, числа бит данных Data Bits и остановка Stop Bits, а также установка паритета Parity. С деталями работы RCL-измерителя E7-22 можно познакомиться по прилагаемой к нему инструкции.



Рис. 1.15. Основное окно программы *Virtual Meter*

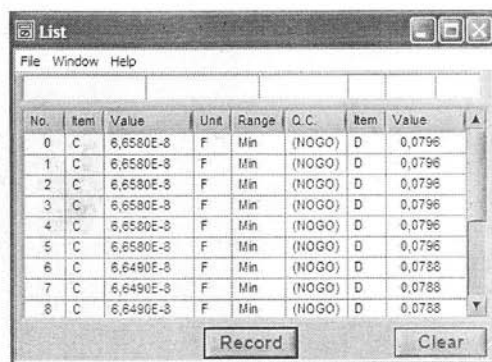


Рис. 1.16. Окно со списком результатов измерений

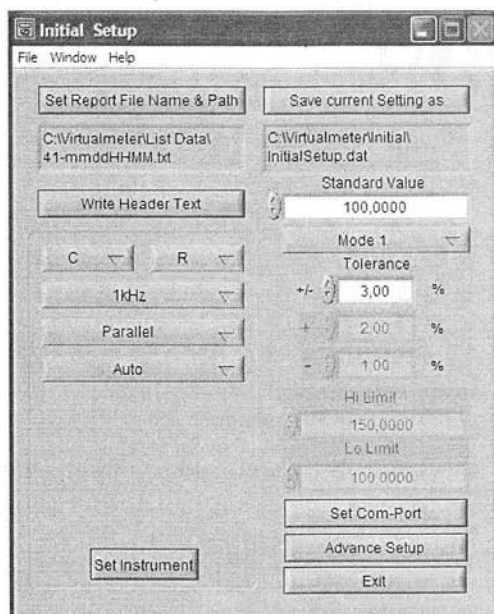


Рис. 1.17. Окно установки параметров измерителя импеданса

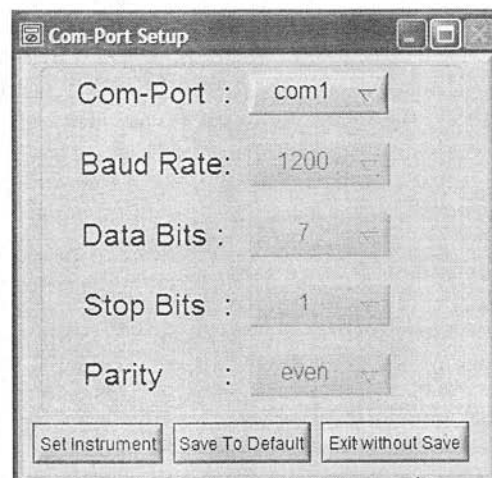


Рис. 1.18. Окно установки параметров порта RS-232

1.3.6. Стационарные лабораторные LCR-измерители компании Good Will

Для высокоточного измерения иммитанса и параметров L , C и R на переменном токе служат стационарные лабораторные приборы компании Good Will LCR-816, LCR-817, LCR-827, LCR-819 и LCR-829 (рис. 1.19). Они предназначены как для проведения фундаментальных лабораторных исследований и разработок, так и для применения в производственных условиях. Приборы могут использоваться для измерения температурных зависимостей емкости и индуктивности и вычисления разброса их параметров. Особо стоит отметить применение приборов для исследования индуктивных и емкостных датчиков различных неэлектрических величин.



Рис. 1.19. Внешний вид лабораторных измерителей LCR-измерителей фирмы Good Will

Приборы отличаются, прежде всего, частотами тест-сигнала. Для измерителя LCR-816 верхняя частота составляет 2 кГц, для измерителей LCR-817 и LCR-827 верхняя частота составляет 10 кГц, LCR 819 и LCR 829 верхняя частота составляет 100 кГц. Нижние частоты измерения для всех приборов одинаковы и составляют 12 Гц. Из этих данных можно сделать вывод, что приборы не предназначены для радиотехнических измерений на высоких (не говоря уже о сверхвысоких) частотах. Их сфера применения — измерения в электронике.

Измерители LCR-827 и LCR-829 выполнены для применения в промышленности. У них увеличена скорость выполнения измерений, но из-за этого несколько возросла погрешность измерения (тем не менее, она находится в пределах 0,1%). С ними возможно применение механического манипулятора для сортировки электронных компонентов при производстве и входном контроле. Для этого предусмотрено управление приборами от персонального (промышленного) компьютера. Сортировка может производиться по различным критериям, например, по абсолютному отклонению, по относительному отклонению и т. д.

Приведем общие данные об LCR-измерителях компании Good Will. Приборы обеспечивают измерения в следующих диапазонах:

- сопротивление R : 0.00001 Ом — 99999 кОм;
- емкость C : 0.00001 пФ — 99999 мкФ;
- индуктивность L : 0.00001 мГн — 99999 Гн;
- добротность Q : 0.0001 Ом — 9999;
- тангенс угла потерь D : 0.0001 — 9999;
- эквивалентное сопротивление 0.0001 Ом — 9999 кОм;
- сопротивление R : 0.00001 Ом — 99999 кОм;

Другие характеристики измерителей:

- базовая погрешность измерения 0.05% (817/819) или 0.1% (827/829);
- около пятисот частот тест-сигнала (в том числе типовые 110 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 100 кГц), что позволяет формировать практически непрерывную сетку частот измерительного сигнала.
- регулировка уровня тест-сигнала от 5 мВ до 1,275 В с шагом 5 мВ, что так же позволяет формировать практически непрерывную сетку уровней и использовать измерители для измерения параметров нелинейных компонентов;

- смещение измерительного сигнала постоянным напряжением в пределах от 0 В до 2 В (до 30 В внешнее смещение), что необходимо при измерении емкости варикапов, которая зависит от напряжения, индуктивностей обмоток нелинейных трансформаторов, зависящих от степени намагничивания постоянным током;
- измерение относительного или абсолютного результата измерения.
- память на 100 профилей условий измерения.
- усреднение результатов измерения для повышения точности измерения;
- программная компенсация режимов коротко замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ).
- связь с компьютерами по интерфейсу RS-232 (817/819);
- внутренняя программная калибровка для обеспечения требуемой погрешности измерения в интервале между проверками;
- высококонтрастный дисплей с большими размерами (разрешение 240?128 пикселей), на котором отображаются не только результаты измерения основных (6 разрядов) и дополнительных (4 разряда) параметров, но и условия измерения;
- одновременная индикация двух результатов измерений;
- комплект дополнительных аксессуаров, который включает множество устройств и приспособлений для подключения различных электронных компонентов с различной конструкцией выводов (827/829).

Приведенные данные свидетельствуют о высоких характеристиках и больших возможностях лабораторных измерителей L , C , R и иммитанса. Однако они далеко выходят за потребности практических измерений при наладке электронной аппаратуры и ее ремонте. Учитывая высокую стоимость таких приборов, можно сделать вывод о том, что они не могут конкурировать с куда более дешевыми портативными приборами в виде LCR -мультиметров с более взвешенными для практических измерений параметрами.

1.3.7. Специфика измерений L , C и R

Несмотря на наличие большого числа типов LCR -измерителей (описанные выше измерители далеко не единственные в этом роде приборов), измерение параметров L , C и R и трактовка результатов измерений остаются достаточно сложной и актуальной задачей. Особенно, если применяются портативные приборы с ограниченными возможностями. В связи с этим приведем несколько полезных рекомендаций по технике измерения этих параметров.

Измерение сопротивления промышленных резисторов особых проблем не вызывает при использовании мультиметров любого типа. Как правило, индуктивность их выводов и резистивного слоя очень малы и проявляется на частотах выше нескольких десятков мегагерц. Результаты измерений на тактовых частотах порядка сотен Гц, характерных для мультиметров, или даже на постоянном токе, достаточно корректны. Если обнаруживается заметная разница между показаниями на разных частотах, то это может служить признаком заметной паразитной индуктивности. Это нередко наблюдается у проволочных резисторов.

Паразитная емкость также может оказывать некоторое влияние на работу резисторов на высоких частотах. Для маломощных резисторов эта емкость обычно не превышает 1 пФ. Для ее практической оценки целесообразно взять максимально высокоомный резистор заданного типа (например, с номиналом 10 МОм) и изме-

речь его емкость (это позволяет далеко не каждый мультиметр). Можно ожидать, что емкость резисторов данного типа с другими номиналами будет близка к измеренной. При измерении малых емкостей, как правило, надо считаться и с паразитной емкостью проводов и щупов измерителя.

С помощью портативных *RCL*-мультиметров не целесообразно измерять индуктивности с номиналами менее примерно 1 мГн. Такие индуктивности используются, как правило, на высоких частотах и их лучше проверять в схемах резонансных *Q*-метров на тех частотах, для которых они предназначены. Это представляет интерес для радиоизмерений. В случае электронных измерений вполне достаточным является измерение индуктивности и ее последовательного сопротивления. В случае индуктивностей в виде обмоток, размещенных на магнитном сердечнике с заметными потерями, измерения целесообразно производить по параллельной схеме измерения на низкой тестовой частоте.

Особых проблем с измерением емкости промышленных конденсаторов многих типов (слюдяных и керамических) обычно не возникает. Рекомендуется производить такие измерения на наиболее высокой из тестовых частот доступного мультиметра. О потерях конденсаторов принято судить по величине тангенса угла потерь *D* (или добротности *Q*). Однако на высоких частотах надо считаться с паразитной индуктивностью выводов, которая при длине выводов 2.5—5 см может достигать 100—200 нГн. Особенно опасно возникновение резонансных явлений у конденсаторов умеренной емкости (сотни пФ — единицы нФ), способных резко изменить характер процессов в цепях с такими конденсаторами.

С бумажными конденсаторами дело обстоит немного сложнее. Такие конденсаторы нередко имеют заметную индуктивность, поскольку выполнены в виде полоски из слоев металла и диэлектрика, свернутой в трубчатую спираль. Рекомендуется измерять емкость таких конденсаторов на наиболее низкой тактовой частоте мультиметра. Старые бумажные негерметизированные конденсаторы имеют тенденцию к заметному изменению емкости во времени и повышению тангенса угла потерь. Следует отказаться от применения таких старых конденсаторов.

Особо внимательно надо относиться к измерению емкости и применению электролитических конденсаторов. Ее (как и емкость бумажных конденсаторов большой емкости) нужно измерять только после разряда конденсатора. При этом надо учитывать, что даже при коротком замыкании конденсатора (кстати, опасно-го при большой емкости) весь заряд не теряется и спустя некоторое время, казалось бы, разряженный конденсатор оказывается немного заряженным. Поскольку через электролитический конденсатор часто текут большие переменные и импульсные токи, то наличие даже малой собственной индуктивности может отрицательно сказаться на работе устройств с такими конденсаторами. К этому стоит добавить быстрое падение емкости с ростом частоты переменной составляющей тока, который течет через конденсатор.

Из сказанного следует сделать вывод, что измерение емкости электролитических конденсаторов желательно выполнять по параллельной схеме и на самой низкой из возможных тестовых частот (если ее выбор возможен и не диктуется иными соображениями). Рекомендуется разрядить конденсатор подключением к его зажимам разрядного резистора с номиналом в сотни Ом. Разряд коротким замыканием нежелателен — может даже перегореть внутренний проводник конденсаторов.

При изменении малых *R*, *C* и *L* большое значение имеет правильная оценка погрешности вычислений. Часто она задается в процентах измеряемой величины

и к ней добавляется погрешность от одного до нескольких единиц младшего разряда цифрового индикатора. Не стоит забывать и о начальном значении измеряемого параметра, например емкости щупов при измерении емкости конденсаторов. В таких случаях заметными преимуществами обладают мультиметры с режимом относительных измерений или с автоматической коррекцией начальных параметров. Именно их целесообразно применять при измерениях малых R , C и L .

1.4. Портативные аналоговые и цифровые мультиметры

1.4.1. Рынок мультиметров и тенденции их развития

В каталогах фирм, торгующих измерительными приборами ныне можно найти многие десятки типов универсальных цифровых приборов, измеряющих несколько параметров — мультиметров. Хотя так правомерно называть любые приборы, измеряющие несколько (множество) параметров, к этому классу приборов обычно относятся приборы для измерения постоянных и переменных токов и напряжений и сопротивления резисторов на постоянном токе.

Некоторые из приборов дополнительно позволяют измерять емкость конденсаторов и температуру, осуществлять прозвон цепей и оценивать исправность диодов и транзисторов. Очень редкие модели мультиметров позволяют измерять индуктивность и освещенность. В некоторые модели встроены генераторы испытательных сигналов на несколько (до десятка) частот.

Эти, ставшие поистине массовыми, многофункциональные измерительные приборы широко используются в службах сервиса и ремонта электронной техники, в научных, учебных и радиолюбительских лабораториях. По широте применения и, тем более, доступности, цифровые мультиметры далеко обогнали электронные осциллографы. Ныне простой и достаточно точный цифровой мультиметр можно купить по цене, намного меньшей цены приличного тестера с аналоговой измерительной головкой. Хотя погрешность последнего (в пределах 3—5%) намного выше погрешности даже простого цифрового прибора.

Современные портативные цифровые мультиметры выпускаются под разными торговыми марками и целым рядом производителей — АКТАКОМ, UNI-T, MASTECH, Wavetek Meterman, METEX, BeeTECH, Fluke и др. По конструктивному выполнению мультиметры можно подразделять на переносные и стационарные, причем последних очень мало. Приборы выполняются с ручным и автоматическим выбором пределов измерения. Можно также выделить приборы с поворотным переключателем, комбинированным и чисто кнопочным управлением. От этих особенностей зависит внешний вид мультиметров.

Приборы разделяются и по разрядности дисплея. Большинство приборов имеют 3—4-разрядный дисплей с неполным старшим разрядом. Разрядность дисплея обозначается как 3 1/4, 3 1/2 или 3 3/4, что дает показания от 0 до 1000 (или 999), от 0 до 2000 (или 1999) или от 0 до 4000 (или 3999), соответственно. Высокоточные мультиметры имеют разрядность 4 3/4 (показания от 00000 до 40000 или 39999), иногда и выше. Дисплей большинства мультиметров жидкокристаллический и позволяет отображать не только результаты и знак измерений, но и различную служебную информацию, например, о виде измеряемых в данное время параметрах, режимах работы, сигналов перегрузки и степени разряда батареи питания и т. д. Дисплей многих приборов имеют «линейную» шкалу, имитирующую

показания стрелочного прибора. Иногда дисплей имеет подсветку для надежного считывания показаний при недостаточном внешнем освещении.

Малое потребление электроэнергии микросхемами мультиметров позволяет питать последние от батарей, причем время эпизодической работы нередко достигает нескольких лет, а при частой работе — нескольких месяцев. Именно поэтому портативных мультиметров выпускается намного больше, чем стационарных (насто-льных).

Можно выделить следующие категории портативных цифровых мультиметров:

- миниатюрные приборы с весом до 200 г (в народе называемые «мыльницами») с погрешностью измерения до 1—2%;
- мультиметры средней категории с весом до 200–400 г, большим дисплеем и погрешностью измерений от 0.5 до 1%;
- высокоточные мультиметры высшей категории с погрешностью измерения на постоянном токе до 0.05% и нередко с автоматическим выбором пределов измерения;
- мультиметры с расширенными возможностями (в частности, измеряющими f и L , с интерфейсом для подключения к компьютеру) с весом до 500—600 г;
- специальные мультиметры (например, для измерения R , C , L и иммитанса, описанные выше, мультиметры для промышленных и военных применений, мультиметры с бесконтактным измерением переменных токов с помощью токовой петли и т. д.);
- мультиметры с встроенными осциллографами (будут описаны позже) и весом до 1—2 кг.

Можно встретить и мультиметры с аналоговыми (стрелочными) измерительными головками (тестеры) и даже комбинированные мультиметры. Живучесть таких приборов связана с тем, что некоторые виды регулировки (например, настройка LC -контуров на резонанс или плавная регулировка тока или напряжения) удобнее производить по аналоговому прибору, наблюдая плавное движение стрелки индикатора, а не «прыгающие» цифры, над значениями которых надо задумываться.

Практически все мультиметры измеряют постоянные и переменные напряжения и токи в пределах 750—1000 В и 10—20 А, соответственно, а также сопротивление электрических цепей от долей единиц Ом до десятков МОм. Погрешность измерений постоянных напряжений и токов составляет сотые-десятые доли процента, что удовлетворяет всем мыслимым запросам подавляющего большинства пользователей. Погрешность измерения переменных напряжения и тока обычно в 2—3 раза выше.

Для решения этой проблемы были созданы мультиметры с возможностью истинно среднеквадратических показаний — True RMS. Они избавляют пользователя от необходимости контроля искажений кривых напряжения и тока с помощью дорогих и пока редких анализаторов спектра. Современные мультиметры подобного типа используют усовершенствованные методы и средства измерений, позволяющие определить реальные эффективные значения переменного тока вне зависимости оттого, является ли токовая кривая идеальной синусоидой или искажена. Единственное ограничение — параметры кривой должны находиться в рамках, допустимых для применяемого прибора. Приборы такого типа в каталогах отмечаются лейблом «True RMS» или имеют букву «Т» в названии.

В последнее время наметилась явная тенденция к разработке мультиметров, подключаемых к персональным компьютерам (ПК). Это позволяет не только за-

фиксировать результаты многих вычислений, но и обработать их на компьютере, например для вычисления некоторых параметров или построения графиков их изменения. Можно распечатать отчет по измерениям на принтере компьютера. Несмотря на резкое повышение и без того высокой функциональности мультиметров, стоимость таких продвинутых приборов обычно не превышает 100–150 \$.

1.4.2. Функциональная схема цифрового мультиметра

На рис. 1.20 представлена функциональная схема *цифрового мультиметра*. Прибор содержит коммутатор К измеряемых сигналов, операционный усилитель ОУ, аналого-цифровой преобразователь АЦП и цифровой индикатор ЦИ. Таким образом, реализуется измерение на нижнем пределе измерения постоянного тока.

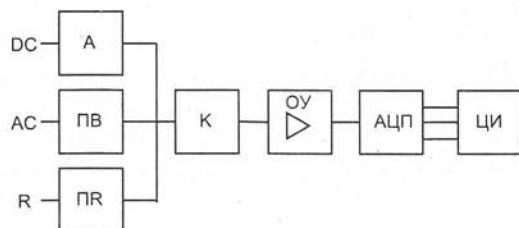


Рис. 1.20. Функциональная схема цифрового мультиметра

Ко входам коммутатора подключены различные измерительные преобразователи. Для простоты на рис. 1.20 показано три преобразователя. Первый — аттенюатор А служит для преобразования постоянного напряжения высокого уровня в постоянное напряжение более низкого уровня. Второй — прецизионный выпрямитель ПВ служит для преобразования переменного напряжения (тока) в напряжение постоянного тока. Третий преобразователь ПР преобразует сопротивление в напряжение постоянного тока. Чаще всего это просто прецизионный источник постоянного тока, который задается через измеряемое сопротивление и создает на нем падение напряжения $U=IR$. Таким образом, мультиметр может измерять напряжение (и токи) постоянного и переменного тока, а также сопротивление.

Число преобразователей на входе коммутатора может быть увеличено. Например, могут применяться преобразователи в постоянное напряжение емкости C , индуктивности L , температуры T , освещенности E , частоты f и др. Для измерения температуры используется обычно датчик на основе полупроводникового диода или (чаще) мостовая схема с термодатчиком на основе металлического терморезистора или эффекта Пельтье (позволяет измерять температуру от -60 до примерно $+1000$ °C).

Разумеется, чем больше преобразователей содержит мультиметр, тем сложнее его электронная начинка и дороже прибор. Впрочем, стоит отметить, что для построения типовых цифровых мультиметров выпускаются специализированные интегральные микросхемы, содержащие практически все упомянутые узлы. Именно поэтому нередко мультиметры даже разных фирм по метрологическим и электрическим характеристикам похожи «как две капли воды». Они обычно отличаются разрядностью дисплея и погрешностью. Чем последняя меньше, тем, как правило, дороже прибор, больше его габариты и масса. Последнее связано с применением прецизионных резисторов и конденсаторов, габариты и масса которых заметно больше, чем у обычных компонентов.

Некоторые мультиметры оснащены простыми средствами для прозвона цепей со звуковой индикацией (если сопротивление цепи меньше заданного в десятки Ом), тестирования микросхем различной логики, проверки диодов и транзисторов. Последняя реализуется обычно заданием в базу стабильного небольшого тока и измерением тока коллектора. Он пропорционален коэффициенту передачи тока базы B (или h_{BE}). Иногда мультиметры снабжаются средствами контроля логических микросхем и даже простым генератором тестовых сигналов на несколько частот.

Все это превращает мультиметры в действительно универсальные и довольно неприхотливые приборы. Стоимость их лежит в пределах от сотен до тысяч рублей. При этом дорогие приборы имеют, как правило, меньшую погрешность измерения и возможность подключения к компьютеру через интерфейсы RS-232 или (пока, увы, реже) USB.

1.4.3. Обзор массовых моделей мультиметров

Как уже отмечалось, массовые мультиметры различных фирм отличаются по своим характеристикам довольно незначительно, поскольку используют типовую элементную базу. В стремлении привлечь покупателей разработчики и производители мультиметров разнообразят их внешний вид, используют то пеструю, то строгую окраску корпуса, повышают число измеряемых параметров и придают корпусу мультиметров оригинальный и диктуемый соображениями эргономики вид.

Рассмотреть все множество выпускаемых мультиметров в одной книге (тем более главе) просто нереально, да и в этом нет необходимости. Для этого существуют каталоги, например каталог фирмы «Платан», выпущенный в виде книги, CD-ROM и представленный в Интернете (www.platan.ru). Ниже описание массовых моделей ограничено несколькими типовыми моделями.

На рис. 1.21 показан внешний вид мультиметра UT-30B фирмы UNI-T — одного из лидеров по поставке этих приборов на российский рынок. Этот прибор весом в 150 г и габаритами 130×74×51 мм — типичная «мыльница». Прибор имеет дисплей с разрядностью 3 1/2 и максимальным показанием до 1999. Прибор имеет пределы измерения постоянного напряжения 0,2, 2, 20, 200 и 500 В с погрешностью 0,5%, переменного напряжения 200 и 500 В с погрешностью 1,2%, постоянного тока 0,2, 2, 20, 200 мА и 10 А (на отдельном сильноточном входе) и сопротивления с пределами 0,2, 2, 20, 200 кОм и 20 МОм с погрешностью 0,8%. Есть возможность прозвона цепей и проверки диодов и транзисторов.

Другие мультиметры этой серии отличаются возможностями измерения переменного тока (UT-30A), частоты от 2 кГц до 20 МГц (UT-30F), выходом прямоугольных импульсов и режимом «Data hold» сохранения данных (UT-30C и UT-30D). Почти аналогичные по размерам, весу и возможностям мультиметры серии DTC830 выпускает фирма MASTECH, поставляющая на наш рынок десятки моделей мультиметров.

К приборам новой серии UT-50 мультиметров фирмы UNI-T относится высокоточный мультиметр UT-50E — рис. 1.22. Он оснащен дисплеем с высокой

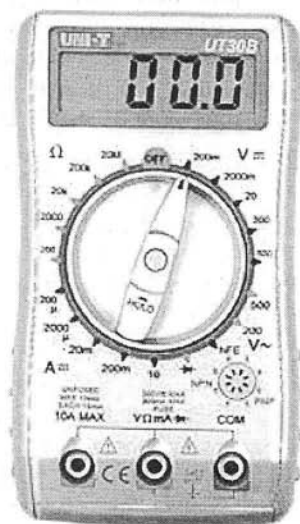


Рис. 1.21. Цифровой мультиметр UT-30B фирмы UNI-T

разрядностью 4 1/2 (максимальное показание 19999) и имеет погрешность измерения постоянного напряжения 0.05%. Диапазон измерений по постоянному напряжению расширен до 1000 В. Погрешность измерения переменного напряжения на пределах 2, 20, 200 и 750 В не превышает 0.8%. Погрешность измерения постоянного тока 0.5% на пределах 2, 20, 200 мА и 20 А, а погрешность измерения на переменном токе 0.8% на пределах 20, 200 мА и 20 А.

Возможности этого прибора расширены измерениями сопротивления на пределах 0.2, 2, 20, 200 кОм и 2, 20 и 200 МОм (погрешность 0.3%), емкости на пределах 2, 20, 200 нФ и 2, 20 мкФ (погрешность 3%), частоты до 20 кГц (погрешность 1.5%) и температуры от -40 до +1000 °С (погрешность 1%). Есть возможность прозвона цепей со звуковой сигнализацией, проверки диодов, индикация разряда батареи, режим сохранения данных «Data hold» и режим сниженного электропотребления «Sleep mode».

Такое обилие возможностей привело к увеличению размеров мультиметра (165×80×38 мм) и веса до 275 г. В серию входит 6 приборов, имеющих несколько различные характеристики — в основном, более высокую погрешность на постоянном токе. Особо следует упомянуть прибор этой серии UT50D, позволяющий измерять индуктивность с погрешностью 2% при пределах измерения 2, 20, 200 мГн и 20 Гн. Все приборы этой серии имеют ручное переключение пределов измерений, что позволило при повышенных метрологических данных сохранить умеренную цену за них.

Серия подобных мультиметров UT58 выполнена в прямоугольных корпусах ярко красного цвета со скругленными углами. Обычно мультиметры имеют на днище корпуса откидную подставку, позволяющую устанавливать их в наклонном положении. Но оно не очень устойчиво. Поэтому фирма UNI-T выпустила серии мультиметров UT-2001/2007 и с наклонным и даже откидным дисплеем. Это по-

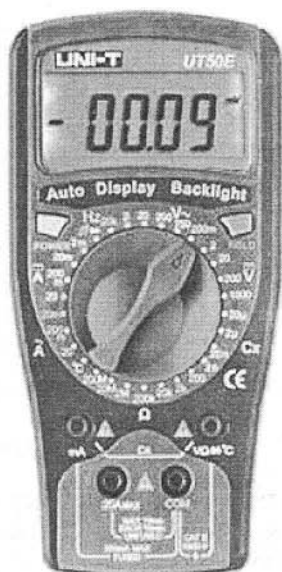


Рис. 1.22. Цифровой мультиметр UT-50E фирмы UNI-T



Рис. 1.23. Мультиметр M9502 с наклонным дисплеем

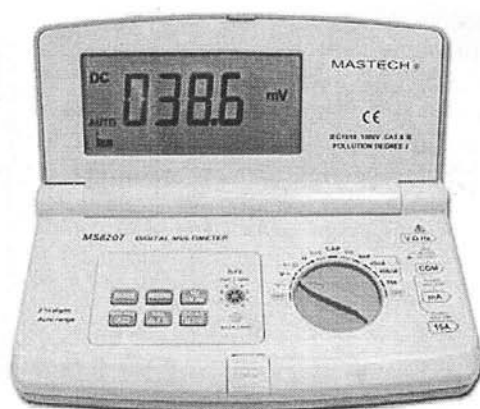


Рис. 1.24. Мультиметр-раскладушка MAS8207/8208

звolyет устойчиво устанавливать мультиметр днищем вниз и удобно считывать показания с наклонного дисплея. Подобные мультиметры M9502/9508 выпускает и фирма MASTECH — см. рис. 1.23.

Фирма MASTECH выпускает несколько серий мультиметров с почти аналогичными характеристиками. Это приборы MAS343/344/345/8205 и др. Оригинальным оформлением отличаются приборы MAS8207/8208. Это «раскладушки», корпус которых состоит из двух половинок — рис. 1.24. Приборы MAS8208 измеряют истинные среднеквадратические значения переменных токов и напряжений (True RMS). У приборов есть ручное и автоматическое переключение пределов измерений. MASTECH выпускает также настольный мультиметр M9803R с весом 1.5 кг.

1.4.4. Мультиметры для промышленных применений

Многие мультиметры имеют ударопрочный корпус или заключаются в обрезиненную оболочку, смягчающую удары — см., например, рис. 1.23. Однако для применения в промышленных или военных условиях одного этого недостаточно. Как правило, мультиметры для таких применений должны работать в расширенном диапазоне изменения температуры и влажности, выдерживать падение с 2—3-метровой высоты. Ряд фирм выпускает мультиметры, специально предназначенные для таких применений. Следует отметить, что цена таких приборов значительно выше, чем у приборов для обычного применения.

Мультиметры АКТАКОМ AM-1095 и AM-1097 (рис. 1.25) предназначены для измерения постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока, частоты, сопротивления, емкости, проверки диодов и прозвонки электрических цепей. Модель AM-1097 обладает дополнительными функциями, позволяющими



Рис. 1.25. Портативный мультиметр АКТАКОМ AM-1095 с ударопрочным корпусом

проводить измерения совокупности постоянного и переменного напряжения и тока, частоты до 10 МГц, длительности (до 2000 мс) и скважности импульса, проводимости до 40 нСм, осуществлять измерения температуры при помощи термопары К-типа. Кроме того, АМ-1097 обеспечивает выдачу постоянного калиброванного напряжения и тока высокой точности, измерение напряжений в децибелах с возможностью выбора 20 сопротивлений, регистрацию пиковых значений длительно-стью менее 1 мс, подсветку дисплея при работе в условиях слабой освещенности.

Базовая погрешность этих мультиметров составляет 0,06%, что и позволяет причислить их к разряду профессиональных. Эти современные приборы оснащены многими дополнительными возможностями, такими как сохранение информации в памяти, регистрация максимального и минимального значений измеряемых параметров, удержание текущего результата измерений на экране, режим относительных измерений.

Прибор оснащен двойным цифровым жидкокристаллическим дисплеем, позволяющим отображать одновременно две измеренные величины, а также 21-сегментной графической аналоговой шкалой. Для передачи данных в персональный компьютер приборы имеют интерфейс RS-232 с оптической развязкой.

Большую серию промышленных мультиметров выпускает фирма Wavetek Meterman — рис. 1.26. Среди них есть даже приборы в герметичном водонепроницаемом корпусе, например, HD110B/115D и приборы HD160B для тяжелых условий работы.

Признанным мировым лидером в выпуске подобных мультиметров является фирма Fluke. На рис. 1.27 представлена модель промышленного мультиметра FLUKE-83-3 классического вида. Прибор имеет ударопрочный корпус и дисплей с разрядностью 3 3/4. Погрешность измерения постоянного напряжения $0,1\% \pm 1$, а переменного — $0,5\% \pm 2$. Погрешность измерения тока $0,4\% \pm 2$ для постоянного



Рис. 1.26. Промышленные мультиметры фирмы Wavetek Meterman HD110B/115D, 34XR и 38XR



Рис. 1.27. Промышленный мультиметр FLUKE-83-3

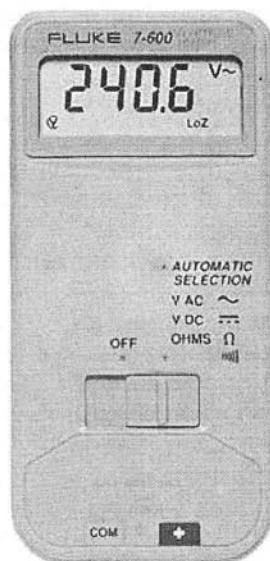


Рис. 1.28. Электрический тестер FLUKE-7-600

тока и $1,2\% \pm 2$ для переменного тока. Пределы измерения обычные (для тока до 10А). Прибор измеряет также сопротивления до 40 МОм, емкость до 5 мкФ и частоту до 200 кГц. Частоты измеряется цифровым методом с точностью до $0,0055\% \pm 1$, есть возможность измерения периода. Предусмотрена возможность прозвона цепей со звуковой сигнализацией и тестирования диодов. Есть режим пониженного электропотребления. Прибор имеет вес 360 г и габариты $187 \times 87 \times 32$ мм.

FLUKE выпускает множество и других мультиметров для промышленных применений. Это приборы FLUKE-87-3/111/112 и др. Приборы FLUKE-187/189 обеспечивают измерение истинных среднеквадратичных значений переменного напряжения и тока.

В промышленных условиях большим неудобством является ручной выбор пределов и видов измерений. Представьте себе, что вам приходится делать это, стоя на лестнице и сунув прибор в небольшой распределительный щит. Для таких условий работы FLUKE выпускает специальные мультиметры с предельно упрощенной процедурой работы. На рис. 1.28 представлен такой электрический тестер FLUKE-7-300/600.

Прибор автоматически выбирает вид измерения (постоянное или переменное напряжение и сопротивление) и предел измерения. Если напряжение на терминалах прибора превосходит 4.5 В он автоматически переходит к измерению напряжения. Прибор измеряет напряжения до 300 В (модель 600 — до 600 В) и сопротивления до 32 МОм. Все, что нужно для работы с таким прибором — это подключить его к измеряемой цепи и включить с помощью большого выключателя.

1.4.5. Мультиметры с токовыми клещами

Как было сказано выше, существует несколько видов мультиметров с токовыми клещами. Наиболее простой вариант (и один из самых ранних на российском

рынке) токовые клещи ECT-650 фирмы Escort (рис. 1.29). Это типичный представитель токовых клещей с разъемным трансформатором. Он обладает следующими характеристиками — диапазон измерения переменного тока — 0,1 — 300 А. Измерение напряжения до 750 В. Базовая погрешность 1 %. Измерение сопротивления до 2000 Ом, режим прозвонки цепей и удержание показаний.

Главное достоинство подобных приборов — простота, малый вес и надежность. Область применения тоже ограничена — измерения в силовых сетях общего назначения.

Десятки моделей мультиметров с токовыми клещами выпускает фирма MASTECH. Характерной их деталью является большая поворотная ручка на правой стороне корпуса, предназначенная для замыкания/размыкания токовых ключей (рис. 1.30). Фактически это вполне приличный мультиметр, дополненный токовыми клещами для бесконтактного измерения переменного тока.

Прибор измеряет постоянное напряжение (с применением обычного входного терминала) на пределах 0,4, 4, 40, 400 и 600 В с погрешностью $0.8\% \pm 1$ и переменного на пределах 4, 40, 400 и 600 В с погрешностью $1.2\% \pm 2$. Пределы измерения переменного тока с помощью токовых клещей 400 и 1000 А с погрешностью $2\% \pm 5$. Возможно также измерение сопротивления на пределах 0,4; 4; 40; 400 кОм; 4 и 40 МОм ($1\% \pm 2$), емкости на пределах 4; 40; 400 нФ; 4; 40 и 200 мкФ ($3\% \pm 5$), частоты на пределах 10; 100 Гц; 1; 10; 100 кГц; 1; 10 МГц ($0,1\% \pm 3$) и даже длительности рабочего цикла от 0,1 до 99,9%. Предусмотрена возможность прозвона цепей, относительных измерений, сохранения данных и уменьшенного потребления электроэнергии. Вес прибора 540 г, размеры 260×90×452 мм.



Рис. 1.29. Простейшие токовые клещи ECT-650 фирмы Escort с разъемным трансформатором



Рис. 1.30. Мультиметр с токовыми клещами UT-205 фирмы MASTECH

1.4.6. Мультиметры — токовые клещи для измерения мощности в трехфазных сетях

Ведущие производители мультиметров выпускают большое число таких приборов со специальными возможностями, отсутствующими у обычных мультиметров и измерителей R , C , L и иммитанса. Прежде всего, это приборы для измерений в трехфазных сетях активной и реактивной мощности, комбинированные (с цифровыми и стрелочными индикаторами) приборы и малогабаритные индикаторы напряжений в форме щупов и ручек, широко применяемые электриками во время работы на выезд.

На рис. 1.31 показаны токовые клещи ATK-2200 — популярный многофункциональный прибор, предназначенный для измерения мощности в однофазной и трехфазной сетях постоянного и переменного тока, измерения постоянного и переменного токов до 2000 А, переменного напряжения до 600 В, постоянного напряжения до 800 В, а также одновременного измерения пар величин: напряжение и частота, ток и частота. По результатам измерения в каждой фазе прибор автоматически рассчитывает и индицирует на дисплее значения суммарной мощности в трехфазных цепях, реактивной и полной мощности, а также сдвига фазы (в градусах). Прибор индицирует истинное эффективное значение (TrueRMS), при коэффициенте формы не более 4, обеспечивает автоматический выбор предела измерения и защиту от перегрузки в любом диапазоне до 800 В.

Величина сдвига фазы может измеряться в диапазоне частот от 50 до 60 Гц с погрешностью $\pm 2,0^\circ$ и выполняется по пресечению нуля, при этом прибор обеспечивает чувствительность по напряжению не менее 100 В и по току не менее 10 А. Измерение частоты может выполняться в диапазоне 10...400 Гц.

По результатам измерения силы тока и напряжения прибор автоматически вычисляет значение мощности. Расчеты производятся по следующим формулам:

$$PF = \frac{KW}{KVA}$$

$$KVA = \frac{V \cdot A}{1000}$$

$$KVAR = \sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2}$$

где PF — коэффициент мощности;

KW — активная мощность;

KVA — полная мощность;

KVAR — реактивная мощность.



Рис. 1.31. Токовые клещи ATK-2200 модельного ряда измерительных приборов АКТАКОМ



Рис. 1.32. Токовые клещи для измерения сопротивления ATK-4001

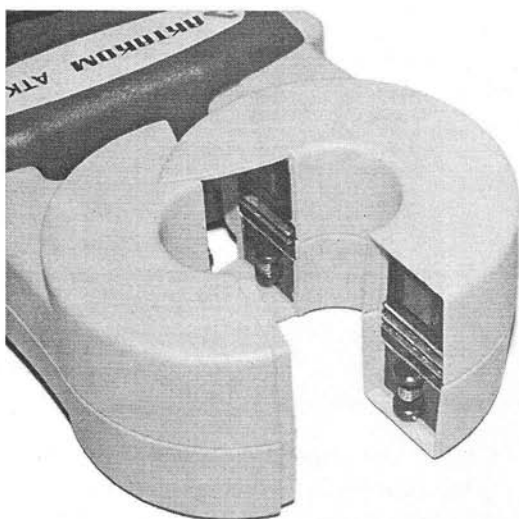


Рис. 1.33. Двухконтурный магнитопровод токовых клещей ATK-4001

Поскольку реактивная мощность рассчитывается, погрешность ее определения в большой степени зависит от точности измерений напряжения, тока и активной мощности. Особенно это важно в случаях, когда значения коэффициента использования мощности близки к 1. Для получения более точных значений при $\cos \varphi$, большем 0,93 (сдвиг фазы меньше 22°), реактивную мощность можно вычислять по следующей формуле, справедливой для идеальной синусоиды:

$$KVAR = KVA \cdot \sin \varphi.$$

Прибор имеет двойной 4-х разрядный дисплей и обеспечивает точность измерений 1,5%.

Интересное техническое решение может быть реализовано, если в состав измерительной головки токовых клещей включить и второй разъемный магнитопровод. В модельном ряду токовых клещей АКТАКОМ имеется такая модель — ATK-4001 (рис. 1.32).

Она имеет два разъемных магнитопровода (рис. 1.33) и отличается от других своих собратьев по классу тем, что через дополнительную обмотку может производить дополнительное воздействие на объект измерения, что позволяет выполнять измерения контура сопротивления.

Контроль сопротивления контура заземления является важным элементом контроля оборудования любой лаборатории. Во многих случаях любой демонтаж цепей на работающем оборудовании является сложным, длительным и, в результате, дорогостоящим мероприятием, поэтому данная модель токовых клещей может оказаться поистине находкой для специалиста: ведь кроме измерения сопротивления заземления этот прибор позволяет измерять ток утечки и производить бесконтактную прозвонку цепи.

Основные технические характеристики прибора приведены в таблице.

Таблица

Основные технические характеристики АТК-4001

Диапазон измерений	Разрешение	Погрешность
0,025...0,250 Ом	0,002 Ом	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 0,05 \text{ Ом})$
0,250...9,999 Ом	0,02 Ом	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 0,1 \text{ Ом})$
10,00...99,99 Ом	0,04 Ом	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 0,3 \text{ Ом})$
100,0...199,9 Ом	0,4 Ом	$\pm(0,03 \cdot R_{\text{изм}} + 1,0 \text{ Ом})$
200,0...400,0 Ом	2 Ом	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм}} + 5 \text{ Ом})$
400,0...600,0 Ом	5 Ом	$\pm(0,1 \cdot R_{\text{изм}} + 10 \text{ Ом})$
600,0...1500 Ом	20 Ом	около $\pm 0,2 \cdot R_{\text{изм}}$

где $R_{\text{изм}}$ — измеренное значение сопротивления заземления.

При проведении бесконтактного измерения сопротивления следует иметь в виду следующие особенности прибора:

- измерительная частота при измерении сопротивления и прозвонке цепи равна 1,667 кГц;
- сопротивление контура должно быть без индуктивной составляющей;
- напряженность внешнего магнитного поля должна быть не более 50 А/м;
- напряженность внешнего электрического поля должна быть не более 1 В/м.

В режиме измерения тока утечки производятся на двух диапазонах: «мА» (при токе от 200 мкА до 1000 мА) и «А» (при токе от 200 мА до 15 А).

1.4.7. Мультиметры с цифровыми и аналоговыми измерителями

Как уже отмечалось, сохранили свою привлекательность и обычные тестеры с магнитоэлектрическими стрелочными аналоговыми головками. У приборов есть и такое важное достоинство, как отсутствие батареи питания (хотя батарея для измерителя сопротивлений нужна). Рынок заполнен массой таких мультиметров — от вполне серьезных приборов до подделок размером со спичечную коробку, от которых можно ожидать разве что едва видимого отклонения стрелки. Фирма UNI-T выпускает ряд стрелочных мультиметров. Внешний вид одного из них показан на рис. 1.34.

Это типичный добротный сделанный тестер на основе большой стрелочной головки с зеркалом на шкале, облегчающим точный отсчет показаний. Прибор измеряет постоянное напряжение на пределах 120 мВ, 3, 12, 30, 120, 300 и 1200 В и постоянный ток на пределах 50 мкА, 0,3; 30; 300 мА и 3 А. Пределы на переменном напряжении те же, только нет предела 120 мВ. Прибор измеряет также сопротивления (пределы 0,2; 2; 20; 200 кОм; 2 и 20 МОм), децибелы и емкость на двух пределах (50 пФ — 0,1 мкФ и 0,01 —



Рис. 1.34. Стрелочный аналоговый мультиметр (тестер) CX-506 компании UNI-T

100 мкФ). Возможен прозвон цепей со светодиодной индикацией, измерение нелинейных сопротивлений и переключение полярности. Масса прибора 350 г, размеры 165×106×44 мм.

Для тех, кто никак не может отдать предпочтение цифровым или аналоговым приборам выпускаются комбинированные аналого-цифровые мультиметры, которые по существу являются цифровыми мультиметрами с встроенным в них аналоговым измерителем. Один из таких гибридов показан на рис. 1.35. Прибор измеряет постоянные и переменные напряжение и ток, сопротивления и емкости. Есть возможность проверки диодов и транзисторов и прозвона цепей.

1.4.8. Мультиметры-щупы

Среди электриков популярностью пользуются миниатюрные мультиметры в виде щупов и даже авторучек. Их легко носить в кармане и мгновенно подключить к измеряемой цепи. На рис. 1.36 показан такой миниатюрный мультиметр M3211D фирмы MASTECH. Прибор измеряет напряжения постоянного и переменного тока до 500 В (5 пределов, погрешность 1 и 1,5 %), токи до 200 мА и сопротивления до 20 МОм (6 пределов, погрешность до 2%). Возможна проверка диодов и транзисторов, а также прозвон цепей со звуковой индикацией. Есть режим сохранения данных. Вес малютки 90 г, размеры 185×22×31 мм.

Выпускаются еще меньшие детекторы напряжения в виде ручки. Но назвать эти полезные и неприхотливые устройства измерительными приборами язык не поворачивается.

1.4.9. Цифровые мультиметры с интерфейсом RS-232

В последние годы на рынок портативных измерительных приборов проникли новые фирмы юго-азиатского региона. Порой они выпускают очень интересные как по дизайну, так и по функциональным возможностям портативные измерительные приборы. Особое внимание уделяется приборам, имеющим возможность подключения к компьютеру. Примером таких устройств могут служить мультиметры фирмы ВееТЕСН.

Мультиметры ВееТЕСН-20R (базовая модель), 20T с измерителем температуры и 20RMS (с измерителями температуры и истинного среднеквадратического значения переменного тока и напряжения) представляют собой приборы с заметно упрощенным кнопочным управлением и автоматическим выбором пределов из-



Рис. 1.35.
Аналогово-цифровой
мультиметр M9701
фирмы UNI-T

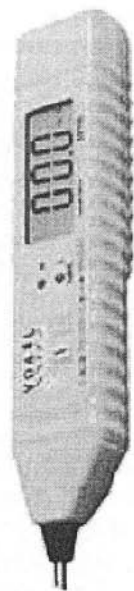


Рис. 1.36.
Миниатюрный
мультиметр-щуп
M3211D фирмы
MASTECH

мерения — рис. 1.37. Во всех видах измерений и на всех диапазонах имеется защита от перегрузок.

Параметры приборов вполне обычные для мультиметров с дисплеем, имеющим разрядность 3 3/4. Измеряются постоянные и переменные напряжения и токи, сопротивление, емкость, частота (до 10 МГц) и температура (кроме базовой модели). Есть прозвон цепей, проверка диодов, режимы сохранения данных и пониженного энергопотребления.

Приборы имеют большой дисплей с индикацией не только результатов измерений, но и состояния прибора и возможных неисправностей.

Еще более совершенными являются мультиметры нового поколения BeeTECH-51/52/53 (рис. 1.38). Это полностью автоматизированные приборы с новым стилем управления (без привычного поворотного переключателя). В дополнение к обычным измерениям почти всех электрических параметров (кроме индуктивности L) приборы имеют режим относительных измерений, измерений максимальных, минимальных и средних значений для ряда измерений, встроенный генератор тестовых сигналов и встроенный таймер. Наряду с прозвоном цепей есть тестирование логики, режим пониженного энергопотребления и индикации напряжения питающей батареи.

Стационарные настольные мультиметры это, как правило, прецизионные профессиональные приборы, так как они позволяют проводить измерения постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления и частоты, при этом «базовая» погрешность измерений составляет 0,01%!

Модель АВМ-4306 (рис. 1.39) — это настольный мультиметр. Такие приборы очень удобны для исследовательских лабораторий и стационарных пунктов сервиса электронной и бытовой аппаратуры.

Мультиметр АВМ-4306 оснащен двустрочным светодиодным $5\frac{1}{2}$ -разрядным дисплеем с изменяемой разрядностью (120000/40000/4000). Он обеспечивает проведение измерений постоянной и переменной составляющих в частотном диапазоне до 100 кГц, истинного среднеквадратичного значения (True RMS), измерение сопротивления по двух- и четырехпроводной схеме, сравнение результатов измерений с заданными значениями, проверку диодов и звуковую прозвонку цепи, измерение в децибелах и т. д. АВМ-4306 обеспечивает автоматический или ручной выбор диапазонов, фиксацию максимального, минимального, среднего значений, удержание на дисплее текущего показания. Полученные данные могут быть переданы в персональ-

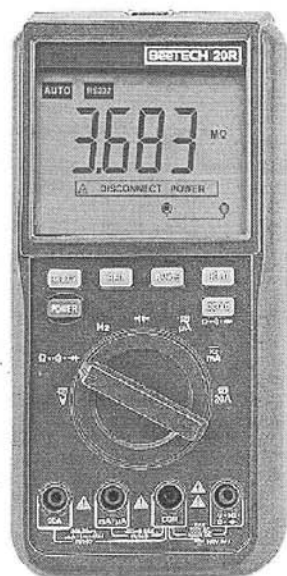


Рис. 1.37. Мультиметры BeeTECH-20R



Рис. 1.38. Мультиметр BeeTECH-52



Рис. 1.39. Настольный цифровой мультиметр ABM-4306

ный компьютер по интерфейсу RS-232 или распечатаны на принтере. Как опция, в приборе предусмотрена возможность установки интерфейса GPIB. Наличие интерфейса позволяет не только передавать данные из прибора в ПК для дальнейшей обработки, но и управлять прибором посредством программного обеспечения CP-07 для операционной системы Windows.

Внешне прибор очень похож на своих собратьев, производимых известной американской компанией Agilent Technologies. Декоративные обрезиненные панели, удобное расположение функциональных клавиш и разъемов, яркие стройные цифры свододиодного индикатора — все это значительно облегчает работу оператора.

Разумеется, настольные мультиметры выпускают и другие фирмы. Например, к «бюджетным» относятся модели настольных мультиметров GDM-8145 и GDM-8135. Это вполне обычные по возможностям и параметрам приборы весом 2,5 кг и с умеренными габаритами (240×90×280 мм).

В производстве подключаемых к компьютеру мультиметров лидирует компания METEX. Только в каталоге фирмы «Платан» 2005 года имеются краткие данные о десятке мультиметров этой фирмы. Многие из них, за исключением модели M-3890D, подключаются к компьютеру через последовательный порт COM (RS-232). Приборы, как правило, могут дополнительно измерять емкость, частоту и температуру (с помощью прилагаемой термодопы)

Серия мультиметров M-36xxD (рис. 1.40) это дешевые приборы с ручным переключением видов и пределов измерения. Такие приборы пользуются наибольшей популярностью.

Приведем параметры мультиметра M-3660D:

- Ручной выбор пределов измерений.
- Дисплей 3 1/2 разряда (максимальное показание 1999) + вспомогательный дисплей + линейная шкала.
- Диапазоны измерения постоянного напряжения: DCV 200 мВ — 200 (0,3) — 1000 В (0,5%).



Рис. 1.40. Мультиметр METEX M-3660 D

- Диапазоны измерения переменного напряжения: ACV 200 мВ — 200 (2,5%) — 750 В (1,5%).
- Диапазоны измерения постоянного тока: DCI 2 мА (0,5%) — 200 мА (1,2%) — 20 А (2%).
- Диапазоны измерения переменного тока: ACI 2 мА (1%) — 200 мА (1,8%) — 20 А (3%).
- Диапазоны измерения сопротивления: 200 Ом — 2 (0,5%) — 20 МОм (1%).
- Диапазоны измерения емкости: 2 — 200 нФ (2%) — 2 — 200 мкФ (4%).
- Диапазоны измерения частоты: 2 кГц — 20 МГц (1%) Т -40..+1200 °С (3%).
- Тест диодов — есть.
- Тест транзисторов — есть.
- Логический пробник — есть.
- Показания среднеквадратичного значения True RMS — есть.
- Прозвон цепей на проводимость со звуковым сигналом — есть.
- Подключение к ПК: через порт RS232C
- Сохранение максимальных max и минимальных min значений — есть.
- Память: на 10 значений.
- Режим «Data hold» (сохранение данных) — есть.
- Размеры: 187×84×34 мм.
- Вес: 305 г.

К приборам с ручным выбором пределов измерения относится также высокоточный мультиметр М-4660А (рис. 1.41). Его характеристики представлены ниже:

- Ручной выбор пределов измерений.
- Дисплей 4 1/2 разряда (максимальное показание 19999).
- Основной и три вспомогательных дисплея + линейная шкала.
- Диапазоны измерения постоянного напряжения: DCV 200 мВ — 200 (0,05%) — 1000 В (0,1%).
- Диапазоны измерения переменного напряжения: ACV 200 мВ — 200 (0,5%) — 750 В (0,8%).
- Диапазоны измерения постоянного тока: DCI 2 -20 (0,3%) — 200 мА (0,5%) — 20 А (0,8%).
- Диапазоны измерения переменного тока: ACI 2 -20 (0,8%) — 200 мА (1%) — 20 А (1,2%).
- Диапазоны измерения сопротивления: 200 Ом — 2 (0,15%) — 20 МОм (0,5%).

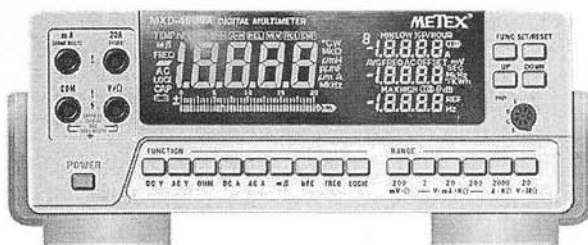


Рис. 1.41. Высокоточный мультиметр METEX М-4660А

- Диапазоны измерения емкости: 2 — 200 нФ (2%) — 2 — 200 мкФ (3%).
- Диапазоны измерения частоты: 20 кГц — 20 МГц (0,1%).
- Диапазоны измерения температуры: -40...+1200 °С (3%).
- Тест диодов — есть.
- Тест транзисторов — есть.
- Логический пробник — есть.
- Прозвон цепей на проводимость со звуковым сигналом — есть.
- Подключение к ПК: через порт RS232C — есть.
- Память — на три значения.
- Размеры: 194×87×34,5 мм.
- Вес: 400 г.

Приборы серии М-38ххD имеют ручной и автоматический выбор пределов измерений. Приведем параметры мультиметра М-3870D этой серии:

- Ручной и автоматический выбор пределов измерений.
- Дисплей 3 3/4 разряда с подсветкой (до значений 3999) + вспомогательный дисплей + линейная шкала.
- Диапазоны измерения постоянного напряжения: DCV 400 мВ — 400 (0,3%) — 1000 В (0,5%).
- Диапазоны измерения переменного напряжения: ACV 400 мВ — 400 (0,8%) — 750 В (1%).
- Диапазоны измерения постоянного тока: DCI 400 мА — 40 — 400 мА (1%) — 4 — 20 А (1,5%).
- Диапазоны измерения переменного тока: ACI 400 мА — 40 — 400 мА (1,5%) — 4 — 20 А (2%).
- Диапазоны измерения сопротивления: 400 Ом — 4 (0,5%) — 40 МОм (1%).
- Диапазоны измерения емкости: 4 — 400 нФ (2%) — 4 — 200 мкФ (3%).
- Диапазон измерения частоты: 4 кГц — 4 МГц (0,1%).
- Диапазон измерения температуры T: -40...+1200 °С (3%) L 4 — 40 Гн (3%).
- Тест транзисторов — есть.
- Логический пробник — есть.
- Прозвон цепей на проводимость со звуковым сигналом — есть.
- Подключение к ПК через порт RS232C — есть.
- Сохранение max и min значений — есть.
- Память: на 5 значений.
- Режим «Data hold» (сохранение данных) — есть.
- Размеры: 147×87×34 мм.
- Вес: 305 г.

Редкой возможностью этого мультиметра является возможность измерения индуктивности. Мультиметр этой серии М-3860М не имеет этой возможности, но зато он измеряет переменные напряжения и токи в режиме True RMS.

Еще один высокоточный мультиметр с повышенной разрядностью дисплея М-5040D показан на рис. 1.42. Прибор имеет встроенный генератор тестовых сигналов для проверки MOS-микросхем.

Технические характеристики прибора следующие:

- Ручной и автоматический выбор пределов измерений.

- Дисплей 4 3/4 разряда с подсветкой (до значений 39999) + вспомогательный дисплей + линейная шкала.
- Диапазоны измерения постоянного напряжения: DCV 400 мВ — 400 (0,06%) — 1000 В (0,2%).
- Диапазоны измерения переменного напряжения: ACV 400 мВ — 400 (0,8%) — 750 В (1%).
- Диапазоны измерения постоянного тока: DCI 400 мА — 40 — 400 мА — 4 (1,5%) — 20 А (0,8%).
- Диапазоны измерения переменного тока: ACI 400 мА — 40 — 400 мА — 4 — 20 А (2%).
- Диапазоны измерения сопротивления: 400 Ом — 4 — 40 МОм (0,2 %).
- Диапазоны измерения емкости: 4 — 400 нФ (2%) — 4 — 200 мкФ (3%)
- Диапазон измерения частоты F: 4 кГц — 40 МГц (2%).
- Тест транзисторов — есть.
- Логический пробник — есть.
- Прозвон цепей на проводимость со звуковым сигналом — есть.
- Подключение к ПК через порт RS232C — есть.
- Сохранение max и min значений — есть.
- Память: на 10 значений.
- Режим «Data hold» (сохранение данных) — есть.
- Тестовые сигналы: от 10 Гц до 10,24 кГц.
- Размеры: 147×87×34 мм.
- Вес: 305 г.



Рис. 1.42. Внешний вид мультиметра М-5040D

1.4.10. Многоцелевой мультиметр METEX M-6000D

К новейшим разработкам фирмы METEX относится недавно появившийся в продаже многоцелевой мультиметр М-6000D (рис. 1.43). Прибор уникален широкими диапазонами измерений и наличием возможности измерения освещенности и уровня шумов. Для измерения освещенности прямо на передней панели размещен датчик освещенности, прикрытый пропускающей свет белой круглой крышкой.

Параметры и характеристики мультиметра М-6000D:

- Выбор пределов измерений: автоматический.
- Количество разрядов индикатора: 4 3/4.
- Вспомогательный индикатор — есть.
- Диапазоны измерения постоянного напряжения: 600 мВ (0,6%) — 6 — 60-600-1000В (0,7%).
- Диапазоны измерения переменного напряжения: 600 мВ (1,5%) — 6 — 750 В (1%).
- Диапазоны измерения постоянного тока: 60-600 мА (1%) — 20А (2%).

- Диапазоны измерения переменного тока: 60-600 мА (1,5%) — 20А (3%).
- Диапазоны измерения сопротивления: 600 Ом (1,5%) — 6 — 60 — 600 кОм — 6 (1%) — 60М Ом (3%).
- Диапазоны измерения емкости: 6нФ-60 (3%) — 600 мкФ — 6 мФ (5%).
- Диапазоны измерения частоты: 6 кГц — 60 МГц (0,1%).
- Диапазоны измерения температуры: -40...1200 °С (3%).
- Измерение освещенности: от 0 до 6000 люкс (5%).
- Измерение уровня шума: от 45 до 100 дБ (3%).
- Тест диодов и транзисторов — есть.
- Прозвонка цепей на проводимость — есть.
- Режим удерживания данных на дисплее (Data Hold) — есть.
- Порт RS232 — есть.
- Размеры: 175×78×27 мм.
- Вес: 600 г.

Все описанные выше приборы оснащены последовательным интерфейсом RS-232, а мультиметры М-3890D — USB-интерфейсом. Впрочем, последние, как программные средства мультиметров, будут рассмотрены в следующем подразделе.

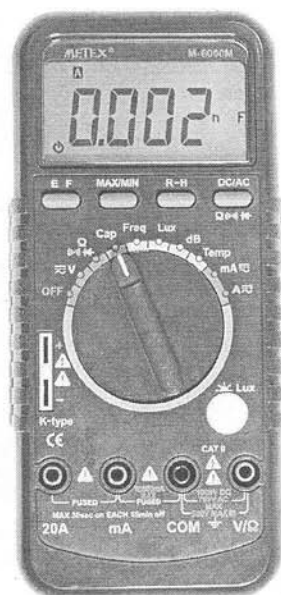


Рис. 1.43. Цифровой многоцелевой мультиметр М-6000D

1.4.11. Цифровые мультиметры М-3890D и М-3890DT фирмы METEX с интерфейсом USB

Фирма METEX выпускает ряд цифровых мультиметров с возможностью их подключения к компьютеру через интерфейс RS-232. Этот, хорошо апробированный и надежный интерфейс, тем не менее, является уже устаревшим, хотя и вполне подходящим для передачи данных с таких не быстрых приборов, как мультиметры, на компьютер.

Особое место в ряде «бюджетных» мультиметров фирмы METEX занимают модели М-3890D и М-3890DT. Эти цифровые мультиметры имеют современный скоростной *USB интерфейс*. USB (от Universal Serial Bus — универсальная последовательная шина) это современный высокоскоростной последовательный интерфейс для подключения к компьютеру множества приборов. Несколькими разъемами USB ныне оснащаются все компьютеры — как настольные, так и мобильные (ноутбуки).

Приборы М-3890DT поставляются в простеньком, но достаточно изящном кейсе. На рис. 1.44 он показан в открытом виде. В комплект поставки входят: сам мультиметр, интерфейсный USB-кабель, два щупа (черный и красный) с наконечниками, термопара (датчик температуры) с разъемом, разъем выхода тестового сигнала с крокодильчиками — наконечниками, гибкий диск с программным обеспечением, инструкция на русском языке.

О внешнем виде мультиметров и средствах их подключения можно судить по рис. 1.45. Мультиметр (1) устанавливается в наклонное почти вертикальное поло-

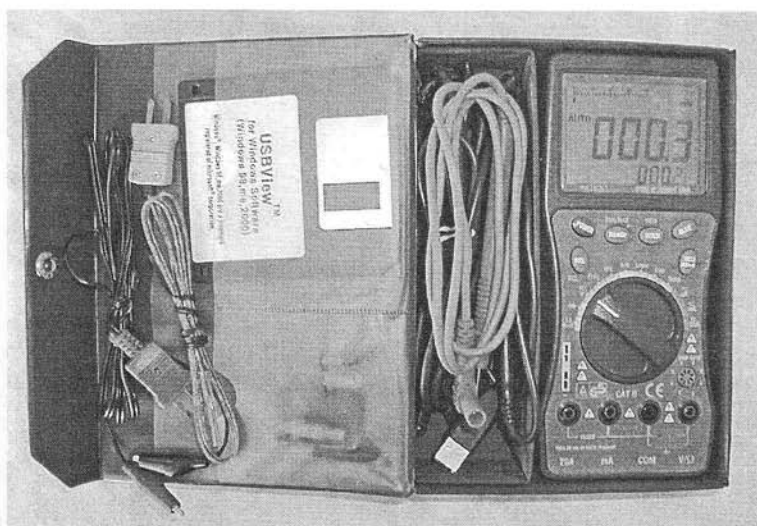


Рис. 1.44. Кейс с мультиметром M-3890DT и его аксессуарами

жение с помощью откидной стойки. Сверху имеется закрываемый съемной крышечкой разъем для подключения USB-кабеля (2). Поворотный переключатель (3) позволяет менять виды измерений. Изменение пределов измерений автоматическое, но можно задать и ручное с помощью кнопки Range. Провода со щупами и наконечниками (4), кабель выходного сигнала с крокодильчиками (5) и кабель (6) подключения термопары (7) показаны слева от прибора.

Удобство применения USB-интерфейса в мультиметрах обусловлено не его скоростными характеристиками, а наличием у всех современных компьютеров нескольких USB-портов с удобным и быстрым подключением к нему различных приборов. Такие порты нередко располагаются на передней панели настольных ПК и в удобных местах мобильных ПК. Операционные системы современных ПК Windows 2000/XP/2003 XP обеспечивают «горячее» подключение устройств с интерфейсом USB.

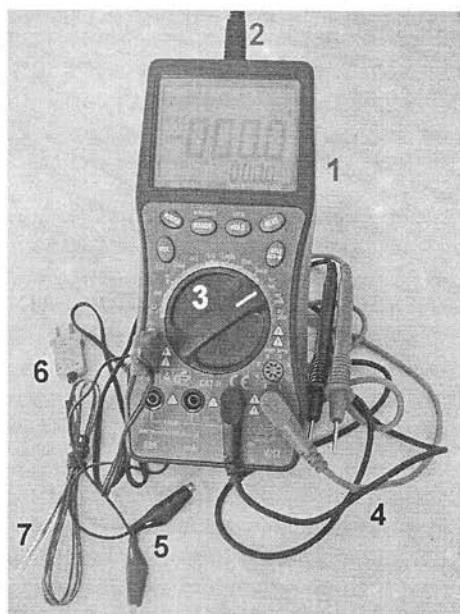


Рис. 1.45. Мультиметр M-3890DT в рабочем состоянии

Основные органы управления мультиметрами представлены на рис. 1.46. Здесь показаны: основной дисплей (1), один из двух вспомогательных дисплеев (2), кнопки управления (3), поворотный переключатель выбора измеряемых параметров (4), терминалы ввода (5), дополнительные терминалы (6), панель тестирования транзисторов (7) и разъем USB-порта (8). Цветовая гамма передней панели

прибора делает его управление с помощью поворотного переключателя и кнопки Blue (ввод параметров с надписями голубого цвета) интуитивно понятным.

Отметим некоторые особенности работы с приборами. Красная кнопка POWER служит для включения и выключения прибора. RANGE задает автоматическое или ручное переключение пределов измерения. А вместе с кнопкой BLUE она инициирует режим измерения минимального и максимального значения измеряемого параметра. Нажатие кнопки REL позволяет перейти к режиму измерения выбранного параметра относительно его заданного перед этим значения. Кнопка HOLD служит для удержания данных на дисплее, а вместе с кнопкой BLUE обеспечивает запись результатов измерений в память (до 10 измерений). Последняя кнопка служит для изменения измеряемого параметра.

Измерения напряжений, токов и резистивности осуществляется при использовании основных терминалов ввода, измерение емкости, температуры и вывод тестовых сигналов осуществляется с дополнительного терминала. Панель тестирования транзисторов используется для проверки параметров биполярных транзисторов малой и средней мощности. Измерение параметров мощных биполярных и полевых транзисторов, а также составных транзисторов не рекомендуется.

Параметры и характеристики мультиметров этой серии следующие:

- Автоматический выбор пределов измерений.
- Дисплей 3 3/4 разряда (максимальное значение 4000).
- Два вспомогательных дисплея и линейная шкала.
- Диапазоны измерения напряжения: постоянного DCV 400 мВ — 1000 В (0,5%), переменного ACV 4 — 750 В (0,8%).
- Диапазоны измерения тока: DCI 400 мкА — 400 мА (1,0%) — 20 А (1,5%) ACI 400 мкА — 400 мА (1,5%) — 20 А (2,0%) .
- Измерение сопротивления R: 400 Ом — 40 МОм (0,5%).
- Измерение частоты F: 4 кГц — 400 МГц (0,1%) C 4 — 200 нФ (2%) T —40..+1200 °C (3%).
- Тестирование логики (напряжение 40 В постоянного тока).
- Тест диодов (по прямому напряжению до 2 В).
- Проверка транзисторов (по параметру h_{FE} при токе коллектора 1 мА).
- Режим прозвона цепи на обрыв со звуковым сигналом (порог сопротивления 80 Ом).
- Выход сигнала уровня MOS с частотами: 1 Гц — 10 кГц (13 шагов).
- Режим экономии энергопотребления.
- Режим «DATA HOLD» (сохранение данных в памяти).
- Сохранение максимального MAX и минимального MIN значений измеряемого параметра.
- Память на 10 значений.
- Индикация разряда батареи.



Рис. 1.46. Органы управления мультиметром

- Размеры: 197×89×37 мм.
- Вес: 360 г.

Приборы характеризуется разумным выбором погрешностей и диапазонов измерения различных параметров. Мультиметр М-3890DT обеспечивает измерение истинных среднеквадратических значений меняющихся напряжений и токов различной формы (режим True RMS). Диапазон измерения токов расширен до 20 А (большинство мультиметров измеряют токи до 10 А). Интересна возможность использования мультиметра в качестве генератора тестовых прямоугольных импульсов с частотами: 1, 5, 10, 50, 60, 100, 400, 500 Гц и 1, 2, 4, 5 и 10 кГц. Даже на частоте 10 кГц форма тестовых импульсов весьма близка к прямоугольной — см. рис. 1.47. Это позволяет использовать мультиметр для коррекции переходных характеристик компенсированных осциллографических пробников и испытания различных электронных устройств.

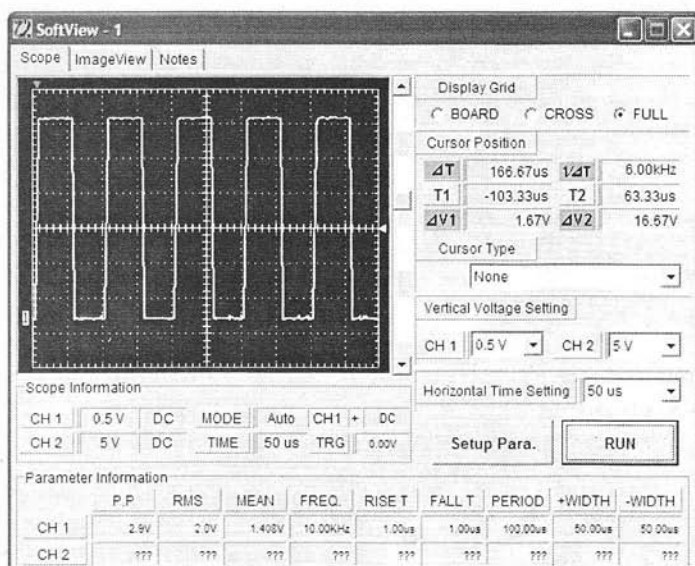


Рис. 1.47. Осциллограмма тестового сигнала на частоте 10 кГц (получены с помощью подключенного к компьютеру цифрового 250 МГц осциллографа DS-1250 фирмы EZ)

1.4.12. Работа USB-мультиметров с персональным компьютером

При подключении приборов к настольному или мобильному компьютеру мультиметр распознается как USB-устройство. На гибком диске, входящем в комплект поставки мультиметров имеется программа USB-View. Ее инсталляция самая обычная. Программа обеспечивает управление мультиметром путем его запуска через заданные интервалы времени, ввод в компьютер данных измерений, контроль за ними на экране компьютера, подготовку отчета по серии измерений и представление их в виде графика.

На рис. 1.48 представлено окно программы USB-View в режиме измерения меняющегося во времени переменного напряжения. В левой части окна строится таблица результатов измерений, в правой — график изменения напряжения во

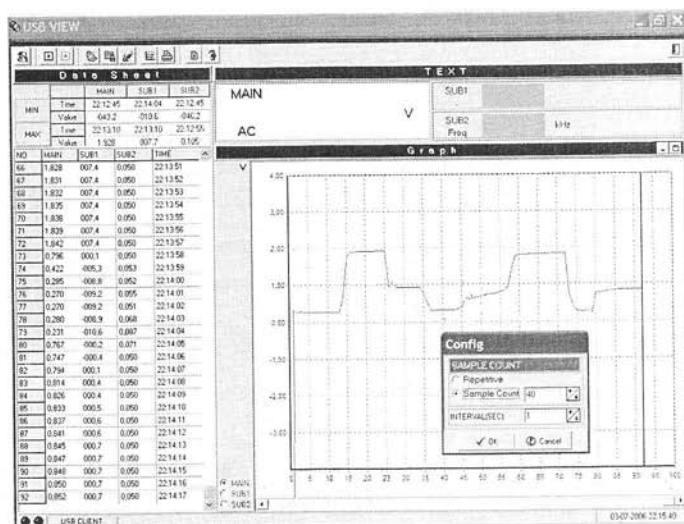


Рис. 1.48. Окно программы USB-View в режиме измерения меняющегося переменного напряжения

времени (показания основного дисплея). Кроме того, в таблицу заносятся показания вспомогательных дисплеев SUB1 и SUB2, если они используются. Текущее положение на графике отмечается жирной вертикальной чертой. Под графиком показано окно установки режима серии измерений (одиночной или периодической) и время между отсчетами (1 с по умолчанию).

Запуск, остановка, запись данных измерений в файл, считывание их из файла, распечатка принтером и другие операции осуществляются с помощью кнопок панели быстрого управления. Работа с этой панелью вполне очевидна.

Как нетрудно заметить, мультиметр с программой USB View обеспечивает построение временной зависимости меняющегося напряжения и позволяет в целом ряде случаев заменить низкочастотный осциллограф. Сами мультиметры способны делать до 2—3 измерений в секунду, но программа задает минимальный интервал между измерениями в 1 с. Это достаточно для исследования инерционных процессов, например контроля пускового тока электродвигателей, изменения температуры в термостате и т. д. Для регистрации более быстрых процессов следует применять электронные осциллографы (см. пример на рис. 1.47).

Программа по завершении измерений позволяет построить и при необходимости распечатать на принтере отчет. Окно с отчетом представлено на рис. 1.49. В отчет входят данные итоговых вычислений и график построенной временной зависимости.

Применение мультиметров М-3890D и М-3890DT с USB-интерфейсом позволяет автоматизировать многие виды измерений. Однако следует помнить, что данные мультиметры предназначены для обычных условий измерений. Их нельзя использовать в качестве промышленных измерительных приборов. Диапазон их рабочих температур всего от 0 до 40 °С, диапазон температур хранения от -10 до +50 °С. Заданная погрешность гарантируется при температуре 23 ± 5 °С. Из недостатков приборов можно отметить тусклую переднюю панель и не слишком контрастный дисплей — без хорошего освещения считывать его показали не очень комфортно.

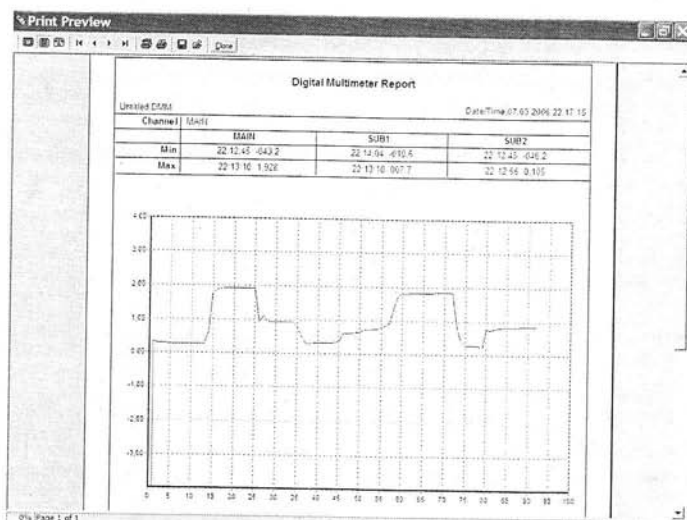


Рис. 1.49. Окно с отчетом по результатам серии измерений

1.5. Цифровые частотометры

1.5.1. Принципы построения цифровых частотометров

Измерение частоты важная задача в проведении измерений. Она решается двумя основными методами:

- преобразованием частоты в постоянное напряжение, измеряемое стрелочным измерителем или цифровым вольтметром;
- подсчетом цифровым счетчиком числа периодов сигнала за эталонный промежуток времени, например 1 с (или 0,1 либо 10 с, в зависимости от точности измерений).

Первый способ широко применялся в период доминирования аналоговых измерительных приборов. Иногда он используется в цифровых мультиметрах при невысоких требованиях к точности измерения частоты (погрешность порядка 0,1—1%). При высоких требованиях к точности измерения частоты почти всегда используется второй метод. Он позволяет также легко реализовать и другие временные измерения, например длительности импульсов, периода сигналов и др.

Цифровые частотометры (приборы для измерения частоты с цифровым отсчетом) часто встраиваются в многофункциональные приборы, такие как мультиметры, функциональные генераторы, комбинированные приборы и т. д. Ниже мы рассмотрим характерные типы сравнительно дешевых цифровых частотометров, доступных как для бюджетных лабораторий, так и для радиолюбителей.

1.5.2. Цифровые частотометры АКТАКОМ серии АСН

Ныне цифровые частотометры выпускают многие фирмы. Различными моделями их, в том числе советского производства, торгуют многие организации. Однако приборов, измеряющих частоту в широких пределах и достаточно дешевых очень немного. Мы рассмотрим такие «бюджетные» модели цифровых частотометров.

Одним из последних предложений российскому рынку от АКТАКОМ стали три новых частотомера: АСН-2801, АСН-3001 и АСН-3002. Главной отличительной особенностью новинок являются их, буквально, «карманные» размеры. Конструктивно приборы выполнены в малогабаритном корпусе из штампованного алюминия с черным анодированным покрытием, и размеры приборов настолько миниатюрны, что они могут легко разместиться на ладони или даже в кармане рубашки! В то же время, несмотря на столь небольшие размеры, данные частотомеры имеют достойные технические характеристики.

Частотомеры АСН-2801, АСН-3001 и АСН-3002 позволяют проводить измерения частоты в диапазоне от 10 Гц до 3 ГГц с максимальным разрешением 0,1 Гц и погрешностью порядка 10^{-5} %. При этом максимальная чувствительность на частоте 100 МГц составляет всего 0,8 мВ (для АСН-3001 и АСН-3002), что является очень неплохим показателем для частотомеров данного ценового сегмента. Рабочие температуры эксплуатации находятся в пределах от 0 °С до +50 °С при относительной влажности не более 90 % и давлении от 495 до 795 мм рт. ст.

Питание приборов осуществляется от аккумуляторных батарей, которых хватает на 6 часов непрерывной работы, или через сетевой адаптер, который выполняет еще и функцию зарядного устройства.

Помимо малых габаритных размеров и веса к преимуществам этих частотомеров можно отнести возможность беспроводного измерения частоты радиопередающего устройства — например, сотового телефона (для АСН-2801) — с помощью телескопической антенны. Высокий уровень чувствительности частотомеров и телескопическая антенна позволяют получить максимальную дальность при поиске источников излучения. Это значительно упрощает процесс измерения частоты при проведении разного рода инженерных и исследовательских работ в «полевых» условиях.

В этих условиях измерение параметров сигнала возможно на следующих расстояниях до передатчика:

- беспроводной телефон — до 0,3 метров;
- сотовый телефон — от 3 до 20 метров (только для АСН-2801);
- СВ-источник — от 2 до 8 метров;
- КВ/УКВ-источник — от 3 до 30 метров.



Рис. 1.50. Универсальные цифровые частотомеры АСН-2801, АСН-3001 и АСН-3002

Отображение результатов измерений все три модели осуществляют на жидкокристаллические индикаторы: 10-разрядный у АСН-3001 и АСН-3002 и 7-разрядный у АСН-2801. Для отображения уровня входного сигнала в нижней части индикатора имеется 16-сегментная графическая шкала, которая послужит хорошим подспорьем при осуществлении поиска источника радиосигнала. АСН-3002 имеет еще и функцию подсветки ЖК-дисплея.

Следует упомянуть и еще одну бюджетную модель частотомера — АСН-2500, обеспечивающую измерения частоты и периода сигнала в диапазоне от 10 Гц до 2,5 ГГц. Чувствительность при измерении частоты от 50 мВ до 120 мВ.

Небольшое число ручных частотомеров связано с тем, что функции измерения частоты ныне есть у многих мультиметров. Правда, диапазон измеряемых частот у большинства мультиметров ограничен частотами около 1 МГц и даже меньше. Однако в последнее время стали появляться мультиметры с достаточно большими измеряемыми частотами, например мультиметр UT-70В измеряет частоты в диапазонах 4, 40, 400 кГц и 4, 40 и даже 400 МГц с погрешностью 0.1%. Высокоточные измерения частоты (с погрешностью 0.005%±1) обеспечивают некоторые мультиметры фирмы FLUKE, например, FLUKE -83-3 (до 199,99 кГц), FLUKE-87-3 (до 199,99 кГц), FLUKE-187/189 (до 999,99 МГц) и др.

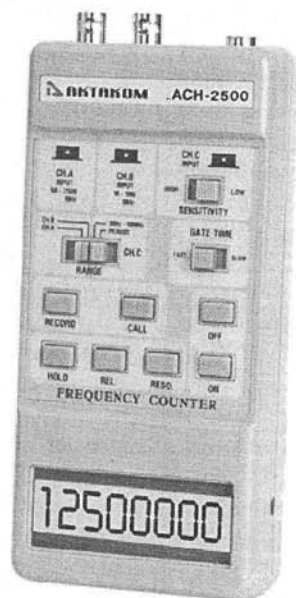


Рис. 1.51. Частотомер АСН-2500

1.6. Элементная база современных мультиметров

1.6.1. Микросхемы АЦП с цифровыми индикаторами

В принципе, мультиметры можно строить на стандартных интегральных операционных усилителях, имеющих большой коэффициент усиления и малый температурный дрейф. Они образуют элементную базу мультиметров. Промышленность, в том числе и наша, выпускает множество таких изделий. Данные о них можно найти в справочниках по интегральным микросхемам и в каталогах фирм, поставляющих такие изделия на наш рынок.

Однако массовое производство цифровых мультиметров потребовало разработки специализированных микросхем для реализации однокристальных приборов. Ведущие производители интегральных микросхем, например Analog Devices и MAXIM выпускают множество таких микросхем, на основе которых возможно построение высокоточных и дешевых мультиметров.

На рис. 1.52 представлено расположение выводов микросхем ICL7106/7107 предназначенных для построения простых мультиметров с дисплеем, имеющим разрядность 3 1/2. Это полностью заверченный АЦП для преобразования постоянных напряжений ± 100 мВ или ± 1 В в цифровой код, который отображается в виде цифр (результатов измерений) на подключаемом к микросхеме жидкокристаллическом дисплее.

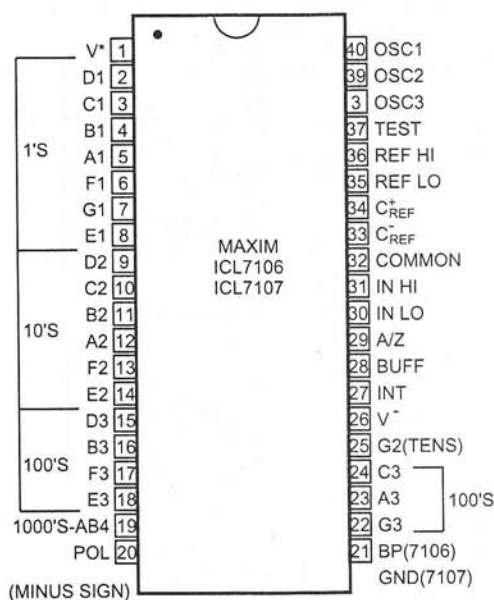


Рис. 1.52. Назначение выводов микросхем ICL7106/7107 для построения мультиметров с разрядностью 3 1/2

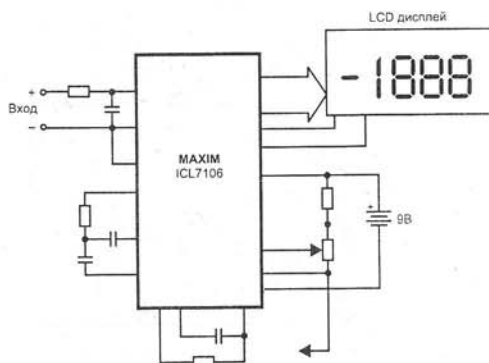


Рис. 1.53. Упрощенная схема включения микросхем ICL7106

На рис. 1.53 показана упрощенная схема включения микросхемы ICL7106. По существу это однопределный цифровой вольтметр, способный измерять напряжение на пределе ± 0.1 или ± 1 В с типовой погрешностью 0.2% и максимальной 1%. Микросхема работает в диапазоне температур от 0 до $+70^\circ\text{C}$ при очень малом уровне шума и нестабильности.

Микросхемы ICL7116 предназначены для построения мультиметров с расширенными возможностями, в частности с режимом запоминания результатов вычислений. Выпускаются также микросхемы для построения мультиметров с разрядностью дисплея 4 1/4, 4 1/2 и 4 3/4, например, ICL7129A /MAX1729. Разумеется, для построения современного многофункционального мультиметра даже таких микросхем недостаточно. Нужна и так называемая «рассыпуха»: прецизионные делители напряжения и шунты, переключатели пределов измерения и измеряемых параметров, входные терминалы, преобразователи различных величин в постоянное напряжение и т. д. Все это вместе взятое и составляет начинку современных мультиметров.

1.6.2. Микросхемы преобразователей True RMS в постоянное напряжение

Как уже отмечалось, уже давно актуальной является проблема измерения истинных среднеквадратических значений переменных напряжений. Долгое время она решалась применением сложных преобразователей переменного напряжения в постоянное на основе термических преобразователей, которые было довольно сложно применять в мультиметрах. Однако с разработкой специальных микросхем преобразователей True RMS-to-DC эта проблема была успешно решена.

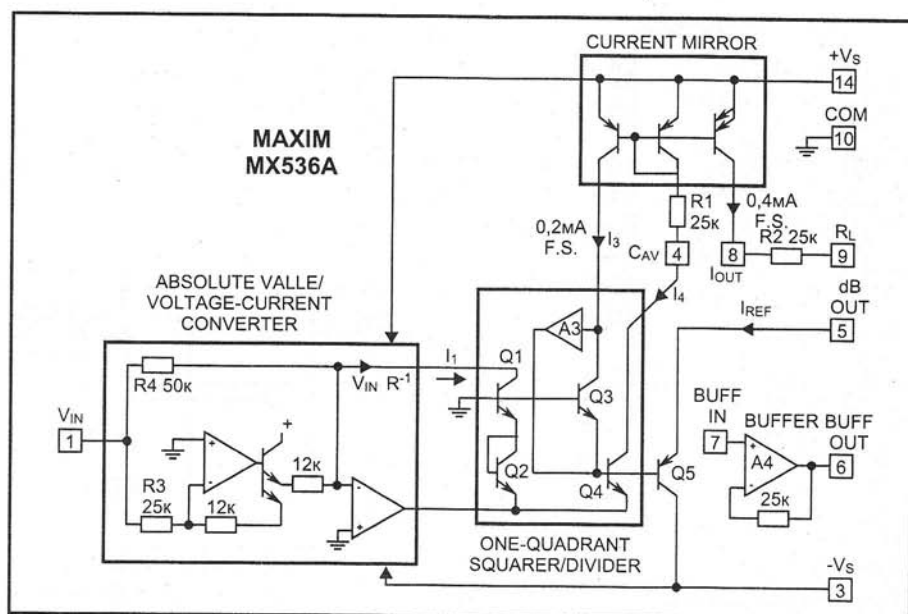


Рис. 1.54. Состав микросхемы преобразователя True RMS-to-DC MX536A/536 фирмы MAXIM

Довольно широко для этих целей используются микросхемы MX536A/536 фирмы MAXIM. В упрощенном виде состав этой микросхемы представлен на рис. 1.54. Выпускается свыше 10 вариантов этой микросхемы, рассчитанных на коммерческий диапазон температуры окружающей среды (от 0 до +70 °C) и вариант MX536ASD на промышленный и военный диапазон температур (от -55 °C до +125 °C).

Микросхемы содержат преобразователь абсолютного значения переменного напряжения в постоянное напряжение, вычислительные блоки для вычисления квадратного корня и истинного среднеквадратического значения, а также буферный каскад. Для питания преобразователей имеется многоканальный источник стабильных токов.

Микросхемы MX536 обеспечивают преобразование в диапазоне частот переменного напряжения до 1 В в диапазоне частот до 2 МГц, а MS536A переменного напряжения до 0.1 В в диапазоне частот до 1 МГц. Для сравнения отметим, что советский милливольтметр ВЗ-48 времен начала 80-х годов прошлого века обеспечивает такое преобразование в диапазоне частот до 50 МГц на нижнем пределе измерения 1 мВ. Заметим, что этот милливольтметр имеет преобразователь True RMS-to-DC с выходом на задней панели прибора. Но, этот милливольтметр имеет приличные (хотя и не очень большие) габариты и вес в 6 кг, тогда как микросхемы MX536A/536 имеют размер маленькой почтовой марки и вес менее грамма. Это открыло возможности создания миниатюрных и легких мультиметров с лейблом «True RMS».

Распайка выводов в наиболее распространенном типе корпуса и основные схемы включения микросхемы представлены на рис. 1.55. Динамический диапазон микросхемы MX536A составляет 60 дБ, а у микросхемы MX536 несколько меньше — 50 дБ. Обе микросхемы очень экономичны. Температурный диапазон мик-

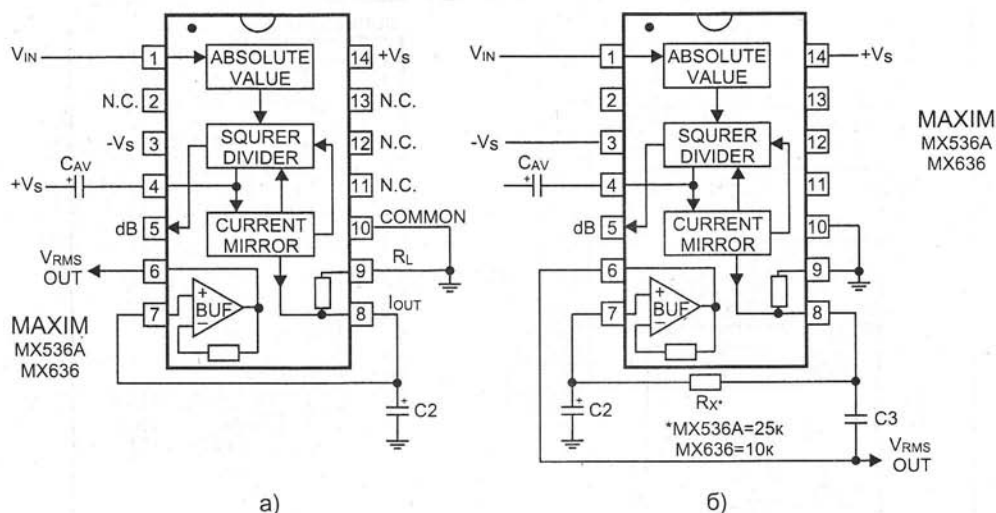


Рис. 1.55. Распайка выводов и основные схемы включения микросхем MAX536A/536: с однополюсным (а) и двухполюсным (б) выходным фильтром

росхем от 0 до $+70^{\circ}\text{C}$, но есть вариант (микросхема MS536AS) с температурным диапазоном от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

1.6.3. Примеры применения микросхем MAX536A/536

Полная схема преобразователя True RMS-to-DC для измерения децибел на основе микросхем MAXIM MX536A/536 представлена на рис. 1.56. В схему добавлен прецизионный источник опорного напряжения и усилитель на операционном усилителе.

На рис. 1.57 представлены зависимости выходного сигнала (дБ) от входного для реализации преобразователя на микросхемах MAXIM MX536A (а) и MX536 (б). На них проставлены (пунктирными линиями) зоны погрешности. Нетрудно заметить, что погрешность менее 1% достигается при максимальных частотах в десятки кГц.

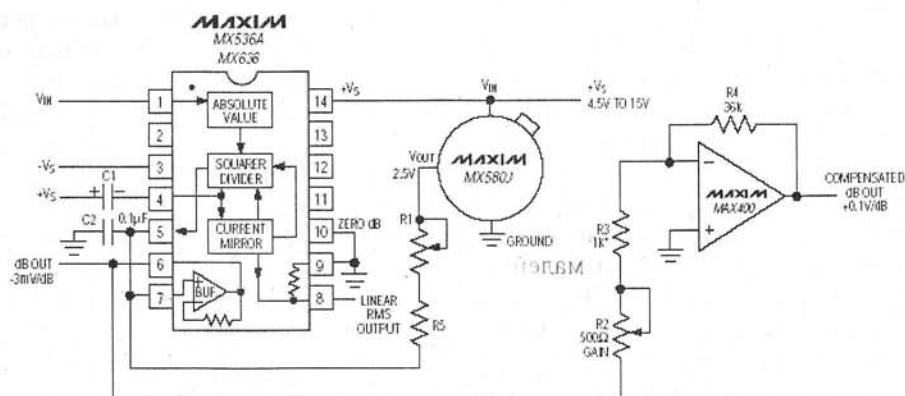


Рис. 1.56. Схема преобразователя True RMS-to-DC для измерения децибел на основе микросхем MAXIM MX536A/536

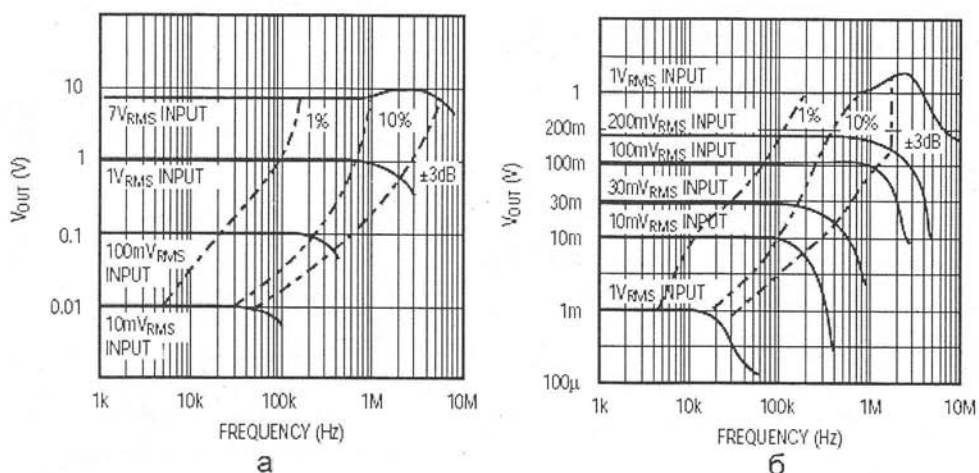


Рис. 1.57. Зависимости выходного сигнала (дБ) от входного для реализации преобразователя на микросхемах MAXIM MX536A (а) и MX536 (б)

1.6.4. Пример построения вольтметра на основе микросхем MX536A/536

На рис. 1.58 показана рекомендуемая разработчиком типовая схема цифрового вольтметра истинных среднеквадратических значений переменного напряжения с пределами измерений 0,2, 2, 20 и 200 В. Схема довольно проста и выполнена всего на трех интегральных микросхемах фирмы MAXIM. Она является основой мультиметров, реализующих метод True RMS.

Очевидно, что дальнейшие разработки преобразователей True RMS-to-DC и мультиметров с ними будут направлены на расширение диапазона частот, уменьшение погрешности измерений и повышение динамического диапазона измерений.

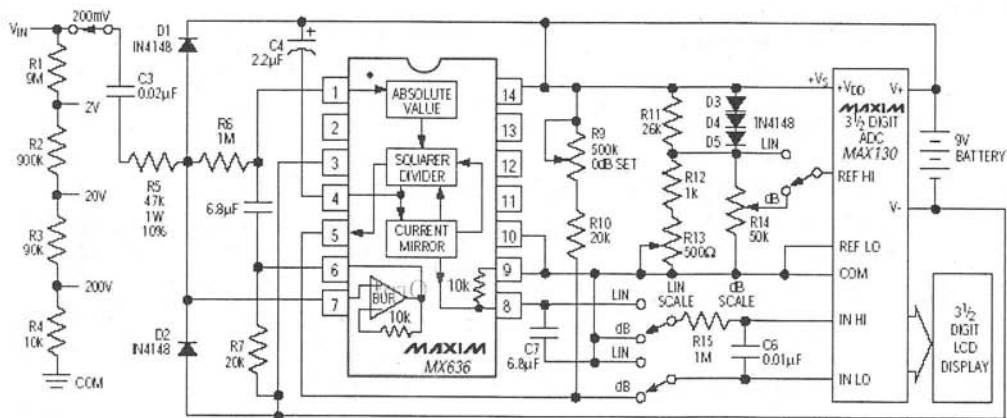


Рис. 1.58. Типовая схема цифрового вольтметра истинных среднеквадратических значений переменного напряжения с пределами измерений 0,2; 2; 20 и 200 В

1.6.5. Микросхема AD693 усилитель сигнала температурного датчика

Многие современные мультиметры имеют средства для измерения температуры. В большинстве случаев они реализованы на основе резисторного датчика температуры на основе проволоочного резистора. Это позволяет вести измерение температуры в очень широком диапазоне, например, от -60 до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и даже выше.

Основой для построения измерителей температуры может служить микросхема AD693 фирмы Analog Devices. Схема имеет калиброванный диапазон измерений от 30 до 60 мВ и может использоваться для усиления сигналов со стандартного резистивного температурного датчика с номинальным сопротивлением 100 Ом — рис. 1.59. Погрешность калибровки датчика $\pm 2\%$, максимальная полная некомпенсированная погрешность $\pm 0,5\%$ от верхнего предела шкалы измерений. Дрейф нуля при номинальном токе 4 мА не превышает $\pm 80\text{ мкА}$, коэффициент ослабления синфазной составляющей более 80 дБ, напряжение питания микросхемы от +12 до +36 В.

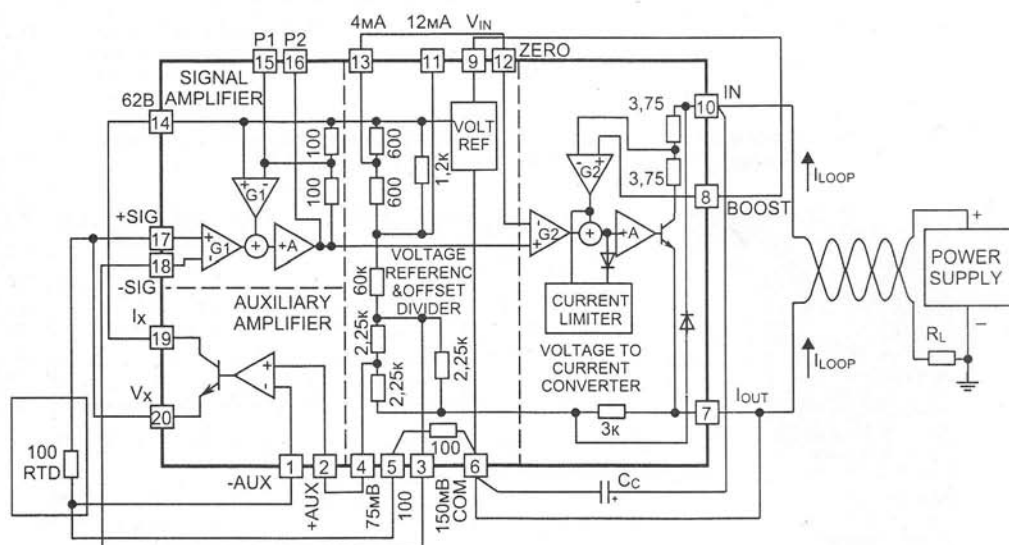


Рис. 1.59. Схема включения микросхемы AD693 фирмы Analog Devices для усиления сигнала с температурного датчика

1.6.6. Микросхемы интерфейсов RS-232

Как уже отмечалось, многие мультиметры выпускаются с интерфейсом RS-232, обеспечивающим их подключение к компьютеру. Для создания такого интерфейса ныне выпускаются специальные микросхемы. Ограничимся приведением данных по таким микросхемам фирмы Analog Devices, лидирующей (наряду с фирмой MAXIM) на рынке таких устройств. На рис. 1.60 представлены функциональные схемы и расположение выводов микросхем интерфейсов последовательного порта RS-232, а на рис. 1.61 — данные о характеристиках таких микросхем.

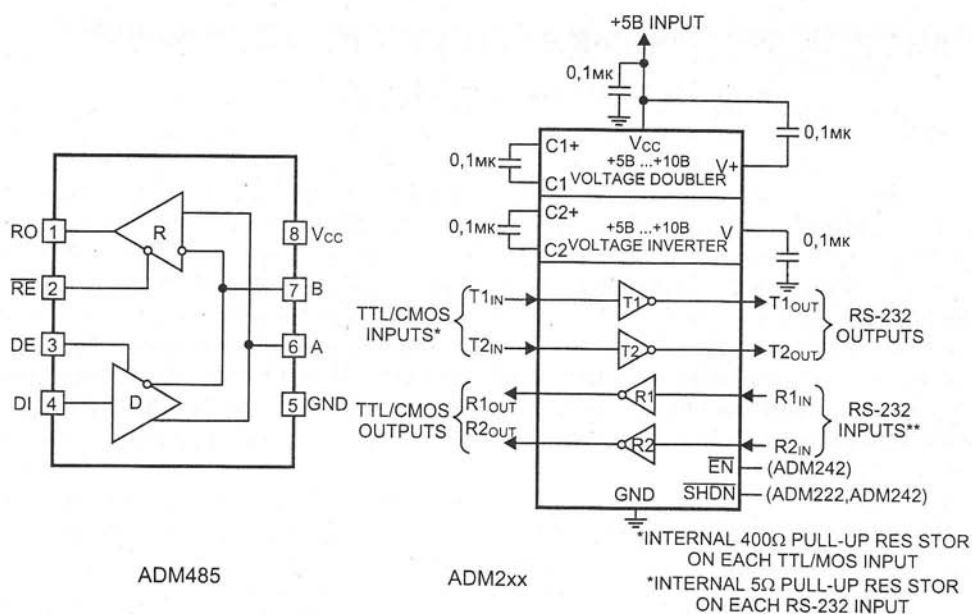


Рис. 1.60. Функциональные схемы и расположение выводов микросхем интерфейсов последовательного порта RS-232

именование	ADM202	ADM202E	ADM208E	ADM211E	ADM232A	ADM232L	ADM485
Протокол	RS-232	RS-232	RS-232 v.28	RS-232 v.28	RS-232 v.28	RS-232 v.28	RS-485
Скор. передачи данных, кБит/с	120	230	230	230	200	120	5000
Количество приемников	2	2	4	4	2	2	1
Количество передатчиков	2	2	4	4	2	2	1
Напряжение питания, В	5	5	5	5	5	5	5
Ток потребления без нагрузки, мА	2	3	6	6	8	6	
ESD/EM		+	+	+			
Режим Shutdown				+			
К-во выводов	16	16	20	28	16	16	8

Рис. 1.61. Данные о характеристиках микросхем интерфейсов последовательного порта RS-232

Глава 2. Источники напряжений, токов и тестовых сигналов

В практике измерений широко используются источники постоянного и переменного напряжения и тока (в том числе лабораторные), генераторы стандартных сигналов низких и высоких частот, а также импульсные генераторы самого различного назначения. К сожалению, выпуск достаточно простых и массовых генераторов у нас практически прекращен, а сложные генераторы на основе цифровых синтезаторов частоты и микропроцессорного управления настолько дороги, что к массовым приборам их никак не отнесешь. В итоге нередко в исследовательских и в любительских разработках приходится создавать свои достаточно простые генераторы синусоидальных и импульсных сигналов. Поэтому в этой главе описаны как измерительные генераторы, выпускаемые нашей и зарубежной промышленностью, так и такие устройства на массовых полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах, которые специалисты и радиолюбители могут легко собрать.

2.1. Источники постоянных напряжений и токов

2.1.1. Кремниевые стабилитроны как источники опорного напряжения

Для наладки и питания многих электронных устройств используются *источники постоянного напряжения*, т. е. напряжения не меняющегося во времени, но иногда регулируемого. Можно выделить три группы таких источников:

- маломощные высокостабильные (опорные) источники постоянного напряжения для калибровки, проверки и создания электронных измерителей напряжения (цифровых вольтметров, мультиметров и т. д.);
- стабилизаторы и регуляторы постоянного напряжения, используемые в электронных и измерительных приборах;
- универсальные лабораторные источники питания с регулируемыми напряжениями, предназначенные для электропитания испытуемых устройств.

В этом подразделе описаны источники постоянного напряжения первой группы. Ранее в качестве таких источников применялись нормальные гальванические элементы и другие электрохимические источники тока. Эти устройства, хотя и дают высокую точность и стабильность напряжения, но имеют большие габариты и массу, не допускают переверачивания и требуют слишком бережного ухода и обращения. Для встраивания в портативные приборы они непригодны.

С появлением полупроводниковых приборов они были вытеснены *кремниевыми стабилитронами*, работа которых основана на явлении пробоя *p-n*-перехода. В отличие от электрохимических элементов — *первичных источников напряжения*, кремниевые стабилитроны являются *вторичными источниками стабильного напряжения*, достигаемого ограничением входного напряжения. Ныне выпускается обширная номенклатура кремниевых стабилитронов на напряжения от 3 В до 100 В. Основная схема включения кремниевого стабилитрона показана на рис. 2.1,а.

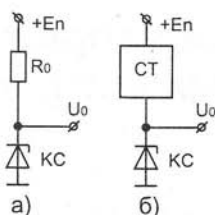


Рис. 2.1. Схемы включения стабилитрона: основная (а) и со стабилизатором тока СТ (б)

В схеме рис. 2.1, а резистор R_0 ограничивает начальный ток стабилитрона на уровне $I_0 = (E - U_0)/R_0$. Выбор начального тока противоречив. Нельзя брать его слишком малым — это ведет к возрастанию дифференциального сопротивления стабилитрона и росту шумов лавинного пробоя (на этом построены генераторы шумового напряжения, например наши 2Г401 или КГ401). При больших токах стабилитрон заметно греется и это ведет к температурному дрейфу его напряжения даже при стабильной температуре окружающей среды.

При использовании схемы рис. 2.1, а в качестве источника опорного напряжения ток обычного стабилитрона надо выбирать от 5 до 15 мА для стабилитронов малой мощности. Коэффициент стабилизации напряжения $K_U \approx R_0/R_{cl}$, где $R_{cl} = du/di$ — дифференциальное сопротивление стабилитрона (единицы-десятки Ом), резко возрастает при замене R_0 на токостабилизирующий двухполюсник (рис. 2.1, б). Кроме того, можно использовать последовательное (каскадное) включение стабилизаторов рис. 2.1, а. Есть стабилитроны как с меньшими токами, так и большими, а также высоковольтные стабилитроны.

Ограниченное применение нашли *стабисторы* — низковольтные стабилитроны на основе включенных в прямом направлении р-п-переходов. У них наблюдается заметное линейное уменьшение напряжения с ростом температуры (примерно на 2,5 мВ/°С). До сих пор применяются отечественные стабисторы Д219С, Д220С и Д223С с напряжением 1,0—1,5 В при токе 50 мА.

Из промышленно выпускаемых кремниевых стабилитронов только небольшая часть может служить источниками опорного напряжения. Это стабилитроны с напряжением стабилизации от 6 до 8 В. Связано это с тем, что на нижней границе указанного диапазона напряжений наблюдаются одновременно лавинный и туннельный механизмы пробоя, которые дают разные знаки температурного изменения напряжения пробоя. Взаимно компенсируясь, они дают близкое к нулю значение температурного дрейфа.

Существуют также прецизионные стабилитроны, у которых для компенсации положительного температурного коэффициента напряжения (ТКН) лавинного диода используются от 1 до 3 прямо включенных диодов с отрицательным ТКН. Такие стабилитроны имеют типовое напряжение стабилизации от 7 до 12 В. К ним относятся, например, отечественные стабилитроны серий КС211 и Д818, имеющие ТКН от 0,005 до 0,02 %/°С в диапазоне температур от -55 до +100 °С. Еще лучшими параметрами обладают стабилитроны серии КС196 с напряжением стабилизации 9,6 В $\pm 5\%$ и ТКН до 0,0005 %/°С.

Специфика применения прецизионных стабилитронов хорошо известна. В отличие от обычных стабилитронов у них желательно точно поддерживать начальный ток через стабилитрон (рис. 2.1, б) и ограничить ток нагрузки. Хотя стабилитроны дают высокостабильное напряжение, его точная подгонка практически иск-

лючена, а разброс напряжения стабилизации значителен. Так что на роль первичного стандарта напряжения они не годятся.

2.1.2. Микросхемы источников опорного напряжения

Указанные недостатки кремниевых стабилитронов и стабилиторов привели к тому, что они используются в качестве источников высокостабильного напряжения только в сравнительно простых измерительных устройствах. Ныне наблюдается повсеместная замена их на много более совершенными источниками высокостабильного (*опорного*) напряжения на основе специализированных интегральных схем. Они выпускаются фирмами Analog Devices, MAXIM (Dallas Semiconductor) и др.

Интегральные источники опорного напряжения фирмы Analog Devices выпускаются в корпусе транзистора с интегральной схемой — рис. 2.2. Микросхема AD660JT имеет выходное напряжение 2.5 В с погрешностью 5 или 10 мВ, очень малыми шумами и малым температурным дрейфом. Она выпускается в корпусе TO-92 и рассчитана на коммерческий температурный диапазон.

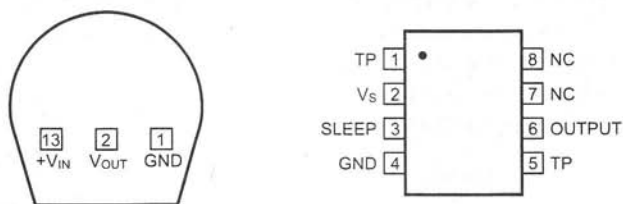


Рис. 2.2. Расположение выводов интегрального источника опорного напряжения AD660JT (а) и REF-192/195 (б)

Микросхемы REF-192/195 выпускаются в 8-выводном корпусе для микросхем P-DIP или S-SOIC. Они имеют напряжение стабилизации 2,5 или 5 В с погрешностью 2, 5 или 10 мВ. Фирма поставляет открытую техническую документацию с подробным описанием этих микросхем.

Интегральные схемы низковольтного опорного напряжения выпускает также фирма MAXIM (Dallas Semiconductor). На рис. 2.3 показаны основные схемы включения микросхем серии MAX606*.

Температурный дрейф выходного напряжения является важнейшим параметром источников опорного напряжения. На рис. 2.4 показаны типовые зависимости выходного напряжения микросхем MAX6062/6065 от °С. Они позволяют оценить оптимальный рабочий диапазон температуры для данного типа изделий.

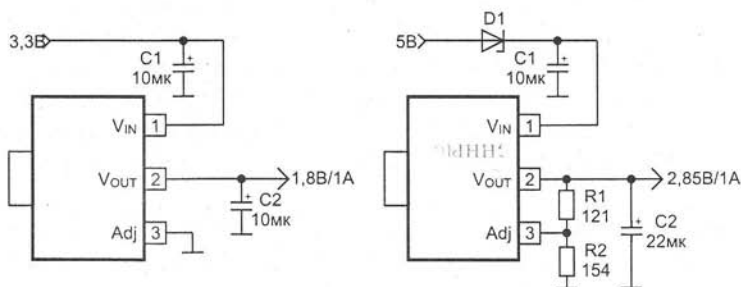


Рис. 2.3. Основные схемы включения источников опорного напряжения фирмы MAXIM (Dallas Semiconductor) MAX606*: нерегулируемого (а) и регулируемого (б)

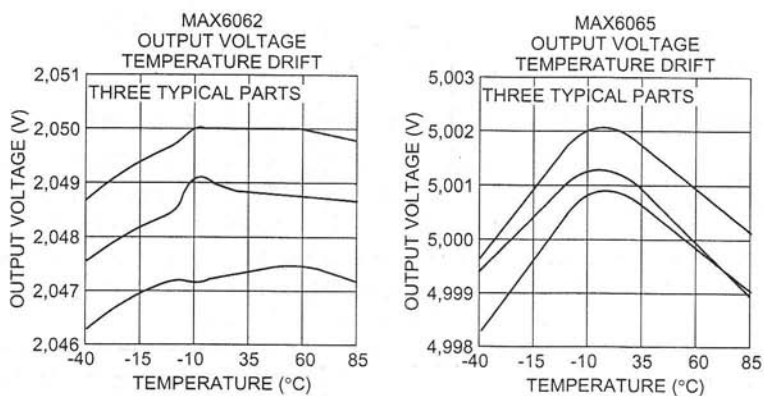


Рис. 2.4. Температурные зависимости выходного напряжения микросхем фирмы MAXIM (Dallas Semiconductor): MAX6062 (а) и MAX6065 (б)

Микросхемы имеют малый уровень шумов, что видно из осциллограмм, представленных на рис. 2.5. Естественным, что меньшим уровнем шума обладают более низковольтные микросхемы источников опорного напряжения. Для снижения уровня шумов на высоких частотах рекомендуется шунтировать выход качественным конденсатором большой емкости — десятки или сотни нФ.

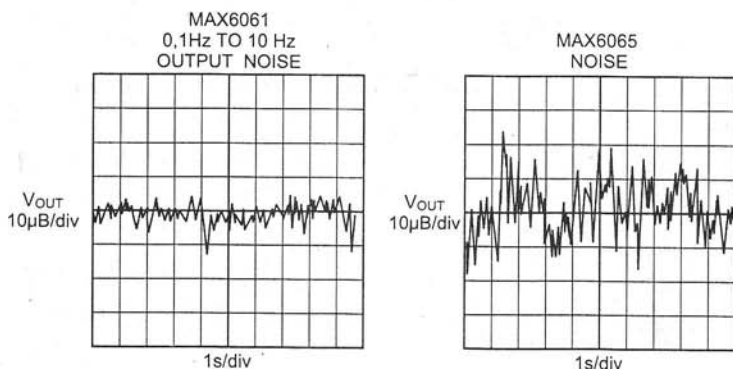


Рис. 2.5. Осциллограммы шумов микросхем источников опорного напряжения MAX6061 и MAX6065

Выпускаются также микросхемы источников регулируемого опорного напряжения REF01/02, позволяющие получать заметно более высокие напряжения — от 5 и 10 В с погрешностью не более $\pm 3\%$ без подстройки. К таким микросхемам относятся микросхемы REF01/02. Они выпускаются в различных корпусах — рис. 2.6.

Основная схема включения показана на рис. 2.7. Фактически это стандартная схема включения маломощного стабилизатора напряжения. С помощью переменного резистора R_p достигается регулировка и установка точного уровня выходного напряжения.

Температурный дрейф выходного напряжения практически линейный и представлен на рис. 2.8. Это открывает возможности сравнительно простой его компенсации.

На рис. 2.9 представлено несколько вариантов применения данных микросхем. Схема рис. 2.9,а является основным вариантом. На схеме рис. 2.9,б показано по-

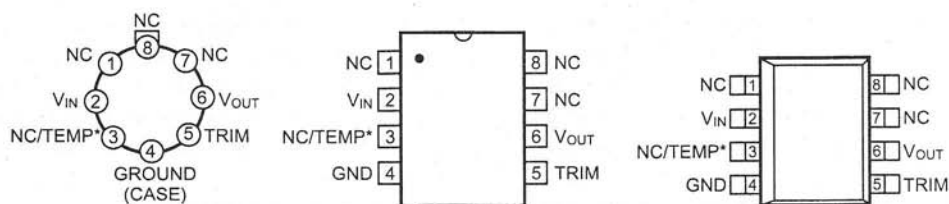


Рис. 2.6. Назначение выводов микросхем REF01/02 фирмы MAXIM, выполненных в различных корпусах

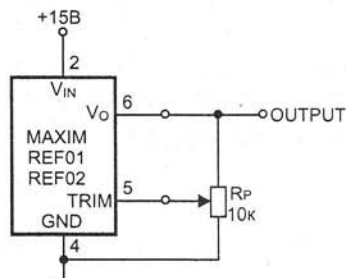


Рис. 2.7. Основная схема включения микросхем источников регулируемого опорного напряжения REF01/02

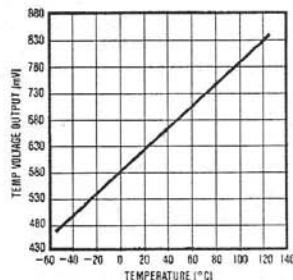


Рис. 2.8. Температурный дрейф выходного напряжения микросхемы REF02

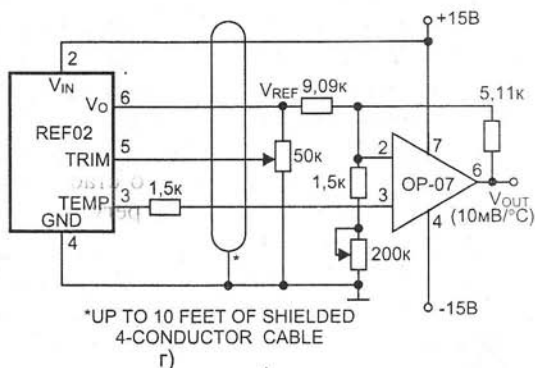
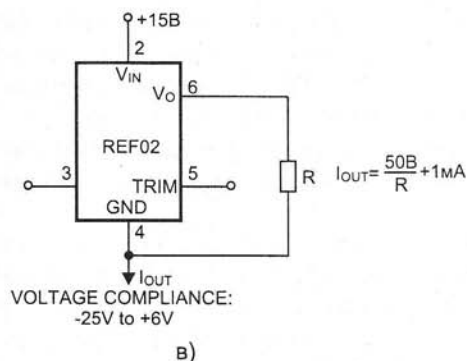
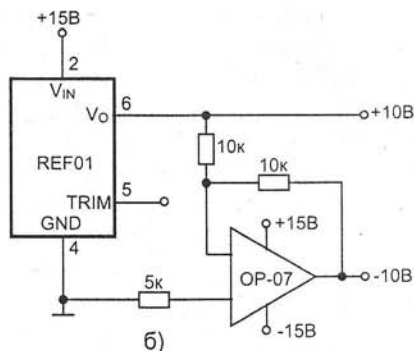
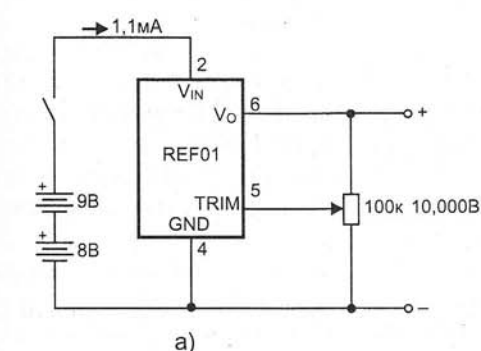


Рис. 2.9. Некоторые схемы применения микросхем REF01/02

строение источника с положительным и отрицательным (инвертированным) выходными напряжениями. Построение источника стабильного тока показано на рис. 2.9,в. Наконец, на рис. 2.9,г показана типичная схема прецизионного преобразователя температуры в постоянное напряжение. Подобные преобразователи часто используются в мультиметрах, имеющих возможность измерения температуры.

2.1.3. Микросхемы последовательных стабилизаторов

Узлы измерительных приборов и испытываемой аппаратуры требуют, как правило, питания от высокостабильных источников питающего напряжения. Их создают с помощью микросхем стабилизаторов постоянного напряжения. Такие микросхемы делятся на три основных класса:

- последовательные стабилизаторы напряжения;
- параллельные стабилизаторы напряжения;
- импульсные преобразователи и стабилизаторы напряжения.

Большинство микросхем относится к первому типу и их работа основана на хорошо известной схеме *последовательного стабилизатора напряжения*, в которой в качестве усилителя согласования применяется интегральный операционный усилитель. Это позволяет получить *коэффициент стабилизации*

$$K_{\text{ст}} = (\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}) / (\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}})$$

в размах порядка многих сотен и даже тысяч. У таких стабилизаторов (например, $\mu\text{A}7800$ и LM320) обычно $U_{\text{вх}} > \Delta U_{\text{вых}}$, поскольку часть напряжения падает на регулирующем элементе — мощном биполярном или полевом транзисторе.

Микросхемы стабилизаторов постоянного напряжения небольшой мощности (мы рассматриваем только такие) выпускает много фирм. У нас большую известность получили отечественные микросхемы КРЕН*, выполненные в трехвыводном транзисторном корпусе. Есть трехвыводные микросхемы стабилизаторов для отрицательных напряжений (например, $\mu\text{A}7900$ и LM340) с инвертированием выходного напряжения и микросхемы стабилизаторов с плавающим потенциалом (LM317/337/338/350 и др.).

На рис. 2.10 представлено включение последовательного стабилизатора -микросхемы с нерегулируемым выходом и малым падением напряжения на регулирующем элементе. Оно составляет от 0,4 до 1,3 В в зависимости от выходного напряжения (от 1,8 до 3,3 В).

Фирма International Rectifier (IR) выпускает варианты серии микросхем IRU для пяти типов корпусов, в том числе миниатюрных с короткими выводами для запайки на печатные платы. Микросхемы IRU1030/1015/1050-33CT, к примеру, выполнены в корпусе TO-223-3, характерном для транзисторов средней мощности.

Выпускается множество микросхем этой серии с регулируемым выходным напряжением и с плавающим потенциалом. Типовая схема включения их показана на рис. 2.11.

Фирма IR выпускает и многоканальные стабилизаторы напряжения. На рис. 2.12 показана схема включения микросхем IRU1237SCCP, IRU1261CM и IRU1261CP с фиксированными выходными напряжениями.

Микросхемы IRU1260CM/CP могут использоваться для построения схем с регулируемым (или устанавливаемым делителем) напряжением. Типовая схема их включения показана на рис. 2.13. Эти микросхемы хорошо приспособлены для

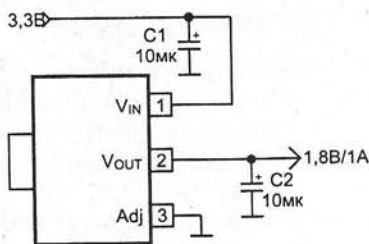


Рис. 2.10. Схема включения микросхемы серии IRU для получения фиксированного выходного напряжения

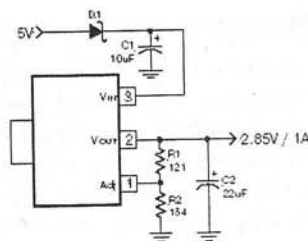


Рис. 2.11 Схема включения микросхемы серии IRU для получения изменяемого выходного напряжения

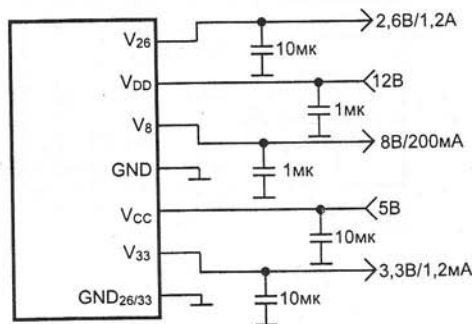


Рис. 2.12 Схема включения микросхем IRU1237SCCP, IRU1261CM и IRU1261CP с фиксированными выходными напряжениями

стабилизации малых напряжений, которые и применяются в современных электронных измерительных приборах с батарейным питанием.

Недостатками последовательных стабилизаторов является опасность короткого замыкания выхода. Без специальной защиты (встроенной во многие микросхемы) это может вызвать появление чрезмерно больших токов и выход микросхемы из строя. Многие микросхемы на такой случай оснащены средствами защиты от короткого замыкания.

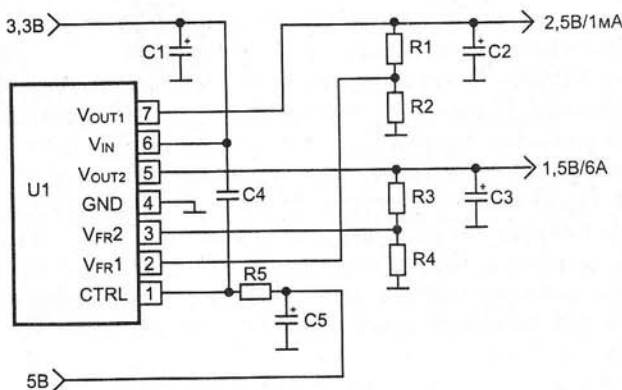


Рис. 2.13. Схема включения микросхем IRU1237SCCP, IRU1261CM и IRU1261CP с устанавливаемыми делителями выходными напряжениями

2.1.4. Микросхемы параллельных стабилизаторов

Параллельные стабилизаторы основаны на шунтировании регулирующим элементом нагрузки, подключенной к питающему напряжению через токоограничивающий резистор. При повышении напряжения на нагрузке компаратор стабилизатора открывает сильнее транзистор шунтирующий нагрузку и напряжение на ней падает до заданной величины.

Такие стабилизаторы не боятся короткого замыкания нагрузки и могут использоваться как аналоги обычного стабилитрона (рис. 2.1,а), лишенные многих недостатков последнего. Известность получили микросхемы параллельных стабилизаторов AP432 фирмы Analog Devices, Inc. и K1156EP1T (корпус SOT-89 для поверхностного монтажа) и K1156EP1П (корпус TO-92 (КТ-26) для объемного монтажа).

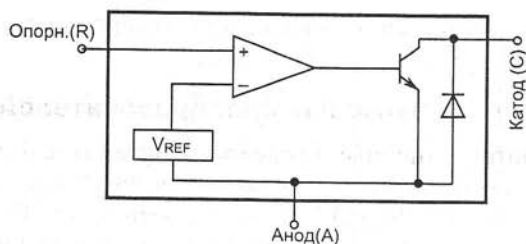


Рис. 2.14. Функциональная схема микросхемы K1156EP1T/П — аналога стабилитрона

Эти микросхемы имеют встроенный источник опорного напряжения $V_{REF} = 1,24 \text{ В} \pm 1\%$, операционный усилитель сравнения и параллельный регулирующий транзистор. Если вход R соединен с катодом, то получается двухполюсник, подобный по функциональному назначению стабилитрону с неизменным напряжением стабилизации и очень малым динамическим выходным сопротивлением — от 0,2 до 0,5 Ом. Если подключить вход R через делитель из двух резисторов, то можно менять напряжение стабилизации в пределах от V_{REF} до 20 В. Допустимая рассеиваемая мощность микросхемы около 0,8 Вт, так что ее применение ограничено маломощными устройствами.

2.1.5. Супервизоры питания

Работа системы электропитания существенно зависит от напряжения питания первичной батареи. Если оно понижается ниже определенного уровня, необходимо вывести на экран дисплея предупреждающее сообщение или значок об этом. Для получения сигнала о снижении напряжения служат специальные микросхемы — супервизоры питания. На рис. 2.15 представлена функциональная схема одной из таких микросхем — MC34064* (обозначение * различно для разных корпусов микросхемы). Прибор выпускается фирмой ON Semiconductor.

Микросхема фиксирует момент, когда напряжение питания падает ниже 5 В. При этом сигнал на выходе падает ниже 4,6 В (работоспособность самой микросхемы сохраняется даже при напряжении питания 1 В). Минимальный втекающий ток (входной ток подключенных к выходу ТТЛ-микросхем) не должен превышать 10 мА. Гистерезис срабатывания составляет 2 мВ. Есть варианты микросхемы для коммерческого и промышленного применения.

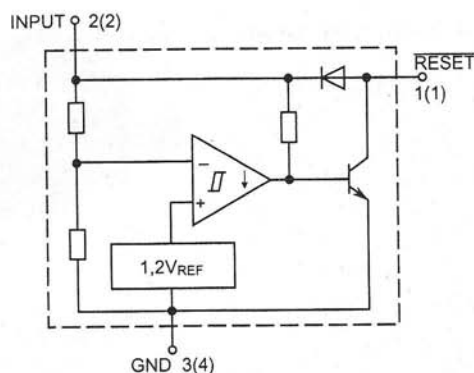


Рис. 2.15. Функциональная схема микросхемы супервизора питания MC34064*

2.1.6. Микросхемы импульсных преобразователей DC-DC

Основной недостаток линейных последовательных и параллельных стабилизаторов напряжения заключается в низком коэффициенте полезного действия (КПД), который составляет 30—60%. Его повышение до 70—90% возможно при применении *ключевых* методов регулирования электроэнергии. При этом с помощью ключа входное постоянное напряжение превращается в импульсное напряжение достаточно высокой частоты. Оно может понижаться или повышаться с помощью трансформатора и после выпрямления использоваться в качестве выходного напряжения.

Для эффективного импульсного преобразования постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня служат *микросхемы преобразователей DC-DC*. Они делятся на однотактные (рис. 2.16,а) и двухтактные (рис. 2.16,б).

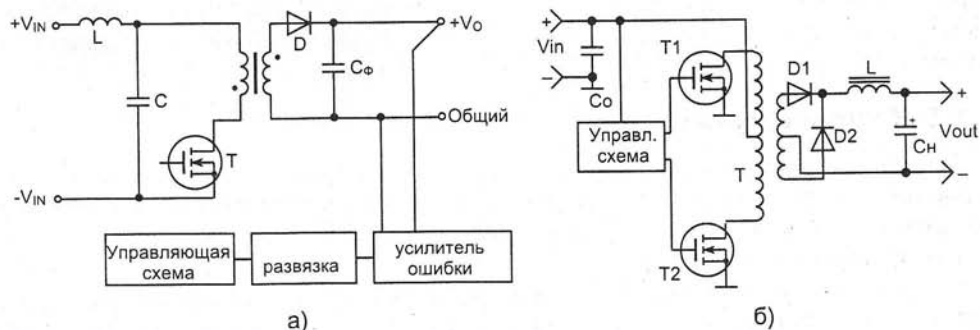


Рис. 2.16. Функциональные схемы однотактного (а) и двухтактного (б) преобразователей DC-DC

Однотактные преобразователи просты и строятся на одном мощном полевом транзисторе Т. Напряжение со входа преобразователя (см. рис. 2.16,а) подается через фильтр *LC*. При открытом транзисторе в индуктивности первичной обмотки трансформатора накапливается энергия, а при закрытом транзисторе она через вторичную обмотку и диод Д передается в накопительный конденсатор C_{Φ} . Выходное напряжение сравнивается с опорным напряжением и его разность после

усиления усилителем рассогласования используется для управления широтно-импульсным модулятором (ШИМ), импульсы которого подаются на затвор транзистора Т. Таким образом, преобразователь является замкнутой системой регулирования, стабилизирующей выходное напряжение V_{out} .

Требования к транзисторам значительно снижаются в *двухтактных преобразователях* (рис. 2.16,б). Кроме того, такая схема имеет больший КПД и обеспечивает меньшие пульсации выходного напряжения, происходящие с удвоенной частотой, поскольку применяется двухполупериодный выпрямитель на диодах Д1 и Д2.

Подобные преобразователи поставляют на рынок ряд фирм. На рис. 2.17 показаны преобразователи фирмы YCL, выполненные в герметичных пластмассовых корпусах, устанавливаемых на печатную плату. Фирма выпускает более трех десятков типов таких преобразователей, отличающихся номиналами входных и выходных напряжений и выходной мощности (единицы-десятки Вт). Они имеют нестабильность выходного напряжения менее 1% и один или несколько его выходов. Частоты преобразования лежат в пределах от 25 до 200 кГц.

Маломощные (от 3 до 8 и от 10 до 20 Вт) преобразователи DC-DC выпускает также фирма ARCH. Внешний вид ее изделий представлен на рис. 2.18. Преобразователи также выпускаются в пластмассовых корпусах. Входное напряжение преобразователей от 18 до 75 В, выходное напряжение 5 В при токе (в зависимости от типа) от 0.9 до 4 А.

Маломощные импульсные преобразователи DC-DC на российский рынок поставляет также фирма CHINFA Electronics. Внешний вид ее герметичных преобразователей в пластиковом корпусе представлен на рис. 2.19. Размеры корпуса 20,3×12,7×31,8 мм. Преобразователи работают на частоте 50 кГц и имеют КПД до 80%. Приборы имеют изолированный выход с напряжением изоляции 1500 В. Выходное напряжение преобразователей 5 В, ток 1,5 А. Выпускается несколько типов преобразователей с разными мощностями (до 3 и 12 Вт) и входными напряжениями, например 10—36 и 18—72 В.

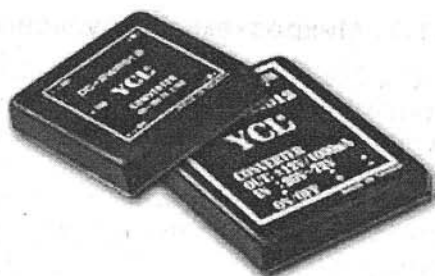


Рис. 2.17. Внешний вид преобразователей DC-DC фирмы YCL

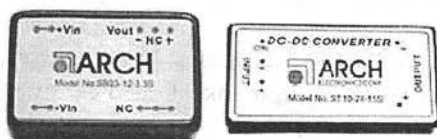


Рис. 2.18. Внешний вид преобразователей DC-DC фирмы ARCH

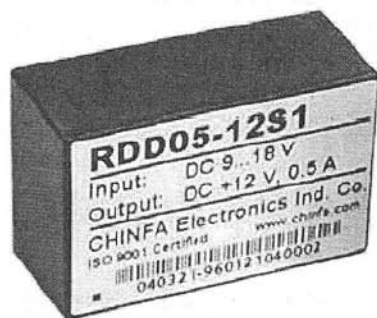


Рис. 2.19. Внешний вид преобразователей DC-DC фирмы CHINFA Electronics

2.1.7. Микросхемы импульсных преобразователей AC-DC

Для стационарных измерительных приборов *импульсный* способ регулирования электроэнергии дает (помимо повышения КПД) еще одно важное достоинство — он не требует применения весьма громоздких и тяжелых силовых низкочастотных трансформаторов. Однако при этом необходимо выпрямлять напряжение промышленной сети переменного тока (220 В, 50—60 Гц) и затем полученное напряжение постоянного тока с напряжением около 300 В подвергать импульсному преобразованию.

До недавнего времени построение таких преобразователей требовало искусства и делалось для каждого прибора отдельно. Но недавно появились микросхемы и для таких устройств. Примером может служить микросхема MC33363B фирмы ON Semiconductor — рис. 2.20. Схема работает от бестрансформаторного мостового сетевого выпрямителя с конденсаторным фильтром, дающим напряжение 240 В постоянного тока.

Силовой мощный МДП-транзистор этой микросхемы имеет рабочее напряжение до 700 В при токе 1 А. В схему входит также 450 В полевой транзистор для за-

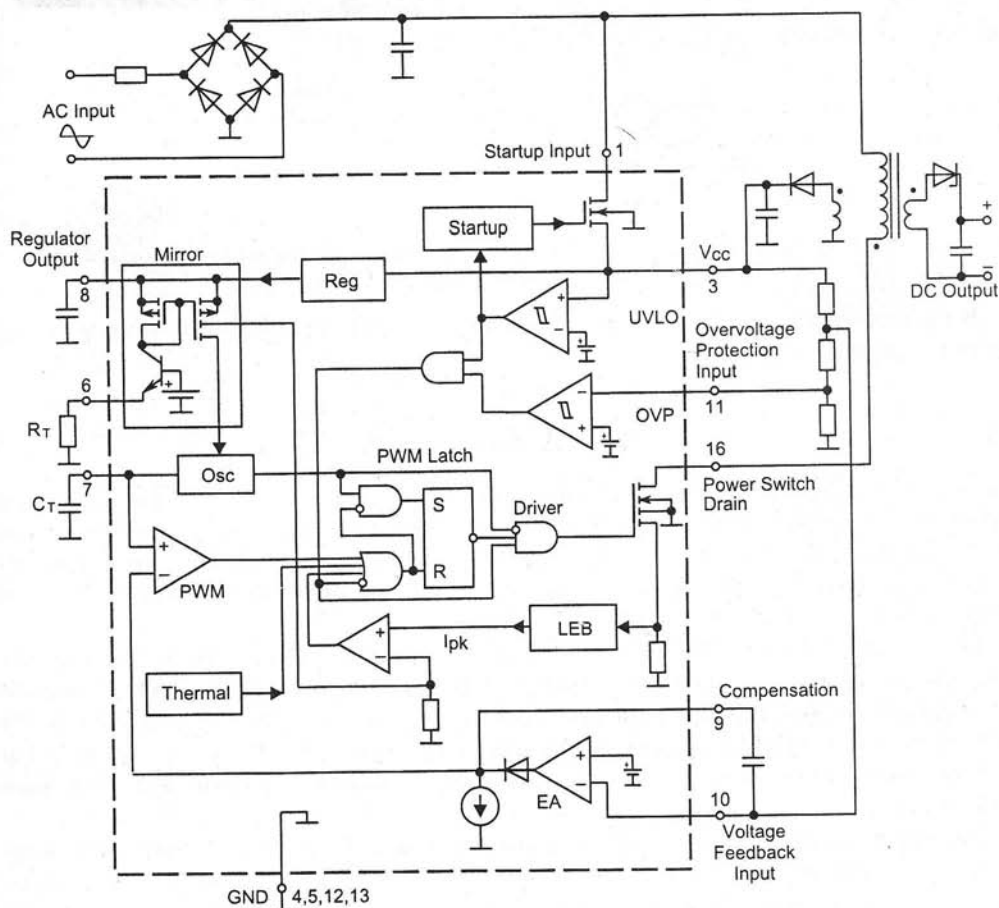


Рис. 2.20. Схема включения микросхемы сетевого источника с импульсным преобразованием энергии MC33363B

пуска и широтно-импульсный модулятор. Преобразование происходит на частоте 260—310 кГц, что позволяет использовать миниатюрный силовой высокочастотный трансформатор на ферритовом сердечнике. Микросхема имеет средства защиты от превышения тока нагрузки выше заданных величин и схемы защиты от перенапряжения и перегрева. Температурный диапазон работы от -25 до $+125$ °С.

2.1.8. Источники постоянного тока

Источники постоянного тока используются гораздо реже, чем источники постоянного напряжения. Обычно их применяют в генераторах пилообразного напряжения электронных осциллографов, в различных измерительных преобразователях и в функциональных генераторах. Для этого нужны маломощные и слаботочные источники постоянного тока. Сильноточные источники тока реализованы в лабораторных источниках питания.

В качестве нелинейных цепей, стабилизирующих ток, часто используют биполярные транзисторы в схеме с общей базой или полевые транзисторы с встроенным каналом — рис. 2.21. Такие цепи характеризуются выходным сопротивлением R_i , которое в редких случаях достигает 1—2 МОм (идеальный источник тока должен иметь $R_i = \infty$). Рабочее напряжение, при котором ток стабилен находится в пределах от нескольких вольт до десятков и даже сотен вольт.

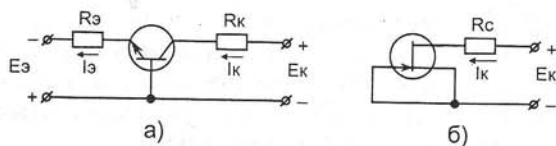


Рис. 2.21. Стабилизирующие ток схемы на биполярном транзисторе (а) и полевом транзисторе (б)

В источнике тока на биполярном транзисторе стабилизируется ток коллектора, который равен:

$$I_K = \alpha \frac{E_3 - U_{36}}{R_3 + r_3} + \frac{U_K}{R_{K0}} + I_{K0} \approx \frac{E_3}{R_3} + \frac{U_K}{R_i}$$

Здесь α — коэффициент передачи тока эмиттера в схеме с общей базой, значение которого близко к 1 (типичное 0.99), $r_3 \ll R_3$ — сопротивление открытого эмиттерного перехода, $R_{K0} = R_i$ — выходное сопротивление в схеме с общей базой. Напряжение U_{36} является источником погрешности и температурной нестабильности тока коллектора, поэтому выбирают $U_{36} \ll E_3$.

Очень простой является схема токостабилизирующего двухполосника на полевом транзисторе с встроенным каналом (как МДП типа, так и с управляющим р-п-переходом, как показано на рис. 2.21,б). Однако получить от нее $R_i > 1$ МОм нельзя без оптимизации структуры полевого транзистора. Однако недавно стала выпускаться микросхема стабилизатора тока на полевом транзисторе КЖ101А (рис. 1.22).

Распайка выводов микросхемы КЖ101А в малогабаритном транзисторном корпусе КТ-26 показана на рис. 1.23. Микросхема представляет собой оптимизированный на получение больших R_i полевой транзистор с термокомпенсирующим резистором R_2 . Одновременно он создает отрицательную обратную связь по току, повышающую R_i до типовых значений 8 МОм. Резистор R_1 служит для защиты за-

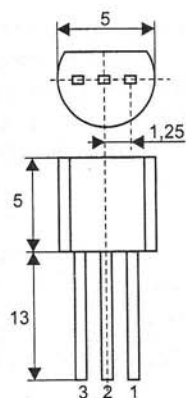
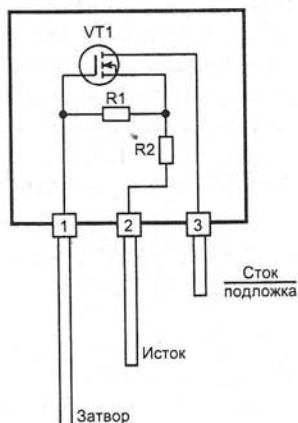
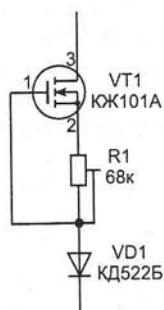


Рис. 2.22. Внешний вид и функциональная схема микросхемы источника постоянного тока КЖ101А



VT1 - ДМОП транзистор со встроенным каналом
R1 - резистор защиты затвора
R2 - термостабилизирующий резистор для компенсации температурной зависимости порогового напряжения

Рис. 2.23. Распайка выводов микросхемы КЖ101А в транзисторном корпусе КТ-26

твора от статического электричества и вместе с внешними резисторами позволят регулировать ток.

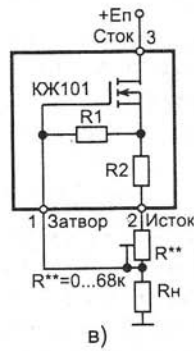
Рекомендуемые схемы применения микросхемы стабильного тока КЖ101А представлены на рис. 2.24. Основная схема включения (рис. 2.24,а) задает начальное нормированное значение тока от 95 до 165 мкА в зависимости от напряжения (от 2 до 230 В). Схема рис. 2.24,б обеспечивает повышение стабилизируемого тока и его регулировку, а рис. 2.24,в — понижение тока.



а)



б)



в)

Рис. 2.24. Основные схемы включения микросхемы КЖ101А

Микросхема КЖ101А не относится к прецизионным стабилизаторам тока. Для нее характерен большой разброс тока. Для его уменьшения можно использовать интегральные операционные усилители с этой микросхемой на выходе и с глубокой отрицательной обратной связью по току.

2.1.9. Лабораторные источники постоянного напряжения и тока

Лабораторные источники постоянного напряжения и тока обычно не рассматриваются как измерительные устройства. Они предназначены для электропитания различной испытуемой аппаратуры. Но, в связи с постоянно повышающимися

требованиями к стабильности устройств электропитания, лабораторные источники выполняются по схемам прецизионных стабилизаторов напряжения и тока. В них, как правило, встраиваются аналоговые или цифровые измерители выходных напряжений и токов, что позволяет использовать эти приборы при некоторых видах измерений, например при снятии вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов и нелинейных резисторов.

От большинства лабораторных источников электропитания требуется высокая стабильность выходного напряжения (или тока) и малый уровень пульсаций. Поэтому импульсные регуляторы напряжения и тока в таких источниках применяются редко, поскольку они дают большие пульсации и высокочастотные помехи. Предпочтение отдается обычным источникам с силовыми трансформаторами и линейным компенсационным стабилизаторам напряжения и тока. Во многих источниках применяются схемы защиты от короткого замыкания.

Для повышения КПД используется питание линейных стабилизаторов от нескольких выпрямителей с переключением с помощью реле. При плавной регулировке выходного напряжения таких источников можно слышать шелканье реле, переключающих входное напряжение линейных стабилизаторов.

На нашем рынке, помимо довольно примитивных и не слишком качественных источников электропитания производства мелких фирм, широко представлены одноканальные и двухканальные источники фирмы MASTECH серии HY. На рис. 2.25 показан внешний вид одноканального источника HY1502 со стрелочными измерителями выходного напряжения и выходного тока.

Оригинальной особенностью этих источников является возможность их применения в качестве как стабильного источника напряжения, так и стабильного тока. Переход к стабилизации тока происходит при увеличении выходного тока до значений, превышающих установленный для стабилизации тока уровень. Это одновременно решает проблему защиты от коротких замыканий нагрузки.

Первые две цифры в названии прибора указывают на верхний предел выходного напряжения, а другие две цифры — выходного тока. Например, источник HY1502 (рис. 2.25) имеет выходное напряжение от 0 до 15 В и ток от 0 до 2 А. Точность установки напряжения или тока 2,5%. Размеры источника 325×147×112, вес 3 кг.

На рис. 2.26 представлен внешний вид трехканального источника электропитания HY3002D-3/3003D-3/3005D-3 с цифровыми измерителями напряжения и тока двух каналов. Эти источники имеют два регулируемых канала на напряжения 0—30 В и токи от 0 до 2, 3 и 5 А соответственно. Имеется и третий нерегулируемый канал с напряжением 5 В и током 3 А. Цифровые измерители выполнены с дисплеем на жидких кристаллах. Точность установки напряжений $\pm 1\% \pm 2$ знака, тока $\pm 1.5\% \pm 2$ знака. Источники обеспечивают высокую стабильность напряжений и токов и малый уровень их пульсаций.

Разумеется есть множество и других источников других фирм с параметрами, близкими к тем, что были описаны для источников фирмы MASTECH.



Рис. 2.25. Одноканальный лабораторный источник питания HY1502 со стрелочными измерителями напряжения и тока



Рис. 2.26. Трехканальный лабораторный источник питания с цифровыми измерителями напряжения и тока

2.2. Источники синусоидальных сигналов

2.2.1. Типы источников синусоидального напряжения

Синусоидальные сигналы (см. рис. 1.4 и раздел 1.2.1) широко используются для тестирования и отладки самых разнообразных электронных устройств. Это связано с тем, что они являются простейшими изменяющимися во времени сигналами, но с постоянными параметрами — амплитудой, частотой и фазой. Изменение этих параметров позволяет осуществлять модуляцию синусоидальных сигналов и использовать их для переноса информации. На этом основаны многочисленные сферы применения синусоидальных сигналов в технике электросвязи и радиотехнике.

В измерительной технике применяются три основных типа источников — генераторов синусоидального напряжения:

- низкочастотные RC -генераторы;
- высокочастотные LC -генераторы;
- генераторы с пьезокристаллическими, кварцевыми и электромеханическими резонаторами;
- генераторы, формирующие синусоидальные сигналы из треугольных сигналов путем их плавного ограничения.

Три первых типа генераторов строятся по обобщенной схеме, показанной на рис. 2.27. Основой генератора является частотно-избирательная цепь ИЦ и усилитель U , охваченные обратной связью через цепь ЦОС. В качестве ИЦ могут использоваться RC -цепи, колебательные LC -контуры, кварцевые и пьезоэлектрические резонаторы и т. д. Колебания в системе рис. 2.27 возникают при двух одновременно выполняемых условиях:

- баланса фаз — на частоте колебаний общий фазовый сдвиг должен быть равен 0 или кратен 2π (это означает, что обратная связь в системе рис. 2.27 должна быть положительной на частоте генерации);
- баланса амплитуд — петлевой коэффициент передачи на частоте колебаний должен быть равен 1 или несколько превышать 1.

В зависимости от выбранных ИЦ, U и ЦОС возможно построение множества схем автогенераторов — генераторов, в которых синусоидальные колебания воз-

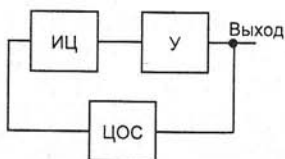


Рис. 2.27

никают автоматически. RC -генераторы не требуют громоздких LC -контуров и легко реализуются в диапазоне частот от единиц Гц до десятка МГц. Однако RC -цепи имеют низкую избирательность и плохо фильтруют гармоники сигнала, что ведет к заметным нелинейным искажениям и невысокой стабильности частоты.

Коэффициент нелинейных искажений НЧ-сигналов оценивается величиной:

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

где U_i — напряжение i -ой гармоники сигнала. Он может достигать нескольких процентов у простых схем RC -генераторов и доходит до тысячных долей процента у ГСС низких частот. Для получения малого K_r нужно применение высококачественных линейных усилителей и тщательное проектирование системы ограничения и стабилизации амплитуды синусоидальных сигналов. Хотя существует немало измерителей нелинейных искажений, при массовых измерениях полезно применение анализаторов спектра, ныне встроенных в большинство цифровых осциллографов.

На высоких частотах (от десятков кГц до сотен МГц и выше) применяются LC -генераторы на основе высокودобротных LC -контуров. Частота контура (последовательного или параллельного) на которой фазовый сдвиг равен 0 обычно близка к резонансной частоте идеального последовательного LC -контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Отсюда следует возможность изменения частоты LC -генератора изменением емкости C или индуктивности L . Для этого используются конденсаторы переменной емкости и катушки переменной индуктивности — *вариометры* (реже). Выпускаются также переменные конденсаторы на основе р-п-перехода (*варикапы*), емкость которых управляется напряжением. Их применение позволяет строить генераторы, управляемые напряжением.

Благодаря высокой фильтрующей способности колебательных LC -контуров получение синусоидальной формы от LC -генераторов оказывается более простой задачей, чем в случае построения RC -генераторов. Однако и тут простые схемы могут давать K_r до нескольких процентов. Часто вместо K_r чистоту спектра ВЧ генераторов оценивают по уровню гармоник сигнала. Он обычно измеряется в логарифмических единицах — *децибелах*. Для отношения напряжений:

$$\text{дБ} = 20 \log \left(\frac{U_2}{U_1} \right),$$

где U_1 — исходное напряжение, U_2 — измеряемое напряжение. Нетрудно убедиться в том, что 6 дБ соответствует отношению 2, 20 дБ — 10, 40 дБ — 100 раз и т. д. Децибелы положительны, если $U_2 > U_1$ и отрицательны, если $U_2 < U_1$. Нередко в де-

цибелах отражают абсолютный уровень переменного напряжения — относительно U_1 с амплитудой 1 В (или эффективным значением 0.707 В). Впрочем, иногда за 0 дБ берут и другие уровни напряжения — например, в милливольтметрах ВЗ-48 это 0.775 В.

Для мощности

$$\text{дБм} = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right),$$

что учитывает квадратичную зависимость мощности от напряжения или тока.

Самыми лучшими избирательными свойствами обладают кварцевые резонаторы. На них строятся наиболее стабильные кварцевые генераторы на диапазон частот от десятков кГц до сотен МГц. Другие (достаточно экзотические) типы автогенераторов рассматриваться не будут.

Большой проблемой в построении генераторов синусоидальных колебаний является *стабилизация амплитуды* колебаний. Если условия баланса фаз и амплитуд соблюдаются в линейной системе, то колебания в генераторе будут непрерывно возрастать. На практике усилитель всегда является нелинейным устройством, так что рано или поздно наступит ограничение амплитуды колебаний. Дифференциальный коэффициент усиления усилителя начнет падать, и указанные условия будут соблюдаться при вполне определенной амплитуде. К сожалению, нередко эта амплитуда оказывается близкой к предельной для усилителя, на котором строится автогенератор, и потому наблюдаются заметные нелинейные искажения сигнала.

Широко практикуется введение в схему генераторов дополнительных *инерционных обратных связей*, глубина которых зависит от амплитуды колебаний. Это позволяет ограничить амплитуду сигналов на выходе усилителя до того, как он начнет вносить заметные нелинейные искажения. Поскольку обратная связь инерционная, то форма синусоиды достаточно высокой частоты не искажается.

Не вдаваясь в теорию автогенераторов, отметим, что стабильность их частоты зависит от параметра $Q = f_0 / 2\Delta f$ — добротности избирательной цепи ИЦ, где $2\Delta f$ — *полоса пропускания*, оцениваемая по спаду резонансной кривой на 3 дБ по обе стороны от частоты резонанса f_0 (или квазирезонанса для RC-цепей). Чем выше добротность и меньше полоса пропускания, тем меньше изменяется частота генерации, на которой соблюдаются условия баланса фаз и амплитуд. Изменение частоты может быть обусловлено изменением фазы усилителя или ИЦ вследствие изменения температуры, напряжения питания и иных факторов.

У избирательных RC-цепей $Q < 1$, а у колебательных LC-контуров Q лежит в пределах от нескольких десятков до сотен. Так что по стабильности частоты LC-автогенераторы, как правило, намного превосходят RC-генераторы. Самую высокую стабильность частоты дают кварцевые генераторы с кварцевым резонатором, добротность которого достигает сотен тысяч и даже нескольких миллионов.

Интересная подборка схем автогенераторов (без описаний) приведена в Интернете по адресу <http://zpostbox.narod.ru/gl.htm>. (в 4 частях). Из их числа рассмотрим только несколько достаточно оригинальных схем генераторов, подтверждающих описанные выше принципы их построения. Более заинтересованный читатель может обратиться к указанной подборке и многочисленной литературе по генераторам, например к книге [15].

2.2.2. Пример схемы RC-генератора

На рис. 2.28 показана одна из лучших схем RC-генераторов с Г-образной ИЦ, образованной последовательной и параллельной RC-цепями. При приведенных

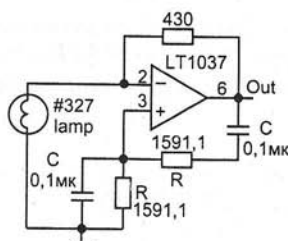


Рис. 2.28. Типичная схема RC-генератора на операционном усилителе

данная схема рассчитана на генерацию фиксированной частоты в 1000 Гц, задаваемой с высокой точностью. Такие схемы часто необходимы в RCL-измерителях для измерения параметров L , C и R на переменном токе.

Стабилизация амплитуды сигнала на выходе достигается применением дополнительной инерционной отрицательной обратной связи с установкой в ее цепи маломощной миниатюрной лампы накаливания. При повышении амплитуды сигнала на выходе нить накаливания разогревается и омическое сопротивление ее возрастает. В результате глубина отрицательной обратной связи возрастает, что приводит к уменьшению амплитуды сигнала и, в конечном счете, стабилизирует ее. Как отмечалось, такой способ стабилизации не ведет к заметным искажениям формы синусоиды, поскольку для быстроизменяющегося сигнала отрицательная обратная связь остается линейной. Данный способ стабилизации амплитуды широко используется в генераторах стандартных НЧ-сигналов.

Перестройка по частоте в данном генераторе осуществляется спаренным прецизионным резистором. Более дорогой является перестройка с помощью воздушного конденсатора переменной емкости. Она сопровождается меньшим шумом и применяется в ГСС низких частот. Часто вполне подходящим для такой перестройки является сдвоенный или строенный конденсатор переменной емкости от радиоприемников. К сожалению, это довольно громоздкий узел.

2.2.3. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общей базой

Классическая схема автогенератора на транзисторе, включенном по схеме с общей базой, представлена на рис. 2.29. Частота генерации задается параллельным LC-контуром. Каскад с общей базой не инвертирует фазу, поэтому для создания положительной обратной связи достаточно подать сигнал с части контура на эмиттер транзистора. Эта схема (при использовании соответствующего транзисто-

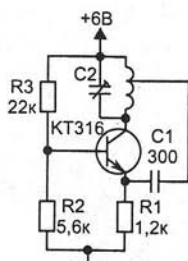


Рис. 2.29. LC-генератора на транзисторе, включенном по схеме с общей базой, и контуре с неполным включением

ра и контура) может работать на частотах от десятков кГц до сотен МГц. Поскольку входное сопротивление каскада с общей базой мало, то необходимо согласование между высокоомной выходной цепью усилителя и его низкоомной входной цепью. Оно и достигается неполным включением контура.

2.2.4. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором

Еще одна классическая схема LC-генератора показана на рис. 2.30. Здесь используется каскад с общим коллектором (эмиттерный повторитель), который тоже не инвертирует фазу входного сигнала, но имеет коэффициент передачи несколько меньший 1. Поэтому для соблюдения условия баланса амплитуд надо использовать повышающее напряжение автотрансформаторном включении колебательного контура.

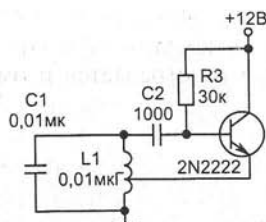


Рис. 2.30. LC-генератора на транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором с автотрансформаторным включением контура

Заметим, что каскад с общим коллектором, как и каскад с общей базой, имеет наилучшие частотные свойства. Это гарантирует устойчивую работу автогенератора на высоких частотах

2.2.5. LC-генераторы с упрощенным включением контура

Множество генераторов создано на основе каскада с общим эмиттером, дающего, как известно, наибольшее усиление по мощности. Однако, эта схема не очень удачна для построения генераторов из-за намного худших частотных свойств биполярного транзистора, по сравнению с предыдущими схемами его включения. Подобные автогенераторы строятся и на полевых транзисторах по схеме с общим истоком, достоинством которых является высокое входное сопротивление.

Тем не менее, классические схемы транзисторных автогенераторов имеют определенные недостатки. Основным из них является необходимость в согласовании импедансов входной и выходной цепей каскадов и LC-контура. Это и приводит к необходимости автотрансформаторного включения контура или к применению отдельной катушки связи. В связи с этим было создано множество оригинальных схем автогенераторов, в которых контур используется без отводов от катушки индуктивности и без дополнительных катушек связи, усложняющих реализацию контуров и затрудняющих их коммутацию в многодиапазонных генераторах.

Следует отметить ряд оригинальных схем, основанных на внесении к контуру отрицательного сопротивления или проводимости, которые компенсируют сопротивление потерь контура и ведут к возникновению в нем незатухающих колебаний. Несмотря на безусловную полезность и оригинальность таких генераторов,

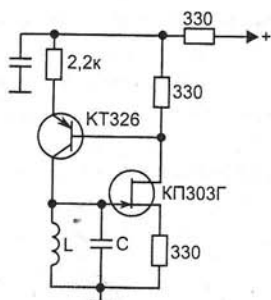


Рис. 2.31. Генератор с полным включением LC-контура на полевом и биполярном транзисторах

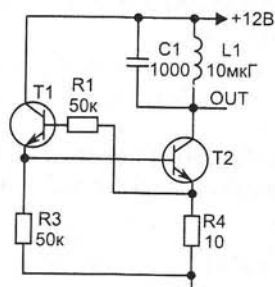


Рис. 2.32. Генератор с полным включением LC-контура на биполярных транзисторах

широкого практического применения они все же не получили. Прежде всего, потому, что нужные для этого специальные приборы — *негатроны* (лавинные транзисторы, туннельные диоды, однопереходные транзисторы и др.) распространены намного реже, чем обычные биполярные и полевые транзисторы, и, как правило, стоят дороже и плохо реализуются в микроэлектронном исполнении.

На рис. 2.31 показана схема LC-генератора на основе каскада с общим истоком на полевом транзисторе и каскада с общим эмиттером на биполярном транзисторе. Это сочетание полезно тем, что первый каскад имеет очень высокое входное сопротивление, а второй — высокое выходное сопротивление. Подключение выхода второго каскада на вход первого каскада создают положительную обратную связь, а роль ИЦ играет полностью включенный LC контур.

На рис. 2.32 представлена еще одна оригинальная схема автогенератора, в которой к контуру подключен выход каскада на транзисторе T2. Это обеспечивает минимальное шунтирование LC-контура.

2.2.6. Генераторы на пьезокерамических фильтрах

Колебательная система автогенератора вовсе не обязательно должна быть LC-контуром. Возможно применение пьезокерамических фильтров, кварцевых резонаторов и даже камертонов с электромагнитами. На рис. 2.33 показаны две схемы автогенераторов с пьезокерамическими фильтрами, обычно предназначенны-

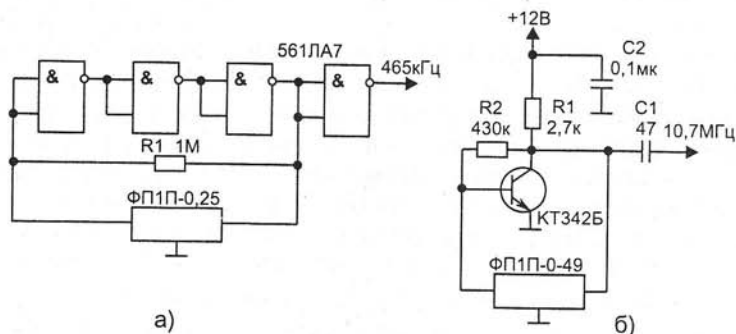


Рис. 2.33. Автогенераторы на основе пьезокерамических фильтров на частоту 465 кГц (а) и 10.7 МГц (б)

ми для применения в усилителях промежуточной частоты супергетеродинных радиоприемников.

Такие фильтры выпускаются в больших количествах, они дешевы и доступны. Фильтры обладают свойством инвертирования входного сигнала и потому для получения положительной обратной связи надо использовать инвертирующий усилитель. В генераторе рис. 2.33,а усилитель построен на основе ТТЛ схем, а в генераторе рис. 2.33,б на биполярном транзисторе. По стабильности частоты такие генераторы превосходят обычные LC -генераторы, но уступают кварцевым генераторам.

2.2.7. Кварцевые резонаторы

Генераторы с кварцевой стабилизацией (или *кварцевые генераторы*) используют в качестве избирательной цепи ИЦ пьезоэлектрический резонатор в виде пластины из кварца с металлизированными поверхностями. Ныне ряд фирм выпускает такие резонаторы на частоты от нескольких килогерц до сотен мегагерц (см. рис. 2.34). Но наиболее распространены кварцевые резонаторы с частотами от десятков килогерц до десятков мегагерц. Высокочастотные резонаторы часто используются в схемах умножения частоты.

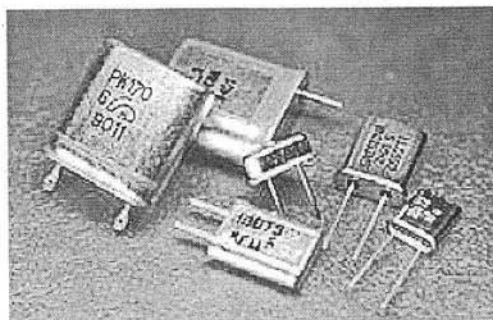


Рис. 2.34. Отечественные кварцевые резонаторы в разных корпусах

Благодаря обратному пьезоэффекту кварцевая пластина колеблется при приложении к ней переменного напряжения. Если частота его приближается к частоте механического резонанса, то амплитуда механических колебаний резко увеличивается и благодаря прямому пьезоэффекту в кварце возникает электрическое поле, усиливающее ток, протекающий через кварцевую пластину. При этом резонатор ведет себя как последовательный LCR -контур очень высокой добротности Q — до нескольких миллионов (у обычных LCR -контуров она составляет десятки-сотни). С учетом собственной емкости обкладок пластин C_0 эквивалентная схема *кварцевого резонатора* приобретает вид, показанный на рис. 2.35.

Как видно из рис. 2.35, резонанс кварца может быть обусловлен как последовательным, так и параллельным эквивалентным колебательным контуром. Расчеты

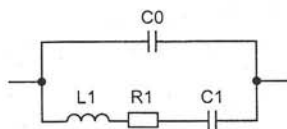


Рис. 2.35. Эквивалентная схема кварцевого резонатора

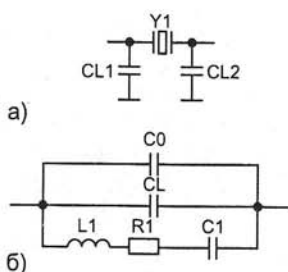


Рис. 2.36. Схема кварцевого резонатора, установленного на печатную плату (а) и эквивалентная схема его (б)

показывают, что резонансные частоты очень близки, но все же немного различаются. Выпускаются кварцы, у которых частота резонанса ориентирована или на последовательный или на параллельный резонанс, что также надо учитывать при выборе резонатора.

При установке кварцевого резонатора на печатную плату надо учитывать емкости монтажа (нагрузки) $CL1$ и $CL2$ — рис. 2.36,а. В результате эквивалентная схема кварцевого резонатора приобретает вид, показанный на рис. 2.36,б.

Частоты последовательного f_s и параллельного f_p резонансов кварцевого резонатора соответственно равны:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} \text{ и } f_p = f_s \sqrt{1 + \frac{C1}{C0 + CL}}.$$

При этом $f_p > f_s$. В паспортных данных на кварцевые резонаторы обычно указывается частота параллельного резонанса и емкость нагрузки. С помощью формулы для f_p нетрудно оценить отклонение частоты параллельного резонанса от паспортного значения при несоответствии емкости C_L ее номинальному значению. Меняя емкость нагрузки C_L можно в некоторых (очень небольших) пределах менять частоту резонанса кварцевого резонатора.

Благодаря прекрасной стабильности механических свойств кварцевого резонатора и высокой добротности его эквивалентных контуров типичная нестабильность частоты кварцевых автогенераторов составляет 10^{-5} — 10^{-4} , а для кварцевых резонаторов размещаемых в термостатах даже 10^{-8} — 10^{-6} . По этому параметру кварцевые генераторы намного превосходят все другие, за исключением уникальных молекулярных и лазерных генераторов, знакомых только специалистам по метрологии.

Свойства кварцевых резонаторов, в частности температурный дрейф их резонансной частоты, зависят от углов среза пластины в кристалле кварца относительно кристаллографических осей — рис. 2.37. При определенных углах среза можно получить близкий к нулю температурный дрейф (срез типа ВТ), но в пределах небольшой области температур, например $20 \pm 5^\circ \text{C}$ или $60 \pm 5^\circ \text{C}$. Кварцевые резонаторы с таким температурным диапазоном часто помещаются в термостаты и используются для построения вторичных эталонов частоты. Существует несколько видов срезов кварцевых пластин, от них зависят размеры пластин и тип их колебаний.

Четверть века назад кварцевый генератор в аппаратуре считался редкостью и применялся в сравнительно дорогих измерительных приборах для их калибровки по частоте. Но в наше время кварцевые резонаторы доступны и выпускаются в

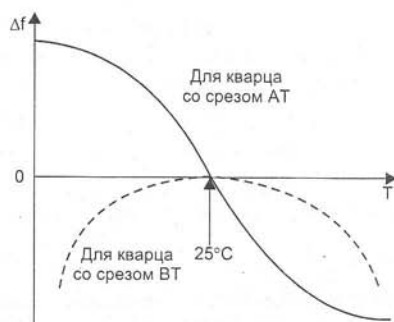


Рис. 2.37. Температурная зависимость частоты для кварцевых резонаторов с различным типом среза

огромной номенклатуре. Так что, если нужен простой генератор на фиксированную частоту, то его нередко проще построить на миниатюрном кварцевом резонаторе, чем на более громоздком и куда более нестабильном LC -контуре.

2.2.8. Кварцевые генераторы на логических микросхемах

Кварцевые генераторы это устройства с кварцевыми резонаторами. Они могут работать на частотах параллельного или последовательного резонансов, либо на частотах, кратных им. Обобщенная схема такого генератора соответствует рис. 2.27, где в качестве избирательной цепи ИЦ используется кварцевый резонатор или фильтр.

В качестве усилителя наиболее часто применяются логические микросхемы, триггеры Шмита, операционные усилители, различные каскады на биполярных и полевых транзисторах. На рис. 2.38 показано несколько схем кварцевых генераторов, выполненных на логических микросхемах.

Кварцевые генераторы на логических микросхемах обычно генерируют несинусоидальное напряжение. Оно скорее близко к прямоугольным импульсам. Од-

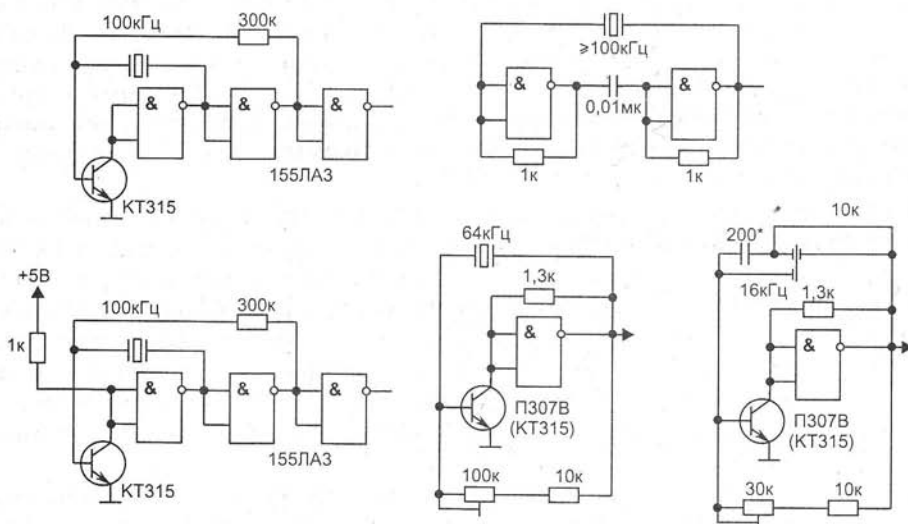


Рис. 2.38. Схемы кварцевых генераторов на логических микросхемах

нако такие генераторы автоматически согласуются по уровням сигнала со стандартными интегральными схемами и могут применяться для работы с ними, например, в качестве тактовых генераторов. Для понижения частоты могут использоваться цифровые делители частоты, которые есть практически во всех сериях логических микросхем.

2.2.9. Кварцевый генератор на операционном усилителе

Достаточно часто в схемах кварцевых генераторов используются операционные усилители. Схема, показанная на рис. 2.39, использует питание операционного усилителя от общего источника, что упрощает построение таких схем.

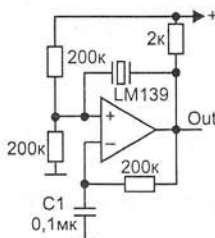


Рис. 2.39. Схема кварцевого генератора на интегральном операционном усилителе

Ныне операционные усилители выпускаются практически на любые частоты, которые могут генерировать кварцевые резонаторы. Однако высокочастотные усилители достаточно дороги, что ограничивает их применение в кварцевых генераторах.

2.2.10. Кварцевый генератор на биполярном транзисторе

Биполярные транзисторы по-прежнему являются наиболее приемлемыми для построения схем кварцевых генераторов, вследствие их невысокой стоимости и достаточно высокой рабочей частоты (в сотни МГц). Это делает построение кварцевых генераторов экономически более оправданным, чем на интегральных микросхемах.

На рис. 2.40 показана типичная схема кварцевого генератора на биполярном транзисторе. Благодаря настройке контура на пятую гармонику кварца с частотой 5.6 МГц генерируется частота 28 МГц. Разумеется, подобную схему можно использовать и для генерации на других гармониках, в том числе и на первой.

В литературе, особенно в радиолюбительской, можно найти огромное число схем кварцевых автогенераторов.

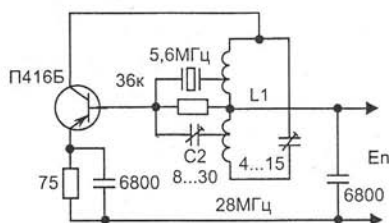


Рис. 2.40. Схема кварцевого генератора на биполярном транзисторе, работающая на пятой гармонике кварцевого резонатора

2.2.11. Промышленные модули кварцевых генераторов

Теперь выпускаются и модули кварцевых генераторов. Это законченные устройства, выполненные в герметичных корпусах, предназначенных для монтажа на печатную плату. Фирма «Платан» (www.platan.ru) предлагает на нашем рынке серию модулей кварцевых генераторов двух типов, показанных на рис. 2.41.

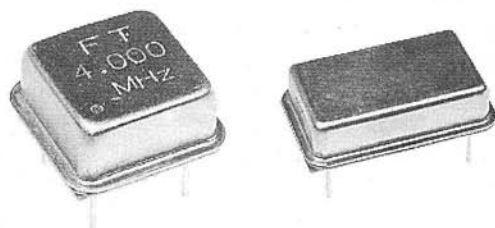


Рис. 2.41. Модули кварцевых генераторов

Эти модули строятся на микросхемах TTL и МОП, есть и варианты с электронной подстройкой частоты. Модули покрывают диапазоны частот от 1 до 100 МГц. Напряжение питания модулей 5 В. Модули типа 1 рассчитаны на фиксированные частоты, они имеют три задействованных выхода (общий, питания и выход). В модулях типа 2 имеется дополнительный вход для управляющего напряжения.

2.2.12. Промышленные генераторы низкочастотных сигналов

Для получения синусоидальных сигналов в достаточно широком диапазоне частот с гарантированными параметрами уровня и формы используются *генераторы стандартных сигналов* (ГСС). Советская промышленность выпускала огромную номенклатуру этих приборов, покрывающих весьма широкий диапазон частот — от инфразвуковых до гигагерцовых. С распадом СССР разработка и промышленное производство этих приборов сильно сократилось. Многие НИИ и КБ списали эти приборы, а их запасы, попали в продажу на свободном рынке с давно просроченными сроками хранения и эксплуатации и, естественно, отсутствием метрологического обеспечения.

В основном применяются три типа ГСС:

- низкочастотные (звуковые) генераторы на диапазон частот от 10—20 Гц до 20—100 (иногда и выше) кГц;
- генераторы стандартных ВЧ-сигналов (диапазон частот от 100 кГц до 50—150 МГц, иногда и выше);
- генераторы стандартных СВЧ сигналов (диапазон частот от 0.1 ГГц до десятков ГГц).

Последний тип приборов не рассматривается, поскольку эти радиотехнические устройства узко специального назначения.

Приведем данные о наиболее распространенных отечественных генераторах НЧ-сигналов.

- Завод «ЭКСИТОН» (г. Павловский посад Московской области) с конца 70-х годов выпускал в больших количествах самый простой RC-генератор — Генератор измерительный комбинированный «Электроника». Этот довольно

неказистый прибор приобретали многие учебные заведения и радиолюбители. Прибор имел диапазон генерируемых частот от 20 Гц до 200 кГц (4 поддиапазона) и выходное напряжение 0—3 В. Коэффициент гармоник при $U_{\text{вых}}=1$ В не более 0,4 %. Прибор наряду с синусоидальным сигналом может генерировать прямоугольные импульсы со скважностью 2 (меандр), измерять частоту от 20 Гц до 200 кГц с погрешностью не более 2% и емкость от 200 пФ до 20 мкФ с погрешностью до 10%. Выходное напряжение и частота контролируются аналоговыми измерительными головками.

- Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-118 представляет собой источник синусоидального сигнала прецизионной формы волны и предназначен для исследования, настройки и испытаний систем и приборов. Имеет 5 диапазонов дискретных частот от 10 Гц до 200 кГц. Прибор обеспечивает низкий уровень коэффициента гармоник выходного сигнала до $1,5 \times 10^{-3}$ % в диапазоне частот свыше 200 Гц до 10 кГц (II и III поддиапазоны). Наибольшее значение уровня составляющих с частотой питающей сети и ее гармоник на выходе прибора не превышает 0,00075 % от установленного значения выходного напряжения. Мощность, потребляемая от сети при номинальном напряжении, не более 30 ВА. Габаритные размеры не более 312×133×322 мм, вес 7,5 кг. Прибор оснащается режекторным фильтром для получения особо чистых сигналов. Все это необходимо для проектирования, макетирования и отладки усилителей мощности звуковой частоты класса Hi-Fi и Hi-End.
- Генератор сигналов низкочастотный ГЗ — 126 представляет собой источник синусоидального и прямоугольного сигналов и предназначен для исследования, настройки и испытаний систем приборов, используемых в радиоэлектронике, связи, автоматике, вычислительной и измерительной технике, приборостроении. Прибор предельно прост в работе, что очевидно из его внешнего вида — рис. 2.42.



Рис. 2.42. НЧ-генератор ГЗ-126

Диапазон частот выходного синусоидального сигнала с плавным изменением от 10 Гц до 10 МГц перекрывается 6 поддиапазонами. Основная погрешность установки частоты не выходит за пределы: ± 2 % в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц (2 .. 5 поддиапазоны); ± 3 % в диапазоне частот от 10 Гц до 100 Гц (1 поддиапазон) и от 1 до 10 МГц (6 поддиапазон). Нестабильность частоты выходного сигнала за любой 15 минутный интервал времени после двухчасового установления рабочего режима работы прибора в нормальных условиях не выходит за пределы $\pm 4 \times 10^{-4}$. Наибольшее значение уровня выходного напряжения синусоидального сигнала генератора не менее 5 В при сопротивлении нагрузки ($50 \pm 0,25$) Ом и 10 В без нагрузки.

В генераторе сигналов предусмотрен режим внешней синхронизации синусоидальным сигналом. Генератор сигналов обеспечивает дополнительный сигнал прямоугольной формы в диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц. Габаритные размеры 308×130×300 мм, вес 6 кг (с транспортным ящиком 45 кг!).

- Вполне современная модель генератора НЧ-сигналов ГЗ-131 (рис. 2.43) обладает широким диапазоном частот (от 2 Гц — 2 МГц), имеет малые искажения синусоидальных сигналов, содержит цифровую индикацию частоты и выход прямоугольных импульсов ТТЛ-уровня. Погрешность установки частоты $\pm 1\%$, нестабильность частоты: за 15 мин — 0,1%; за 180 мин 0,5%. Амплитуда: ≥ 10 В (без нагрузки); ≥ 5 В (нагрузка 600 Ом), плавное ослабление ≥ 20 дБ. Коэффициент гармоник синусоидального сигнала: $\leq 0,5\%$ до 20 Гц; 0,2% до 200 кГц; 1% до 2 МГц. Потребляемая мощность 10 В · А, габариты 210×248×71 мм, вес 2 кг. Прибор заменяет ряд более старых разработок: ГЗ-102, ГЗ-106, ГЗ-107, ГЗ-109, ГЗ-111, ГЗ-112.

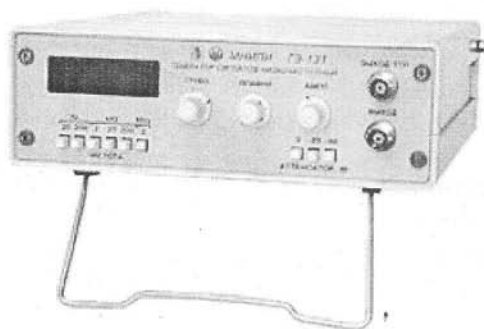


Рис. 2.43. НЧ-генератор ГЗ-31

- Выпускается также множество лабораторных приборов с очень высокими техническими характеристиками. Эти приборы, построенные на основе цифровых технологий, предназначены для серьезных научных исследований и их никак нельзя отнести к категории «бюджетных», т. е. массовых приборов. В связи с этим ограничимся описанием представленных выше приборов умеренной стоимости.

2.2.13. Генераторы стандартных сигналов (ГСС) высоких частот

ГСС ВЧ-диапазона по своему уникальные приборы. Предназначенные для измерения параметров радиоприемной аппаратуры и исследования высокочувствительных устройств, они должны обладать высокой степенью экранировки, без чего проведение точных измерений при малых уровнях ВЧ-сигналов просто невозможно. Первые советские приборы этого класса, например, ГСС-6 и ГЗ-18А, выполненные на электронных лампах высоко ценились за свою неприхотливость и высокую степень экранировки. Они позволяли работать с уровнями сигналов до 0,1 мкВ, тогда как чувствительность даже профессиональных и военных коротковолновых радиоприемников тех времен была на уровне 2—5 мкВ.

- ГСС ГЗ-18А ценится специалистами и радиолюбителями и сейчас, хотя он был разработан почти 40 лет назад. Эти приборы продаются до сих пор! Диапазон частот приборов от 0,1 до 35 МГц (6 поддиапазонов), уровень выход-

ного напряжения с гарантированной точностью от 0,1 мкВ до 0,1 В. Есть возможность осуществления амплитудной модуляции. Погрешность установки частоты не более 1%. Благодаря применению усилителя ВЧ после автогенератора гарантируется высокая степень чистоты выходного синусоидального напряжения. Габариты прибора 390×280×290 мм, вес 18 кг. ГЗ-18А были заменены ГСС следующего поколения — на транзисторах.

- ГСС Г4-118 типичный представитель аналогового поколения этих приборов. Он имеет диапазон частот от 100 кГц до 30 МГц. Габариты прибора 360×190×355 мм, вес 13,5 кг. Прибор имеет большую открытую шкалу частот и простые органы управления. Переключение диапазонов кнопочное, измеритель уровня выполнен на стрелочном индикаторе.
- ГСС Г4-102, тоже уже устаревший, но пользующийся популярностью ГСС. Имеет диапазон частот от 0,1 до 50 МГц (8 поддиапазонов). Погрешность установки частоты от 1 до 1,5%, калиброванное выходное напряжение от 0,1 мкВ до 0,5 В. Возможна амплитудная модуляция. Потребляемая мощность: 15 В · А, габаритные размеры 385×190×240 мм, вес 8 кг.
- Генератор высокочастотный Г4-154 имеет широкий диапазон частот от 100 Гц до 50 МГц с цифровой установкой и индикацией частот и возможностью амплитудной модуляции. Размеры прибора 356×133×370 мм, вес 10,5 кг.

Более подробные данные о предлагаемых на нашем рынке ГСС высоких частот можно найти на Интернет-сайте [56].

- Из числа достаточно современных и не слишком дорогих отечественных ГСС нового поколения стоит отметить прибор Г4-158А, который перекрывает диапазон частот от 0,1 до 130 МГц. Установка частоты дискретная с цифровым контролем. Предусмотрена амплитудная и частотная модуляция (с девиацией до 400 кГц).

У прибора Г4-158 диапазон частот немного уже (до 100 МГц) и предусмотрена возможность только амплитудной модуляции.

У новых приборов Г4-164/164А диапазон частот расширен до 640 МГц, но это куда более дорогие и тяжелые приборы (вес 22 кг против 10 кг у Г4-158/158А).

Для электронных измерений часто требуются куда более простые генераторы ВЧ-сигналов — даже без точной калибровки по уровню. Такие приборы выпускались и выпускаются как у нас, так и за рубежом. К примеру, в наших школах довольно хорошо известен учебный комбинированный генератор ГУК-1. Этот ти-



Рис. 2.44. Современный ВЧ ГСС Г4-158А

пичный представитель советского ширпотреба в пластмассовом корпусе с экраном из фольги выполнен по довольно оригинальной схеме и позволяет получать ВЧ-сигналы в диапазоне частот от 0,1 до 28 МГц при вполне приличной для такого прибора стабильности частоты и неравномерности АЧХ. Он имеет несколько частот в звуковом диапазоне и обеспечивает некалиброванную амплитудную модуляцию.

Хорошо известная массой своих измерительных приборов фирма Good Will поставляет на российский рынок упрощенный генератор ВЧ-сигналов GRG-450B. Назвать его ГСС язык не поворачивается. Хотя прибор имеет изящный внешний вид (не в пример нашему ГУК-1) и довольно широкий диапазон частот (от 0,1 до 150 МГц с «калиброванными» гармониками в диапазоне от 150 до 450 МГц). Ему присущ ряд серьезных недостатков: сильно искаженный выходной сигнал, большая неравномерность АЧХ, некалиброванный выход, заметная паразитная амплитудная модуляция.

Погрешность установки частоты прибора 5%, возможна амплитудная модуляция внутренняя (частота 1 кГц) и внешняя (от 50 Гц до 20 кГц). Детальное рассмотрение прибора показало, что он выполнен по примитивной схеме LC-генератора без резонансного буферного каскада и вообще без средств подгонки частотной шкалы (не считая возможность изменения L раздвижением витков катушек или их секций).

По всем показателям сигналов эти приборы заметно уступают даже нашему старому советскому ГСС Г4-102. Но они имеют привлекательный внешний вид, удобную и большую шкалу частот, малые габариты (247×158×140 мм) и малый вес (2,5 кг). Любопытно, что разработчик пожалел применить в этих приборах качественный воздушный конденсатор переменной емкости и использовал дешевый пленочный конденсатор.

Новое поколение отечественных и зарубежных ГСС основано на применении цифровых синтезаторов частоты, задающих сигналы с высокой точностью по частоте. Так, многосигнальные ВЧ генераторы IFR 2026A/2026B с несколькими источниками сигнала (до 3 полнофункциональных генераторов сигнала) представляют собой уникальное решение для проведения сложных тестов приемников и других компонентов систем связи. Они имеют диапазон рабочих частот: 10 кГц — 2,05 ГГц для модели 2026A и 10 кГц — 2,51 ГГц для 2026B.

Эти приборы идеально подходит для снятия интермодуляционных характеристик и характеристик чувствительности радиоприемников и радиоизмерительных приборов. Имеют ряд специальных тестов, упрощающих процедуру измерения. Имеют ряд опций (дополнительных средств): модулятор GSM, модулятор Bluetooth и GSM и высокоскоростной импульсный модулятор. Но, ввиду очень высокой стоимости, такие приборы доступны только крупным лабораториям, да и то далеко не всем. Поэтому детально эти уникальные приборы не описываются.

2.3. Функциональные генераторы

2.3.1. Принципы построения функциональных генераторов

Функциональными генераторами принято называть генераторы нескольких функциональных зависимостей (сигналов), например, прямоугольных, треугольных и синусоидальных [57]. Разнообразие форм сигналов расширяет сферы применения

таких генераторов и позволяет использовать их для тестирования, отладки и исследования самой разнообразной электронной аппаратуры.

Широкое распространение функциональные генераторы получили после разработки высококачественных интегральных операционных усилителей, на которых стало возможным построение прецизионных *интеграторов*. Они и составляют основу функциональных генераторов. Довольно простая схема типичного функционального генератора, представленная на рис. 2.45, иллюстрирует принцип построения этого устройства.

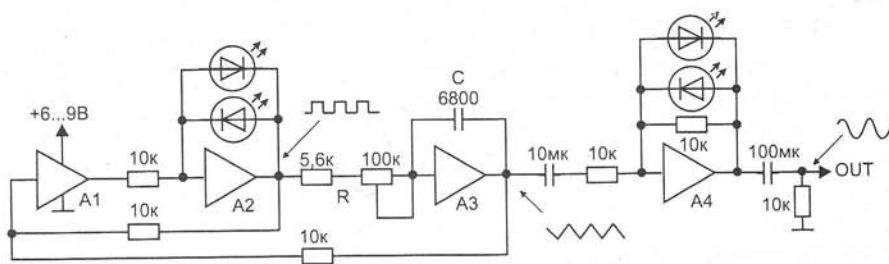


Рис. 2.45. Простая схема функционального генератора на интегральных операционных усилителях

Генератор содержит триггер на двух операционных усилителях A1 и A2 с ограничителем напряжения на светодиодах (эти приборы применены не потому, что они излучают свет, а вследствие своего повышенного прямого напряжения). Триггер управляет направлением интегрирования в операционном усилителе A3. Скорость линейного изменения напряжения на выходе A3 задается емкостью конденсатора C и величиной резистивности резистора R. Обычно резистором R задается плавное изменение скорости изменения напряжения в 10–20 раз, а изменением C — фиксированное изменение скорости.

Если сигнал на выходе интегратора растет, то при достижении верхнего порога триггера он переключается и направление интегрирования меняется — напряжение на его выходе начинает линейно падать, пока не достигнет нижнего порога интегрирования. При этом триггер вновь переключается и направление интегрирования меняется, и т. д.

На выходе триггера формируются прямоугольные импульсы, а на выходе интегратора — треугольные. Для получения сигнала близкого к синусоидальному используется ограничитель треугольного напряжения. В данном случае он выполнен на операционном усилителе A4 с диодным ограничителем (тоже на светодиодах).

Параметры такого функционального генератора (прежде всего максимальная частота и амплитуда сигнала) всецело зависят от применяемых операционных усилителей. Обычные операционные усилители могут использоваться до частот в десятки кГц и при амплитудах до 10–15 В. Однако новейшие сверхширокополосные операционные усилители могут использоваться для построения функциональных генераторов с частотами до десятков МГц, но с амплитудой импульсов до 3–5 В.

2.3.2. Формирователи синусоидального сигнала из треугольного

Формирование из треугольного сигнала синусоидального является одной из самых трудных задач при построении функциональных генераторов. Простой

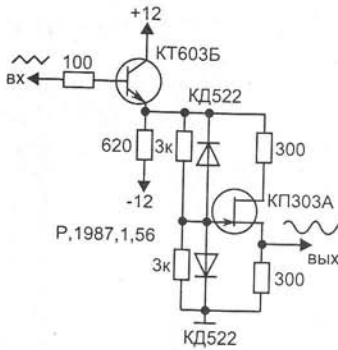


Рис. 2.46. Формирователь синусоидального сигнала из треугольного на полевом транзисторе

ограничитель, такой, как показан на рис. 2.45, создает заметно (даже на глаз) искаженное синусоидальное напряжение. Несколько лучшие результаты дает применение ограничителя на полевом транзисторе (рис. 2.46). Тут используется то обстоятельство, что начальный участок выходной ВАХ полевого транзистора похож на вид синусоидальной кривой в первом и третьем квадрантах. Однако и в этой схеме выходной сигнал не идеально синусоидальный и коэффициент гармоник доходит до нескольких процентов.

Фактически формирователь может быть одноквадрантным, поскольку должен воспроизводить четверть периода синусоидальной функции (остальные четверти можно получить из первой четверти периода с помощью не очень сложных схем). Было показано [57, 59], что для этого вполне подходят диодные 4—5 уровневые ограничители напряжения, которые широко использовались еще в старых аналоговых ЭВМ. На рис. 2.47 показана схема 5-уровневого ограничителя треугольного сигнала, которая при тщательном подборе компонент может обеспечить значения K_f намного меньше 1%, вполне сравнимые с присущими RC-генераторам с инерционной обратной связью.

Подробное описание функциональных преобразователей и их проектирования можно найти в [59, 68].

2.3.3. Микросхема функционального генератора МАХ

Широкому распространению функциональных генераторов способствовала разработка ориентированных на их построение больших интегральных микросхем (БИС). Их применение не только удешевляет эти полезные приборы, но и позволяет достигнуть при их построении высоких технических характеристик. В частности, благодаря хорошо согласованным свойствам входящих в их состав полупроводниковых приборов и операционных усилителей.

Примером высококачественной микросхемы функционального генератора является микросхема МАХ038 фирмы MAXIM [58]. Вид на ее корпус сверху пред-

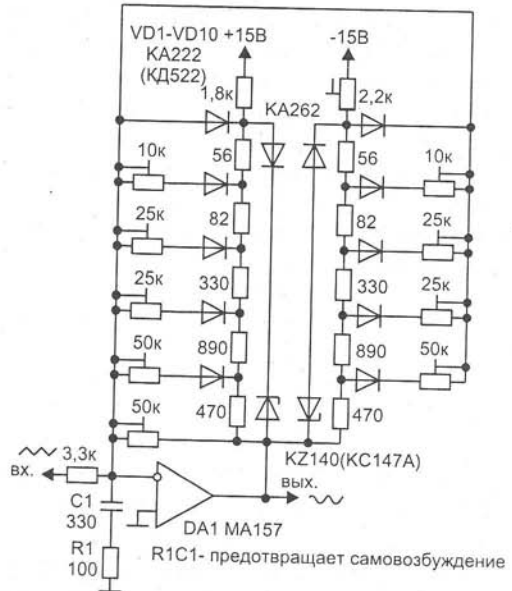


Рис. 2.47. Формирователь синусоидального сигнала из треугольного с 5-уровневым ограничителем

ставлен на рис. 2.48. Микросхема выполнена в корпусе с 20 выводами и содержит все блоки типичного функционального генератора, включая преобразователь треугольного сигнала в синусоидальный.

Функциональная схема микросхемы MAX038 показана на рис. 2.49. Центральное место занимает собственно генератор OSCILLATOR, работа которого основана на заряде и разряде внешней емкости C регулируемым постоянным током. Для этого служит источник регулируемого тока OSCILLATOR CURRENT GENERATOR. Такое решение обеспечивает заземление одной из обкладок обычно переключаемого конденсатора и позволяет менять частоту генератора изменением управляющего напряжения. Кроме того, при этом обеспечена возможность регулировки симметрии (скважности) импульсов и манипуляции.

Применение интегратора на основе управляемых источников тока имеет некоторые преимущества перед интегратором с емкостной отрицательной обратной связью — большая высокочастотность и меньшие искажения вершук треугольных колебаний. Правда, получение высокой линейности треугольного напряжения оказывается более сложной задачей.

Для получения синусоидального напряжения применен преобразователь SINE SHAPER, а для получения прямоугольного напряжения — дополнительный ком-

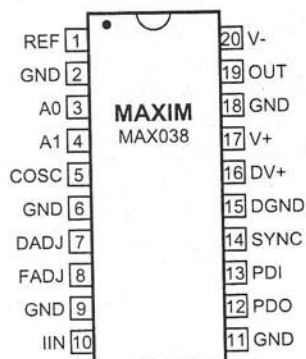


Рис. 2.48. Микросхема MAX038 фирмы MAXIM (вид сверху)

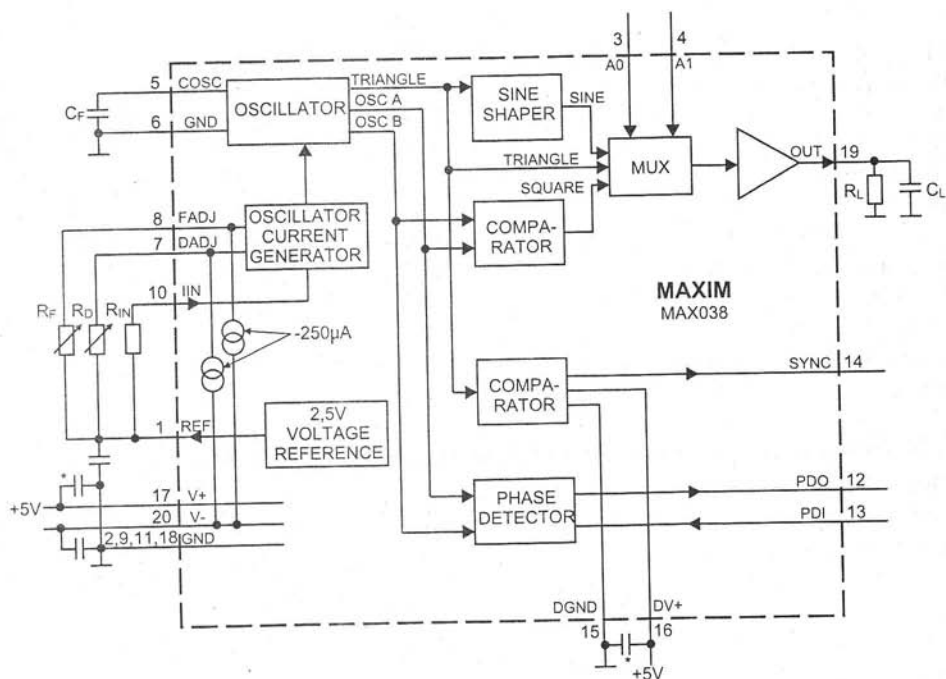


Рис. 2.49. Функциональная схема микросхемы MAX038

паратор COMPARATOR. Коммутатор MUX служит для выбора формы сигнала (синусоидальной, треугольной или прямоугольной), а буферный усилитель для подключения нагрузки $R_L C_L$. Второй компаратор и фазовый детектор PHASE DETECTOR служат для создания сигналов синхронизации, которые используются осциллографом при работе с функциональным генератором.

На рис. 2.50 представлены рекомендованные разработчиком типовые схемы включения этой микросхемы — слева обычная, а справа с несколько улучшенными характеристиками.

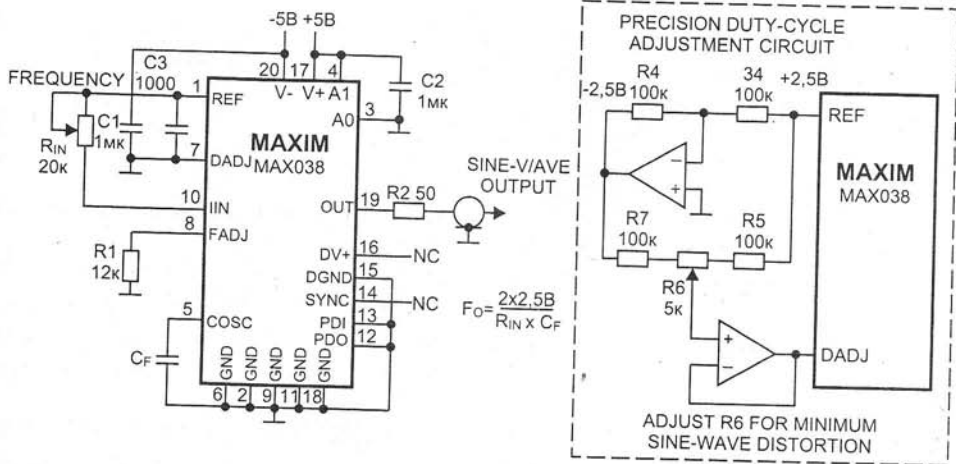
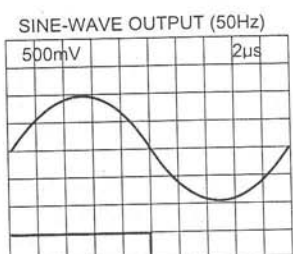


Рис. 2.50. Обычная и улучшенная схемы включения микросхемы MAX038 фирмы MAXIM

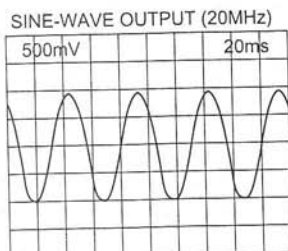
На рис. 2.51 представлены полученные широкополосным осциллографом осциллограммы сигналов функционального генератора на данной микросхеме — слева на частоте 50 Гц, а справа на предельной частоте 20 МГц. Нетрудно заметить, что на низкой частоте форма сигналов безупречна, а на частоте 20 МГц искажения сигнала заметны даже на глаз. Тут, однако, уместно отметить, что функциональные генераторы со столь высокой частотой довольно редкие приборы. Так что микросхема MAX038 пригодна практически для всех массовых моделей функциональных генераторов.

Осциллограммы рис. 2.52 дают представление и о других возможностях микросхемы, в частности о влиянии емкости нагрузки на форму импульсов прямоугольной формы, о возможности манипуляции и частотной модуляции выходного сигнала.

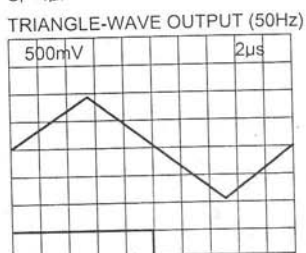
Специалистам о качестве сигналов генераторов лучше всего говорят спектрограммы сигналов. На рис. 2.53 представлены спектрограммы двух сигналов — прямоугольного (слева) и синусоидального (справа). К примеру, из них видно, что уровень второй гармоники синусоидального сигнала с частотой 5.9 кГц на 50 дБ (почти в 300 раз) ниже уровня первой гармоники. Напротив, прямоугольный сигнал дает четко выраженные гармоники (особенно нечетные).



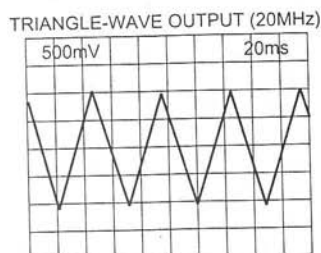
TOP: OUTPUT 50Hz= F_0
BOTTOM: SYNC
 $I_N=50\mu A$
 $C_F=1\mu F$



$I_N=400\mu A$
 $C_F=20pF$

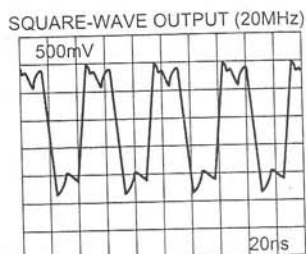


TOP: OUTPUT 50Hz= F_0
BOTTOM: SYNC
 $I_N=50\mu A$
 $C_F=1\mu F$

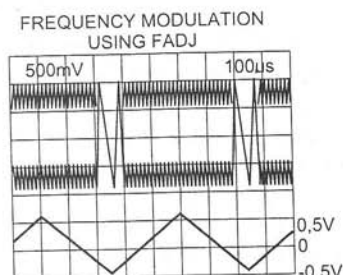


$I_N=400\mu A$
 $C_F=20pF$

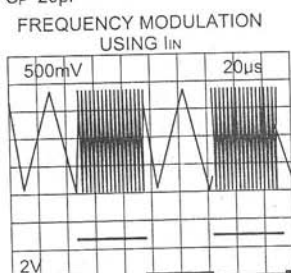
Рис. 2.51. Осциллограммы сигналов функционального генератора MAX038 на частоте 50 Гц (слева) и 20 МГц (справа)



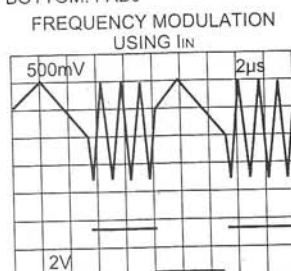
$I_N=400\mu A$
 $C_F=20pF$



TOP: OUTPUT
BOTTOM: FADJ



TOP: OUTPUT
BOTTOM: I_{IN}



TOP: OUTPUT
BOTTOM: I_{IN}

Рис. 2.52. Осциллограммы, иллюстрирующие возможности микросхемы MAX038

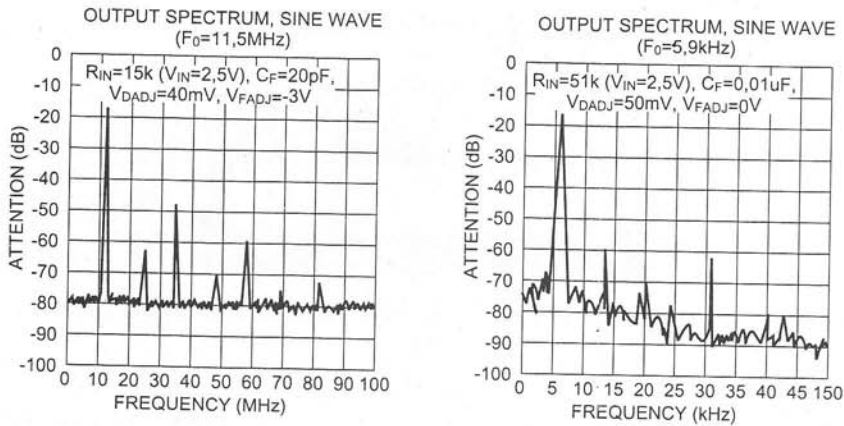


Рис. 2.53. Спектрограммы прямоугольного (слева) и синусоидального (справа) сигналов функционального генератора MAX038

2.3.4. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы Wavetek Meterman

Наша и особенно зарубежная промышленность выпускает множество функциональных генераторов. Рассмотрим наиболее доступные из них. К сожалению, ныне положение таково, что более доступными на нашем рынке стали зарубежные генераторы этого типа. Ничего обидного в этом нет — таковы законы конкуренции. Элементная база за рубежом более обширна, а потому и производство функциональных генераторов обходится дешевле.

Прибор FG2CE фирмы Wavetek Meterman (рис. 2.54) представляет собой типичную «бюджетную» модель функционального генератора для широкого применения. Диапазон частот генератора от 0,3 Гц до 3 МГц перекрывается 7 поддиапазонами. Плавное изменение частоты в чуть более 20 раз осуществляется ручкой с лимбом. Прибор вырабатывает следующие виды сигналов: синусоидальный (коэффициент гармоник менее 1% на частотах до 200 кГц), треугольный, прямоугольный, TTL и CMOS. Возможна перестройка частоты (до 1:100) с помощью внешнего напряжения от 0 до 10 В. Габариты прибора 292×143×93 мм, вес 2 кг.

Поскольку частота является важным параметром любого измерительного генератора, то разумно объединение функционального генератора с простым цифровым частотомером. Это и сделано в приборе FG3CE (рис. 2.55). Этот прибор построен на основе ранее описанной модели и имеет идентичные с ней параметры функционального генератора. Цифровой электронный частотомер прибора построен по счетному принципу и имеет индикатор с 6 разрядами. Диапазоны частот 0,3 Гц — 3 МГц для контроля частоты и от 5 Гц до 150 МГц на внешнем входе. Габариты и вес прибора аналогичны приведенным выше для прибора FG2CE.

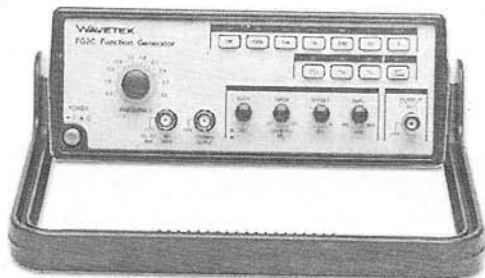


Рис. 2.54. Функциональный генератор FG2CE фирмы Wavetek Meterman

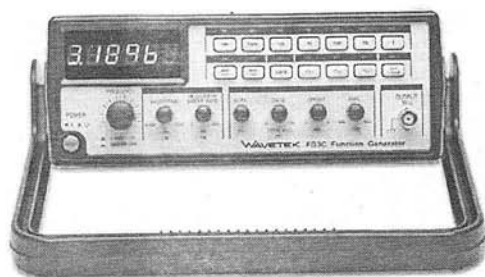


Рис. 2.55. Функциональный генератор FG3CE с встроенным цифровым частотомером

2.3.5. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы METEX

Южнокорейская компания METEX получила известность на нашем рынке своими «бюджетными» измерительными приборами и комплексами, например настольными и портативными мультиметрами и портативными осциллографами. Выпускает она и комбинированные измерительные приборы, имеющие широкие возможности в выполнении разнообразных измерений в сочетании с вполне умеренной ценой. Они прекрасно подходят для служб ремонта и сервиса сложной электронной техники, исследовательских лабораторий и даже для радиолюбителей.

Функциональные генераторы и цифровые частотомеры MSG-9802A/9810A/9816A (рис. 2.56) отличаются только диапазонами частот функционального генератора. У MSG-9802A он составляет от 0,2 Гц до 2 МГц, у MSG-9810A от 1 Гц до 10 МГц, а у MSG-9816A от 1 Гц до 16 МГц. Этот диапазон разбит на 7 поддиапазонов, выбираемых кнопками под цифровым индикатором. Функциональный генератор генерирует сигналы синусоидальной формы, прямоугольные (меандр) и треугольные. Выбор формы сигналов также осуществляется кнопками. Размеры прибора 213×80×260 мм (у MSG-9802A 280×213×110 мм), вес 0,4 кг.

Функциональный генератор позволяет добавлять к этим сигналам постоянную составляющую и менять соотношение времен нарастания и спада сигналов. Все это позволяет получать множество форм сигналов, нужных для тестирования электронных устройств и проведения их исследования.

Управление генераторами удобное и осуществляется с помощью кнопок и переменных резисторов со своими переключателями (выдвигаемые ручки). Частота сигналов меняется с помощью многооборотного резистора, оснащенного ручкой с верньером и шкалой. Это позволяет достаточно точно устанавливать нужную частоту. Сама шкала имеет чисто символический характер и контроль частоты осуществляется цифровым частотомером.

Поскольку функциональный генератор аналоговый, то искажения формы сигналов, связанные с дискретизацией, отсутствуют.

Была практически оценена работа функционального генератора MSG-9810A. Учитывая довольно высокие частоты (до 10 и даже 16 МГц) сигналов для этого применялся цифровой



Рис. 2.56. Функциональный генератор и цифровой частотомер MSG-9810A

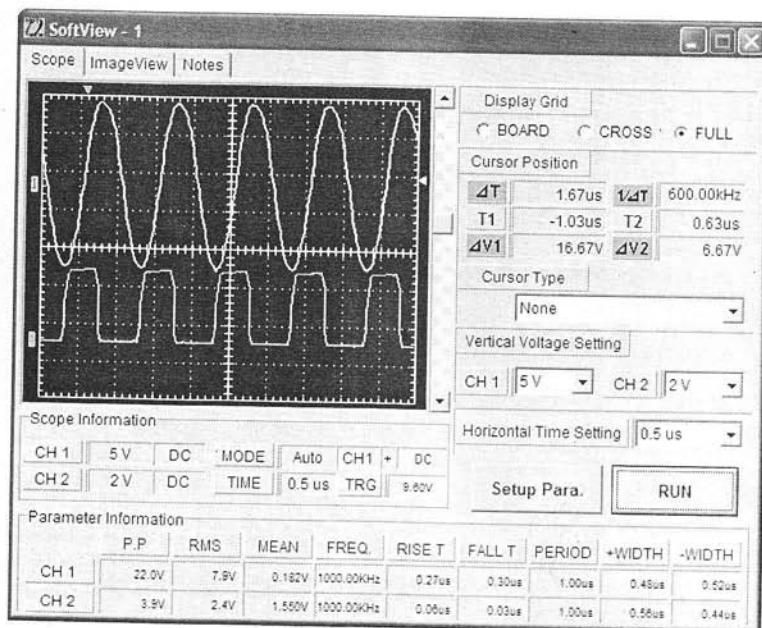


Рис. 2.57. Окно с осциллограммами синусоидального и TTL сигналов на частоте 1 МГц

широкополосный (250 МГц) осциллограф DS-1250 фирмы EZ Digital, подключенный по USB-интерфейсу к компьютеру. Применение такого комплекса позволяет не только наблюдать форму сигналов испытуемого генератора без искажений, но и получить в цифровой форме данные о десятке параметров сигналов по двум каналам.

На рис. 2.57 показано окно с осциллограммами синусоидального и TTL сигналов на частоте генератора, равной 1 МГц. На синусоиде слабо видны признаки ее дискретизации цифровым осциллографом. Но в целом форма синусоиды весьма близка к идеальной (коэффициент гармоник нормируется на уровне менее 1% на частоте 1 кГц). Неплохо выглядит и TTL сигнал. Данные измерений различных амплитудных и временных параметров представлены внизу окна.

На рис. 2.58 и 2.59 показаны осциллограммы треугольного и прямоугольного сигналов на той же частоте. Можно сделать вывод о вполне хорошей форме сигналов на частотах порядка 1 МГц. Это оправдывает наличие «низкочастотной» модели MSG-9802A, у которой нижняя граничная частота равна 0,1 Гц и гарантируется хорошая форма сигналов до предельной частоты в 2 МГц.

Максимальные частоты даже куда более дорогих функциональных генераторов других фирм редко превосходят 3-5 МГц. Поэтому, как немаловажное достоинство приборов фирмы METEX MSG-9810A и MSG-9816A можно отметить максимальные частоты сигналов в 10 и даже 16 МГц. Это резко расширяет их возможности в тестировании и наладке современных импульсных, радиоприемных и иных устройств.

Разумеется, ждать идеальной формы сигналов на таких частотах не приходится. Это подтверждают осциллограммы рис. 2.60 для генератора MSG-9810A для его предельной частоты в 10 МГц. Тем не менее, нетрудно заметить, что даже на этой частоте треугольный сигнал имеет удовлетворительную форму со слегка скруглен-

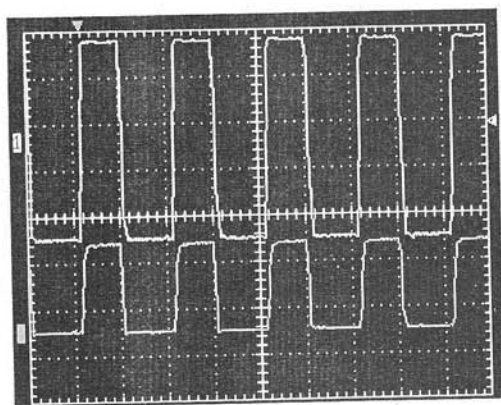


Рис. 2.58. Осциллограммы
прямоугольного и TTL сигналов
на частоте 1 МГц

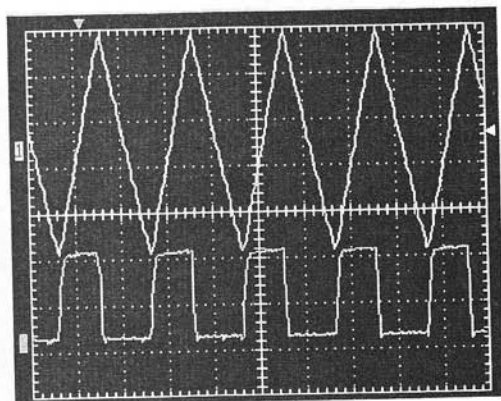


Рис. 2.59. Осциллограммы
треугольного и TTL сигналов
на частоте 1 МГц

ными вершинами. Форма прямоугольных импульсов, увы, далека от идеальной, как на TTL, так и на основном выходе. Для ее улучшения рекомендуется подключать к выходу согласованную нагрузку в 50 Ом.

Как уже отмечалось, у генераторов есть возможность регулировки асимметрии сигналов — отношение длительности полупериодов примерно от 1/3 до 3/1 и более (рис. 2.61). Введение асимметрии позволяет получать линейно-нарастающие и линейно-спадающие сигналы, а также сигналы прямоугольной формы со скважностью, заметно отличающейся от 2 (это значение характерно для меандра). Это также расширяет области применения прибора, например, позволяет использовать его в качестве генераторов развертки и запускающих импульсов.

Наряду с основным выходом OUT (амплитуда сигнала 20 В без нагрузки и 10 В на согласованной нагрузке 50 Ом) предусмотрен выход TTL для несимметричных почти прямоугольных импульсов с параметрами, характерными для TTL микро-

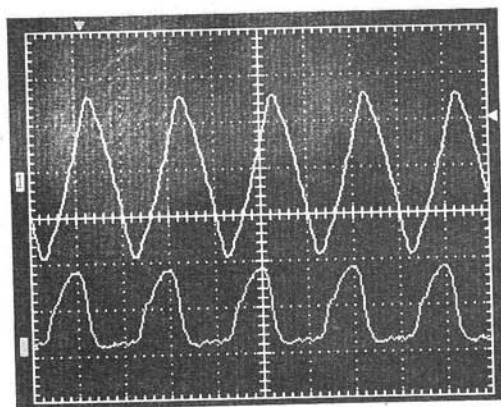


Рис. 2.60. Осциллограммы
треугольного и TTL сигналов
на частоте 10 МГц

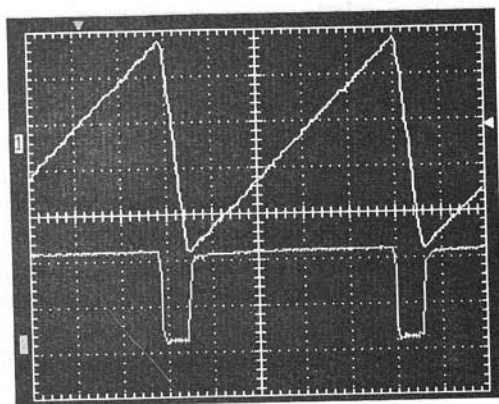


Рис. 2.61. Осциллограммы
треугольного и TTL сигналов
на частоте 1 МГц с максимальной
асимметрией

схем. При выдвигании ручки регулировки амплитуды включается аттенюатор, ослабляющий сигнал в 10 раз (20 дБ).

Для точного контроля частоты сигналов функционального генератора необходим цифровой частотомер. Поэтому вполне естественно объединение в одном приборе серии MSG функционального генератора и цифрового частотомера. Частотомер описываемых приборов имеет два канала. Канал А обеспечивает измерение частот до 20 МГц с высокоомным входом (1 МОм, максимальный размах напряжения от пика до пика 35 В), а канал В частот от 20 МГц до 2,7 ГГц на 50-омном входе (максимальное напряжение от пика до пика 3 В). Измерения частот производится подсчетом числа периодов сигналов в интервалах времени 0,1, 1 и 10 секунд. Это соответствует разрешению по частоте 10, 1 и 0,1 Гц. Результаты измерения частоты сигналов или функционального генератора отображаются на 8-разрядном цифровом индикаторе (с белым или красным цветом цифр). Для канала А предусмотрена возможность подачи сигнала с выхода функционального генератора (для контроля его частоты) или со входа СН-А.

2.3.6. Программа стыковки приборов METEX с компьютером

Для своих мультиметров и частотомеров, в том числе входящих в комбинированные приборы, компания METEX поставляет программу BenchView, которая позволяет вводить данные измерений частоты в компьютер и отображать их в табличной и графической форме. Разумеется, это возможно после подключения приборов к компьютеру с помощью прилагаемого интерфейсного RS-232 кабеля и после установки программного обеспечения с дискеты.

На рис. 2.62 представлено основное окно программы при работе с цифровым частотомером приборов серии MSG. Работа с окном вполне очевидна, как и назначение деталей интерфейса пользователя.

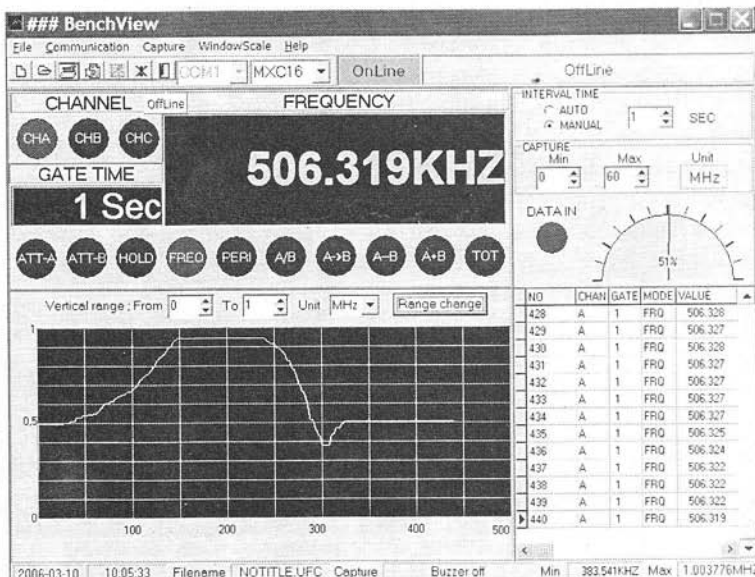


Рис. 2.62. Основное окно программы BenchView при работе с цифровым частотомером приборов серии MSG



Рис. 2.63. Окно графика зависимости частоты от номера отсчета (времени)

В позиции WindowScale меню программы можно задать или убрать вывод того или иного частичного окна. Для примера на рис. 2.63 представлено окно графики. Оно позволяет наблюдать график зависимости частоты от времени, подобный показанному на рис. 2.62 в укрупненном виде. В этом окне можно поменять пределы отображаемых частот и подтвердить это активизацией кнопки Range Change. В правой части сверху окна рис. 10 можно задать интервал времени измерений и интервал их повторений (по умолчанию 1 с).

2.3.7. Функциональный генератор 33220A фирмы Agilent

Представителем функциональных генераторов высокого класса является модель 33220A известная своими высококлассными измерительными приборами фирмы Agilent. Внешний вид прибора спереди и сзади представлен на рис. 2.64. Прибор имеет диапазон частот сигналов до 20 МГц с возможностью цифровой установки частоты и ее контролем по встроенному цифровому частотомеру. Прибор вырабатывает 11 стандартных форм сигналов. Имеется возможность AM, FM, PM, FSK и PWM модуляции.

Принцип формирования сигнала цифровой. Используется 14-битовое кодирование со скоростью до 50 Мвыб/с при 64 К точек. Предусмотрено линейное и логарифмическое качание частоты. Предусмотрена связь с компьютером по интерфейсам USB, GPIB и LAN. К массовым подобные приборы, разумеется, не относятся.



Рис. 2.64. Функциональный генератор 33220A фирмы Agilent

2.4. Генераторы качающейся частоты (ГКЧ) и измерители АЧХ

2.4.1. Промышленные ГКЧ и измерители АЧХ

Генераторами качающейся частоты (ГКЧ) называют генераторы, частота которых меняется обычно изменением некоторого управляющего напряжения. Чаще всего частота меняется с помощью варикапов или (в функциональных генераторах) изменением токов заряда и разряда времязадающего конденсатора.

На основе ГКЧ строятся измерители амплитудно-частотных (или просто частотных) характеристик (АЧХ) [60, 61]. Это одни из весьма эффективных и полезных, но сложных приборов, применяемых при регулировке и настройке различных электронных устройств. Например, таких, как активные фильтры на операционных усилителях, резонансные цепи, частотные дискриминаторы, усилители, радиоприемники, телевизоры и т. д. Любопытно отметить, что первый отечественный ламповый измеритель частотных характеристик ИЧХ-1 был весьма громоздким прибором весом в 200 кг (!). Он позволял снимать АЧХ в диапазоне частот от 0,1 до 20 МГц при девиации частоты до 4 МГц.

В СССР в середине 80-х годов прошлого века был освоен массовый выпуск вполне современного по тем временам измерителя АЧХ Х1-50. Небольшой, напоминающий осциллограф, прибор (рис. 2.65) предназначен для исследования АЧХ и настройки ВЧ- и СВЧ-узлов с воспроизведением АЧХ на экране ЭЛТ. Прибор Х1-50 применяется при производстве, настройке и ремонте радиоэлектронной аппаратуры в лабораториях и цехах, ремонтных мастерских, а также в качестве сервисного прибора при ремонте телевизоров на дому.

Характеристики Х1-50:

- Широкий диапазон частот: 0,36—1002 МГц (0,36-436, 434-636 и 636—1002 МГц).
- Отчет частоты: по цифровому индикатору в точке останова развертки и по меткам.
- Полоса качания частоты: в узкополосном режиме 0,5—20 МГц, в широкополосном режиме от $0,01f_{\text{макс}}$ до всего поддиапазона.
- Частотные метки (кварцованные): через 1 и 10 МГц.
- Выходное напряжение ГКЧ: синусоидальное со стабильной амплитудой около 100 мВ на нагрузке 75 Ом.
- Неравномерность собственной АЧХ: в максимально узкой полосе качания: $\pm 0,5$ дБ в широкой полосе качания $\pm 1,5$ дБ.
- Пределы ослабления выходного напряжения: 0—50 дБ
- Чувствительность канала вертикального отклонения, мм/мВ: без детекторов — 10; по входу согласованной детекторной головки — 1



Рис. 2.65. Измеритель АЧХ Х1-50

- Входное сопротивление и емкость высокоомной детекторной головки: 10 кОм и 2 пФ.
- Встроенный генератор сетчатого поля для испытания видеотракта телевизоров.
- Режим использования в качестве осциллографа с автоколебательной разверткой.
- Потребляемая мощность: 70 ВА.
- Масса: 8,5 кг.
- Габариты: 308×304×133 мм.

Приведем краткие данные еще по нескольким измерителям АЧХ отечественного производства.

ТЕСТ-2

Диапазон частот 1—1000 МГц, полоса качания: 0,5—20 МГц и $0,01f_{\text{макс}}$ —1000 МГц. Габариты 308×133×304, масса М-8,5 кг. Есть возможность измерения КСВ (коэффициента стоячей волны).

X1-40

Диапазон частот 20 Гц—1 МГц, плавно изменяется полоса качания, габариты 495×475×255, масса 35 кг. Предназначен для исследования низкочастотных устройств.

X1-42

Диапазон частот 1—1250 МГц, два блока с размерами 488×173×507 и 488×173×507, общая масса 45 кг.

X1-48

Диапазон частот 0,1—150 МГц (три поддиапазона: 0,1—1,5 МГц, 1—15 МГц и 10—150 МГц), размеры 480×170×490, масса 14 кг. Предназначен для исследования радиоприемных и телевизионных устройств с частотами до 150 МГц.

X1-54

Диапазон частот 0,1-150 МГц, полоса качания 1500 Гц — 5,7 МГц или 1500 Гц — 150 МГц, микропроцессорное управление, самодиагностика, диалоговый режим, 2 блока с размерами 490×135×475 мм и 490×215×475 мм, общая масса 36 кг

X1-55

Диапазон частот 1—1400 МГц, полоса качания 0,1—11 МГц, 0,3—132 МГц и 3—1400 МГц, микропроцессорное управление, самодиагностика, диалоговый режим, 2 блока с размерами 488×173×507 мм и 488×173×507 мм, общая масса 46 кг.

X1-56

Диапазон частот 1-250 МГц (3 поддиапазона: 1—10 МГц, 5 Гц-50 МГц и 25—250 МГц), микропроцессорное управление, максимальный уровень сигнала 1 мВт; размеры 488×507×73, масса 22 кг.

Нетрудно заметить, что большинство приборов этого типа — тяжелые и громоздкие изделия. Они явно не предназначены для массовых измерений. Поэтому помимо промышленных измерителей АЧХ полезно рассмотреть альтернативные средства, пригодные для снятия АЧХ, например, на основе применения массовых функциональных генераторов с управляемой в широких пределах частотой.

2.4.2. Применение функциональных генераторов в качестве ГКЧ

Ныне для построения измерителей АЧХ на низких и умеренно высоких частотах (до 10—20 МГц) могут использоваться функциональные генераторы с перестройкой частоты напряжением. К таким приборам относятся описанные выше функциональные генераторы фирмы METEX. В генераторах имеется встроенная схема развертки, которая позволяет превратить его в генератор качающейся частоты. Качание может осуществляться как по линейному, так и логарифмическому законам. Время качания регулируется от 20 мс до 2 с. При этом отношение максимальной частоты к минимальной может достигать до 100 раз и более. Есть также возможность управления частотой напряжением, поданный на вход VCF IN (от 0 до 10 В).

При использовании прибора в качестве генератора качающейся частоты он может быть подключен к аналоговому сервисному осциллографу ОСУ-20 — рис. 2.66 (сверху). Таким образом, образуется простая схема измерения АЧХ.



Рис. 2.66. Блок-схемы построения АЧХ объекта

Недостаток такой простой блок-схемы АЧХ заключается в необходимости регулировки запуска развертки и ее частоты. Изменение полосы качания или частоты встроенной в функциональный генератор развертки ведет к необходимости подстройки осциллографа. Это вполне обычная подстройка, так что получить на экране осциллографа устойчивое изображение кривой АЧХ не так уж и сложно. Однако точный контроль диапазона частот в этом случае затруднен.

Для проверки работы простейшей схемы измерителя АЧХ возьмем в качестве испытуемого объекта дифференцирующую RC -цепь ($R=750$ Ом, $C=150$ пФ) с малой постоянной времени. Как известно, такая цепь имеет практически линейную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), если период сигнала остается заметно большим ее постоянной времени. Осциллографирование (см. рис. 2.67,а) показало, что АЧХ RC -цепи действительно практически линейная. При переключении развертки прибора MSG-10A на логарифмический масштаб, АЧХ должна была смениться на экспоненциальную. Это и произошло — см. рис. 2.67,б.

Эти примеры говорят о высокой эффективности функциональных генераторов серии MSG в роли генераторов качающейся частоты при изменении частоты в широких пределах (от нескольких раз до десятков, а порою и сотен раз). Как недостаток приборов в таком применении стоит отметить отсутствие выхода внутренней развертки или сигнала синхронизации с ней в большинстве генераторов (хотя на задней стенке приборов предусмотрены отверстия для разъема такого выхода). Это затрудняет синхронизацию исследуемых процессов с аналоговым осциллографом. Однако, как видно из рис. 2.67, она вполне возможна. Органами управления генератора и развертки осциллографа можно вывести на экран осциллографа нужный участок исследуемой АЧХ.

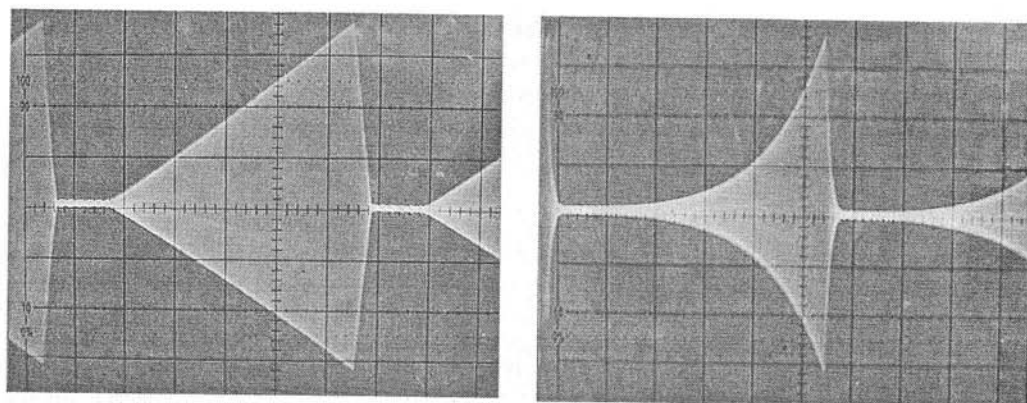


Рис. 2.67. Осциллограмма сигнала на выходе RC-цепи при линейном (а) и логарифмическом (б) качании частоты

2.4.3. Построение ГКЧ на высоких частотах

Вполне полноценный ГКЧ и измеритель АЧХ легко создать, просто подключив к объекту испытаний функциональный генератор и осциллограф — рис. 5.66 сверху. Если снимается АЧХ высокочастотных цепей, то между испытуемым устройством и осциллографом нужно включить ВЧ-диод. Он, вместе со входной емкостью осциллографа, образует диодный детектор, обеспечивающий построение АЧХ в виде линии. Большое выходное напряжение функционального генератора (несколько вольт) позволяет получить вполне линейное детектирование даже при применении кремниевых диодов.

Если функциональный генератор имеет выход развертки (при его отсутствии в MSG-9810A такой выход нетрудно добавить), то лучшие возможности дает применение осциллографа в режиме XY (рис. 2.66 снизу). При этом на вход X канала CH1 подается сигнал развертки, а на вход Y канала CH2 подается сигнал с выхода испытуемого устройства (в случае необходимости через диод).

Но приведенные блок-схемы не являются единственными. Если осциллограф имеет выход генератора развертки, то можно подключить его ко входу VCF IN функционального генератора.

На рис. 2.68 показана АЧХ двухконтурного полосового фильтра промежуточной частоты от профессионального радиоприемника при использовании блок-схемы, показанной на рис. 5.110 снизу. От вида измерительной блок-схемы форма АЧХ практически не зависит. Хорошо видны два горба АЧХ, которые характерны при связи между LC-контурами больше критической.

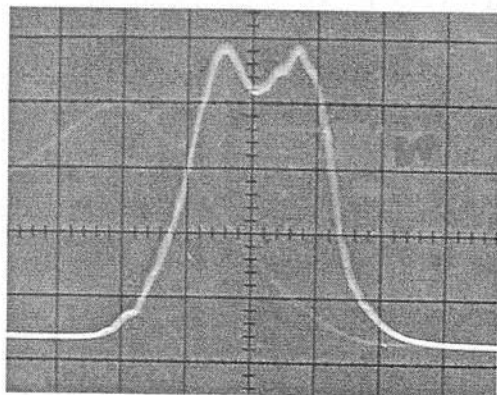


Рис. 2.68. Фото АЧХ двухконтурного полосового фильтра промежуточной частоты

Меняя частоту функционального генератора можно перемещать кривую АЧХ по оси частот (X). Масштаб оси частот можно менять регулятором

SWEEP WIDTH. Регулятор **SWEEP RATE** позволяет изменять частоту развертки. При низких частотах развертки изображение заметно мигает, при высоких частотах АЧХ может искажаться. Если ручка этого регулятора выдвинута, то изменение частоты происходит по логарифмическому закону, что часто используется при снятии АЧХ усилителей и других достаточно широкополосных устройств. Для контроля масштаба частотной оси можно использовать встроенный в функциональный генератор MSG-9810A цифровой частотомер. Для этого достаточно замерить разность частот при сдвиге АЧХ на одно или два деления по горизонтали.

При использовании вместо аналогового осциллографа цифрового можно заметно повысить стабильность представления АЧХ. Поскольку цифровой осциллограф является запоминающим, то он позволяет работать с меньшими частотами развертки функционального генератора, что обеспечивает повышенную точность построения АЧХ и получение стабильного не мерцающего изображения АЧХ — рис. 2.69. Этому способствует и включение режима усреднения, который имеют цифровые осциллографы серии DS-1000.

При соответствующей установке полосы качания можно проводить количественные измерения. Для этого можно также использовать перемещение исследуемой АЧХ с помощью ручки изменения частоты с контролем последней по показаниям цифрового частотомера. Однако следует отметить, что первичную настройку избирательных устройств на высоких частотах всегда лучше выполнять с помощью генераторов стандартных сигналов с точной установкой частоты.

2.4.4. Работа с измерителем АЧХ X1-50

При всей привлекательности функциональных генераторов в роли НЧ и ВЧ ГКЧ они имеют ряд недостатков:

- большинство функциональных генераторов имеют низкие максимальные частоты (даже с учетом возможности применения высших гармоник) не выходящие за пределы 30 МГц;
- стабильность частоты низка для испытаний высокоизбирательной ВЧ-аппаратуры, например кварцевых и LC-фильтров;
- трудно получить малые калиброванные изменения частоты в ходе качания;
- отсутствуют метки для точного измерения частоты.

Эти недостатки делают по-прежнему актуальной разработку и применение ВЧ- и СВЧ-измерителей АЧХ. К сожалению, доступные приборы этого класса на нашем рынке ныне отсутствуют (не считая описанного выше X1-50 и узко специализированных приборов для настройки телевизоров). В связи с этим ограничимся описанием работы с прибором X1-50, который до сих пор популярен в службах сервиса и ремонта (особенно телевизоров) и среди опытных радиолюбителей. Это небольшой прибор с весом чуть больше 8 кг.

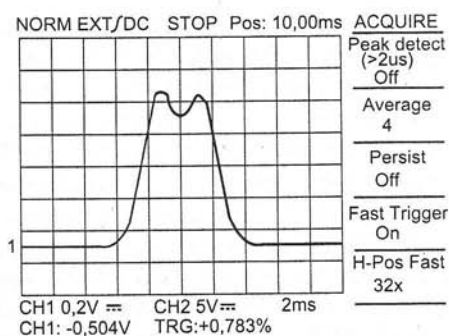


Рис. 2.69. АЧХ двухконтурного полосового фильтра промежуточной частоты (копия экрана цифрового осциллографа DS-1250)

Варианты функциональных схем измерения АЧХ представлены на рис. 2.70. Схема рис. 2.70,а используется для проверки качества работы прибора. В ней сигнал с выхода подается на широкополосную низкоомную коаксиальную детекторную головку с германиевым диодом, а с ее выхода на вход осциллографа прибора. На выходе формируются две параллельные линии — нулевого отчета и выхода детекторной головки. Линия нулевого уровня формируется при обратном ходе развертки путем блокирования выхода сигнала.

В общем случае (снятие АЧХ четырехполосников — рис. 2.70,б) сигнал с выхода ГКЧ —дБ подается на исследуемое устройство, а с его выхода на детекторную головку. При необходимости сигнал можно ослабить в диапазоне уровней ослабления от 0 до 50 дБ. Обычно используется высокоомная детекторная головка. В случае исследования 75-омных четырехполосников можно использовать более широкополосную низкоомную детекторную головку, выполненную в виде коаксиального переходника.

Схема рис. 2.70,в используется, если входное или выходное сопротивления исследуемых четырехполосников отличается от 75 Ом (например, равно 50 Ом). В этом случае следует использовать прилагаемые к прибору коаксиальные переходники. Следует тщательно следить за согласованием входных и выходных цепей, поскольку при его отсутствии возможны очень сильные искажения АЧХ.

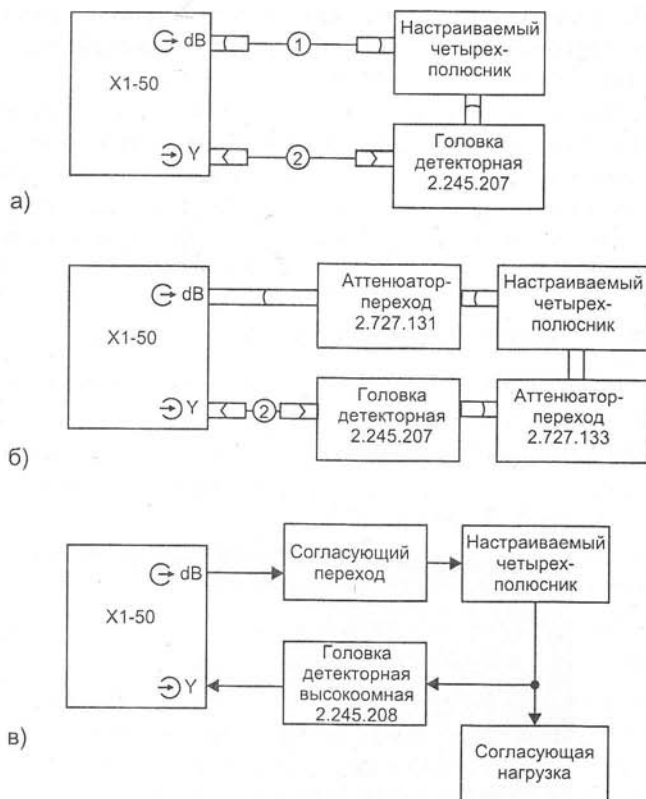


Рис. 2.70. Основные функциональные схемы применения измерителя АЧХ X1-50: а — самоконтроль прибора, б — снятие АЧХ согласованных четырехполосников и в — четырехполосников с сопротивлением, отличным от 75 Ом

На рис. 2.71 показан вид части передней панели прибора Х1-50 с АЧХ широкополосного 50-мегагерцового усилителя (милливольтметра ВЗ-40). Надписи на рисунке поясняют назначение основных органов управления прибора и назначение деталей осциллограммы АЧХ.

Осциллограммы АЧХ, получаемые прибором Х1-50 нередко далеки от тех, которые обычно приводят в учебниках по радиотехнике и нуждаются в некоторой интерпретации. Во-первых, надо отметить, что прибор формирует нулевую линию отсчета — на рис. 2.71 она показана в нижней части экрана. Во-вторых, при работе в первом частотном поддиапазоне генерируемые частоты получаются в результате смещения частот от двух СВЧ-генераторов. Поэтому в левой части АЧХ отчетливо виден провал почти до нуля напряжения, соответствующий нулевой разностной частоте в зоне нечувствительности прибора (она составляет 300—400 кГц). В-третьих, на самой АЧХ можно наблюдать также частотные метки типа нулевых биений, создаваемые кварцевым генератором частотных меток. Эти метки могут иметь частоты 10 или 1 МГц. По ним (амплитуда регулируется ручкой Метки МГц — на рис. 2.71 не видна) можно грубо отсчитывать частоты.

Наконец, в-четвертых, на АЧХ хорошо видна яркая точка останова (выглядит как светлый кружок на рис. 2.71) которая формируется полочкой останова генератора развертки ГКЧ прибора. Эта точка служит для отсчета частоты, которую можно измерить встроенным цифровым частотомером с разрешением 1 МГц. Для этого надо нажать кнопку СЧЕТ. Изображение в этом случае мигает (частота миганий задается реле) и можно отсчитать частоту по индикатору частотомера (справа и выше экрана).

Прибор позволяет также формировать метки от внешнего генератора синусоидальных сигналов, сигнал которого подается на вход ВНЕШ. При этом формируется одна метка (впрочем, как показала практика, можно наблюдать и метки на гармониках внешнего генератора), что облегчает отсчет частоты в интересующих пользователя местах АЧХ. Для измерения частоты меток можно использовать встроенный в прибор цифровой частотомер. Возможно переключение полярности осциллографического входа и плавное и грубое изменение чувствительности (делителями 1:1, 1:10 и 1:100).

Применение прибора в качестве обычного простого осциллографа и генератора сеточного поля (выход ГЕНЕР.) в особых комментариях не нуждается. В ЗИП прибора имеется ряд насадок для изменения параметров входной цепи осциллографа и набор щупов, игл и петель. Диапазон частот осциллографа ограничен сот-



Рис. 2.71. Часть передней панели прибора Х1-50 с осциллограммой АЧХ

ниями кГц, развертка только автоколебательная. На роль серьезного осциллографа прибор явно не претендует.

С применением Х1-50 есть немало проблем. Малый размер экрана и отсутствие подсветки масштабной сети затрудняют фотографирование АЧХ. Точность отсчета (особенно уровня) невелика, так что прибор вряд ли сгодится для точных количественных измерений — скорее он служит для качественного представления графика АЧХ достаточно широкополосных устройств диапазона ВЧ и СВЧ. Стабильность частоты генератора при частотах ниже 10 МГц явно не удовлетворительная. Малый уровень выходного сигнала (около 100 мВ) исключает применение кремниевых диодов в детекторных головках, и даже при применении германиевых диодов дает заметную нелинейность передаточной характеристики детектора — зависимости выходного постоянного напряжения от уровня входного синусоидального сигнала (выхода ГКЧ).

При использовании низкоомной (75 Ом) согласованной детекторной головки заметно уменьшается выходное напряжение ГКЧ и АЧХ приходится рассматривать при максимальной чувствительности осциллографа. Немало проблем создает и довольно низкое входное сопротивление даже высокоомной детекторной головки (10 кОм, 2 пФ) и квадратичный (а не линейный) характер передаточной характеристики. Это затрудняет исследование высокочастотных резонансных цепей. Для этого пользователю может потребоваться изготовление простой, действительно высокоомной детекторной головки. Для ее питания можно использовать выход маломощного источника питания с регулировкой напряжения от 0 до -12 В, который есть на задней стенке прибора. Описание различных схем детекторов (в том числе с удвоением напряжения, компенсацией нелинейности и с применением в качестве детектора полевого транзистора) можно найти в [97].

Если пользователь имеет электронный милливольтметр ВЗ-48 то его можно эффективно использовать в системе контроля АЧХ всевозможных цепей с диапазоном частот до 50 МГц — т. е. именно таких устройств и в том диапазоне частот, где возникают большие трудности в применении прибора Х1-50 из-за низкого входного сопротивления стандартных детекторных головок. При включении милливольтметра между выходом ГКЧ и испытуемым устройством выход последнего нагружается на довольно высокое входное сопротивление милливольтметра (20 МОм и 8 пФ без делителя и даже 4 пФ с делителем 1/1000), а детекторная головка подключается к выходу широкополосного усилителя милливольтметра с выходным сопротивлением 50 Ом.

АЧХ усилителя милливольтметра показана на рис. 2.71 и демонстрирует приличную равномерность в диапазоне частот до 50 МГц. Удобным является контроль уровня напряжения на выходе исследуемого устройства и возможность исследования устройств с усилением при достаточно высоком уровне выходных напряжений. Для этого потребуется применение делителя-насадки 1:1000 из комплекта милливольтметра.

В целом надо отметить, что измеритель АЧХ Х1-50 ориентирован на исследование достаточно широкополосных устройств, например, трактов телевизионных приемников, видеоусилителей, СВЧ-цепей и т. д. Он (без дополнительных согласующих устройств) плохо подходит для исследования узкополосных и сравнительно низкочастотных устройств, например, радиоприемных или усилительных. Для такого исследования куда лучше применять функциональные генераторы в роли ГКЧ, что было описано выше. Применение Х1-50 для настройки телевизионных устройств довольно подробно описано в инструкции по эксплуатации этого прибора.

2.5. Измерительные комплексы MS-9150/60/70 фирмы METEX

2.5.1. Приборный состав комплекса

Компания METEX выпускает также измерительные комплексы MS-9150, MS-9160 и MS-9170. Эти устройства объединяют в одном корпусе сразу 4 прибора: аналоговый функциональный генератор, цифровой частотомер, универсальный цифровой мультиметр и трехканальный источник питания. Варианты оформления приборов (с темной и светлой передними панелями) представлены на рис. 2.72.

Нельзя не отметить, что стоимость комплексов заметно ниже стоимости отдельно приобретаемых приборов, аналогичных по параметрам. Таким образом, приобретение комплексов экономит не только место на рабочем столе пользователя, но и его средства.

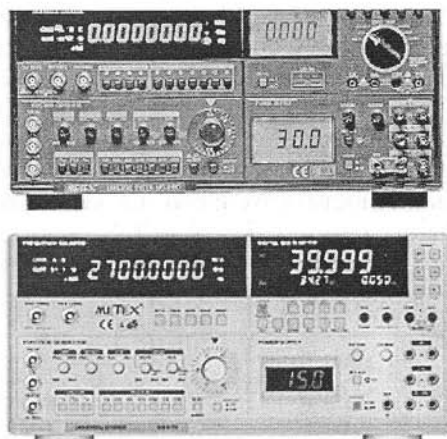


Рис. 2.72. Измерительные комплексы серии MS фирмы METEX

2.5.2. Универсальный мультиметр комплексов

Мультиметр комплексов имеет свой дисплей служит для измерения следующих параметров электрических сигналов:

- Дисплей 3 3/4 разряда (максимальное показание 3999) + дополнительный дисплей + линейная шкала (у MS-9170 дисплей 5 3/4 разряда).
- Режим «Data hold» (сохранение данных на дисплее).
- Диапазоны измерения постоянного напряжения: DCV 400 мВ — 4 — 40 — 400 — 1000 В.
- Диапазоны измерения переменного напряжения: ACV 400 мВ — 4 — 40 — 400 — 750 В.
- Диапазоны измерения постоянного тока: DCI 4 — 40 — 400 мА — 4 А, 20 А.
- Диапазоны измерения переменного тока: ACI 4 — 40 — 400 мА — 4А — 20 А.
- Диапазоны измерения сопротивления: 200 Ом — 4 — 40 — 400 кОм — 4 — 40 МОм.
- Измерение индуктивности: 40 — 400 мГн (только у MS-9160).
- Тест диодов и транзисторов — есть (только у MS-9150).
- Режим прозвона цепей на проводимость со звуковым сигналом < 40 Ом — есть (только у MS-9150).
- Питание: от внутреннего источника.

2.5.3. Функциональный генератор и частотомер комплексов

Функциональный генератор и частотомер у этих приборов совершенно аналогичны примененным в приборах серии MSG и описанным выше. Аналогично и применяемое программное обеспечение.

Стоимость измерительных комплексов заметно меньше, чем стоимость отдельно приобретаемых приборов, входящих в комплекс. Вес комплекса довольно большой — 15 кг, что связано с включением в него источников питания. Размеры приборов 375×370×165 мм.

Приборы не лишены недостатков. Так, в функциональных генераторах нет выхода развертки, управляющей качанием частоты, что усложняет построение на них измерителей АЧХ. Достаточно сложна точная установка частоты по показаниям цифрового частотомера. Приведенные в инструкциях параметры приборов не дают полного представления об их возможностях и конкретных значениях параметров. Прилагаемое программное обеспечение примитивно и явно недоработано. В связи с этим некоторые возможности приборов (например, компьютерная обработка результатов вычислений) остаются не полностью реализованными.

2.5.4. Встроенный лабораторный источник питания

Встроенный лабораторный источник питания имеет три канала, параметры которых представлены ниже:

Параметр	Выход 1	Выход 2	Выход 3
Выходное напряжение	0 – 30 В	5 В фиксир.	15 В фиксир.
Ток			
MS-9150	0-2 А	2 А	1А
MS-9160	0-3 А	2 А	1А
MS-9170	0-3 А	2 А	1А
Пульсации	До 1 мВ	До 2 мВ	До 2 мВ
Точность	0,1% + 5 мВ	0,1% + 30 мВ	0,1% + 30 мВ
Установки			

2.6. Широкополосные и импульсные интегральные усилители и компараторы

2.6.1. О требованиях к интегральным усилителям

Часто параметры измерительных приборов и трактов вертикального отклонения осциллографов не удовлетворяют нужным параметрам для решения тех или иных задач в области измерений. Обычно неудовлетворенность вызывает недостаточная чувствительность или чрезмерно большая входная емкость входных цепей измерительных приборов.

Особенно остро эта проблема встает при измерении параметров оптических импульсов от лазерных светодиодов и лазерных светоизлучающих диодов. В этом случае для приема оптических импульсов применяются сверхскоростные р-і-п или лавинные фотодиоды, создающие сигналы малой амплитуды с временами нарастания в доли или единицы нс. Для просмотра этих сигналов осциллографами их надо усилить — см. рис. 2.73.

С некоторыми электронными осциллографами и милливольтметрами поставляются активные пробники, содержащие повторитель напряжения на биполярном или полевом транзисторе [62]. Подобные пробники можно изготовить самостоятельно. Однако они имеют серьезные недостатки: большое напряжение сдвига, бо-

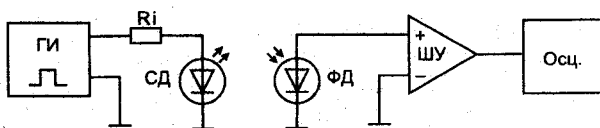


Рис. 2.73. Типовая функциональная схема установки для измерения параметров лазерных светодиодов и светоизлучающих решеток (ГИ — генератор импульсов, СД — светоизлучающий или лазерный светодиод, ФД — широкополосный фотодиод, ШУ — широкополосный усилитель, Осц. — осциллограф)

льшой температурный дрейф и меньший единицы коэффициент передачи. Все это нарушает калибровку осциллографов и ухудшает точность измерений.

В наше время высококачественные усилители для повышения чувствительности измерительных приборов целесообразно строить только на основе специализированных интегральных микросхем — операционных и широкополосных дифференциальных усилителях и аналогов транзисторов [49, 58]. Такие микросхемы имеют полосу частот от десятков до сотен мегагерц при коэффициенте усиления от 1 до 10 (с обратной связью), малые шумы и ничтожный температурный дрейф, высокую стабильность работы и ничтожно малый сдвиг по напряжению. Именно такие усилители и устройства на них описываются ниже.

2.6.2. Широкополосные интегральные усилители фирмы BURR-BROWN

Обычные интегральные операционные усилители имеют небольшую полосу частот — от десятков килогерц до единиц мегагерц. Такие усилители выпускаются большим числом фирм и вполне пригодны для повышения чувствительности низкочастотных осциллографов, применяемых, например, для усиления биомедицинских или звуковых сигналов. Ввиду общеизвестности подобные усилители здесь не рассматриваются.

Мы остановимся на рассмотрении только широкополосных и сверхширокополосных интегральных усилителей, обеспечивающих полосу усиливаемых частот в десятки и сотни мегагерц. Такие усилители на микросхемах выпускают фирмы Analog Devices, BURR-BROWN, Dallas Semiconductor MAXIM, Motorola, Texas Instruments (TI) и др. На отечественный рынок эти микросхемы поставяет компания «ПЛАТАН» [58].

На рис. 2.74 приведено расположение выводов широкополосного интегрального усилителя OPA622/AU фирмы BURR-BROWN, недавно вошедшей в крупную корпорацию TI (Texas Instruments), известную разработкой широкой номенклатуры измерительных приборов самого различного назначения. В состав микросхемы входят четыре функциональных узла:

- OTA (Operational Transconductance Amplifier) — операционный усилитель с преобразованием импеданса;
- OB (Output Buffer) — выходной буфер;
- FB (Feedback Buffer) — буфер обратной связи;
- Biasing — каскад балансировки.

Основные схемы включения усилителя представлены на рис. 2.75. В них используется отрицательная обратная связь по току или по напряжению. Кроме того, возможно получение инверсии входного сигнала или ее отсутствие. На схемах указано значение коэффициента усиления усилителя G_{CL} .

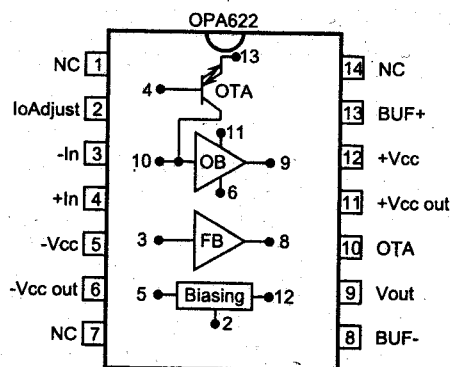


Рис. 2.74. Расположение выводов и состав широкополосного интегрального усилителя OPA622/AU

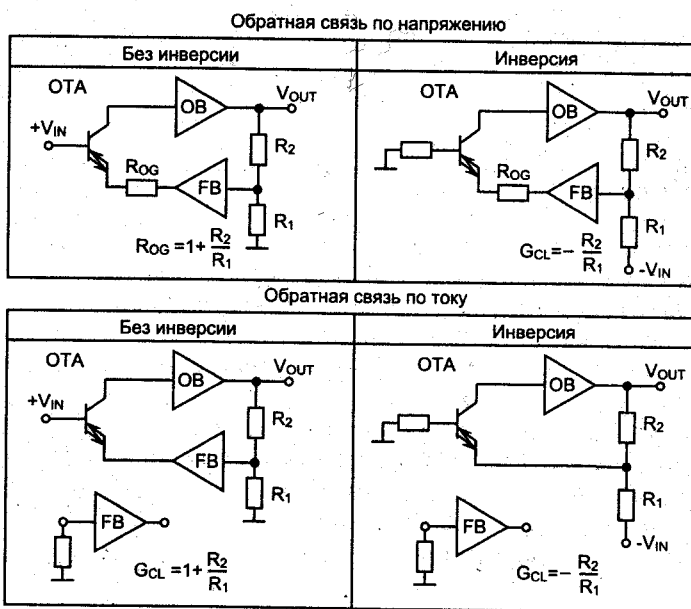


Рис. 2.75. Основные схемы включения интегрального усилителя OPA622/AU

Усилитель OPA622/AU обеспечивает следующие основные параметры:

- максимальное выходное напряжение $\pm 3,2$ В;
- входной импеданс в дифференциальном включении 2,4 МОм и 1 пФ;
- выходной импеданс 0,2 Ом и 1,5 пФ;
- напряжение питания ± 5 В (максимум ± 6 В);
- приведенное ко входу напряжение шумов 11 нВ/в полосе частот от 0,1 до 100 МГц;
- ток покоя ± 5 мА при сопротивлении нагрузки $R_Q = 430$ Ом
- температура окружающей среды от -40 до $+85$ °С.

Усилитель рассчитан на применение глубокой отрицательной обратной связи и получение небольшого коэффициента усиления в широкой полосе частот. На

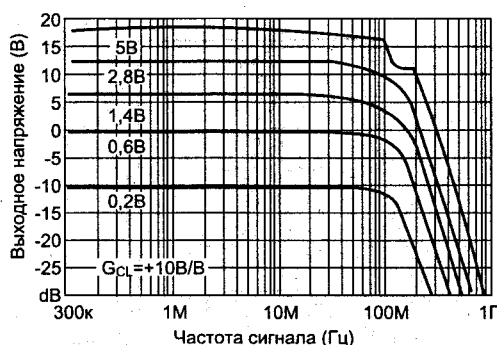


Рис. 2.76. АЧХ усилителя при разных выходных напряжениях для схемы включения с отрицательной обратной связью по напряжению и $G_{CL}=+10$

рис. 2.76 показаны АЧХ усилителя при разных выходных напряжениях для наиболее распространенной схемы включения с отрицательной обратной связью по напряжению и коэффициентом усиления $G_{CL}=10$. Полоса усиливаемых частот при этом превышает 100 МГц и еще выше при выборе меньшего коэффициента усиления. Более подробные характеристики усилителя можно найти в технической документации на него и в статье [49].

На рис. 2.77 представлена схема усилителя-разветвителя широкополосного сигнала на три канала без потерь. На нагрузке 75 Ом усилитель обеспечивает сигнал в полосе частот до 150—200 МГц. Такие разветвители часто используются в измерительной технике, например, если сигнал от измерительного генератора надо подать одновременно на вход исследуемого устройства, вход электронного вольтметра и вход осциллографа. В случае широкополосных сигналов приходится использовать отрезки коаксиальных кабелей, обеспечивая согласование.

На рис. 2.78 представлена схема (с указанием назначения выводов) широкополосного операционного усилителя с полевыми транзисторами на входе — ОРА655Р/У. Схема усилителя состоит из сдвоенного балансного истокового повторителя на полевых транзисторах и дифференциального каскодного (общий эмиттер — общая база) усилителя. Благодаря простоте схемы усилитель устойчиво работает без внешней коррекции в полосе частот от 0 до 400 МГц (при $G_{CL}=+10$

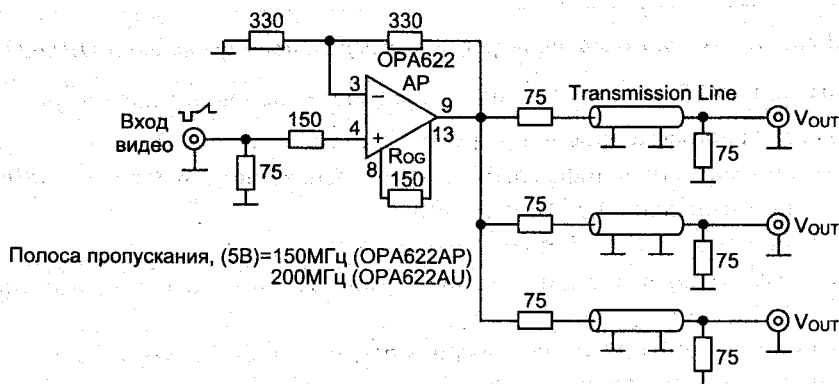


Рис. 2.77. Схема широкополосного усилителя-разветвителя на операционном усилителе ОРА622/АУ

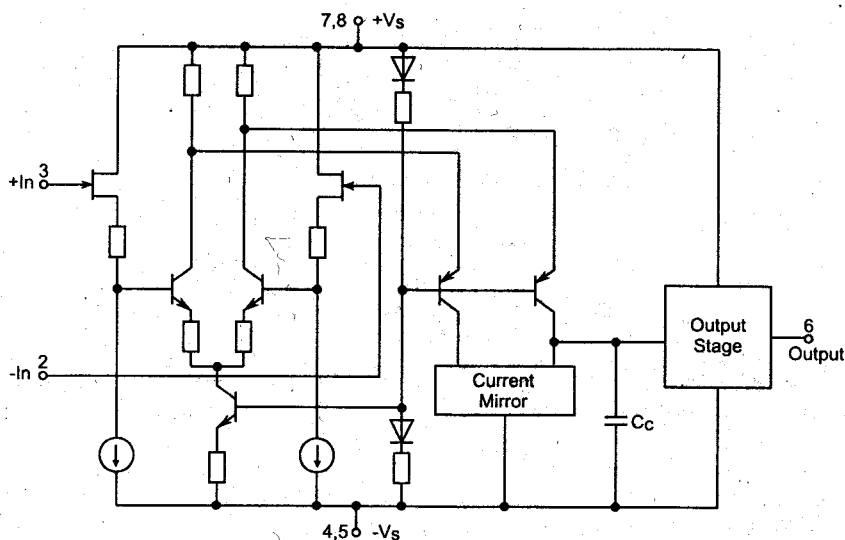


Рис. 2.78. Схема широкополосного операционного усилителя OPA655P/U с полевыми транзисторами на входе

полоса пропускания не менее 37 МГц). Скорость нарастания выходного напряжения усилителя до 300 В/мкс.

Аналогичный по схеме операционный усилитель OPA658P имеет рабочую полосу при коэффициенте усиления близком к единице и отсутствии цепей коррекции до 900 МГц (при усилении +10 полоса усиливаемых частот от 0 до 195 МГц). Время нарастания выходного сигнала не менее 2000 В/мкс, выходное напряжение на нагрузке 100 Ом не менее $\pm 2,8$ В, входной импеданс 500 кОм/1 пФ. Ко всему этому стоимость такого усилителя невысокая.

2.6.3. Интегральный аналог идеального биполярного транзистора

Схемы на биполярных транзисторах в свое время нашли широчайшее применение в построении широкополосных устройств. Применяются они и сейчас. Однако, развитие микроэлектроники сделало необходимым создание микроэлектронных аналогов транзисторов, лишенных недостатков последних — прежде всего смещения входной характеристики и небольшого выходного сопротивления.

Микросхема усилителя OPA660A (рис. 2.79) имитирует «идеальный» биполярный транзистор и по существу является усилителем с преобразованием импеданса (ОТА). Она имеет крутизну преобразования 125 мА/В при малосигнальной полосе частот до 850 МГц и скорости нарастания выходного напряжения до 3000 В/мкс.

На рис. 2.80 показана схема дифференциального усилителя на базе микросхемы OPA660A и буферного каскада на микросхеме BUF601. В полосе частот от 0 до 400 МГц усилитель обеспечивает усиление, равное 4.

На рис. 2.81 показаны АЧХ усилителя без коррекции и с коррекцией, а также зависимость коэффициента подавления синфазной составляющей от частоты. Усилители, подобные приведенному на рис. 2.78 являются хорошим решением для повышения чувствительности широкополосных цифровых осциллографов с полосой тракта вертикального отклонения до сотен мегагерц.

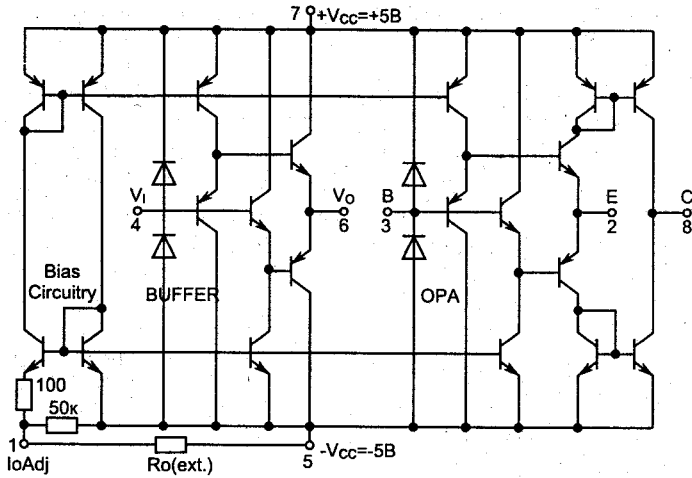


Рис. 2.79. Микросхема усилителя — «идеального транзистора» OPA660A

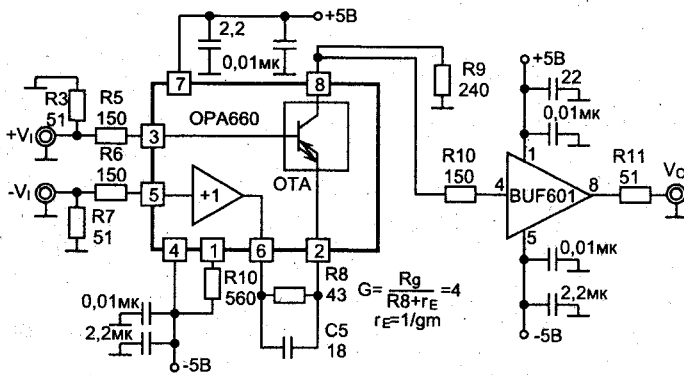


Рис. 2.80. Схема широкополосного усилителя на микросхеме OPA660A с полосой усиливаемых частот от 0 до 400 МГц

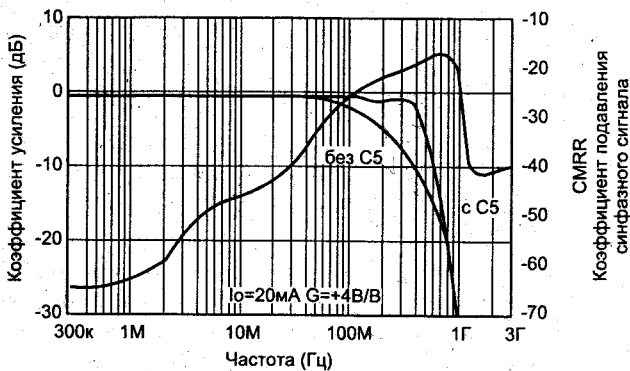


Рис. 2.81. АЧХ усилителя рис. 2.80 и зависимость коэффициента подавления синфазной составляющей от частоты

2.6.4. Сверхширокополосные дифференциальные усилители фирмы MAXIM

Уникальными параметрами обладают широкополосные дифференциальные усилители фирмы MAXIM — рис. 2.82. Усилители имеют малый уровень шума — 2,1 нВ/и полосу частот до 740 МГц при коэффициенте усиления, равном 2. Подробные данные об усилителях можно найти на сайте www.maxim-ic.com.

Эти усилители нашли применение в трактах вертикального отклонения цифровых осциллографов с полосой пропускания до 300 МГц — см. рис. 2.83.

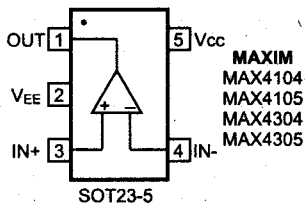


Рис. 2.82. Расположение выводов широкополосных усилителей фирмы MAXIM

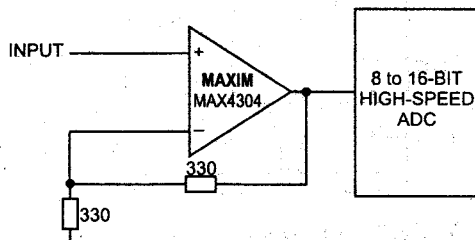


Рис. 2.83. Рекомендуемая разработчиком схема включения операционных усилителей фирмы MAXIM

Типичные характеристики усилителей представлены в помещенной ниже таблице.

Тип усилителя	Коэффициент усиления	Полоса частот в МГц
MAX4104	1	625
MAX4304	2	740
MAX4105	5	410
MAX4305	10	340

Усилители фирмы MAXIM обладают превосходными динамическими свойствами и позволяют усиливать импульсы с временем нарастания менее 1 нс без заметных искажений их формы — длительность фронтов импульсов, разумеется, несколько возрастает, но признаков колебаний не видно — см. рис. 2.84.

Подобные импульсные свойства являются следствием строго монотонной АЧХ, получаемой без цепей коррекции. На рис. 2.85 представлена нормированная АЧХ усилителя MAXIM 4105 при коэффициенте усиления +10. Коэффициент усиления вплоть до частоты 100 МГц практически не меняется и лишь на частоте около 340 МГц падает на 3 дБ.

Из других достоинств усилителей фирмы MAXIM можно отметить малый уровень нелинейных искажений, работу на низкоомную (порядка 100 Ом) нагрузку, малые размеры корпуса и простоту типовых схем включения. Эти усилители применяются в трактах вертикального отклонения цифровых осциллографов и могут использоваться в качестве усилителей для повышения чувствительности серийных аналоговых и цифровых осциллографов.

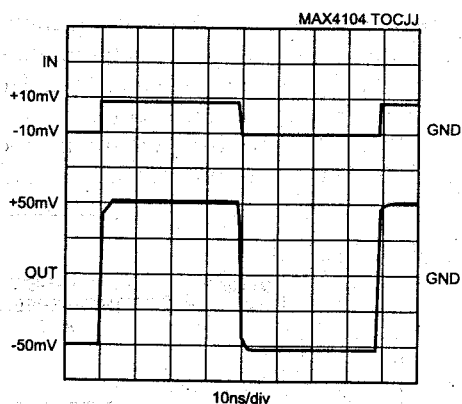


Рис. 2.84. Реакция усилителя MAXIM 4104 на импульсный сигнал (при коэффициенте усиления +10)

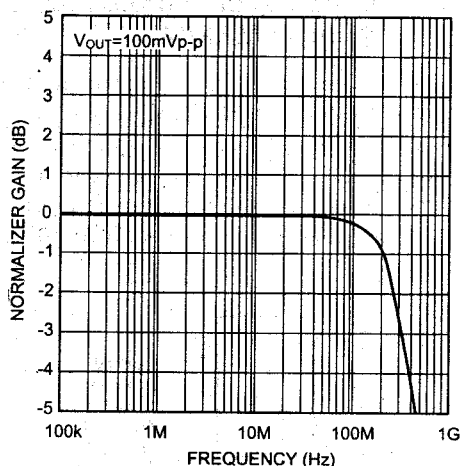


Рис. 2.85. Нормированная АЧХ усилителя MAXIM 4105 при коэффициенте усиления +10

2.6.5. Сверхширокополосные одноходовые усилители фирмы MAXIM

Для построения сверхширокополосных и импульсных устройств предназначены одноходовые усилители MAX7178/4278 — рис. 2.86. Они могут прямо работать на нагрузку 75 Ом, подключаемую через коаксиальный кабель и резистор с номиналом 75 Ом.

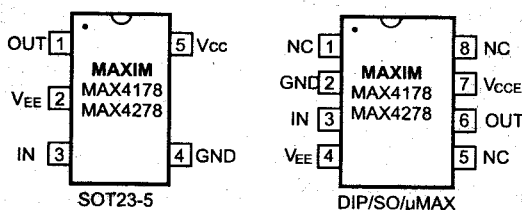


Рис. 2.86. Одноходовые широкополосные усилители MAX4178/4278

На рис. 2.87 показана АЧХ интегрального усилителя MAX4178. Вплоть до 200 МГц характеристика практически является горизонтальной линией. Это косвенно указывает на отсутствие выбросов на переходной характеристике усилителя при усилении им импульсных сигналов.

Рис. 2.88 полностью подтверждает это. На нем показана реакция усилителя на импульсный сигнал малой и большой амплитуды. При отсутствии емкостной составляющей нагрузки время нарастания и спада в малосигнальном режиме составляет менее 1.5 нс, а в режиме большого сигнала не более 2 нс.

Любопытно поведение усилителя при емкости нагрузки 50 пФ — рис. 2.89. Довольно большая емкость вызывает появление заметных выбросов, но время нарастания и спада выходных импульсов почти не возрастает. Это говорит об удачной реализации выходного каскада.

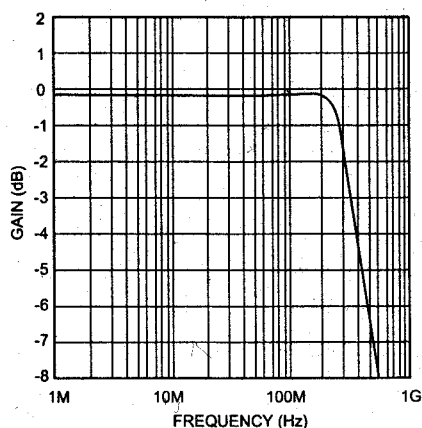


Рис. 2.87. АЧХ интегрального усилителя MAX4178

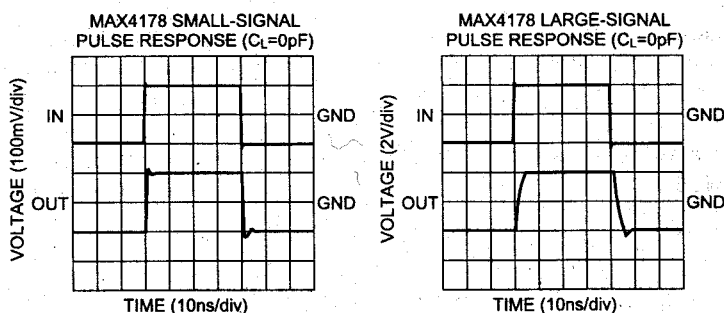


Рис. 2.88. Реакция микросхемы усилителя MAX4178 на импульсный сигнал малой (слева) и большой (справа) амплитуды при емкости нагрузки, равной 0

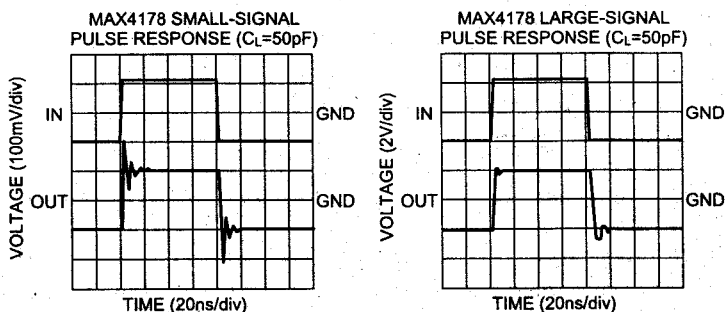


Рис. 2.89. Реакция микросхемы усилителя MAX4178 на импульсный сигнал малой (слева) и большой (справа) амплитуды при емкости нагрузки, равной 50 пФ

Семейство АЧХ усилителя MAX4178 при разных емкостях нагрузки показано на рис. 2.90. Нетрудно заметить, что небольшая емкость нагрузки оказывает корректирующее действие, повышая усиление вблизи граничной частоты.

Типичный пример применения микросхемы MAX4178/4278 показан на рис. 2.91. Здесь показана схема разветвителя без потерь, передающая широкополосный сигнал на три 75-омных выхода. Из-за необходимости точного согласования коаксиального кабеля на входе и на выходе ослабление на каждом выходе со-

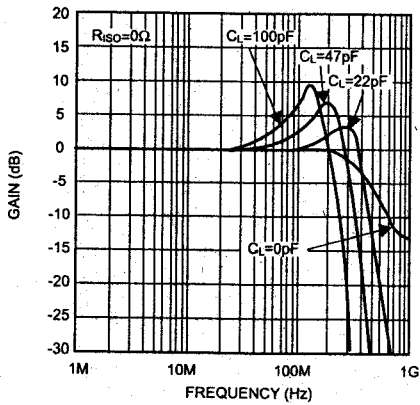


Рис. 2.90. Семейство АЧХ усилителя MAX4178 для разных емкостей

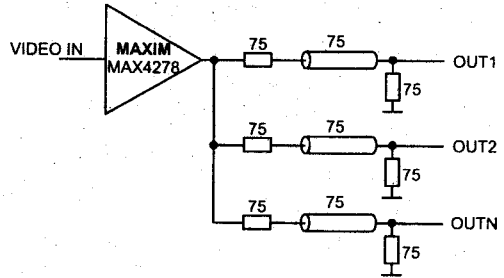


Рис. 2.91. Разветвитель трех широкополосных сигналов на базе микросхемы MAX4278

ставляет 2 раза и усилитель компенсирует его, причем даже не для одного, а для всех трех выходов. Как уже отмечалось, подобное устройство очень полезно для подключения сигнала к нескольким измерительным устройствам, например к импульсному вольтметру, осциллографу и входу испытываемого устройства.

Микросхема MAX4201 имеет выходной каскад с внутренним согласующим резистором в 50 Ом. Это позволяет подключать к ее выходу коаксиальный разъем для коаксиального 50-омного кабеля, обычно используемого в измерительных приборах.

На рис. 2.92 показаны АЧХ микросхем MAX4204/4205. При малых сигналах полоса частот на уровне спада -3 дБ достигает почти 800 МГц.

На рис. 2.93 представлены дополнительные данные о частотной зависимости параметров микросхем (уровней второй и третьей гармоник и модуля выходного импеданса) для микросхем MAX4204/4205.

Данные о реакции микросхем серии MAX4100* на импульсный сигнал представлены на рис. 2.94 и 2.95

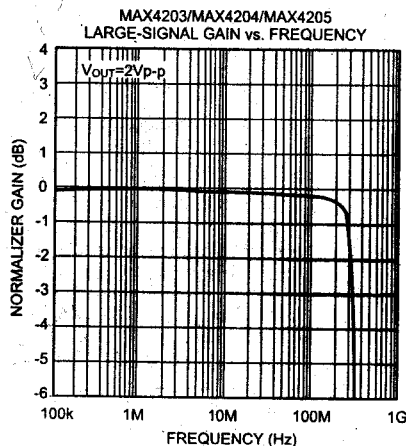
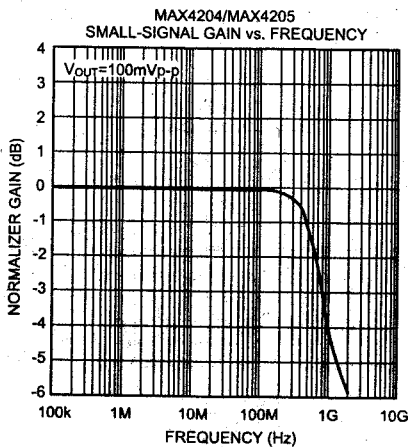


Рис. 2.92. АЧХ микросхем MAX4204/4205 для малых (слева) и больших (справа) сигналов

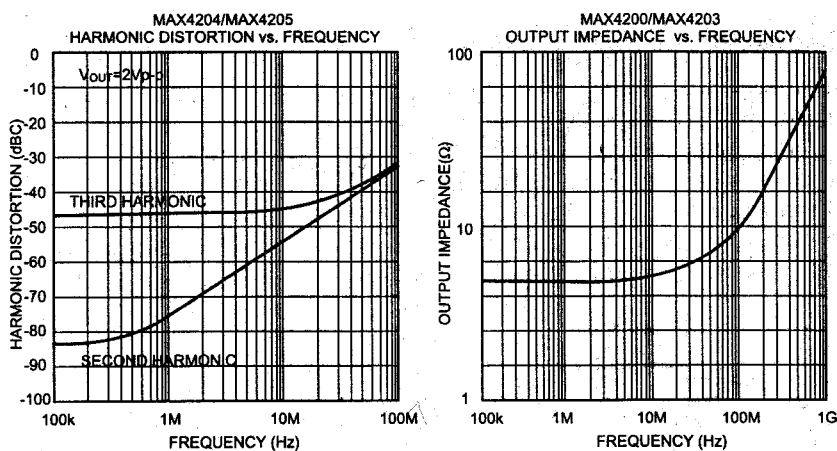


Рис. 2.93. Уровни второй и третьей гармоник (слева) и выходной импеданс (справа) в зависимости от частоты для MAX4204/4205

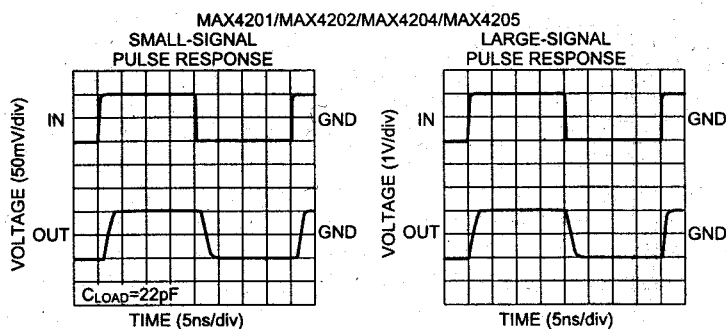


Рис. 2.94. Реакция микросхемы усилителя MAX410* на импульсный сигнал при малой (слева) и большой (справа) амплитуде. Из этих данных вытекает возможность формирования выходных импульсов с временами нарастания и спада менее 1 нс

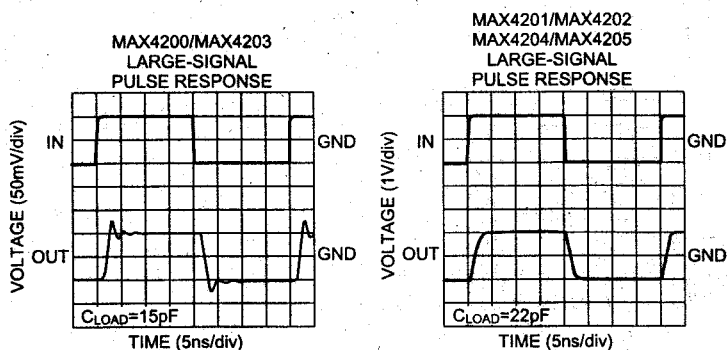


Рис. 2.95. Реакция микросхемы усилителя MAX410* на импульсный сигнал большой амплитуды

2.6.6. Сверхскоростные интегральные компараторы

Для построения разнообразных импульсных и измерительных устройств широко применяются *интегральные компараторы*. Хотя по схемным решениям они подобны интегральным операционным усилителям, компараторы обычно работают в режиме большого сигнала, переключаясь из одного состояния в другое, если сигнал на одном входе проходит через пороговый уровень, заданный на другом входе. На рис. 2.96 представлены расположения выводов и состав микросхем скоростных интегральных компараторов MAX9691/9692/9693.

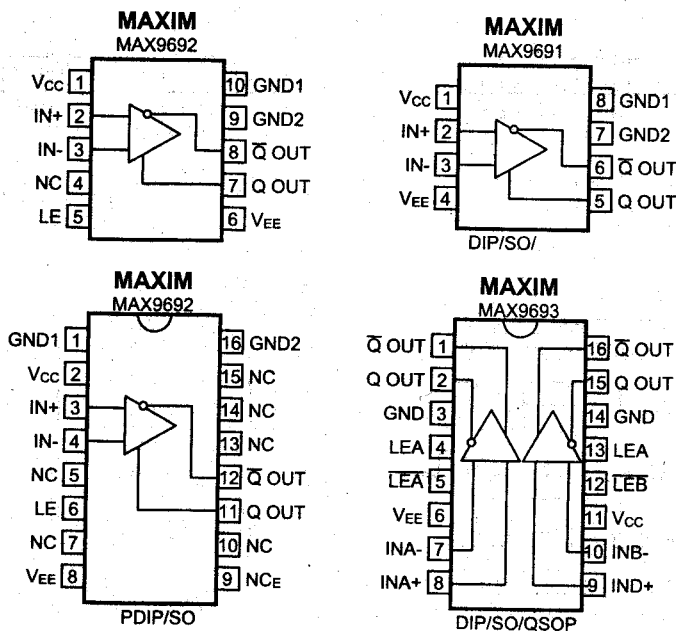


Рис. 2.96. Микросхемы интегральных компараторов MAX9691/9692/9693

Рис. 2.97 показывает реакцию (и задержку) компараторов на действие импульсного и синусоидального 100-МГц сигнала. Видно, что компараторы способны формировать импульсные сигналы с временами нарастания и спада около 1 нс и менее.

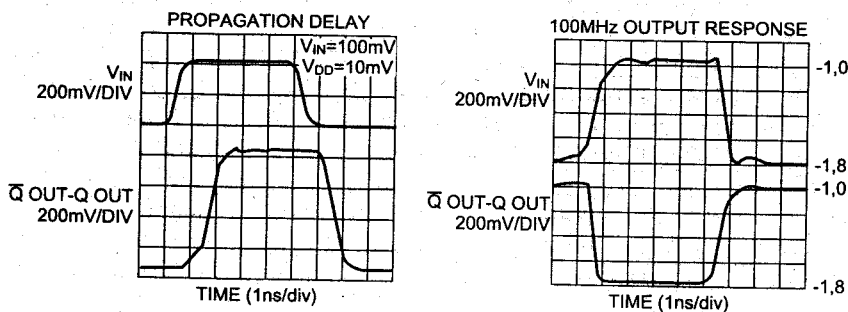


Рис. 2.97. Реакция компаратора на импульсный (слева) и 100-МГц синусоидальный (справа) сигналы

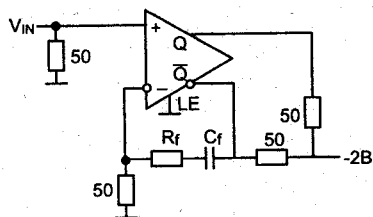


Рис. 2.98. Схема формирования почти прямоугольных импульсов из 100-МГц синусоидального сигнала

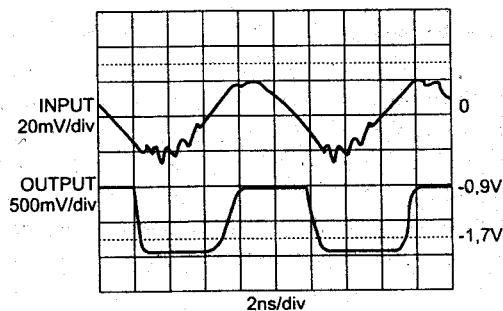


Рис. 2.99. осциллограммы входных и выходных импульсов формирователя рис. 2.98 при частоте входных импульсов 100-МГц

На рис. 2.98 показана схема формирователя импульсов на основе интегрального компаратора. Она ориентирована на получение почти прямоугольных импульсов с частотой до 100 МГц из синусоидального сигнала.

На рис. 2.99 показаны осциллограммы входного и выходного сигналов формирователя рис. 2.98. Несмотря на высокую частоту выходной сигнал имеет неплотную форму, в частности полностью отсутствуют выбросы выходного напряжения и <звон>.

2.7. Источники импульсных сигналов

2.7.1. Промышленные генераторы импульсов

Наряду с синусоидальными сигналами для отладки и тестирования электронной аппаратуры широко применяются источники импульсных сигналов. Множество их выпускается промышленностью в виде *импульсных генераторов* [61]. Эти устройства перекрывают огромный диапазон длительностей импульсных сигналов — от долей наносекунды до многих суток и даже лет.

Однако с появлением функциональных генераторов, генерирующих как симметричные, так и несимметричные прямоугольные и треугольные импульсы в широком диапазоне изменения частот и длительностей, потребность в универсальных импульсных генераторах заметно упала. Многие серийные генераторы импульсов имеют чрезмерно высокие характеристики, а потому дороги, громоздки и тяжелы. Современная микросистемная база позволяет на одной-двух микросхемах и нескольких дополнительных элементах создавать множество дешевых импульсных устройств, встраиваемых с современными измерительными приборами, таких как: калибраторы мультиметров и осциллографов, генераторы тестовых сигналов для проверки логических устройств, генераторы для запуска исследуемых импульсных устройств и т. д.

В связи с этим выпуск универсальных импульсных генераторов (особенно у нас) резко сократился. Зато пополнились складские запасы таких нераспроданных устройств. Ниже дано краткое аннотационное описание нескольких типовых моделей отечественных импульсных генераторов. Подробное описание их и условия поставки можно найти на Интернет-сайте организации НПО МаксПрофит [56] и в томе 3 [64].

Г5-54

Простой и сравнительно недорогой малогабаритный и довольно легкий универсальный генератор прямоугольных импульсов. Частота повторения импульсов 0,01—100 кГц, длительность 0,1—1000 мкс, амплитуда 15 мВ — 50 В, габариты, масса 370×227×185 мм, вес 6 кг.

Г5-63

Генератор двойных импульсов. Период повторения импульсов основных 10 мкс—200 мс, двойных 50 мкс — 200 мс, длительность 0,1 — 1000 мкс, амплитуда 6 мВ — 60 В, габариты 380×258×187 мм, вес 7,6 кг.

Г5-67

Высокочастотный генератор импульсов. Частота повторения импульсов 1 кГц—50 МГц, длительность 10 нс—300 мкс, амплитуда 5 В, габариты 486×132×475 мм, вес 15 кг.

Г5-72

Универсальный импульсный генератор с широким диапазоном длительностей импульсов и с удобным кнопочным управлением (рис. 2.100). Диапазон длительностей импульсов от 20 нс до 1 с, амплитуда 0,025 В — 10 В, длительность фронта до 2 нс, габариты 335×200×354 мм, вес 7,5 кг.

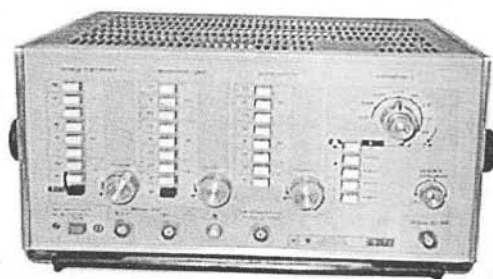


Рис. 2.100. Генератор импульсов универсальный Г5-72

Г5-88

Малогабаритный и довольно легкий генератор импульсов. Период повторения импульсов 1 мкс — 1 с, длительность 0,1 мкс — 1 с, амплитуда 0,006 — 100 В, габариты 327×132×260 мм, вес 4,5 кг.

Г5-78

Универсальный генератор импульсов с очень широким частотным диапазоном и минимальной длительностью импульсов в 1 нс. Частота повторения 1 кГц — 500 МГц (при внешнем запуске диапазон частот снизу не ограничен), амплитуда основных импульсов 0,5—5В, длительность импульсов 1 нс — 500 мкс (в этих же пределах регулируется время задержки импульсов, а также их времена нарастания и спада), габариты 304×120×300 мм, вес 9 кг. Внешний вид генератора представлен на рис. 2.101.

При использовании подобных генераторов очень важно соблюдать все правила измерений в области малых времен и высоких частот: подключение генератора и осциллографа только через коаксиальные кабели с волновым сопротивлением 50 Ом, тщательное согласование кабелей на входе и на выходе, предельное укорочение длины соединительных проводников и выводов компонентов и снижение

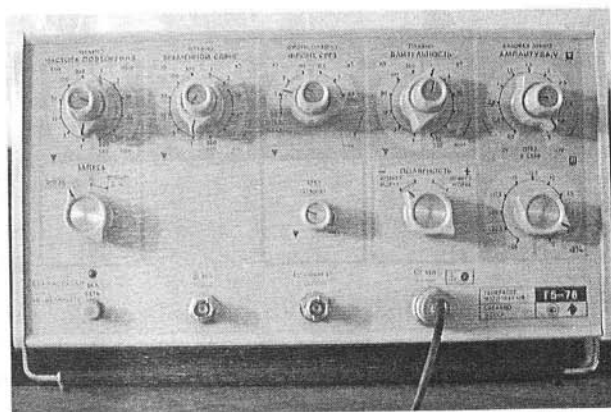


Рис. 2.101. Генератор импульсов Г5-78

входной емкости осциллографа (заметим, что даже при 50-омном согласовании емкость в 20 пФ дает постоянную времени входной цепи в 1 нс и время нарастания импульсов не менее 2,2 нс). Только в этом случае можно реализовать полученные хорошей формы импульсов и наблюдения их времен нарастания (около 1—2 нс) без заметных выбросов и колебаний (см. рис. 2.102).

Замечательной особенностью этого генератора является возможность плавной регулировки времени нарастания и спада импульсов, а также временной задержки относительно импульсов синхронизации. На рис. 2.103 показана осциллограмма выходного трапецеидального импульса генератора Г5-78 при длительностях фронта и спада импульса, равных 10 нс. Увеличение длительности фронта и спада импульсов позволяет заметно уменьшить выбросы, а также генерировать импульсы пилообразной формы.

Г5-62

Генератор кодовых комбинаций импульсов: длина кодовой комбинации 32 бит, число кодовых комбинаций в пакете и пауза между пакетами 1—99, длительность

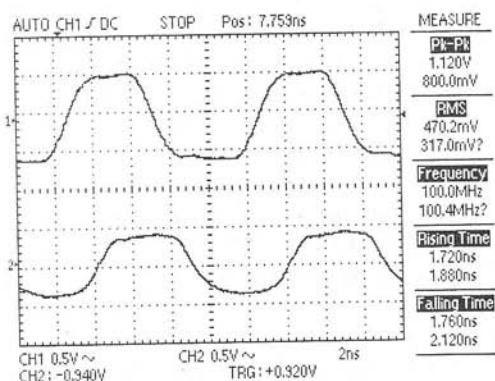


Рис. 2.102. Импульсы на основном выходе и выходе синхронизации генератора Г5-78 на частоте 100 МГц (сняты с помощью цифрового осциллографа DS-1250 с полосой частот до 250 МГц)

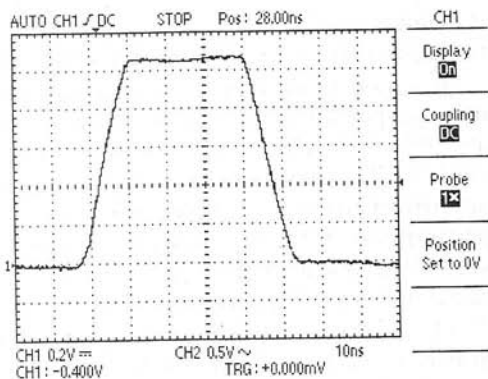


Рис. 2.103. Импульс генератора Г5-78 при длительностях его фронта и спада в 10 нс

3—3000 нс, временной сдвиг 0—20 нс, тактовая частота 0,3—120 МГц., амплитуда 1,5—5 В, габариты 486×185×570 мм, вес 26 кг.

Г5-84

Этот прибор предназначен для формирования импульсов обеих полярностей с широким диапазоном измерения всех основных параметров. Период повторения 1 мкс — 999 мс, длительность импульсов 1 нс — 999 мкс, длительность фронта 70 пс, спада 200 пс, амплитуда импульсов 5—9,9 В, предел основной погрешности ± 10%, габариты 480×160×475 мм, вес 18 кг.

Нетрудно заметить, что электрические параметры промышленных генераторов импульсов достаточно высоки, но практически все приборы имеют большие вес и габариты. Все они относятся к стационарным и отнюдь не дешевым приборам. Поэтому как специалисты, так и радиолюбители, нередко собирают импульсные генераторы специального назначения самостоятельно.

2.7.2. Импульсные генераторы на транзисторах и интегральных микросхемах

В 60-х — 70-х годах прошлого века импульсные устройства строились преимущественно на дискретных биполярных и реже полевых транзисторах. Биполярные транзисторы в силу их прекрасных ключевых свойств (в частности низкого остаточного напряжения в режиме насыщения) нашли преимущественное применение. Они широко описаны в литературе по импульсной технике тех лет [11, 17, 63, 64] и в дальнейшем, ввиду общеизвестности, не рассматриваются. Это относится как к импульсным устройствам с RC -цепями, так и к блокинг-генераторам, содержащим трансформатор, плохо реализуемый технологически и порождающий специфические искажения импульсов.

Маломощные полевые транзисторы на первых порах резко уступали биполярным как по ключевым свойствам, так и по стабильности генерируемых импульсов и быстродействию. Однако положение изменилось кардинальным образом после создания мощных полевых транзисторов, которые ныне стали основным типом ключевых устройств и по скорости переключения намного превосходят биполярные транзисторы. Тем не менее, в связи с подробным описанием их схемотехники в книге [15] схемы на дискретных полевых транзисторах ниже также не рассматриваются.

В конце указанного периода широкое распространение получили также схемы на интегральных логических микросхемах и интегральных операционных усилителях [63—68]. Построение устройств на логических микросхемах (прежде всего типа ТТЛ) оправдывалось дешевизной их и, главное, естественной стыковкой с другими устройствами на таких микросхемах, например, триггерами, счетчиками, регистрами и т. д. Однако, стабильность генерируемых импульсов у таких устройств была низкой, а диапазон регулировки параметров импульсов (прежде всего частоты) был довольно узким.

Не особенно прижились и импульсные устройства на интегральных операционных усилителях [64], поскольку они требовали обычно двух питающих напряжений и имели невысокое быстродействие. Сверхширокополосные интегральные усилители и компараторы, описанные выше, лишены этих недостатков, но они пока дефицитны и дороги.

Ниже мы опишем те типы импульсных устройств, которые не только применяются в наши дни, но и перспективны в будущем, в связи с их специфическими достоинствами.

2.7.3. Импульсные генераторы на интегральном таймере

Для построения импульсных устройств умеренного быстродействия (на уровне, характерном для ТТЛ-схем), одной из лучших является микросхема аналогового интегрального таймера (ИТ), за рубежом называемая 555 (NE 555) [68, 69]. Функциональная схема обычного интегрального таймера серии 555 показана на рис. 2.104. Выпускаются и двоянные таймеры, например, NE 556. В СССР был выпущен аналог этой микросхемы 1006ВИ1, который выпускается до сих пор и широко применяется в построении самых разнообразных импульсных устройств.

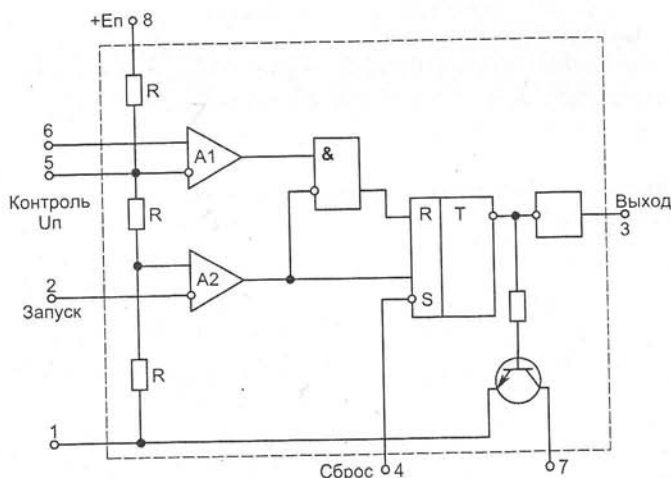


Рис. 2.104. Функциональная схема интегрального таймера

В состав интегрального таймера 555 (и половины 556) входит делитель напряжения на трех практически одинаковых резисторах R с номиналом около 5 кОм, два компаратора А1 и А2 задающих пороговые уровни включения и выключения, управляемый от них триггер, выходной каскад с ТТЛ-выходом и ключ на биполярном транзисторе V1.

Схема автоколебательного релаксатора на интегральном таймере показана на рис. 2.105, а. Конденсатор C_1 заряжается через резисторы R_1 и R_2 и напряжение на нем растет от $U_{\text{выкл}}$ до $U_{\text{вкл}}$. Когда достигается уровень, срабатывает компаратор А1 и триггер переключается в положение, при котором открывается ключевой

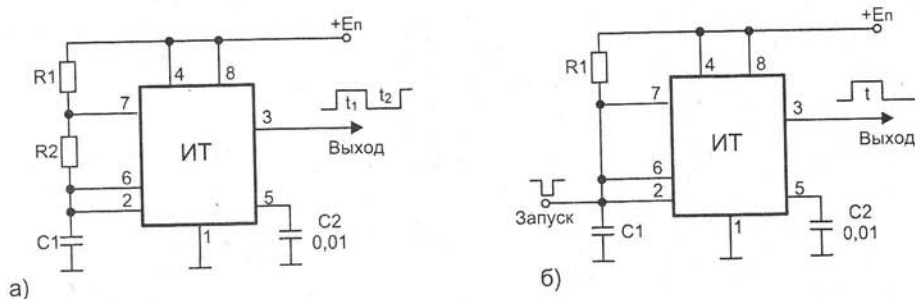


Рис. 2.105. Типовые схемы автоколебательного (а) и ждущего (б) импульсных генераторов (релаксаторов) на интегральном таймере

транзистор V1 и напряжение на выводе 7 падает практически до 0 (точнее напряжения насыщения транзистора). В результате C_1 начинает разряжаться через резистор R_2 от уровня $U_{\text{вкл}}$ до уровня $U_{\text{выкл}}$. Но как только напряжение на нем упадет до уровня $U_{\text{выкл}}$, сработает компаратор A2 и триггер вернется в положение, при котором транзистор V1 выключается и начинается новый цикл заряда конденсатора. Процессы заряда и разряда повторяются с периодом T .

В релаксаторах на интегральном таймере пороговые напряжения выключения $U_{\text{выкл}}$ и включения $U_{\text{вкл}}$ задаются порогами интегральных компараторов A2 и A1 и встроенным делителем напряжения из трех одинаковых резисторов R . Сами резисторы могут иметь большой разброс и заметную температурную зависимость. Но, благодаря их интегральному изготовлению и очень малым размерам их нестабильности строго идентичны, и коэффициенты деления $1/3$ и $2/3$ оказываются очень стабильными. А это означает, что в схеме достигаются условия:

$$U_{\text{выкл}} = E_{\text{п}}/3 \text{ и } U_{\text{вкл}} = 2E_{\text{п}}/3.$$

В этом случае:

$$T = t_3 + t_p = C_1(R_1 + R_2) \ln \frac{E_{\text{п}} - U_{\text{выкл}}}{E_{\text{п}} - U_{\text{вкл}}} + C_1 R_2 \ln \frac{U_{\text{вкл}}}{U_{\text{выкл}}}.$$

Подставив значения $U_{\text{вкл}}$ и $U_{\text{выкл}}$ в последнюю формулу получим:

$$T = C_1(R_1 + R_2) \ln(2) + C_1 R_2 \ln(2) = 0.693 C_1(R_1 + R_2) + 0.693 C_1 R_2.$$

Нетрудно заметить, период T принципиально не зависит от $E_{\text{п}}$, по крайней мере в пределах принятых допущений к точности сравнения напряжений компараторами. Работоспособность таймера гарантируется при изменении $E_{\text{п}}$ от 4,5 до 16 В, но на практике таймер работает даже при снижении $E_{\text{п}}$ до 2,2—5 В. Изменение T на 1 В составляет не более 0,05%, а изменение температуры на 1 °С меняет период на 0,005%. Максимальный выходной ток таймера 555 200 мА, а 556 150 мА, что позволяет применять таймер для управления светодиодами и даже маломощными реле.

Возможно построение на интегральном таймере и ждущего релаксатора (генератора импульсов), запускаемого внешним импульсом (точнее отрицательным перепадом на входе «Запуск»). Основная схема такого генератора представлена на рис. 2.103,б. Здесь в исходном состоянии транзистор V1 открыт и конденсатор C_1 практически разряжен. Запускающий перепад ведет к срабатыванию триггера, в результате чего транзистор выключается и конденсатор C_1 начинает заряжаться от напряжения $U_{\text{выкл}} \approx 0$ до напряжения $U_{\text{вкл}}$. Время его заряда и определяет длительность импульса $t_i = RC_1 \ln 3 = 1.1 RC_1$.

Малые входные токи компараторов допускают использование времязадающих резисторов с номиналами от нескольких кОм до 10—20 МОм, что позволяет в тысячи раз менять период колебаний или длительность импульса ждущего генератора (если это необходимо). У автоколебательного релаксатора на интегральном таймере входные токи компараторов частично компенсируются, что позволяет увеличивать R до значений даже более 20 МОм. Максимальная частота импульсов около 10 МГц, времена нарастания и спада импульсов — до 30—50 нс.

Представляет интерес рассмотрение реальных временных диаграмм работы типовых импульсных схем на интегральном таймере. На рис. 2.106 представлены осциллограммы работы интегрального таймера в схеме автоколебательного мультивибратора рис. 1.105,а при $R_1 = 4,1$ кОм, $R_2 = 51$ кОм, $C = 1000$ пФ и $E_{\text{п}} = 5$ В.

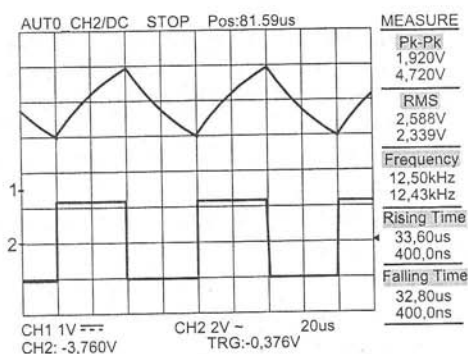


Рис. 2.106. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и на выходе интегрального таймера при $C = 1000$ пФ

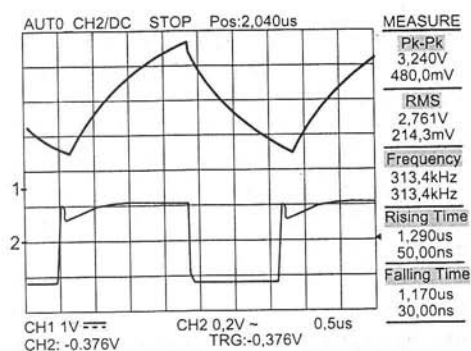


Рис. 2.107. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и на выходе интегрального таймера при $C = 20$ пФ

Осциллограммы получены с помощью цифрового осциллографа DS-1250 с полосу частот исследуемых сигналов до 250 МГц.

Нетрудно заметить, что при указанных параметрах и частоте повторения импульсов около 12 кГц форма временных зависимостей весьма близка к идеальной. Однако при уменьшении C примерно до 20 пФ неидеальности временных зависимостей становятся видными — см. рис. 2.107. В частности виден заметный выброс на вершине выходного импульса (интересно, что на выводе 7 микросхемы ИТ такого выброса нет). Минимальная длительность фронтов выходных импульсов типична для ТТЛ-микросхем и составляет до 20—30 нс.

Уже к началу 80-х годов выпускалось более 20 типов интегральных таймеров. Практически все они выпускаются и в наше время. Среди них одиночные (NE 555, LM 322, XR 320) и двойные (NE 556, XR 2256) интегральные таймеры, улучшенные таймеры с уменьшенным потребляемым током и таймеры на основе технологии КМОП транзисторов (ICM 7555, ICM 7556). Выпускаются также и программируемые таймеры (с изменяемым параметром τ) и таймеры со встроенным в них счетчиком импульсов (XR 2240, ICM 8240, ICM 8250, ICM 8260 и др.).

На интегральных таймерах выполнено очень большое число (многие сотни) импульсных схем. Частично их обзор можно найти в [68, 69]. Среди описанных схем измерители сопротивления, емкости, индуктивности, частоты и др. параметров. Описаны всевозможные схемы сигнализации, сенсорные устройства и т. д. Большинство описанных схем, однако, относится скорее к любительским, чем к профессиональным. Таймеры широко применяются в различных измерительных приборах, в промышленных и бытовых устройствах [68, 69]. Однако стоимость даже простых интегральных таймеров в несколько раз больше стоимости пары маломощных биполярных транзисторов, на которых строится множество «классических» импульсных устройств, например автоколебательных и ждущих мультивибраторов.

2.7.4. Импульсные устройства на негатронах

Вскоре после появления биполярных и полевых транзисторов было создано множество полупроводниковых приборов с S- и N-образными вольтамперными характеристиками (ВАХ), имеющими участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением или отрицательной проводимостью. Их называют *негатронами*.

В 60-х и даже в 70-х годах прошлого столетия на эти приборы возлагались большие надежды. Было показано, что при простоте схемных решений негатроны способны выполнять любые функции электронных устройств [70—94]: линейное и нелинейное усиление и смещение сигналов, генерацию синусоидальных и импульсных сигналов, реализацию функций триггерных устройств и т. д.

Первым массовым и самым известным типом негатронов стали низковольтные туннельные диоды. Из-за очень низких рабочих напряжений и отсутствия управляемости их N-образной ВАХ ныне эти приборы в импульсной технике ныне практически не применяются. Разве что, иногда они используются в высокочастотных пороговых устройствах и в некоторых уникальных (скорее даже экзотических) разработках. Например, они используются в генераторах перепадов напряжения (от 0,2 до 0,4 В) с длительностью 50—70 пс в блоках Я4С-89 стробоскопических осциллографов С1-91/4, С1-122/4, С1-122/13 и др.

Затем были созданы приборы с S-образной ВАХ — динисторы, тиристоры и однопереходные транзисторы (ОПТ) и программируемые однопереходные транзисторы. Динисторы и тиристоры, в основном, выпускаются как мощные приборы и широко используются в современных энергетических устройствах для преобразования электрической энергии, хотя и испытывают сильную конкуренцию со стороны мощных биполярных и полевых транзисторов и приборов IGBT (биполярные транзисторы с полевым управлением). Импульсные устройства общего назначения на динисторах и тиристорах, хотя и были созданы, широкого применения не получили. Прежде всего, из-за очень ограниченного быстродействия (частоты редко доходят до десятков кГц) и малой области токов, в пределах которой формируется падающий участок S-образной ВАХ.

В импульсных устройствах широкого назначения больше повезло однопереходным транзисторам [71—76] и их транзисторным аналогам [77—79]. На основе последних были разработаны и программируемые однопереходные транзисторы. Имея на порядок более высокое быстродействие, чем тиристоры, и более широкий диапазон токов в области падающего участка S-образной ВАХ, эти приборы заняли прочные позиции на рынке простых релаксационных устройств. Лямбда-диоды и лямбда-транзисторы и их аналоги [80] также показали себя достаточно интересными и полезными приборами, но из стадии экзотических применений так и не вышли.

Основная схема автоколебательного релаксационного генератора на ОПТ представлена на рис. 2.109. Величину резистора R берут такой, что бы рабочая точка ОПТ располагалась на падающем участке S-образной входной ВАХ. При ее работе конденсатор C периодически заряжается через резистор R от напряжения впадины ВАХ U_B (вначале от 0) до напряжения пика ВАХ $U_{\Pi} = \eta U_{66} + U_2(I_{\Pi})$, а затем разряжается от этого уровня до U_B . На рис. 2.108 показаны три варианта включения дополнительных резисторов для съема с них коротких импульсов (обычно используется один или два варианта).

Времена заряда и разряда C при отсутствии дополнительных резисторов равны:

$$t_z = RC \ln \frac{E - U_B}{E - U_{\Pi}} \text{ и } t_p = CR_{\text{вкл}} \ln \frac{U_{\Pi}}{U_B}.$$

Сопротивление ОПТ во включенном состоянии $R_{\text{вкл}} \ll R$, поэтому период колебаний при $U_{\text{вкл}} \ll E$ и $R_{62} \ll R_{66}$:

$$T = t_z + t_p \approx t_z = RC \ln \frac{E - U_B}{E - U_{\Pi}} \approx RC \ln \frac{1}{1 - \eta}.$$

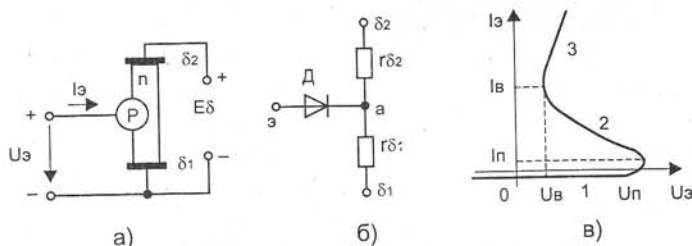


Рис. 2.108. Автоколебательный генератор (релаксатор) на ОПТ

Итак, при ряде сделанных допущений период колебаний не зависит от напряжения питания E . Однако, поскольку эти допущения соблюдаются лишь приблизительно, то некоторая слабая зависимость T от E все же имеет место. Тем не менее, релаксатор рис. 2.109 относится к числу высокостабильных (по частоте) импульсных схем. Для получения высокой стабильности желательно задавать $E > 10$ В.

Осциллограммы импульсов на базе 2 при $C = 1000$ пФ, $R = 51$ кОм, $R_{62} = 2$ кОм, $R_{61} = R_p = 0$ и на конденсаторе C представлены на рис. 2.109. Частота повторения импульсов при этом близка к 20 кГц и может плавно меняться в десятки раз при применении переменного резистора R .

Напряжение на конденсаторе C имеет классический для релаксатора вид — экспоненциальное медленное нарастание при заряде конденсатора C и затем быстрый спад при его разряде. Таким образом генерируются импульсы с высокой скважностью — отношением t_p/t_z . Однако короткие импульсы на резисторе R_{62} имеют довольно большие времена нарастания и спада из-за невысокого быстродействия ОПТ при его включении и выключении. Их конкретные значения равны примерно 1,6 и 1 мкс. В связи с этим схема рис. 2.109 пригодна лишь к качеству генератора коротких запускающих импульсов отрицательной полярности. Для получения импульсов положительной полярности можно включить резистор небольшой величины (сотни Ом) в цепь базы 1.

На однопереходных транзисторах было построено множество схем генераторов прямоугольных импульсов (мультивибраторов), генераторов треугольных и пилообразных импульсов и т. д. [71—74]. Для примера на рис. 1.110 показана простая схема генератора пилообразного напряжения на ОПТ. Ее отличительная особен-

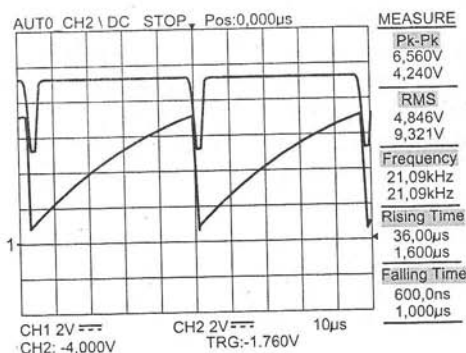


Рис. 2.109. Осциллограммы импульсов на базе 2 (сверху) и на конденсаторе C

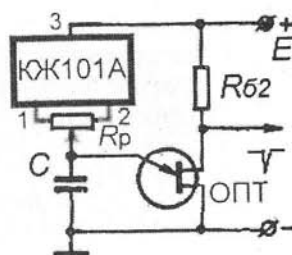


Рис. 2.110. Схема автоколебательного генератора пилообразного напряжения на ОПТ и микросхеме стабилизатора тока КЖ101А

ность — применение для стабилизации зарядного тока интегрального стабилизатора тока на основе сравнительно новой микросхемы КЖ101А.

Микросхема включена так, что позволяет регулировать ток заряда конденсатора C , делая его как меньшим, так и большим начального тока микросхемы. Ниже представлены замеры тока на выходе интегрального стабилизатора тока при разных напряжениях на нем (верхняя строка таблицы). Нетрудно заметить, что ток практически стабилизируется. Схема автоколебательного генератора пилообразного напряжения на ОПТ и микросхеме стабилизатора тока КЖ101А. Схема автоколебательного генератора пилообразного напряжения на ОПТ и микросхеме стабилизатора тока КЖ101А при напряжениях более 1,5–2 В.

0	0,3	0,5	1	1,5	2	3	5	10
0	60	96	192	285	369	379	374	365
0	13	21	42	64	86	105	104	102
0	4	8	16	20	20	20	20	20

Осциллограммы импульсов напряжения на эмиттере (конденсаторе C) и на базе 2 ОПТ представлены на рис. 2.111. Форма напряжения на конденсаторе C выглядит близкой к идеальной, но стоит заметить, что получение нелинейности менее 1% у такой простой схемы все же затруднительно. Иногда для повышения линейности и нагрузочной способности подобных генераторов применяют буферные эмиттерные повторители на одном обычном или составном биполярном транзисторе.

Множество других схем на ОПТ можно найти в литературе [71–77]. Уместно отметить, что со схемами на ОПТ успешно конкурируют схемы на аналогах лямбда-транзисторов (интересная схема емкостного релаксатора на этом приборе с управляемой N-образной ВАХ описана в [80]) и высокостабильные релаксаторы на аналогах ОПТ [77–79]. Последние в ряде случаев даже более предпочтительны.

В 70-х годах широкую известность получили лавинные транзисторы — приборы уникальные по физическим свойствам и рекордно высокому быстродействию импульсных схем на них, которое (что встречается очень редко) у них сочетается с высокими уровнями рабочих напряжений и токов [81–95]. Кроме того, биполярные лавинные транзисторы имеют легко управляемые как S-образные, так и N-образные ВАХ — рис. 2.112.

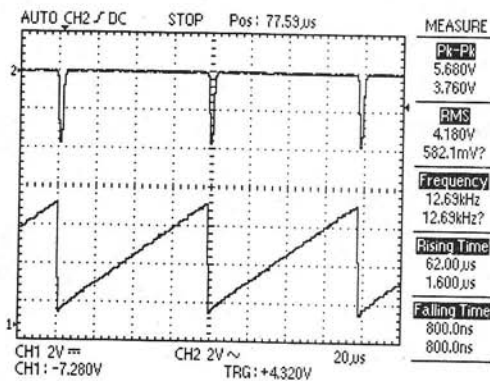


Рис. 2.111. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и на базе 1 ОПТ в схеме генератора пилообразного напряжения рис. 2.119

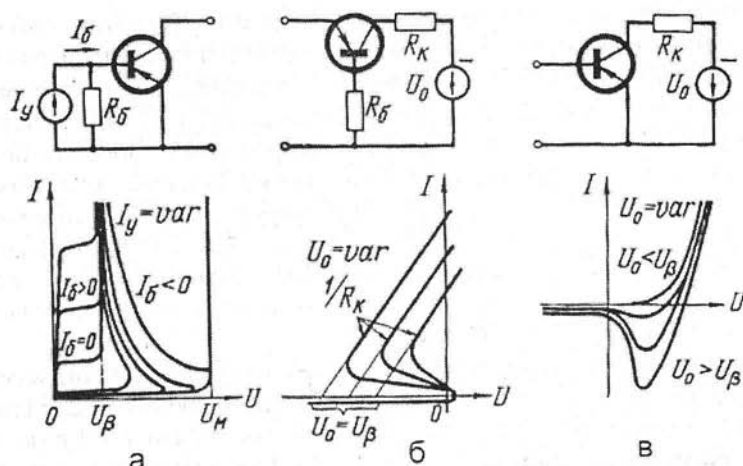


Рис. 2.112. Схемы включения лавинного транзистора и соответствующие им семейства ВАХ: а — со стороны коллектора, б — со стороны эмиттера и в — со стороны базы

Причины anomalно высокого быстродействия транзисторов (особенно кремниевых $n-p-n-p^+$ планарно-эпитаксиальных) в лавинном режиме кроются во впервые обнаруженном и объясненном в книге [16] и в серии статей [81—91] эффекте расширения области объемного заряда (ООЗ) коллекторного перехода вглубь базы — вплоть до динамического смыкания с эмиттером. Используя этот эффект транзисторы были названы лавинными транзисторами с ограниченной областью объемного заряда — ЛТОООЗ.

ЛТОООЗ (и обычные кремниевые $n-p-n$ транзисторы, работающие лавинном режиме с ограниченной ООЗ) позволяют получить уникальные параметры импульсов, недостижимые при использовании других полупроводниковых приборов. Примером может служить схема генератора импульсов с амплитудой около 25 А при длительности импульса около 1,5 нс [95]. Генератор предназначен для запуска мощных скоростных лазерных диодов.

Это типичная релаксационная схема. Для увеличения начального напряжения на конденсаторе релаксатора до напряжения лавинного пробоя коллекторного перехода U_M желательно надежно запереть транзистор вплоть до наступления пробоя. Для этого в схему релаксатора введем резистор $R_6 = 10$ кОм, подключенный к

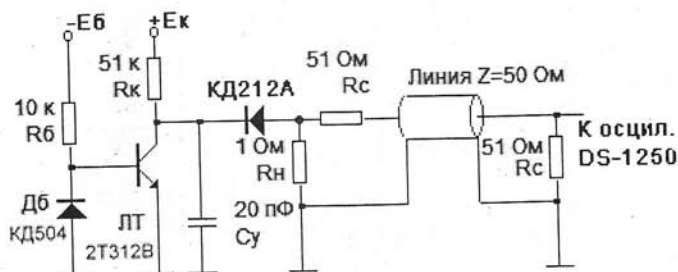


Рис. 1.113. Схема генератора мощных наносекундных импульсов на лавинном транзисторе

источнику напряжения E_6 отрицательной полярности. При этом потенциал базы фиксируется диодом D_6 , что предотвращает пробой эмиттерного перехода.

Моделирование на ЭВМ и эксперимент показывают, что даже малая паразитная индуктивность разрядного контура (в единицы нГн) вызывает сильный колебательный процесс. Было установлено, что эффективным способом борьбы с ней является применение нелинейного накопительного конденсатора, емкость которого увеличивается по мере его разряда. Подходящим в этой роли является силовой диод КД212А, который имеет рабочее напряжение 200 В (больше U_M) и емкость около 45 пФ при напряжении 100 В. Она возрастает в несколько раз при уменьшении напряжения до 0. Кроме того, этот диод имеет очень малое паразитное последовательное сопротивление.

Чтобы исключить отражение в кабеле осциллографа введем согласующие резисторы R_c по 51 Ом в начале и в конце кабеля, подключающего осциллограф к нагрузке R_H . Это означает возникновение делителя напряжения в 2 раза. В качестве эквивалента нагрузки возьмем практически безиндуктивный резистор МЛТ-0,25 с номиналом 1 Ом.

На рис. 2.114 показаны осциллограммы импульсов на нагрузке $R_H=1$ Ом и на коллекторе транзистора, снятые 250-МГц цифровым осциллографом DS-1250 фирмы EZ Digital. Амплитуда импульса достигает (с учетом деления напряжения в 2 раза) 25 В, т. е. пиковый ток в нагрузке имеет значение 25 А, вполне соответствующее нашим прикидкам. При смене транзистора амплитуда тока может быть примерно от 20 до 30 А при практически аналогичных временных параметрах.

Импульс разрядного тока имеет почти равные по длительности участки нарастания 1 и спада 2 тока и характерный выброс после них — 3. Минимизировать этот выброс можно предельно сократив длину разрядной цепи. Полное устранение выброса, как правило, не целесообразно, поскольку он способствует рассасыванию избыточных зарядов в реальной нагрузке — лазерном диоде и уменьшению длительности спада светового импульса.

Частота автоколебаний генератора около 200 кГц, что превышает предельные частоты работы большинства лазерных излучателей (включая лазерные светоизлучающие решетки). Уменьшив E_K или увеличив E_6 можно перевести генератор в ждущий режим и запускать импульсами положительной полярности, подаваемыми на базу транзистора через разделительный резистор в сотни Ом. Если E_K не-

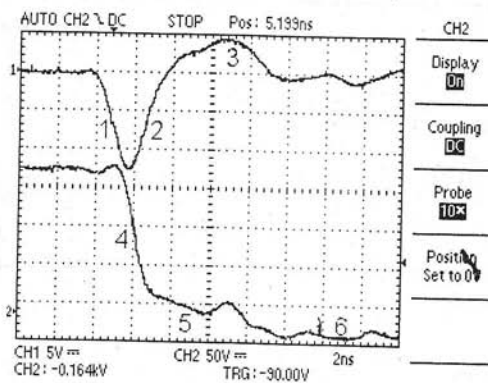


Рис. 2.114. Осциллограммы импульсов напряжения на нагрузке и коллекторе лавинного транзистора при масштабе по горизонтали 2 нс/дел

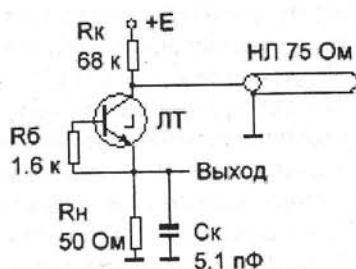


Рис. 2.115. Генератор прямоугольных импульсов на лавинном транзисторе КТ630А с накопительной линией в виде отрезка коаксиального кабеля

много превышает U_M , то форма импульсов получается аналогичной описанной. При меньших E_K амплитуда импульсов быстро падает.

Заменяв накопительный конденсатор накопительной линией в виде отрезка коаксиального кабеля можно построить очень простой генератор прямоугольных наносекундных импульсов — рис. 2.115. В генераторе применен высоковольтный транзистор КТ630А с U_M около 300 В и отрезок коаксиального 75-омного коаксиального кабеля с длиной около 1,5 м.

На рис. 2.116 представлена осциллограмма формируемого импульса. Нетрудно заметить, что форма импульса при столь малой длительности (15 нс) очень хорошая, а амплитуда импульса на нагрузке 50 Ом достигает 100 В. Получить такие импульсы от обычных и куда более сложных схемных решений довольно трудно, а подчас и просто невозможно. Конденсатор C_K небольшой емкости служит для коррекции фронта импульса — он уменьшает выбросы выходного импульса.

При использовании в этой схеме менее высоковольтных транзисторов КТ831А и К1102Л можно получить амплитуду импульса при той же форме, соответственно около 70 и 30 В. Расчет подобных схем и ряд других схем генераторов прямоугольных импульсов на лавинных транзисторах можно найти в [16].

В наши дни параметры подобных генераторов можно существенно улучшить, применяя специально разработанные зарубежные высоковольтные кремниевые

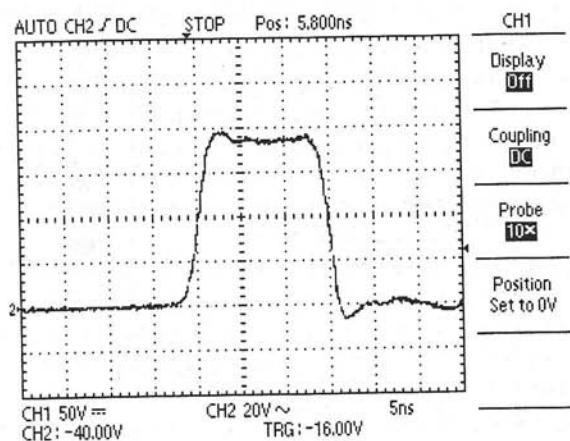


Рис. 2.116. Осциллограмма выходного импульса генератора рис. 2.115 ($E=300$ В)

ЛТОООЗ. Серию таких приборов разработала в середине 90-х годов крупная полупроводниковая фирма Zetex Semiconductors. Приборы FMMT413, FMMT415, ZTX415 и FMMT417 имеют напряжение $U_M = U_{CBO} = 150, 260, 260$ и 320 В и пиковые токи разряда конденсатора 50 и 60 А [95]. Транзисторы выполнены в сверхминиатюрном корпусе SOT23 для плотного поверхностного монтажа на печатные платы. Длина выводов у них минимизирована, что уменьшает их паразитную индуктивность и уменьшает возникновение колебаний при разряде С. Несмотря на уникально большие импульсные токи, средняя рассеиваемая мощность приборов составляет всего 0,33 или 0,68 Вт, т. е. приборы относятся к классу маломощных транзисторов.

Применение этих транзисторов позволяет в простых релаксационных схемах получать наносекундные импульсы с амплитудой до 50—60 А от одного лавинного транзистора или многие сотни В и сотни А при их последовательном и параллельном включении, либо при использовании в схеме Маркса. Необходимость в получении таких импульсов появилась в связи с созданием новых типов измерительных приборов — лазерных локаторов и дальномеров, видеолокаторов и георадаров.

Впрочем, на этом обзор таких устройств мы вынуждены прервать, поскольку построение устройств на современных лавинных транзисторах это уже отдельная серьезная тема, заслуживающая отражения в отдельной книге.

2.8. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов

2.8.1. Генераторы произвольных сигналов серии Tektronix AFG3000

В последнее время появился новый класс многофункциональных генераторов, по возможностям многократно превосходящим даже описанные выше функциональные генераторы. Так, корпорация Tektronix — один из лидеров в области разработки и производства высококачественных измерительных приборов недавно выпустила на рынок серию генераторов произвольных сигналов AFG3000. Ныне новая серия представлена шестью моделями: AFG3021, AFG3022, AFG3101, AFG3102, AFG3251, AFG3252. Буквы «AFG» являются сокращениями слов Arbitrary/Function Generator (Генератор Произвольных Функций) [96].

Последняя цифра в названии приборов указывает на число каналов: 1 — одноканальные приборы и 2 — двухканальные. Двухканальные генераторы способны формировать независимые сигналы по обоим каналам, в том числе и синхронные (например, дифференциальные). Две средние цифры приблизительно указывают на максимальную частоту генерации синусоидальных сигналов: 02—25 МГц, 10—100 МГц и 25—240 МГц. Минимальное значение частоты 0,001 Гц (1 мГц). Приборы используют новейшие методы генерации множества сигналов с помощью одной СБИС и методы прямого цифрового синтеза частот, обеспечивая при этом максимальную нестабильность частот выходных сигналов не более $1 \cdot 10^{-6}$ (или 0,0001%) за год работы и работу в диапазоне температур от 0 до +50 °С. Срок гарантии на приборы 3 года.

Генераторы AFG3000 являются комбинацией функционального генератора (генератора стандартных функций), программируемого генератора сигналов произвольной формы и генератора импульсов с регулируемой длительностью фронтов.

Но, фактически они сочетают в себе функции множества устройств, нередко выпускаемых как отдельные приборы:

- высокостабильного широкодиапазонного генератора синусоидального сигнала с несколькими видами модуляции;
- генератора прямоугольных и пилообразных импульсов с изменяемым в широких пределах коэффициентом заполнения и различными видами модуляции;
- функционального генератора шести типовых временных зависимостей с возможностью сигналов с любой математически заданной зависимостью;
- программируемого генератора сигналов произвольной (заданной пользователем) формы;
- генератора шума, который можно добавлять к другим сигналам;
- генератора трапецеидальных импульсов с отдельно регулируемыми длительностями полочки фронтов;
- генератора качающейся частоты.

Внешний вид генератора серии показан на рис. 2.117. Приборы выполнены в небольшом корпусе (для настольной конфигурации он имеет высоту 156,3 мм, ширину 329,6 мм и глубину 168,0 мм). Вес прибора 4,5 кг, в упаковке 5,9 кг. Диапазон рабочих температур от 0 до +50 °С, температура хранения от -30 °С до +70 °С. Охлаждение прибора активное с помощью вентилятора на боковой стенке. В связи с этим закрывать боковые стенки нельзя, по обе стороны от них нужно иметь не менее 5 см свободного пространства. Необходимо заземление прибора (клемма на задней стенке).

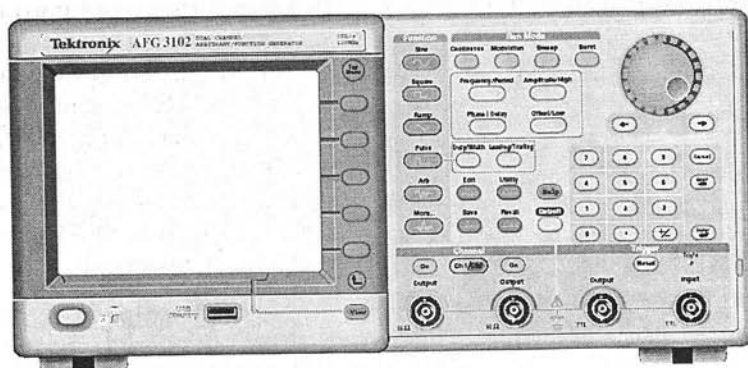


Рис. 2.117. Внешний вид двухканального генератора серии AFG3000

На задней панели расположены защитный порт Security Port, разъем сигнала добавляемого к основному сигналу ADD INPUT, разъемы внешней модуляции сигналов EXT MODULATION CH1/CH2, входной EXT REF INPUT и выходной EXT REF OUTPUT разъемы опорной (эталонной) частоты. Все эти разъемы стандартные 50-омные коаксиальные типа BNC. Кроме того, имеются разъемы для подключения к линии USB, сети LAN и порта GPIB, используемого для управления измерительными приборами. Есть также винтовой зажим заземления и гнездо для подключения стандартного сетевого кабеля с земляным выводом.

Основные технические характеристики разных моделей генераторов серии AFG3000 представлены на рис. 2.118. Приборы отличаются числом каналов (1 или

2.8. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов

Модель	AFG3021/AFG3022	AFG3101/AFG3102		AFG3251/AFG3252	
Канал	1/2	1/2		1/2	
Синусоида	25 МГц	100 МГц		240 МГц	
Импульс	12,5 МГц	50 МГц		120 МГц	
Память	От 2 до 65,536	От 2 до 16,384	От >16,384 до 131,072	От 2 до 16,384	От >16,384 до 131,072
Частота выборки	250 Мвыб/с	1 Гвыб/с	250 Мвыб/с	2 Гвыб/с	250 Мвыб/с
Амплитуда	10 В _{размах}	10 В _{размах}		5 В _{размах}	
Дисплей	Монохромный/Цветной	Цветной		Цветной	
Интерфейс	USB	USB, LAN, GPIB		USB, LAN, GPIB	

Рис. 2.118. Основные характеристики генераторов серии AFG3000

2), максимальной частотой синусоидального напряжения (25, 100 и 240 МГц) и вдвое более низкой максимальной частотой повторения импульсного напряжения (прямоугольного, импульсного и произвольного). Импульсы с дополнительными формами, определяемыми математическими функциями, можно формировать в диапазоне частот от 1 МГц до 1 МГц.

Управление генератором, в основном, кнопочное, но есть и удобная поворотная ручка универсального манипулятора с кнопками направления (в правом верхнем углу передней панели). Эти кнопки используются для перемещения по разряду числа того или иного параметра, например, частоты, после чего поворотная ручка позволяет быстро менять число в выбранном разряде. Пример: частота 1.000 000 000 00 MHz — частота 1 МГц, меняется изменением десятых долей МГц. Это очень удобно при имитации плавного изменения того или иного параметра.

Генераторы имеют самый современный, простой и наглядный интерфейс, подобный интерфейсу современных цифровых осциллографов. Большой жидкокристаллический цветной дисплей (только у модели AFG3021 он черно-белый) с размером по диагонали 5,6 дюйма отображает крупными знаками основные параметры сигналов и режимы работы генераторов и представляет форму создаваемых сигналов — рис. 2.119. Генератор имеет интерфейс (надписи на передней панели) на 8 языках, включая русский. Для изменения языка надписей на передней панели поставляется наклейка, которая крепится на передней панели.

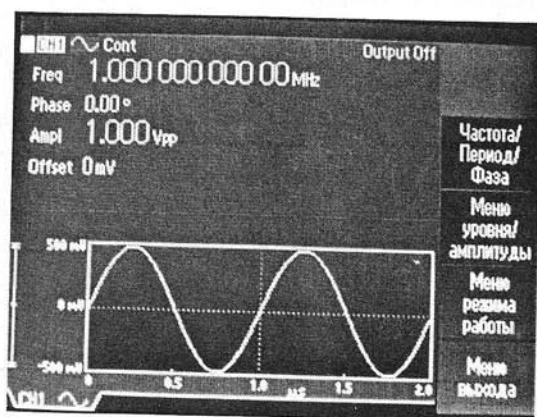


Рис. 2.119. Дисплей серии генераторов AFG3000

Основные выходы (или выход в одноканальной модели) изолированы от земли приборов, так что генератор может использоваться как «подвешенный» источник сигналов. Максимальное напряжение (постоянное плюс импульсное) относительно его внутренней земли не должно превышать ± 42 В. Возможно изменение фазы синусоидального сигнала от $-180,00^\circ$ до $+180,00^\circ$ и осуществление амплитудной, частотной и фазовой модуляции, а также частотной манипуляции. Для импульсных сигналов возможна еще и широтно-импульсная модуляция, которая широко используется в преобразовательных устройствах для управления мощностью в нагрузке, например для изменения яркости свечения светодиодов или изменения температуры нагрева нагревателей в электрических печах.

2.8.2. Возможности генераторов серии AFG3000

В качестве генератора синусоидальных сигналов AFG3000 генерируют такие сигналы с частотой от 0.001 Гц (1 мГц) до 25, 100 или 240 МГц. Этот диапазон намного перекрывает диапазон частот звуковых генераторов и обычных аналоговых ВЧ-генераторов стандартных сигналов старых аналоговых моделей. Возможна модуляция синусоидальных и других сигналов (кроме сигнала шума и постоянного напряжения). Основные формы генерируемых сигналов представлены на рис. 2.120.

У AFG3000 на частотах до 20 кГц коэффициент гармоник не превышает 0,2%. На более высоких частотах при двойной амплитуде выходного сигнала 1 В уровень подавления паразитных составляющих у первых четырех моделей генераторов более 60 дБ на частотах до 1 МГц, 50 дБ на частотах от 1 до 25 МГц и 50 дБ на частотах от 25 до 100 МГц.

Двойная амплитуда синусоидального напряжения (кстати, как и напряжения других форм) на нагрузке 50 Ом может изменяться от 10, 20 и 50 мВ для групп генераторов, представленных на рис. 4 до 10 В (и 5 В у приборов AFG3251/3252). Это обстоятельство является одним из немногих недостатков генератора — его нельзя использовать в качестве генератора сигналов малой амплитуды без применения внешних делителей напряжения (аттенюаторов). Установка амплитуды производится с разрешением в 0,1 мВ. Возможна установка уровня как двойной амплитуды, так и среднеквадратичного значения и уровня мощности в дБ. Предусмотрена работа на нагрузку 50 Ом и на высокоомную нагрузку, причем в последнем случае предельный уровень напряжения удваивается. Предусмотрено смещение выходного сигнала по постоянному уровню в пределах его размаха и с разрешением в 1 мВ. Погрешность установления уровня и смещения около 1% (более точные значения указаны в фирменной спецификации).

Амплитудная неравномерность при уровне двойной амплитуды в 1 В мала. Для всех генераторов она характеризуется следующими данными (в пределах указанного диапазона частот для каждой модели):

Диапазон частот, МГц	<5	5—20	20—100	100—200
Неравномерность АЧХ, дБ	$\pm 0,15$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$

Весьма эффективным является применение генераторов AFG3000 в качестве генераторов импульсов. Здесь реализуются частоты от 1 мГц до частот, равных половине частоты повторения синусоидальных сигналов (до 50 МГц у AFG3101/3102 и даже 120 МГц у AFG3251/3252). В пределах возможных определений можно менять не только частоту (или период повторения) импульсов, но и времена нара-

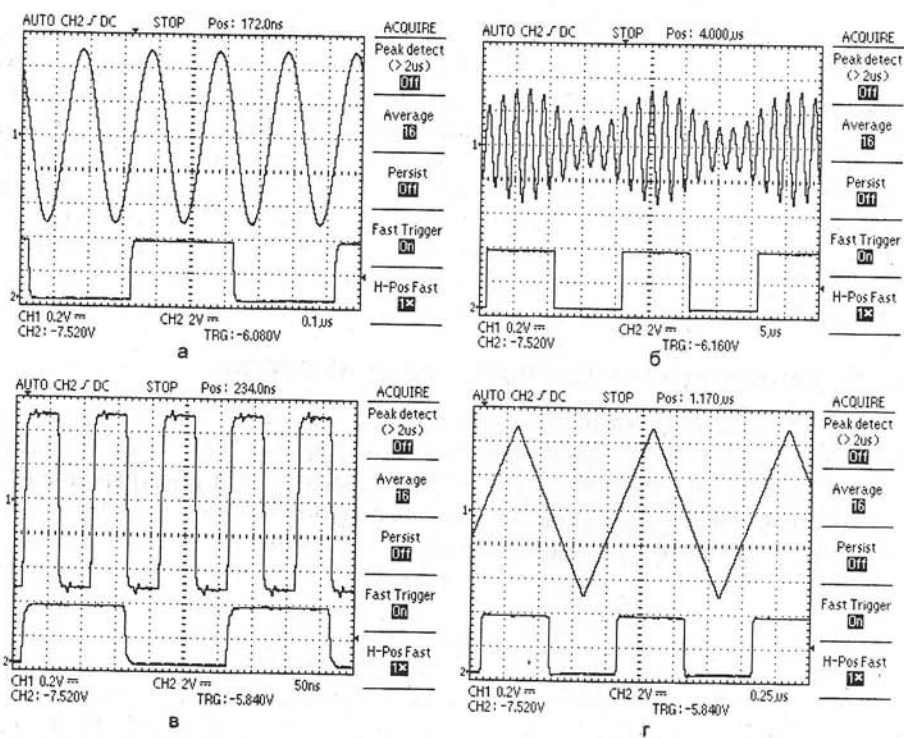


Рис. 2.120. Осциллограммы сигнала на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая): синусоидальный сигнал (а), синусоидальный сигнал с амплитудной модуляцией (б), прямоугольные импульсы (в) и пилообразный сигнал (г)

тания и спада и активную длительность. Таким образом, в общем случае генерируются импульсы трапецеидальной формы — рис. 2.121. Минимальная длительность фронтов импульсов у генераторов серии AFG3000 составляет 18, 5 и 2,5 нс. Минимальная длительность импульсов 30, 8 и 4 нс, максимальная длительность у всех моделей 999 с.

Большую группу сигналов, генерируемых генераторами AFG3000 можно отнести к разряду математических функций. Это уже упомянутый пилообразный сигнал, сигнал вида $\sin(x)/x$, функция Гаусса (рис. 2.121,б), функция Лоренца, экспонента нарастающая, экспонента падающая (тут определения неточны — фактически речь идет просто о перепадах с экспоненциальным спадом положительной и отрицательной полярности) и гаверсинус. Все эти сигналы, за исключением пилообразного, выбираются из позиции меню Еще... в меню функций. Они, как и сигналы математических функций, генерируются с частотами от 1 мГц до 1 МГц.

Частотная модуляция также возможна — рис. 2.121,в. Как и при амплитудной модуляции, частотная модуляция может осуществляться разными видами сигналов: синусоидальным, прямоугольным, импульсным, шумом и произвольным. Модулируемые сигналы могут иметь любой вид кроме импульсного, шума и постоянного тока. Частота внутренней модуляции может быть от 2 мГц до 50 кГц. При частотной модуляции пиковое отклонение частоты составляет половину максимально возможной частоты синусоидального сигнала.

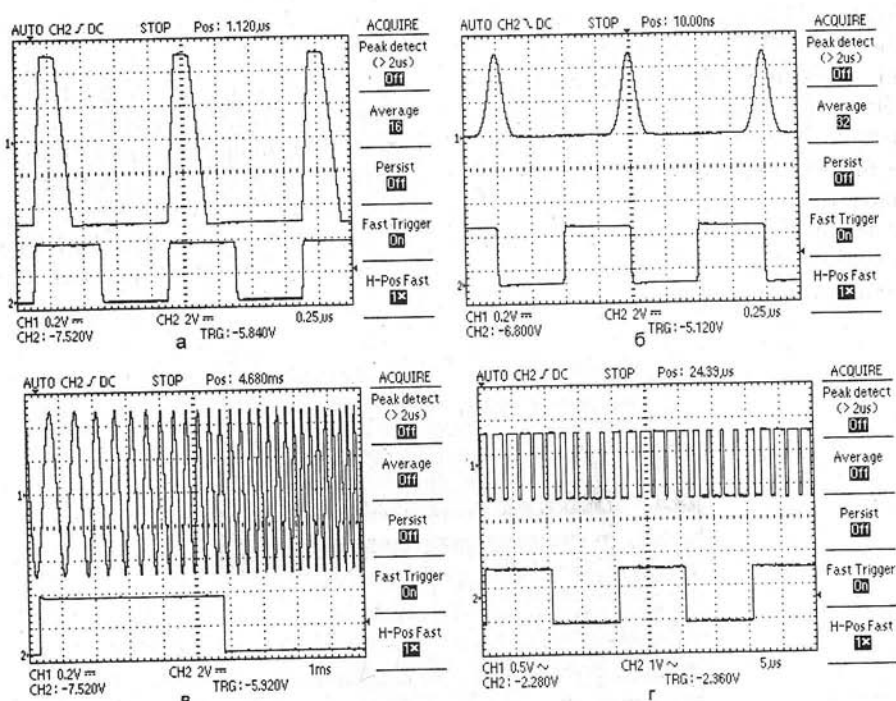


Рис. 2.121. Осциллограммы сигнала на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая): импульсный сигнал (а), сигнал в виде функции Гаусса (б), частотно-модулированный сигнал (в) и импульсный сигнал с широтно-импульсной модуляцией (г)

Фазовая модуляция означает изменение фазового сдвига несущего колебания. Диапазон сдвигов от 0 до 180 градусов с установкой через 0.1 градуса. Диапазон частот модуляции тот же, что при частотной модуляции. Частотная манипуляция возможна с частотой от 2 МГц до 1 МГц.

Для импульсного сигнала возможна широтно-импульсная модуляция (ШИМ) по различному закону, например линейному или синусоидальному. При этом виде модуляции амплитуда и частота импульсов не меняется, но меняется их коэффициент заполнения. Такая модуляция широко используется в преобразовательных устройствах силовой электроники. На рис. 2.121,г показан пример ШИМ для импульсов с частотой 500 кГц при частоте модуляции 50 кГц (диапазон частот модуляции при ШИМ от 2 МГц до 50 кГц) с девиацией 30%. На осциллограмме основного сигнала отчетливо видно изменение коэффициента заполнения импульсов.

Всего генераторы серии AFG3000 имеют 12 стандартных форм сигналов. Все они полезны и позволяют использовать генераторы для самых разнообразных сервисных, научных и учебных целей. Однако в полной мере уникальные возможности генераторов проявляются в режиме генерации сигналов произвольной формы — меню и кнопка Произвольн. (в оригинале Arb.) функций. Приятно отметить, что полоса частот для произвольных сигналов нормируется до 25, 100 и даже 240 МГц у генераторов трех групп, отмеченных выше (см. рис. 2.118). При этом созданный сигнал имеет разрядность 14 бит, а частота его дискретизации составляет до 1 Гвыб/с у генераторов AFG3101/3102 и даже 2,5 Гвыб/с у

AFG3251/3252. И никто нам не мешает в качестве такого сигнала воспользоваться образцом сигнала любой формы!

Для хранения созданных пользователем сигналов есть два вида памяти — встроенная и внешняя. Встроенная память позволяет создать 5 файлов, имена которых представлены в окне генератора, показанном на рис. 2.122. Это окно вызывается нажатием кнопки Произвольн. меню функций и выбором позиции Сигнал произвольн. формы экранного меню. В окне представлены имена файлов, хранящихся во внутренней памяти. В позиции экранного меню Память есть возможность выбора окон либо внутренней памяти (рис. 2.122), либо внешней памяти флэш-карты, которая вставляется в гнездо под экраном.

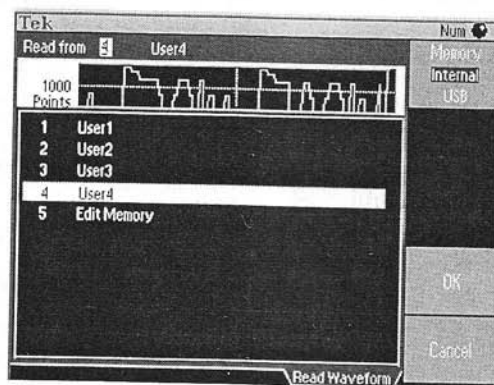


Рис. 2.122. Экран дисплея генератора с окном выбора файла из внутренней памяти

Чтобы проверить возможность генерации произвольных сигналов был задан сигнал пилообразной формы в виде двух периодов в одном кадре произвольного сигнала. Напоминаем, что обычный пилообразный сигнал может иметь частоту повторения максимум в 1 МГц. Осциллограммы нашего сигнала с основной частотой 5 МГц показаны на рис. 2.123,а. Фактическая частота сигнала равна 10 МГц, поскольку она удваивается из-за двух пил в кадре. Как видно из рис. 2.123,а форма 10-МГц пилы очень даже приличная. Небольшие колебания после резкого спада (обратный ход пилы) вызваны неточным согласованием кабеля с 50-омной нагрузкой. При замене кабеля (75 см) более длинным колебания перемещались в другое место, дальше от спада.

Было интересно проверить, а какова будет форма пилы, если увеличить основную частоту до 50 МГц, а частоту пилы до 100 МГц? Сказано — сделано (см. рис. 2.123,б)! Можно было ожидать, что пила вырождается в синусоиду, поскольку полоса частот выходного усилителя у AFG3101 ограничена значением в 100 МГц. Но, как видно из рис. 2.123,б даже в таком экстремальном случае выходной сигнал скорее напоминает пилу с сильно скругленными верхушками, чем синусоиду.

Разумеется, что возможность создания произвольных сигналов означает, что генераторы серии AFG3000 позволяют пользователю создавать бесчисленное множество сигналов самой разнообразной формы. Генераторы предусматривают различные возможности создания сигналов произвольной формы — от копирования сигналов стандартных форм, ручного ввода опорных точек и интерполяции кривых в промежутках между ними, до ввода отдельно каждой точки сигналов с разрешением в 14 бит. Это очень высокое разрешение — достаточно отметить, что

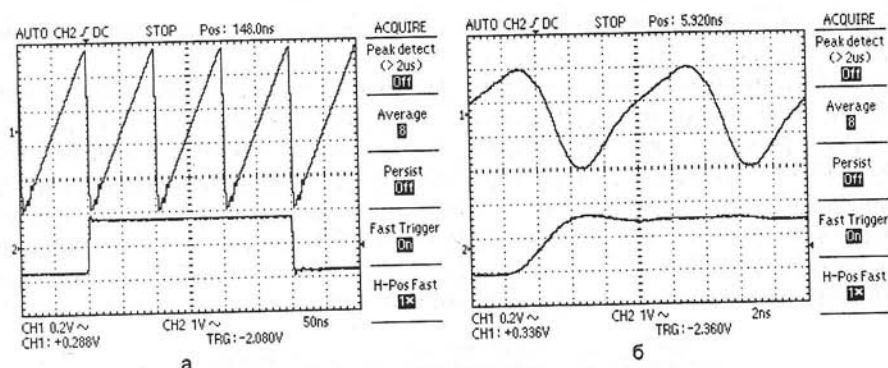


Рис. 2.123. Осциллограммы пилообразного сигнала на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте пилы 10 МГц (а) и 100 МГц (б)

многие цифровые осциллографы довольствуются разрешением в 8 бит (это всего 256 значений каждой точки).

Их можно сохранять во внутренней памяти (4 сигнала и текущий редактируемый сигнал), а можно хранить и во внешней флэш-памяти. Это уже вполне современное решение — карту с флэш-памятью можно перенести на компьютер для сохранения файлов не жестком диске большой емкости или для применения в серьезных программах математической обработки сигналов, в том числе с помощью современных систем компьютерной математики Mathcad, Mathematica, Maple или MATLAB. Все это открывает неограниченные возможности моделирования сигналов и использующих их устройств.

Для снятия АЧХ различных устройств и их испытания при изменении частоты сигналов служит режим Качание (кнопка Sweep или Качание). Важно отметить, что качание частоты может осуществляться как для синусоидального, так и для импульсного сигнала как с применением внутреннего генератора развертки, так и внешнего. Зависимость частоты от времени представлена на рис. 2.124. Все указанные на этом рисунке временные и частотные параметры можно задавать в экранном меню. Кроме того можно задавать качание частоты по линейному или логарифмическому закону. Последнее нужно при снятии логарифмических АЧХ —



Рис. 2.124. Зависимость частоты от времени в режиме качания (сweep-генератора)

ЛАЧХ. По уже указанным причинам нельзя использовать этот режим (свип-генератора) для сигналов постоянного тока и шума.

В заключении обзора возможностей генераторов стоит остановиться на еще одной интересной возможности приборов — формировании пачек сигналов различной формы. Для задания такого режима работы служит кнопка Пачка. Можно изменять число сигналов в пачке от 1 до 1000000. Возможна также непрерывная генерация заданной пачки. На рис. 2.125 показан пример генерации пачки из 5 пилообразных импульсов. Пачка может стробироваться как от внутреннего генератора импульсов, что и показано на рис. 20, так и от внешнего генератора, выход которого подключается ко входу Input на передней панели генератора AFG3000.

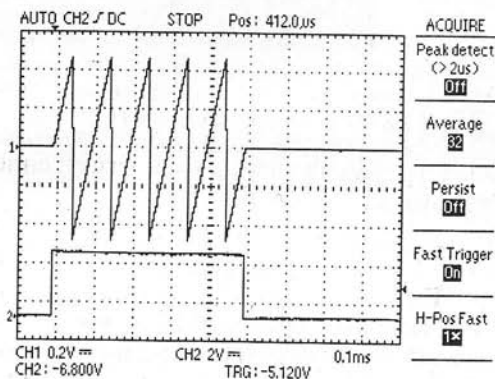


Рис. 2.125. Осциллограммы пачки пилообразных импульсов на основном выходе (верхняя кривая) и импульсов на ТТЛ-выходе запуска (нижняя кривая)

Отметим еще несколько аппаратных возможностей генераторов AFG3000. Их можно использовать в качестве генераторов опорного высокостабильного сигнала с частотой 10 МГц. Можно, напротив, обеспечить работу генератора от внешнего сигнала с частотой 10 МГц (область захвата при этом равна ± 35 кГц). Несколько генераторов могут быть работать синхронно. Как уже отмечалось, есть возможность суммирования выходных сигналов с внешним сигналом. Для защиты основного выхода от коротких замыканий и перегрузок по напряжению имеется встроенная защита и внутренний плавкий предохранитель. Однако его замена требует обращения в сервисный центр Tektronix (в России при фирме Эликс [96]). Рекомендуется использовать внешний переходник с плавким предохранителем, который пользователь может менять самостоятельно.

2.8.3. Работа генераторов серии AFG3000 с компьютером

Возможности генераторов AFG3000 заметно расширяются при организации его связи с персональным компьютером. При этом возможно дистанционное управление генератором, задание и редактирование сигналов произвольной формы и генерация сигналов, полученных от цифровых осциллографов. Для этого используется программа ArbExpress(tm), входящая в поставку генератора. Для использования этих возможностей требуется инсталляция программы (вполне заурядная) и подключение генератора к свободному USB-разъему компьютера. Требования к нему вполне обычные и любой современный компьютер им удовлетворяет.

На рис. 2.126 представлено окно программы ArbExpress с тремя окнами различных сигналов. Они создаются после активизации гиперссылки Standart Wave-

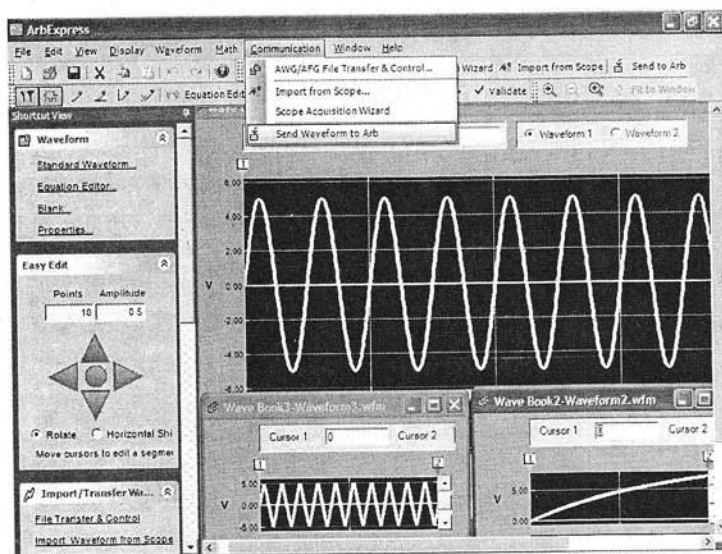


Рис. 2.126. Окна программы ArbExpress (пример передачи установок сигнала на генератор)

form... в окне Waveform в левой части рис. 2.126. Команда Send Waveform to Arb в позиции меню Communication обеспечивает передачу установок выбранного сигнала (из текущего окна) в генератор AFG3000.

Наряду с созданием сигналов стандартных форм (все они были описаны выше) программа ArbExpress обеспечивает создание сигналов, временная зависимость которых задается математическим выражением. Для этого служит редактор математических формул, окно которого (рис. 2.127) вызывается активизацией гиперс-

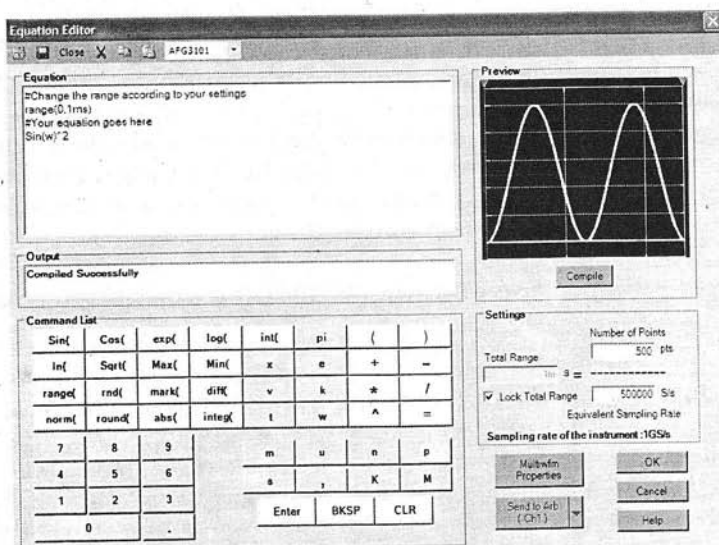


Рис. 1.127. Окна редактора формул программы ArbExpress (пример создания сигнала — квадрата синуса)

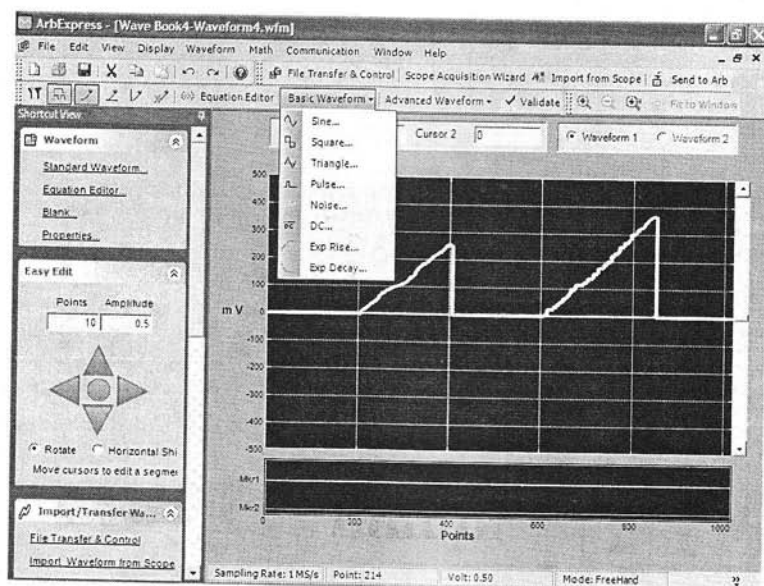


Рис. 2.128. Пример создания сигнала произвольной формы с помощью графического редактора программы ArbExpress

сылки Equation Editor.... В окне редактора Equation можно составить простую программу, используя символы и функции, вводимые кнопками в окне Command List. Для примера показано создание сигнала временная зависимость которого описывается квадратом синуса. Подготовленная программа (если она верна) компилируется без ошибок и в окне предварительного просмотра Preview можно наблюдать график созданной зависимости. Кнопка Send to Arb позволяет направить созданный сигнал в указанный канал генератора.

И заканчивая краткое описание данной программы отметим, что есть возможность вызывать пустой бланк временной зависимости и с помощью электронного карандаша с различными функциями нарисовать от руки произвольную временную зависимость сигнала — рис. 2.128.

В заключении стоит отметить, что генераторы серии AFG3000 это целый комплекс средств генерации сигналов — от простейших до самых сложных. Это довольно дорогие приборы, но следует помнить, что они заменяют несколько приборов и имеют огромные возможности в создании сигналов любой формы. Они необходимы для моделирования и изучения сложных сигналов, при серьезных исследованиях огромного числа устройств и систем и, наконец, при тестировании сложной электронной аппаратуры.

2.8.4. Генераторы произвольных сигналов других фирм

Наиболее достойным соперником корпорации Tektronix в части разработки многофункциональных генераторов является Израильская фирма Tabor Electronics Ltd. Она выпускает серию генераторы сигналов произвольной формы WW5061, WW5062, WW1071, WW1072, WW2571, WW2572, WW1281, внешний вид которых показан на рис. 2.129. выпускаются одноканальные и двухканальные генераторы серии WW. На генераторы дается гарантия 5 лет!

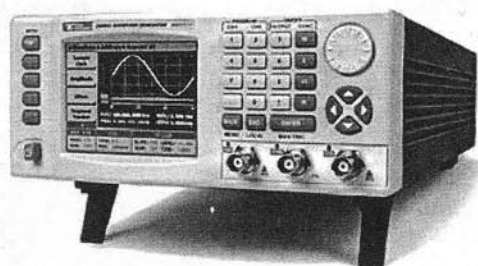


Рис. 2.129. Внешний вид генераторов серии WW фирмы Tabor

Краткие технические данные генераторов следующие:

- диапазон частот (синус, меандр): от 0,1 МГц... 25 МГц / 50 МГц / 100 МГц; 50 Гц... 400 МГц (WW1281);
- расширенный диапазон частот для сигналов произвольной формы;
- 1 (WW1281) или 2 выходных канала;
- разрядность ЦАП 12, 14 или 16 бит;
- амплитуда 2; 10; 16 В (пиковых) на нагрузке 50 Ом;
- частота дискретизации 50; 100; 250 МГц; 1,2 ГГц;
- память для формирования сигнала от 0,5 М до 8 М точек (опция — 16 М);
- режим последовательного формирования произвольного сигнала из различных сегментов с возможностью циклического повторения сегмента в последовательности;
- большой цветной ЖК-дисплей (диагональ 3,5 дюймов);
- стандартные формы — 10 видов;
- различные виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМн, ЧМн; ИМ, ГКЧ; 3D; IQ;
- параллельный 16 битный выход (WW257х) и 2 выхода последовательных цифровых потоков (WW1281);
- ПО ArbConnection для формирования сигнала произвольной формы;
- поддержка синхронной работы нескольких генераторов;
- интерфейсы ДУ: USB, LAN, GPIB.

Достаточно высокими характеристиками обладают и подобные генераторы 33220A и 33250A (рис. 2.130) фирмы Agilent Technologies. Они имеют диапазоны частот от 1 мкГц (микрогерца!) и до 20/80 МГц с разрешением в 1 мкГц для синуса и меандра (рис. 2.131). Приборы заметно уступают генераторам AFG3000 по верхнему пределу частоты, но зато имеют в 1000 раз меньший нижний предел. Впрочем, где нужны столь низкие частоты, указать довольно трудно. Максимальная частота для сигналов произвольной формы равна 6 и 25 МГц при частоте дискретизации 50 и 200 МГц.

Указанные выше приборы удорожает применение графического ЖКИ-дисплея, позволяющего отображать форму генерируемого сигнала. Ряд фирм выпускает упрощенные и более дешевые генераторы, тем не менее, имеющие возможности формирования сигналов произвольной формы. Например, это модели SFG-830/830G фирмы GoodWill с частотами до 30 МГц для синуса и прямоугольника и до 100 кГц для треугольника и пилы. По остальным параметрам они также уступают описанным выше генераторам серии AFG3000.

Фирма Micro Instrument Technology Inc. выпускает многофункциональные генераторы MIT-9301/9302 с частотами синтезируемых сигналов до 31 МГц. Разрядность при синтезе произвольных сигналов 12 бит, частота дискретизации 40 Мвыб/с. Генераторы имеют рекордную разрешающую способность по частоте — до 0,01 мкГц!

Обширную номенклатуру многофункциональных генераторов серии ГСС-XX и ГСС-XXI выпускает компания А-КИП. Приборы генерируют сигналы с частотами от 1 мГц до 120 МГц (для высшей в ряду модели). Они позволяют генерировать 27 видов сигналов заданной формы и имеют опционально поставляемый блок синтеза до 8 сигналов произвольной формы (разрядность 10 бит, частота дискретизации до 200/300 МГц).



Рис. 2.130. Внешний вид генераторов 33220A/33250A фирмы Agilent Technologies

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	33220A	33250A
ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Частотный диапазон	1 мГц - 20 МГц	1 мГц - 80 МГц
	Разрешение	1 мГц	1 мГц
СИНУСОИДА	Погрешность установившегося уровня на 1 мГц	$\pm 20 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$
	Погрешность частоты	10 мВ...10 В	на нагрузке 50 Ом
СИНУСОИДА	Погрешность установившегося уровня на 1 мГц	$\pm (1\% \pm 1 \text{ мВ})$	$\pm (1\% \pm 1 \text{ мВ})$
	Неравномерность АЧХ относительно 1 кГц	0,1 дБ при частоте менее 100 кГц, 0,15 дБ для частот от 100 кГц до 5 МГц, 0,3 дБ для частот от 5 МГц до 20 МГц	0,1 дБ при частоте менее 10 МГц, 0,2 дБ для частот от 10 МГц до 50 МГц, 0,4 дБ для частот от 50 МГц до 80 МГц
СИНУСОИДА	Коэффициент гармоник	$\leq -70 \text{ дБн}$ (0,04%) до 20 кГц, $\leq -85 \text{ дБн}$ до 100 кГц, $\leq -50 \text{ дБн}$ до 1 МГц, $\leq -40 \text{ дБн}$ до 20 МГц	$\leq -80 \text{ дБн}$ (0,2%) до 1 МГц, $\leq -57 \text{ дБн}$ до 5 МГц, $\leq -37 \text{ дБн}$ до 80 МГц
ПОСТОЯННОЕ СМЕЩЕНИЕ	Диапазон (пик. знач. АС+ДС)	$\pm 5 \text{ В}$ на нагрузке 50 В	$\pm 1\%$
	Погрешность установившегося уровня	$\pm 2\%$	$\pm 1\%$
МЕАНДР	Частотный диапазон	1 мГц - 20 МГц	1 мГц - 80 МГц
	Время нарастания/спада	$< 13 \text{ нс}$	$< 8 \text{ нс}$
МЕАНДР	Выброс	$< 2\%$	$< 5\%$
	Перестраиваемая скважность	20% - 80% (до 10 МГц), 40% - 60% (до 20 МГц)	20% - 80% (до 25 МГц), 40% - 60% (до 50 МГц)
МЕАНДР	Погрешность установившегося уровня	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$
	Джиттер	1 нс	75 пс
ПИЛА, ТРЕУГОЛЬНИК	Диапазон частот	1 мГц - 200 кГц	1 мГц - 1 МГц
	Нелинейность	$< 0,1\%$	$< 0,1\%$
ИМПУЛЬС	Перестраиваемая скважность	0,0% - 100,0%	0,0% - 100,0%
	Диапазон частот	500 мГц - 5 МГц	500 мГц - 50 МГц
ИМПУЛЬС	Длительность импульса	От 20 нс	От 8 нс
	Перестраиваемое время нарастания	От 13 до 100 нс	5 нс - 1 мс
ИМПУЛЬС	Выброс	$< 2\%$	$< 5\%$
	Джиттер	300 пс	50 пс
ШУМ	Полоса частот (белый шум)	9 МГц	50 МГц
	Диапазон частот	1 мГц - 8 МГц	1 мГц - 25 МГц
ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА	Длина памяти	2 - 64 тысячи точек	1 - 64 тысячи точек
	Разрешение ЦАП	14 бит (включая знак)	12 бит (включая знак)
ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА	Частота дискретизации	50 МГц	200 МГц (фильтр полосы 50 МГц)
	Память	4 ячейки	4 ячейки
АМ, ЧМ	Встроенные сигналы	Нарастающая и спадющая экспонента, гармоническая, sin x/x	Синус, меандр, пилы, произвольная
	Формы несущей	Синус, меандр, пилы, произвольная	Внешняя/внутренняя
АМ, ЧМ	Источники модуляции	Синус, меандр, пилы, треугольник, шум, произвольная	Синус, меандр, пилы, треугольник, шум, произвольная
	Модулирующее колебание (внутреннее)	(частоты до 20 кГц)	(частоты до 20 кГц)
АМ, ЧМ	Движения частоты	До 10 МГц (гнесса)	До 80 МГц (гнесса)
	Коэффициент АМ	1...120 % (АМ); разрешение 0,1 %	1...120 % (АМ); разрешение 0,1 %
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	Напряжение питания	220 В ($\pm 15\%$), 50 / 60 Гц	254 x 104 x 374 мм
	Габаритные размеры	261 x 104 x 303 мм	254 x 104 x 374 мм
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	Масса	3,4 кг	4,6 кг
	Комплект поставки	Сетевой шнур (1), руководство по эксплуатации, ПО, USB или RS-232 кабель	Сетевой шнур (1), руководство по эксплуатации, ПО, USB или RS-232 кабель

Рис. 2.131. Технические характеристики генераторов 33220A/33250A

Глава 3. Основы электронной осциллографии

В этой главе очень кратко описана история возникновения техники визуализации электрических сигналов — осциллография. Даны основы представления и обработки сигналов. Особое внимание уделено описанию принципов построения современных аналоговых и цифровых электронных осциллографов и основ их схмотехнической реализации. Подробно описана система параметров осциллографов. По сравнению с [1] заметно расширено описание основ цифровой осциллографии.

3.1. Сигналы и их спектры

3.1.1. Синусоидальные колебания и сигналы

Область науки и техники, позволяющая визуально (чаще всего графически) представлять различные, обычно невидимые, процессы получила название — *осциллография*. Приборы, реализующие возможности осциллографии называются *осциллографами*.

Колебания (осцилляции) широко распространены в природе. Звучание камертона и струны, свист человека — все это примеры достаточно простых колебаний, близких к синусоидальным. Мы слышим звуки от таких колебаний, но не имеем ни малейшего представления о том, какую форму имеют эти колебания. Лишь с помощью механических осциллографов более сотни лет тому назад была установлена форма этих колебаний — она оказалась синусоидальной (см. рис. 3.1). Впрочем, математики давно установили, что такую форму имеют низкочастотные, так называемые свободные, механические колебания, например механического маятника, качелей или моста, после их возбуждения. Это очень немногие виды колебаний, которые мы иногда можем наглядно увидеть и оценить.

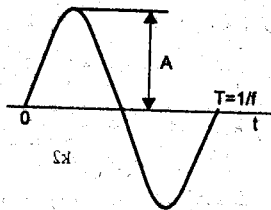


Рис. 3.1. Период синусоидального колебания (сигнала)

Синусоидальные колебания $y(t)$ в общем случае описываются следующей зависимостью:

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (3.1)$$

где A — амплитуда (для тока в амперах, для напряжения в вольтах и т. д.), f — частота (в герцах, 1 Гц это одно полное колебание в секунду) и φ — фаза (в радианах). Период синусоидальных колебаний (один их полный цикл) $T=1/f$. Синусоидальные колебания циклически повторяются. Частота синусоидальных колебаний

это число циклов в единицу времени. Для звуковых колебаний амплитуда определяет громкость звука, частота его тон, а вот фазу чистого синусоидального колебания ухо не воспринимает.

Нередко используется и понятие *круговой частоты* $\omega = 2\pi f$, тогда синусоидальное колебание (3.1) записывается в виде:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi). \quad (3.2)$$

Синусоидальное колебание (3.2) имеет огромное значение в науке и технике. В отличие от постоянных величин, например, постоянного напряжения или тока, синусоидальное колебание описывает простейшие режимы работы динамических систем.

3.1.2. Понятие о спектральном синтезе сложных сигналов

Роль синусоидальных сигналов многократно возрастает, если учесть, что сложные сигналы практически любой реальной формы могут быть представлены набором синусоидальных колебаний — *гармоник* с кратными основной частоте (первой гармоники) частотами [4]. При этом такой набор (*спектр*) образует сложные колебания, например звуки музыки или человеческой речи. Простые колебания именуют *гармоническими*, поскольку они, несмотря на свой колебательный характер, находятся как бы в гармонии с окружающей средой — их форма и параметры (амплитуда, частота и фаза) неизменны во времени.

Эту возможность, вначале на примере задач теплопроводности, теоретически обосновал гениальный французский математик Жан Батист Жозеф Фурье (1768—1830 г.г.). С помощью современных систем компьютерной математики [2, 3] можно дать весьма наглядную трактовку гениальному мышлению Фурье. Возьмем для примера широко распространенные в технике осциллографии сигналы — прямоугольные и пилообразные импульсы. Первые применяются для контроля временных параметров осциллографов и различных технических устройств, вторые (что показано ниже) для создания развертки осциллографов. Оба сигнала содержат скачки. Можно ли получить хотя бы приближение таких сигналов с помощью сумм их синусоидальных составляющих? Ответ оказывается положительный и иллюстрируется рис. 3.2 и 3.3, где даны примеры синтеза этих сигналов.

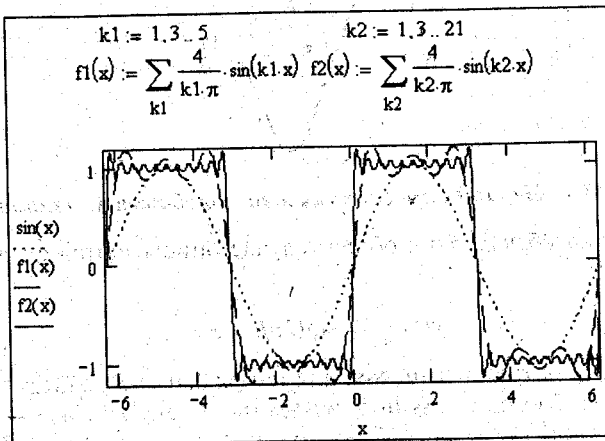


Рис. 3.2. Пример гармонического синтеза прямоугольных импульсов — меандра

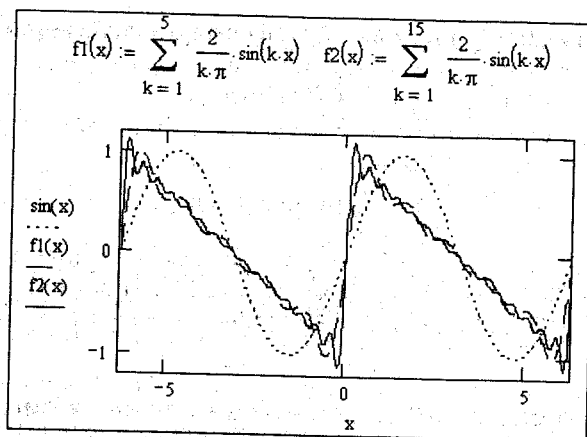


Рис. 3.3. Пример гармонического синтеза пилообразных импульсов

Кривые на рис. 3.2 получены суммированием 1, 3 и 21 синусоид с частотами, кратными частоте сигнала и амплитудой убывающей обратно пропорциональной номеру частотной составляющей — *гармоники*. Используются только нечетные гармоники. Нетрудно заметить, что чем больше гармоник используется, тем ближе форма синтезированного сигнала к идеальной прямоугольной форме меандра — сигнала прямоугольной формы с равной длительностью полупериодов и равной амплитудой положительной и отрицательной полуволн. Если суммируются все гармоники (как четные, так и нечетные), то форма синтезируемого сигнала оказывается близкой к пилообразной — рис. 3.3 (здесь показаны 1, 5 и 15 гармоник). Впрочем, сами скачки по времени стремятся к нулю только при бесконечном числе гармоник, что на практике не реализуется.

Для получения импульсных сигналов применяются *импульсные генераторы*. (см. главу 2). Существуют и синтезаторы импульсных и даже произвольных периодических сигналов на основе Фурье-синтеза, но это очень дорогие и редкие приборы. Все они без осциллографа были бы бессмысленны.

3.1.3. Фурье-анализ и синтез периодических функций

Задача замены произвольной сложной или неудобной для вычислений функции набором более простых функций давно занимала умы математиков. Гениальность Фурье проявилась не только в том, что он предсказал гармонический синтез сложных сигналов, но и в том, что Фурье теоретически еще в 1807 году обосновал возможность гармонического синтеза произвольных периодических зависимостей, удовлетворяющих *условиям Дирихле* на промежутке $(-\pi, \pi)$:

- функция $y(x)$ непрерывна или имеет конечное число разрывов первого рода;
- промежуток $(-\pi, \pi)$ можно разбить на конечное число таких промежутков, на которых функция меняется монотонно.

Здесь важно отметить, что условия Дирихле выполняются для всех практически существующих периодических сигналов, поэтому в дальнейшем мы будем опускать ссылки на них. Рядом Фурье для функции общего вида $y(x)$, удовлетворяющей условиям Дирихле и имеющей период 2π , является ряд:

$$y(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \sin(kx) + b_k \cos(kx)). \quad (3.3)$$

Коэффициенты ряда (3.3) находятся по формулам Эйлера — Фурье:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(x) \cos(kx) dx \quad (3.4)$$

и

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(x) \sin(kx) dx. \quad (3.5)$$

Строгое доказательство того, что ряд (3.3) может приближать произвольную функцию, базируется на элементарных тригонометрических преобразованиях и понятии ортогональности набора функций, образующих этот ряд:

$$1, \cos(x), \sin(x), \cos(2x), \sin(2x), \dots, \cos(nx), \sin(nx), \dots$$

Ортогональность означает, что интеграл от произведения двух любых различных функций этого (возможно и иного) набора функций в промежутке от 0 до 2π равен нулю. Само доказательство, довольно громоздкое, можно найти в учебниках по высшей математике.

Важными сферами применения рядов Фурье являются расчеты радиотехнических устройств. В них обычно периодические сигналы представляют как функции времени $y(t)$ на отрезке $[0, T]$ с периодом $T=1/f_1$, где f_1 — частота первой гармоники периодического сигнала. В этом случае ряд Фурье, после несложных преобразований, записывается в виде:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi k f_1 t) + b_k \sin(2\pi k f_1 t)), \quad (3.6)$$

где

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(2\pi k f_1 t) dt \quad (3.7)$$

и

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(2\pi k f_1 t) dt. \quad (3.8)$$

В этом случае коэффициенты a_k (3.7) и b_k (3.8) ряда (3.6) описывают косинусную и синусную составляющие k -ой гармоники сигнала с периодом T и частотой $f_1=1/T$. Часто используется иная форма ряда Фурье, упрощающая его синтез:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N M_k \cos(2\pi k f_1 t + \varphi_k), \quad (3.9)$$

ЭТНН

где амплитуды гармоник M_k и их фазы φ_k определяются выражениями:

$$M_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (3.10)$$

и

$$\varphi_k = -\arctan(b_k/a_k). \quad (3.11)$$

Разложение функции на гармонические составляющие, то есть вычисление коэффициентов Фурье, принято называть *спектральным анализом*. А воссоздание функции представленной рядом Фурье, называют *спектральным синтезом*. Гармонике с $k=1$ называют основной или *первой гармоникой* сигнала. Она задает его частоту повторения f_1 . Остальные гармоники называют *высшими*, их частоты равны $f_k=kf_1$, где $k=2,3,4,\dots$. Таким образом, спектр периодических сигналов, представи-

мых рядом Фурье *дискретный* — он содержит набор фиксированных частот f_k , где $k=1, 2, 3, \dots$.

Как видно из (3.9) сложные колебания могут содержать множество гармонических составляющих с разной амплитудой (3.10) и фазой (3.11). Чем сложнее форма просматриваемых на экране осциллографа сигналов, тем больше гармоник требуется для его представления и тем шире должна быть полоса частот осциллографической трубки и усилителей отклонения. С помощью ряда Фурье мы можем установить, сколько гармоник сигнала нужно для представления сложного сигнала с заданной погрешностью. Словом мы можем узнать какими амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиками должен обладать осциллограф, чтобы представлять тот или иной сигнал достаточно достоверно. Спектральный подход лежит в основе многих направлений современной радиоэлектроники — достаточно отметить современную технику радиосвязи.

3.1.4. Дискретный Фурье-анализ и спектр периодических функций

Вычисление коэффициентов Фурье прямо по интегральным представлениям встречает большие вычислительные трудности. Даже в системах компьютерной математики, где такое вычисление вполне возможно, оно занимает много времени и ограничено приближенным вычислением амплитуд и фаз не более чем десятков гармоник. К тому же далеко не всегда сигнал является непрерывным. Чаще (особенно в цифровых устройствах) он имеет *дискретное представление*.

Предположим, что некоторая функция (или сигнал) задана рядом равноотстоящих дискретных отсчетов с числом N , т. е. y_1, y_2, \dots, y_N . В этом случае у нас нет никаких оснований считать, что в промежутках между узлами значения функции не постоянны. Если же они постоянны, то интегралы при расчете коэффициентов Фурье (3.7) и (3.8) могут вычисляться простейшим методом прямоугольников:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y_i \cos\left(\frac{2\pi k i}{N}\right) \text{ и } b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y_i \sin\left(\frac{2\pi k i}{N}\right). \quad (3.12)$$

Детальный анализ, выходящий за рамки данной книги, показывает, что формулы (3.12) для коэффициентов Фурье являются единственными теоретически обоснованными формулами приближенного вычисления коэффициентов Фурье [4]. Для произвольных функций они обеспечивают минимум среднеквадратической погрешности. Другими словами представление функции тригонометрическим рядом Фурье с ограниченным числом членов является регрессией. Простое описание средств дискретного анализа и синтеза *методом дискретного преобразования Фурье* можно найти в [2, 3]. Именно дискретное преобразование Фурье лежит в основе построения современных *программных анализаторов спектра*, которые часто встраиваются в цифровые осциллографы.

3.1.5. Непрерывное преобразование Фурье для произвольного сигнала

До сих пор мы рассматривали периодические функции и сигналы. А как быть, если они не периодические? Тут правомерны два подхода. Если функция или сигнал определены на некотором конечном промежутке пространства или времени (носителе конечной длины), то мы можем считать сигналы как бы периодическими и применять к ним описанный выше спектральный анализ и синтез. Напри-

мер, если сигнал определен на некотором промежутке времени t_0 , то его можно посчитать периодическим с периодом t_0 или частотой $f_1=1/t_0$.

Другой путь заключается в переходе к *непрерывному преобразованию Фурье* в общем виде — для произвольного сигнала. *Прямое преобразование Фурье* в таком виде позволяет получить в аналитическом виде функцию частоты $F(\omega)$ от временной функции $f(t)$. Оно реализуется формулой

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (3.13)$$

Здесь $f(t)$ — скалярная функция независимой переменной t . Спектр при этом становится сплошным.

Заметим, что существует особый вид *оконного преобразования Фурье*. Он реализуется вводом в подынтегральное выражение множителя $W(t)$ описывающего некоторую временную зависимость, определенную на конечном интервале времени. Это позволяет перейти от Фурье-анализа полного сигнала $f(t)$ к анализу его по частям, локализованным во времени.

Поскольку мы исходим из предположения, что $f(t)$, в общем, непериодическая функция, то уже нельзя вести речь об отдельных гармониках и о дискретном спектре сигнала. Спектр $F(\omega)$ становится непрерывным и можно говорить лишь о плотности энергии сигнала в некоторой малой (стремящейся к нулю) полосе частот. Так что в данном случае $F(\omega)$ есть зависимость плотности энергии сигнала от частоты.

Соответственно, *обратное преобразование Фурье* задается следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.14)$$

Эта формула позволяет по функции $F(\omega)$ найти в аналитическом виде функцию $f(t)$.

Из формулы (3.13) вытекает главный недостаток прямого преобразования Фурье — интегральная оценка всех частотных составляющих спектра вне зависимости от времени их существования. Это связано непосредственно с бесконечными пределами интегрирования в (3.13). В результате вполне возможны случаи, когда совсем разные сигналы имеют одинаковый частотный спектр. Другими словами Фурье анализ прекрасно подходит для стационарных сигналов, но не годится для нестационарных, у которых определенные частотные компоненты существуют только в определенных промежутки времени или когда параметры сигнала меняются во времени.

Роль осциллографии может резко возрасти при переходе к новому базису представления произвольных зависимостей — *вейвлетам* [48]. Вейвлет-анализ означает разложение таких зависимостей на сумму произведений вейвлет-коэффициентов на вейвлет-функции, имеющие вид ограниченных во времени зависимостей, удовлетворяющих ряду особых условий. Большинство вейвлетов имеет вид импульсных или очень сложных (например, фрактальных) колебаний, ограниченных во времени, перемещаемых и масштабируемых.

Вейвлет-анализ и синтез уже широко применяется в технике обработки сигналов с локальными особенностями, например импульсных и цифровых сигналов. Он положен в основу наиболее эффективных алгоритмов сжатия звуковых и видео-сигналов, их фильтрации и очистки от шума. Уже появились интегральные

микросхемы, реализующие вейвлет-преобразования. Для наблюдения весьма разнообразных по форме вейвлетов и нужны осциллографы, причем достаточно широкополосные.

Техника вейвлет-преобразований ничуть не снижает значения Фурье-преобразований. Она лишь устраняет некоторые принципиальные недостатки Фурье-преобразований, в частности неудовлетворительный учет локальных особенностей сигналов и непригодность для анализа нестационарных сигналов (частично устраняемая применением оконного преобразования Фурье). В последнее время она проникает в новейшие устройства, например, георадары, дающие изображение слоев земли или предметов в толще строений.

3.1.6. Быстрое преобразование Фурье (БПФ)

С позиций практики главным недостатком всех описанных выше методов Фурье-анализа и синтеза функций и сигналов является большое время вычислений. Это связано с тем, что в формулах для коэффициентов Фурье присутствуют быстро осциллирующие множители, что требует разбивки интервалов интегрирования на очень малые части. В итоге объем вычислительных операций резко возрастает.

Для преодоления вычислительных трудностей, связанных с интегрированием в ходе ППФ и ОПФ быстроизменяющихся зависимостей, были предложены методы *быстрого преобразования Фурье* (БПФ или, в англоязычной транскрипции, FFT — от Fast Fourier Transform). Они используют специальную технику комбинации отсчетов функций, помноженных на осциллирующие множители, и учитывают периодичность значений тригонометрических функций. Алгоритмы БПФ не уменьшают погрешности вычислений при заданном числе гармоник, но позволяют резко уменьшить время спектрального анализа и синтеза — особенно, если число временных отсчетов $y(t)$ кратно 2^N , где N — целое число.

В основе БПФ лежит прореживание по частоте и пирамидальный алгоритм, исключающий повторные вычисления периодически повторяющихся членов тригонометрического ряда Фурье. БПФ алгоритм выполняется за $\sim N \log N$ операций, где N — число отсчетов сигнала. БПФ применяется не только в системах компьютерной математики для ускорения преобразований Фурье, но и во многих иных аппаратных и программных средствах, описываемых в данной книге. Например, этот метод используется в анализаторах спектра, входящих практически во все цифровые осциллографы.

3.1.7. Эффект Гиббса

Синусоида (рис. 3.1) не содержит скачков и, следовательно, любой конечный набор синусоид (гармоник) не в состоянии создать скачки сигнала с бесконечно малой длительностью. Лишь в том случае, когда суммируется бесконечное число гармоник можно надеяться на то, что быстрые изменения сигнала будут иметь стремящуюся к нулю длительность и будут близки к скачкам. Однако теоретически бесконечное число гармоник применять невозможно, хотя бы потому, что при этом время синтеза сигнала будет бесконечно большим. Поэтому на практике число гармоник при синтезе импульсных сигналов всегда ограничено, а форма синтезированного сигнала несколько отличается от идеализированной формы. В этом отношении вейвлеты ведут себя куда лучше и легко синтезируют скачки [48].

При ограничении спектра конечным числом гармоник наблюдаются характерные волнообразные колебания синтезированных сигналов, особенно заметные в области разрывов. Этот эффект получил название *эффекта Гиббса*. Это очень не-

желательный эффект, поскольку он сильно искажает форму колебаний и служит источником больших погрешностей. Относительная амплитуда пульсаций синтезированных сигналов (самих по себе, не имеющих пульсаций) достигает 18% (или 9% от двойной амплитуды) и практически не меняется при увеличении числа гармоник — просто выбросы при пульсациях становятся короче. Между тем известно множество задач, где точность приближения должна составлять значения намного меньшие 1%, а порою не превышать и тысячных долей процента.

Поскольку пульсации эффекта Гиббса наиболее явно проявляются в моменты скачков анализируемой функции, ограничимся рассмотрением случая представления скачка

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

ограниченным спектром. Ограничение спектра можно учесть, введя в (3.14) умножение на прямоугольное частотное окно

$$W(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \gamma \\ 0, & |\omega| > \gamma \end{cases}$$

Это окно задает резкое ограничение спектра. Опуская детали вывода, которые можно найти в [3], найдем, что в этом случае

$$f(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} Si(\gamma x), \quad (3.15)$$

где функция $Si(z)$ известна как интегральный синус

$$Si(z) = \int_0^z \frac{\sin(t)}{t} dt. \quad (3.16)$$

Задание функции $Si(z)$ и построение зависимости $f(x)$ для данного случая представлено на рис. 3.4. Там же представлены результаты вычисления значений выбросов, обусловленных эффектом Гиббса.

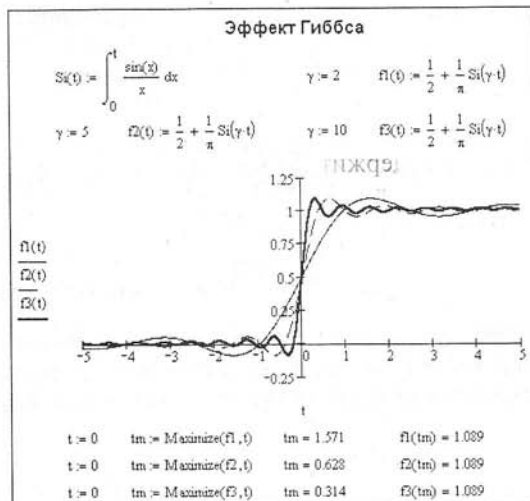


Рис. 3.4. Иллюстрация к возникновению эффекта Гиббса

Итак, как следует из рассмотренного, в частности выражений (3.15) и (3.16), эффект Гиббса существует, увы, как теоретически обоснованная реальность. И связан он, прежде всего, с неудачно подобранной (или просто поневоле существующей) формой частотного окна, резко ограничивающего число используемых при спектральном синтезе гармоник (частот) — прямоугольного. Выбором специального окна можно заметно ослабить влияние этого «зловредного» эффекта. Для этого в подынтегральное выражение (3.14) вводится множитель $W(\omega)$, задающий окно с заданной формой амплитудно-частотной характеристики. Тем самым реализуется обратное оконное преобразование Фурье. Математические средства борьбы с эффектом Гиббса и примеры их реализации в системе Mathcad можно найти в [3]. Там же, кстати, как и в [48], можно найти примеры представления импульсов с помощью вейвлет-анализа и синтеза.

3.1.8. Спектральный анализ дискретных сигналов

Современные цифровые осциллографы представляют сигнал в виде ряда дискретных отсчетов $y_0, y_1, \dots, y_{N-2}, y_{N-1}$, обычно размещаемых через постоянные промежутки времени (см. далее раздел 3.4). Последовательность отсчетов фиксирована по длине и характеризуется числом отсчетов N . Таким образом, сигнал представляется в виде периодической последовательности $y_{k+N} = y_k$. При этом сигнал представляется как последовательность смещенных во времени дельта-функций [51–53]:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_k \delta(t - k),$$

которая может быть продолжена как вперед, так и назад.

Это, кстати, является одним из принципиальных отличий цифровых осциллографов от аналоговых — у последних сигнал определен только для $t \geq 0$. Благодаря этому нулевой отчет времени осциллограмм в цифровых осциллографах можно вывести в любую точку горизонтальной оси и наблюдать фронты импульсов не применяя линии задержки, которые встраиваются в аналоговые осциллографы и вносят дополнительные искажения в наблюдаемые сигналы.

Теоретически, ряд Фурье для данного сигнала определяется выражением:

$$\dot{Y}_n = \frac{1}{NT} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right).$$

Здесь j -мнимая единица, n — номер гармоники, k — индекс отсчетов сигнала (от 0 до $N-1$). Обычно приведенное выражение нормируется путем задания периода $T=1$:

$$\dot{Y}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (3.17)$$

Используя последнее выражение можно вычислить отсчеты амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) дискретного сигнала, т. е. его спектр. Это широко используется в современных цифровых осциллографах (см. подраздел 3.4.3).

3.2. Начало осциллографии

3.2.1. Рождение электронной осциллографии

Человечество давно искало способы отображать графически временную зависимость сложных колебаний (сигналов). Для этого использовалась развертка колебаний во времени. Область науки и техники, посвященная решению этой задачи получила название *осциллографии*. А приборы для наблюдения временных зависимостей различных изменяющихся величин получили название *осциллоскопов*, а в дальнейшем после приспособления их к достаточно точным измерениям — *осциллографов*.

Слово «осциллограф» образовано от слов «осциллум» — колебания и «графо» — пишу. Отсюда и назначение этого измерительного прибора — отображать на экране кривые, характеризующие форму тех или иных колебаний. Другое название этого прибора — *осциллоскоп* происходит от того же «осциллум» и «скопео» — смотрю. Т. е. речь идет опять таки о наблюдении формы колебаний. И хотя второе название более точное, в литературе на русском языке принято все же первое — осциллограф. Оно звучит более солидно, чем осциллоскоп!

Будь авторы этой книги историками, они отдали бы предпочтение в первенстве создания осциллографии изобретателю фонографа — Эдисону. Тот еще в 1877 г. стал записывать механические колебания иглы, прикрепленной к мембране, на вращающийся восковый валик. Получаемая при этом спиральная канавка на восковом диске представляла собой типичную осциллограмму сложных звуковых колебаний с механической разверткой, осуществляемой равномерным вращением валика (позже диска граммофонной пластинки). Однако, даже такой гениальный изобретатель, как Эдисон, не догадался о том, что создал первый *механический осциллограф*, записывающий сложные колебания и позволяющий их наблюдать. Возможно, так было потому, что амплитуда отклонений канавки воскового диска была столь мала, что «осциллограмму» можно было разглядеть лишь в лупу с хорошим увеличением.

Спустя чуть меньше десятилетия в 1885 г. казанским физиком Р. А. Колли (1845—1891) был создан *осциллометр* — прототип современных светолучевых (шлейфовых) осциллографов и магнитоэлектрический осциллоскоп французского физика А. Блонделя (1863—1938), изобретенный в 1893 г. Однако использование светолучевых и магнитоэлектрических осциллографов было ограничено низкочастотным диапазоном. Эти приборы применяются и в наши дни, порою под несколько иными названиями. Например, в электроэнергетике широко используются магнитоэлектрические ленточные самописцы, исправно вычерчивающие временные зависимости токов и напряжений на рулонной бумаге. Их можно увидеть на любой электростанции. Но эти приборы регистрируют лишь медленно изменяющиеся процессы.

3.2.2. Осциллограф и трубка Брауна

В последней четверти XIX бурно развивается электроэнергетика и электротехника. Электрические сети многих городов работали на переменном токе. Появились различные преобразователи переменного тока. В ходе такого преобразования синусоидальная форма переменного напряжения нередко сильно искажалась. Возникла необходимость в измерении мгновенных значений напряжений и токов, их эффективных значений и разности фаз в электрических цепях. Так появилась потребность в точном графическом представлении сложных временных зависимостей напряжений и токов в электротехнических системах и устройствах.

Открытие Генрихом Герцем в 1886—1888 г.г. электромагнитных волн, и связанных с ними высокочастотных электромагнитных процессов, привело к возникновению радиотехники, в которой стали широко использоваться высокочастотные сигналы. Возникла техника связи, а затем радиолокация и импульсная техника, а еще позже телевидение и вычислительная техника. В этих отраслях науки и техники самое широкое применение получили импульсные сигналы самой разнообразной формы, порою очень сложной. Но органы чувств человека вообще не реагируют на слабые электрические и световые сигналы, совершенно не чувствительны к их форме (временной зависимости).

Все это вело к необходимости создания быстродействующих и широкополосных осциллографов. Ими стали *электронные осциллографы*. Ныне это «глаза» человека в мире самых разнообразных сигналов, которые человеческий организм сам по себе не воспринимает. Уникальные возможности этих приборов, как и массовость их применений, невозможно переоценить. Но путь к их появлению был не простым, а сами эти приборы поначалу были далеко не так совершенны как в наши дни. Первые осциллографы были вовсе не массовыми изделиями, скорее они были уникальными физическими приборами.

6 июня 2000 года исполнилось 150 лет со дня рождения крупного немецкого ученого-физика, лауреата Нобелевской премии, члена-корреспондента Берлинской Академии наук Фердинанда Брауна, который считается изобретателем электронного осциллографа и ряда других физических и электроизмерительных приборов [6—8]. Он был удостоен этой престижной награды вместе со знаменитым итальянским радиотехником Г. Маркони за выдающийся вклад в развитие радиотехники вообще и изобретение осциллографа в частности.

Во время творчества Брауна многие физики увлекались опытами с различными излучениями. Браун обратил внимание на катодные лучи и вскоре пришел к убеждению, что, взяв за основу известную физикам трубку У. Крукса (1832—1919) с холодным катодом, можно создать катодно-лучевой прибор для индикации формы электромагнитной волны, поскольку световое пятно на флуоресцирующем экране трубки, мгновенно реагируя на электромагнитное поле, может синхронно следовать за его изменением. Так появилась трубка Брауна — рис. 3.5. Это событие датируется 1897 годом.

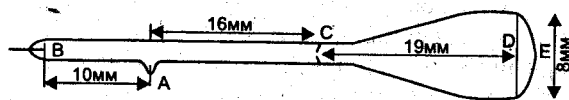


Рис. 3.5. Чертеж трубки Брауна

Трубка Брауна (это название вплоть до 40-х г.г. распространялось и на другие электронно-лучевые приборы) монтировалась горизонтально на опоре вместе с отклоняющей луч электронов катушкой. Таким образом, впервые использовалось *магнитное отклонение*. В дальнейшем такие трубки с двумя катушками получили название *кинескопов*, а катушки — *магнитной отклоняющей системой*. Брауном использовались как отпаянные трубки, так и трубки с непрерывно откачивающим воздух ручным ртутным насосом. Анодное напряжение около 50 кВ (впечатляет и сейчас) обеспечивалось индукционной машиной.

Исследуемый ток подвели к катушке электромагнита, расположенной снаружи узкой части стеклянной колбы между диафрагмой и экраном. Пучок электронов, создаваемый катодом, откликаясь на изменения магнитного поля, вычерчивал

на флуоресцирующем экране линию между двумя точками, соответствующими минимальной и максимальной величинам исследуемого сигнала. Светящаяся линия отбрасывалась на внешний экран с помощью зеркала В. Кенига, которое, поворачиваясь, позволяло наблюдать изменение сигнала во времени. Итак, в осциллокопе Брауна использовалась оптико-механическая развертка по горизонтали.

Скорость сканирования с помощью зеркала, превращающего пульсирующую вертикальную линию в двумерную визуально наблюдаемую кривую, отображающую временную зависимость тока в отклоняющей катушке, была невелика. Таким образом, созданная Брауном трубка заметно отличалась от современных осциллографических трубок и тем более от современных цветных кинескопов с маской для телевизоров, изобретение которых иногда безосновательно приписывают К. Ф. Брауну. Отличалась трубка и от современных осциллографических трубок с электростатическим отклонением.

Осциллограф Брауна в некотором роде был парадоксальным инструментом. Он содержал скоростной электронный прибор — электронно-лучевую трубку, но использовал инерционный метод магнитного отклонения луча катушкой и механическую развертку. Отсюда и невысокое быстродействие прибора в целом.

Трубка Брауна широко применялась в научных исследованиях русскими учеными [8]. Об опытах с нею сообщали в своих публикациях А. Л. Гершун (1868—1915), В. К. Лебединский (1868—1937), А. А. Петровский (1873—1942) и другие, вносящие в методы осциллографии и в прибор Брауна значительные усовершенствования. В 1899 г. ассистент Брауна И. Ценнек (1871—1959) ввел электромагнитную развертку для замены зеркала Кенига. В 1907 г. другой его ассистент — россиянин Л. И. Мандельштам разработал метод и схему получения пилообразного тока для линейной развертки осциллограммы по оси времени [9]. Суть метода заключалась в том, что для развертки использовалось только начало фазрядного процесса конденсатора, когда ток является практически линейной функцией времени. Остальная часть тока (80 %) отбрасывала пятно за край экрана. Эти и другие нововведения существенно расширили возможности осциллографа, сделали его использование более удобным.

Достижения К. Ф. Брауна высоко оценила мировая научная общественность и Комитет по присуждению Нобелевских премий, уравнивший его заслуги с заслугами именитого итальянца Г. Маркони, которого считают создателем радиотехнической индустрии Запада. Наш соотечественник А. С. Попова умер 1906 г. Если бы не это печальное событие, возможно, что и он разделил бы в 1909 г. славу Нобелевского лауреата в области радиотехники — вместе с Г. Маркони и К. Ф. Брауном (Нобелевские премии присуждаются только живым ученым).

3.2.3. Осциллографическая трубка с электростатическим отклонением

Одной из главных особенностей осциллографа Брауна было то, что он мог применяться для построения временных зависимостей тока $i(t)$, протекающего через отклоняющую катушку с индуктивностью L . Магнитное поле катушки пропорционально протекающему через нее току и меняется с изменением тока.

Однако чаще возникает необходимость наблюдать временную зависимость изменяющегося напряжения $u(t)$, а вовсе не тока. Но для этого магнитная развертка плохо пригодна. В этом легко убедиться, если учесть, что напряжение на идеальной катушке индуктивности с индуктивностью $L = \text{const}$ пропорционально производной протекающего через нее тока:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.18)$$

Эту закономерность ныне знают даже в школе. Если предположить, что $u(t) = E = \text{const}$, то из (3.18) мы имеем:

$$\frac{E}{L} = \frac{di(t)}{dt} = \text{const}$$

Отсюда следует, что если к идеальной катушке индуктивности приложено постоянное напряжение, то ток в ее цепи будет линейно расти, так как только в этом случае производная тока является константой. Она задает крутизну пилообразного напряжения, равную E/L .

Мало разбирающийся в электротехнике читатель может наивно предположить, что при приложении к отклоняющей катушке напряжения пятно от электронного луча просто переместится от исходного положения в новое место. Оказывается (см. выше) это совсем не так — пятно начнет перемещаться по экрану с постоянной линейной скоростью в соответствии с линейным изменением тока в катушке. Кстати, из этих рассуждений мы приходим к идее реализации линейной магнитной развертки по горизонтали, но это совсем не годится для отклонения луча по вертикали.

На самом деле ситуация осложняется тем, что реальная катушка индуктивности обладает собственным омическим сопротивлением (резистивностью). Имеет свое внутренне сопротивление и источник напряжения (сигнала). Не вдаваясь в детали, описанные, например, в [44], отметим, что в этом случае изменение тока при воздействии на катушку постоянного напряжения будет описываться уже не линейным, а экспоненциальным законом с постоянной времени $\tau = L/R$, где R — суммарное сопротивление в цепи катушки.

Судя по описанию осциллографа Брауна отклоняющая катушка имела индуктивность порядка десятков — сотен миллигенри (мГн). Взяв, к примеру, $L = 100$ мГн и $R = 100$ Ом получим $\tau = 0,1/100 = 1 \cdot 10^{-3}$ с или 1 мс. Величина постоянной времени оказывается достаточно характерной для осциллографа с магнитным отклонением. Дело в том, что время переходных процессов, регистрируемых осциллографом не может быть заметно меньше постоянной времени τ . Это говорит о том, что осциллограф с магнитным отклонением не может быть скоростным. Его удел — наблюдение низкочастотных колебаний с постоянными времени порядка миллисекунд или долей миллисекунды.

Разработчики современных осциллографических электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) давно пришли к кардинальному изменению принципа отклонения электронного луча — был использован электростатический метод отклонения. При этом электронный луч отклоняется под действием электрического поля. Первая вакуумная трубка с электростатическим отклонением и горячим (подогревным) катодом появилась в 1911 г. и была разработана Д. А. Рожанским в компании «Дженерал Электрик».

Удивительно, но этот метод гораздо проще метода магнитного отклонения — в качестве отклоняющей системы используется просто пара пластин, расположенных по обе стороны луча. Правда, расчеты, приведенные ниже, показывают, что пластины должны быть расположены достаточно близко и потому должны находиться внутри трубки, а не снаружи, как в случае отклоняющей катушки трубки Брауна. Но и в этом случае напряжение на пластинах, нужное для полного отклонения луча должно достигать десятков, а иногда и сотен В.

Если подать на пластины постоянное напряжение, то луч из электронов с отрицательным зарядом будет отталкиваться от пластины с отрицательным напряжением и притягиваться к пластине с положительным зарядом. Он будет испытывать отклонение и попадет уже в новую точку экрана. Симметричность подачи отклоняющих напряжений нужна для сохранения хорошей фокусировки луча осциллографической трубки. В этом случае потенциал областей пространства между пластинами не меняется и не влияет на фокусировку луча, как в случае подачи отклоняющих напряжений на одну пластину (при заземленной другой). Для получения парафазных отклоняющих напряжений используются специальные схемы каскадов усиления с симметричным выходом или схемы фазоинверторов.

Рассмотрим устройство современной электронно-лучевой осциллографической трубки — рис. 3.6. Экран трубки покрыт изнутри люминофором — веществом, способным светиться под (ударами) электронов. Чем больше поток электронов, тем ярче свечение той части экрана, куда они попадают. Электронный луч создается электронной пушкой, размещенной на противоположном от экрана конце трубки. Она состоит из подогревателя (нити накала) и катода. Между пушкой и экраном размещен модулятор, регулирующий поток летящих к экрану электронов.

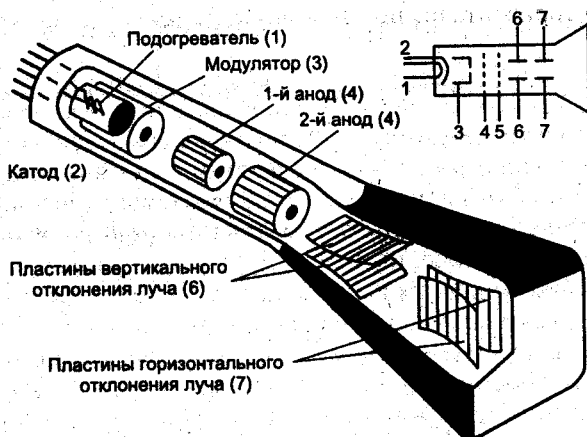


Рис. 3.6. Осциллографическая ЭЛТ с электростатическим отклонением и ее обозначение

С помощью двух электродов — анодов создаются электрические поля, распределение потенциалов которых создает электронные линзы. Благодаря этому пучок электронов довольно большого диаметра (несколько мм), пройдя электронные линзы, фокусируется и принимает форму конуса с острием у экрана трубки. В результате размеры изображения точки на экране удастся довести до долей мм. Кроме того, анодами обеспечивается нужное ускорение электронов в пучке, что обеспечивает достаточно высокую скорость записи осциллограмм. Луч отклоняется с помощью пары двойных металлических отклоняющих пластин. Одна из них отклоняет луч по вертикали (ось Y), а другая по горизонтальной (ось X).

Экран электронно-лучевой трубки будет светиться лишь при подаче на ее специальные ускоряющие электроды — аноды определенных напряжений. Их обычно называют *ускоряющими электродами* или *анодами*. Эти напряжения достигают сотен вольт у малогабаритных трубок и тысяч вольт у большинства трубок умеренных размеров. Для их создания используются высоковольтные источники пита-

ния. Часто поверхность трубки у экрана покрывается проводящим ток слоем и он используется как еще один анод, обеспечивающий ускорение электронов луча уже после его отклонения. Такое решение существенно повышает яркость изображения и графическую скорость записи (см. ниже).

На нить накала обычно подают переменное напряжение, на управляющий электрод (модулятор) постоянное, отрицательной полярности по отношению к катоду, на аноды — положительное; причем на первом аноде (фокусирующем) напряжение значительно меньше, чем на втором (ускоряющем). Меняя напряжение на управляющем электроде можно менять интенсивность электронного луча от максимальной или рабочей до нулевой.

На отклоняющие пластины подается как постоянное напряжение, позволяющее смещать пучок электронов в любую сторону, относительно центра экрана, так и переменное, создающее линию развертки той или иной длины, а также «рисующей» на экране форму исследуемых колебаний. Желательна парафазная подача отклоняющих напряжений. При ней средний потенциал пластин не меняется и не нарушается фокусировка электронного луча трубки.

3.3. Современные осциллографические трубки

3.3.1. Особенности конструкции осциллографических ЭЛТ

Описание деталей конструкции осциллографических ЭЛТ можно найти в [10, 11]. Далеко вдаваться в него не стоит, поскольку цель данной книги заключается не в конструировании ЭЛТ, а лишь в знакомстве с ними как с одной, хотя и важной, деталью осциллографа. В осциллографах применяются серийно выпускаемые осциллографические (индикаторные) ЭЛТ. Их параметры нельзя менять, но некоторые из них надо учитывать при оценке применимости тех или иных трубок и осциллографов на их основе в практике измерений.

Отметим некоторые характерные особенности современных осциллографических ЭЛТ:

- колба трубки имеет плоскую или выпуклую область экрана, плоская область дает меньшие геометрические искажения, но худшую фокусировку, чем выпуклая;
- катод имеет нить подогрева, питающуюся чаще всего стандартным напряжением 6,3 В при токе в доли А;
- максимальный ток катода составляет несколько мА, но ток луча у экрана не превышает 0,1 мА (часть потока поглощается анодами и до экрана не доходит);
- для полного запираения трубки на управляющий электрод достаточно подать отрицательное напряжение (относительно катода) порядка десятков В;
- на аноды трубки подаются ускоряющие напряжения в сотни В, меньшее подается на первый анод (вблизи катода);
- используется пара отклоняющих пластин с однократным изгибом, ближайшая к катоду используется для отклонения по оси Y, более дальняя по оси X;
- угол отклонения луча обычно не превышает 15°, т. к. в противном случае ухудшается фокусировка и чувствительность трубки;
- для уменьшения бликов от внутренней поверхности колбы она выполняется со специальным изгибом и покрывается слоем графита.

Наиболее важными параметрами осциллографических ЭЛТ являются их геометрические размеры, в частности размеры экрана и параметры отклоняющих систем. У нас принято размер трубки указывать цифрами ее названия, например, 13ЛО37И — это индикаторная трубка с диаметром экрана 13 см с номером разработки 37. Трубки делаются как с круглым, так и прямоугольным экраном. Последнее позволяет сделать трубки меньшего размера и лучше использовать площадь экрана. Однако для повышения прочности у таких трубок приходится увеличивать толщину стекла у экрана и они получаются более тяжелыми. Современная ЭЛТ с размером экрана 13 см имеет длину до полуметра, что и объясняет большие размеры осциллографов с такими трубками.

3.3.2. Графическая скорость луча

Одной из фундаментальных характеристик осциллографической трубки является графическая скорость луча, т. е. скорость с которой луч чертит изображение на экране. Чем быстрее луч движется по экрану, тем слабее будет его видимая яркость в случае наблюдения однократных и редко повторяющихся процессов. В случае регистрации синусоидального сигнала (3.1) вертикальную составляющую этой скорости можно вычислить следующим образом:

$$v_{y \max} = \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = 2\pi f. \quad (3.19)$$

Тогда максимальная графическая скорость, с учетом скорости движения луча при горизонтальной развертке, будет равна:

$$v_{z \max} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (3.20)$$

Расчеты показывают, что при размере осциллограммы по вертикали около 1 см и типовой возможной яркости следа от луча максимальные частоты регистрации синусоидального сигнала составляют около 3 ГГц. При этом графическая скорость перемещения пятна от электронного луча оказывается близкой к скорости света. Однако графическая скорость не является реальной скоростью движения электронов, так что ограничения теории относительности Эйнштейна к ней не относятся.

В случае регистрации видеоимпульса графическая скорость выражается следующей формулой [11]:

$$v_z = \sqrt{v_x^2 + \sigma v_y^2}. \quad (3.21)$$

где σ — чувствительность трубки по вертикальному отклонению (в см/В). Максимальная графическая скорость при регистрации видеоимпульса имеет место на его фронтах, где максимальна скорость изменения сигнала.

Графическая скорость определяет яркость осциллограмм. Она падает при наблюдении однократных или редко повторяющихся событий. Для повышения графической скорости нужно увеличивать напряжения на ускоряющих электродах трубки (до 10—20 кВ). Однако (см. далее) это ведет к падению чувствительности по отклонению.

3.3.3. Время установления отклоняющей системы

Отклоняющая система осциллографических трубок из двух пластин в простейшем приближении является фактически неидеальным конденсатором, имеющим

емкость C . В его цепи надо учитывать паразитную индуктивность выводов L и сопротивление источника сигнала R (например, это выходное сопротивление усилителя). Таким образом, эквивалентная схема цепи отклонения представляет собой звено фильтра низких частот или последовательный RLC -контур — рис. 3.7.

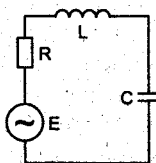


Рис. 3.7. Эквивалентная схема тракта отклонения

Если на вход такого контура подать идеальный перепад напряжения E , то временная зависимость напряжения на C будет иметь вид:

$$u(t) = E \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\frac{\alpha}{\delta} \sin(\delta t) + \cos(\delta t) \right) \right],$$

где $\alpha = R/2L$ и $\delta = (1/LC - R^2/4L^2)^{1/2}$. Расчеты показывают, что эта зависимость может иметь значительный выброс при малых R . При $\alpha/\delta = 1$ этот выброс составляет не более 4 % от амплитуды перепада, что является вполне удовлетворительным показателем. Для этого величину R надо выбирать равной:

$$R = \sqrt{2L/C}. \quad (3.22)$$

Если воспользоваться известным значением резонансной частоты контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.23)$$

то можно выразить значение R через резонансную частоту контура, определяющую предельную частоту тракта отклоняющей системы:

$$R = \frac{1}{f_0 C \sqrt{2\pi}} = \frac{0,22}{f_0 C}. \quad (3.24)$$

Нетрудно доказать, что время достижения напряжением $u(t)$ значения E составит значение:

$$t = 3\pi RC/4 = 2,2RC. \quad (3.25)$$

Это значение обычно и принимают за *время установления* отклоняющей системы с оптимальной переходной характеристикой.

Эти данные относятся к идеальному случаю подачи сигнала прямо на электроды отклоняющей системы осциллографической трубки. Расчеты показывают, что максимальная частота регистрируемых сигналов не превышает 300 МГц, а время установления тракта отклоняющих пластин не может быть меньше 1 нс без кардинальной переработки конструкции трубки. Разумеется, эти значения на много порядков выше, чем у трубки Брауна, но все же далеки от тех, которые нужны в современной *скоростной осциллографии*. Отметим, что исходя из квантово-механического принципа неопределенности, предельное разрешение осциллографии оценивается временем порядка 10^{-14} с. Так что даже в наше время конструкторы осциллографических трубок имеют шансы на улучшение их временных характеристик.

3.3.4. Отклоняющие системы осциллографических ЭЛТ

Важнейшими конструктивными деталями ЭЛТ являются ее отклоняющие системы. В простейшем случае это две пары плоскопараллельных пластин. Одна пара используется для отклонения по вертикали (Y), другая по горизонтали (X). Каждая из пластин каждой пары установлена по обе стороны траектории луча. Возможны и более сложные конструкции отклоняющих пластин (систем).

Одним из важнейших параметров осциллографической ЭЛТ является чувствительность по отклонению. Она определяется как отношение отклонения точки на экране трубки h , поделенное на напряжение, приложенное к пластинам $U_{отк}$. Для плоскопараллельных отклоняющих пластин (рис. 3.8) она определяется выражением [10]:

$$\varepsilon = \frac{h}{U_{отк}} = k \frac{lL}{2bU_a} \text{ [мм/В]}. \quad (3.26)$$

Здесь l — длина пластин, L — расстояние от входного края пластин до экрана, b — расстояние между пластинами, U_a — разность потенциалов между катодом и выходным электродом прожектора, $k > 1$ — коэффициент, учитывающий повышение чувствительности из-за краевых эффектов (практически $k=0,1 - 0,15$).

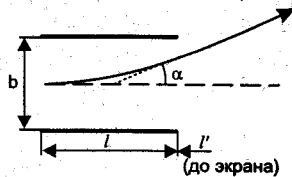


Рис. 3.8. Плоскопараллельные отклоняющие пластины

Чувствительность по отклонению увеличивается при уменьшении расстояния между пластинами. Однако, при слишком малом расстоянии между пластинами, луч при отклонении попадает на пластину, к которой он приближается и полностью поглощается ею. Фактически это означает уменьшение предельного угла отклонения α , почему он обычно и не превышает 15° . Следствием этого является большая длина осциллографических трубок — она в несколько раз больше, чем диаметр экрана круглой трубки или диагональ экрана трубки с прямоугольным экраном. Именно поэтому осциллографическая трубка с большим размером экрана (10 см и выше) оказывается довольно громоздкой и определяет большие размеры осциллографа, построенного на ее основе.

Можно несколько увеличить чувствительность трубки к отклонению, если сделать пластины изогнутыми с увеличенным в месте выхода луча расстоянием — рис. 3.9. Расчеты показывают, что оптимальным является экспоненциальное расширение расстояния между пластинами. Однако оказалось, что очень близкий результат обеспечивает более простой в реализации однократный изгиб пластин примерно в середине их общей длины. При этом чувствительность по отклонению составляет величину, равную:

$$\varepsilon = \frac{h}{U_{отк}} = \frac{L}{2U_a} \left(\frac{l_1}{b_1} + \frac{l_2}{b_2 - b_1} \ln \frac{b_2}{b_1} \right) \text{ [мм/В]}. \quad (3.27)$$

Здесь l_1 — длина параллельной части пластин, l_2 — длина по горизонтали отогнутой части пластин, b_1 — расстояние между параллельными частями пластин и b_2 — расстояние между краями расширенной части изогнутых пластин.

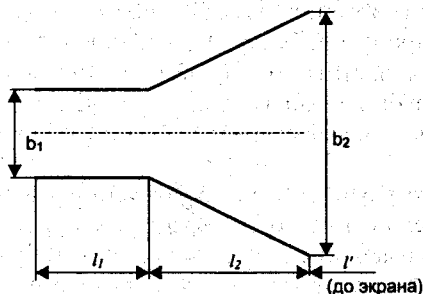


Рис. 3.9. Отклоняющие пластины с одним изгибом

Расчеты по (3.26) и (3.27) показывают, что чувствительность последнего варианта отклоняющей системы примерно в 1,8 раза выше, чем у отклоняющей системы с плоскопараллельными пластинами. Именно поэтому она применяется в большинстве серийных осциллографических трубок. Типичные значения чувствительности осциллографических ЭЛТ составляют 0,5—5 мм/В. Они немного отличаются для пластин вертикального и горизонтального отклонения, поскольку они расположены на разном расстоянии от экрана.

Приведенные значения чувствительности означают возможность регистрации сигналов с амплитудой, начиная от нескольких В и выше. Для работы с меньшими сигналами необходимо применять усилители. Они увеличивают чувствительность к отклонению в K раз, где K — коэффициент усиления усилителя. При этом для сохранения широкополосности трубки надо использовать усилители с шириной полосы пропускания в 2—3 раза выше, чем у трубки. Этого удастся достигнуть далеко не всегда и чаще всего именно усилители ограничивают ширину полосы частот осциллографа и его временные характеристики (в главе 2 были описаны сверхширокополосные интегральные усилители, применение которых позволяет реализовать потенциал современных ЭЛТ в аналоговых осциллографах).

Для электронных осциллографов переход к трубке с электростатическим отклонением означал резкое повышение верности воспроизводимой на экране картины переходных процессов и повышение скоростных характеристик сразу на несколько порядков. Первое связано с тем, что в первом приближении отклонение луча почти пропорционально разности потенциалов отклоняющих пластин. А второе связано с резким снижением постоянной времени устройства отклонения. Дело в том, что инерционность электростатической системы отклонения связана не столько с конечной скоростью движения электронов в пучке, сколько с емкостью пластин. А она составляет обычно единицы-десятки пикофарад.

Допустим, что емкость пластин вертикального отклонения составляет 20 пФ, а выходное сопротивление источника сигнала (например, усилителя канала Y) $R=500$ Ом. Тогда постоянная времени отклоняющей системы будет равна $\tau=R \cdot C=20 \cdot 10^{-12} \cdot 500=1 \cdot 10^{-8}$. Если уменьшить выходное сопротивление усилителя Y до 50 Ом, то постоянная времени упадет до $1 \cdot 10^{-9}$ с. Это в миллион раз меньше, чем в примере с магнитной системой отклонения и означает возможность регистрации процессов с длительностью порядка единиц-десятков наносекунд, а то и намного меньшей.

3.3.5. Осциллографические трубки специального назначения

В ходе эволюции развития осциллографических трубок их конструкция претерпевала некоторые изменения. Первые типы трубок имели выводы от пластин, заведенные в цоколь трубки, обычно размещенный в узкой части трубки (у катода). Это вело к удлинению проводов, росту паразитной индуктивности пластин и их емкости. Для увеличения частотного диапазона сигналов, которые можно просматривать на экране трубки выводы пластин в некоторых трубках выводились кратчайшим путем — прямо через стекло трубки по месту расположения отклоняющих пластин.

Однако кардинального улучшения в отображении высоких частот трубкой это не обеспечивало — предельная частота, определяемая резонансом цепей отклоняющих пластин, увеличивалась лишь в несколько раз. В лучшем случае она составляла несколько сотен МГц. А между тем в радиотехнике все чаще и чаще стали использоваться сверхвысокочастотные (СВЧ) устройства, работающие на частотах в единицы и десятки ГГц.

Существенное повышение полосы частот осциллографических трубок было достигнуто разработкой *широкополосных отклоняющих систем* в виде *линий передачи* [10, 11]. Схематично конструкция таких систем представлена на рис. 3.10. У таких трубок используется множество пар маленьких пластин, соответственно с уменьшенной емкостью C_1 каждой пластины. Пластины соединяются между собой отрезками спиралей с индуктивностью L_1 . Если число ячеек линии передачи равно n , то примерно в n раз повышается предельная частота отображаемых трубкой сигналов и уменьшается предельное время установления.

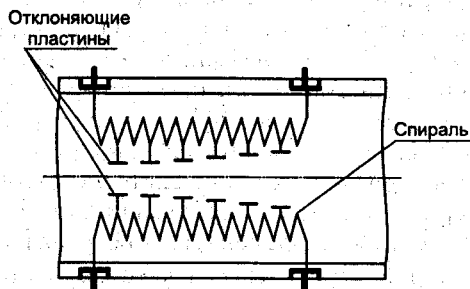


Рис. 3.10. Широкополосная отклоняющая система в виде линии передачи

Для дальнейшего повышения предельных частот регистрации были созданы отклоняющие системы на основе распределенных полосковых линий передачи. Как и в отклоняющих системах, показанных на рис. 3.10, для получения минимального искажения формы импульсов и устранения их отражения — нужно обеспечить согласование линий на входе и на выходе. Для этого сопротивление генератора сигналов и нагрузки линий выбирается равным *волновому сопротивлению* линий

$$R_B = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (3.28)$$

Здесь L_1 и C_1 значения индуктивности и емкости одной секции для линий с сосредоточенными параметрами или погонные (на единицу длины) для линии с распределенной постоянной. Обычно волновое сопротивление выбирается равным от 50 до 500 Ом. Например, у трубки 11ЛО101М оно равно 320 Ом. Волновое сопро-

тивление 50, 75 и 100 Ом — такое, как у обычных коаксиальных кабелей, используется у трубок для наблюдения сверхширокополосных сигналов. Однако столь малое волновое сопротивление затрудняет получение достаточно больших напряжений на выходе усилителей вертикального отклонения.

Следует отметить положительный момент в использовании линий передачи в тракте вертикального отклонения осциллографов — появление *задержки* сигнала, которая равна:

$$t_3 = n\sqrt{L_1 C_1}. \quad (3.29)$$

Полезность задержки особенно очевидна при исследовании однократных или редко повторяющихся сигналов. В этом случае используется *ждущий режим* работы развертки, при котором она запускается обычно передним фронтом исследуемого сигнала. Однако задержка запуска развертки приводит к тому, что часть этого фронта не отображается, поскольку во время задержки луч не движется по горизонтали. Этого можно избежать, задержав сигнал с помощью линии передачи. В некоторые осциллографы даже с обычными трубками приходится вводить специальные линии задержки, которые являются теми же линиями передачи с сосредоточенными или распределенными постоянными L_1 и C_1 .

В СССР выпускались трубки 10ЛО101М и 13ЛО101М с отклоняющими системами в виде линий передачи [11], дожившие до наших дней. Они позволяли наблюдать процессы с частотами до 1 ГГц. Трубки 13ЛО102М с отклоняющей системой на основе распределенных линий передачи обеспечивали возможность просмотра процессов с частотами до 3 ГГц. Существовали и уникальные разработки трубок с отклоняющими системами на основе коаксиальных линий передачи. Их частоты регистрации сигналов доходили до десятков ГГц.

Для широкополосных трубок важно обеспечение предельно высокой графической скорости без резкого снижения чувствительности. Это было достигнуто в трубках с системой послеускорения — ускорения электронов уже после прохождения ими отклоняющих систем. Практически это достигается созданием третьего анода, размещенного уже после отклоняющих систем. Часто такой анод создается напылением проводящего материала на внутреннюю поверхность колбы у экрана.

Дальнейшее усовершенствование ЭЛТ привело к созданию трубок с *рассеивающей сеткой*, установленной на пути выхода электронного пучка из отклоняющей системы [14]. Такая сетка с мельчайшими отверстиями увеличивает угол отклонения луча и приводит к увеличению чувствительности ЭЛТ до 3—5 В/см. Благодаря этому стало возможным применение широкополосных транзисторных усилителей. Осциллографы на ЭЛТ с рассеивающей сеткой выпускались фирмами CRT (Франция) и Tektronix (США).

В СССР в 70-е годы прошлого века были созданы уникальные ЭЛТ с *последотклонением* луча с помощью триплета квадрупольных линз [14]. Такие трубки имели уникально высокую чувствительность до 1 В/см при одновременном улучшении линейности и увеличении размера рабочего поля. Такая трубка 10ЛО102М была применена в выпускаемом в те годы осциллографе С7-10А (С1-61), который не имел усилителя. Полоса частот осциллографа составляла 0—1500 МГц. Масса этого прибора достигала 70 кг. Во многом это обусловлено тем, что триплет квадрупольных линз представляет собой сложную систему из электромагнитов, питаемых от стабилизированных источников постоянного тока.

Сверхширокополосные осциллографические трубки — дорогие и уникальные изделия. Осциллографы на них широко применялись до 60-х годов ушедшего

20-го столетия и иногда применяются и сейчас в физических лабораториях, занятых исследованием высокоскоростных процессов. Главное достоинство таких осциллографов заключается в работе в режиме реального времени. Это значит, что осциллографы способны регистрировать быстротекающие одиночные и редко повторяющиеся события, что особенно ценно при их применении для исследования ядерных реакций и процессов.

Обычные трубки плохо приспособлены для регистрации однократных и редко повторяющихся процессов. Человеческий глаз просто не успевает заметить такие процессы. Для устранения этого недостатка были предложены трубки с большим временем послесвечения люминофора. В этом случае обеспечивалось не только время, достаточное для регистрации наблюдаемого события (например, фотографированием осциллограмм), но и для воспроизведения множества следующих друг за другом событий. В дальнейшем были созданы запоминающие аналоговые трубки, способные запоминать осциллограммы длительное время и затем отображать их на экране.

Однако в наше время осциллографы на таких ЭЛТ повсеместно вытесняются цифровыми и стробоскопическими осциллографами, которые не только превосходят аналоговые по широкополосности, но и не требуют применения уникальных высокоскоростных трубок. Более того, вместо них обычно применяются более компактные кинескопы или даже плоские дисплеи на основе жидкокристаллических индикаторов. При всем этом такие осциллографы с шириной полосы усиливаемых частот выше 0,3—0,5 ГГц остаются дорогими и нередко уникальными приборами, которые имеются далеко не в каждой научной лаборатории.

3.4. Принцип действия и устройство аналогового осциллографа

3.4.1. Принцип действия осциллографа

Чтобы представить, как же получается на экране изображение колебаний, изобразим условно экран трубки в виде окружности (хотя у трубки он может быть и прямоугольный) и поместим внутри нее отклоняющие пластины (рис. 3.11).

Если подвести к горизонтальным пластинам X_1 и X_2 пилообразное напряжение, на экране появится светящаяся горизонтальная линия — ее называют линией

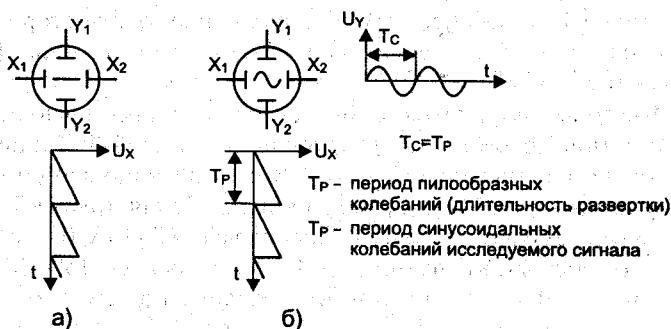


Рис. 3.11. Иллюстрации к получению осциллограмм: а — при отсутствии сигнала на пластинах вертикального отклонения и б — при подаче на них синусоидального сигнала

развертки или просто разверткой. Длина ее зависит от амплитуды пилообразного напряжения (рис. 3.11,а). Если теперь одновременно с пилообразным напряжением, поданным на пластины X_1 и X_2 , подать на другую пару пластин (вертикальных — Y_1 и Y_2), например, переменное напряжение синусоидальной формы, линия развертки в точности «изогнется» по форме колебаний и «нарисует» на экране изображение (рис. 3.11,б).

В случае равенства периодов синусоидального и пилообразного колебаний, на экране будет изображение одной синусоиды. При неравенстве же периодов на экране появится столько полных колебаний, сколько периодов их укладывается в периоде колебаний пилообразного напряжения развертки. В осциллографе есть регулировка частоты развертки, с помощью которой добиваются нужного числа наблюдаемых на экране колебаний исследуемого сигнала.

Тут уместно отметить, что при просмотре периодических сигналов длительность развертки в общем случае должна быть строго кратной периоду повторения сигнала. Таким образом развертка должна быть синхронной с сигналом. Для этого используется *система синхронизации* развертки осциллографа. Кроме того, надо учитывать, что часть периода развертки тратится на обратный ход луча. На экране это означает отображение линии, соединяющей начальную и конечную точки осциллограммы. Как правило, эта линия гасится подачей специального импульса гашения на управляющий электрод трубки. Это означает наличие в осциллографе кроме каналов X и Y еще одного канала Z — управления яркостью луча.

3.4.2. Структурная схема аналогового осциллографа

На рис. 3.12 изображена типовая структурная схема осциллографа, называемого *аналоговым осциллографом*. Иногда говорят, что такие осциллографы работают в режиме реального времени, хотя это несколько иная особенность аналоговых осциллографов. Суть же аналоговых осциллографов — работа с аналоговыми (не разрывными во времени) сигналами.

На сегодняшний день существует большое число различных по конструкции и назначению осциллографов. По разному выглядят их лицевые панели (панели управления), несколько отличаются названия ручек управления и переключатели. Но в любом осциллографе существует минимально необходимый набор узлов, без которых он не может работать. Рассмотрим назначение этих основных узлов. Как уже отмечалось, осциллограф в общем случае содержит три *канала*:

- канал вертикального отклонения Y , содержащий цепи и устройства, относящиеся к пластинам вертикального отклонения;
- канал горизонтального отклонения X , содержащий цепи и устройства, относящиеся к пластинам горизонтального отклонения;
- канал яркости Z , содержащий цепи, относящиеся к управляющему электроду трубки.

Блок питания обеспечивает энергией работу всех узлов электронного осциллографа. На вход блока питания поступает переменное напряжение от городской электросети, как правило величиной 110/127 или 220 В с частотой 50 или 60 Гц. В нем оно преобразуется в напряжения разной величины: переменное 6,3 В для питания нити накала электронно-лучевой трубки, постоянное напряжение 12—24 В для питания усилителей и генератора, если они полупроводниковые (или 200—250 В, если ламповые), около 150 В для питания оконечных усилителей горизонтального и вертикального отклонения луча, несколько сотен вольт для фо-

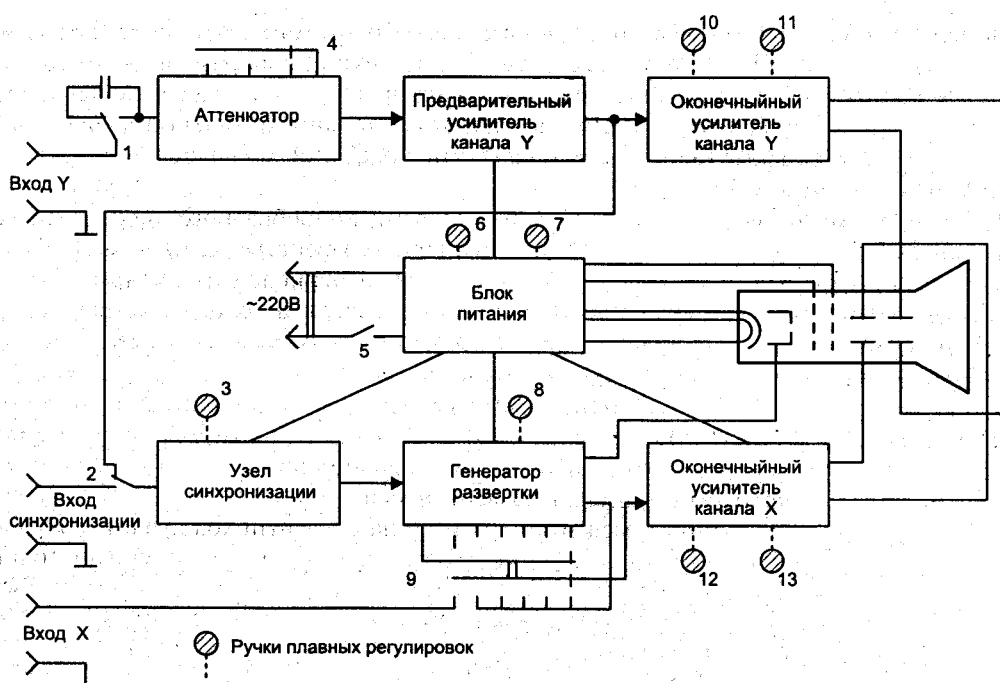


Рис. 3.12. Типовая функциональная схема электронного осциллографа

кусировки электронного луча и несколько тысяч вольт для ускорения электронного пучка.

Из блока питания кроме выключателя питания (5), выведены на переднюю панель осциллографа регуляторы: «ФОКУСИРОВКА» (6) и «ЯРКОСТЬ» (7). При вращении этих ручек изменяются напряжения, подаваемые на первый анод и модулятор. При изменении напряжения на первом аноде, меняется конфигурация электростатического поля, что приводит к изменению ширины электронного луча. Модулятор в электронно-лучевой трубке выполняет роль управляющей сетки в ламповом триоде. При изменении напряжения на модуляторе изменяется ток электронного луча (изменяется кинетическая энергия электронов), что приводит к изменению яркости свечения люминофора экрана. Напряжение на модуляторе должно быть отрицательным по отношению к катоду. При некотором напряжении запирающего ток электронного луча падает до нуля и пятно на экране трубки исчезает (трубка оказывается запертой).

Генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение, частоту которого можно изменять грубо (ступенями) переключателем (9) и плавно — регулятором (8). На лицевой панели осциллографа они называются «ЧАСТОТА ГРУБО» (или «ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РАЗВЕРТКИ») и «ЧАСТОТА ПЛАВНО». Диапазон частот генератора весьма широк — от единиц герц до единиц мегагерц. Правда, около переключателя диапазонов обычно проставлены значения длительности (продолжительности) пилообразных колебаний, а не их частоты, хотя в некоторых (обычно старых) осциллографах проставлены именно частоты.

Как отмечалось, в импульсных осциллографах помимо непрерывной развертки часто используется ждущая развертка, запускаемая сигналом (внутренним с усилителя канала Y) или внешним. Для наблюдения фронта импульса в канал Y вво-

дится линия задержки, создающая временную задержку, несколько превосходящую время задержки срабатывания ждущей развертки. Такая линия может включаться в любое место канала Y, но после точки, с которой снимается сигнал для запуска ждущей развертки. На нашей блок-схеме такую линию можно включить на выходе или на входе оконечного каскада канала Y.

Усилитель канала горизонтального отклонения (канала X) служит для получения напряжений развертки, достаточных для получения нужной длины линии развертки — порядка горизонтального размера (или диаметра) трубки. На его вход подается сигнал с выхода генератора развертки. Этот усилитель необходим для получения такой амплитуды пилообразного напряжения, при которой электронный луч отклоняется на весь экран. В усилителе расположены регулятор длины линии развертки (иначе говоря, регулятор амплитуды выходного пилообразного напряжения — 12). На передней панели осциллографа он представлен ручкой «УСИЛЕНИЕ X» или «АМПЛИТУДА X». Есть и регулятор смещения линии развертки по горизонтали 13 (обычно он обозначен значком \leftrightarrow).

Канал вертикального отклонения состоит из входного аттенюатора (делителя входного сигнала) и двух усилителей — предварительного и оконечного. Аттенюатор позволяет выбирать нужную высоту рассматриваемого изображения в зависимости от амплитуды исследуемых колебаний. С помощью переключателя входного аттенюатора (4), амплитуду сигнала можно уменьшить в 10 или 100 раз. Около переключателя обычно стоят надписи: 1:1 — в этом случае входной сигнал не ослабляется; 1:10 и 1:100 — в этих случаях ослабление соответственно в 10 и 100 раз. Более плавные изменения уровня сигнала, а значит и размера изображения на экране, получают с помощью регулятора чувствительности оконечного усилителя канала Y (10). В оконечном усилителе этого канала, как и канала горизонтального отклонения, есть регулировка смещения луча (11), а значит, и изображения, по вертикали.

Кроме того, на входе канала вертикального отклонения стоит переключатель 1, с помощью которого можно либо подавать на усилитель (нередко через аттенюатор — калиброванный делитель напряжения) постоянную составляющую исследуемого сигнала, либо избавляться от нее включением разделительного конденсатора. Это в свою очередь, позволяет пользоваться осциллографом как вольтметром постоянного тока, способным измерять постоянные напряжения. Причем входное сопротивление осциллографа достаточно высокое — 1 Мом или выше.

Кроме переключателя (9) и регулятора (8) длительности развертки у генератора развертки есть еще один переключатель — переключатель режима работы развертки. Он также выведен на переднюю панель осциллографа (на структурной схеме он не указан). Генератор разверток может работать в двух режимах: в автоматическом — генерирует пилообразное напряжение заданной длительности и в ждущем режиме — ожидает прихода входного сигнала, и с его появлением запускается. Этот режим бывает необходим при исследовании сигналов появляющихся случайно, либо при исследовании параметров импульса, когда его передний фронт должен быть в начале развертки. В автоматическом режиме работы случайный сигнал может появиться в любом месте развертки, что усложняет его наблюдение. Удобства ждущего режима вы сможете оценить во время импульсных измерений.

Переключатель (9) спаренный. Во всех положениях верхней (по чертежу) секции переключателя, кроме крайнего левого, генератор вырабатывает пилообразное напряжение различной длительности. В крайнем же левом положении генера-

тор разверток отключается, а нижняя секция переключателя (9) подключает оконечный усилитель канала горизонтального отклонения к гнездам «Вход X».

Теперь горизонтальная линия развертки будет получаться только при подаче сигнала на указанные гнезда. Причем чувствительность этого канала обычно меньше, чем канала вертикального отклонения. Длину линии развертки можно устанавливать регулятором (12). Такой режим работы осциллографа бывает нужен, например, при исследовании частотных и фазовых соотношений гармонических колебаний или для построения *фигур Лиссажу* (для этого один сигнал подают на вход Y осциллографа, а другой — на вход X).

Каждый осциллограф оснащен средствами *синхронизации* развертки исследуемым или внешним сигналами. Если между генератором развертки и сигналом нет никакой связи, то начало развертки и появления сигнала будут происходить в разное время, изображение сигнала на экране осциллографа будет перемещаться либо в одну, либо в другую сторону — в зависимости от разности частот сигнала и развертки. Чтобы остановить изображение нужно засинхронизировать генератор развертки, т. е. обеспечить такой режим работы, при котором начало развертки будет совпадать с началом появления периодического сигнала (скажем синусоидального). Обычно при этом период развертки должен в целое число раз превышать период повторения сигнала.

Синхронизировать генератор развертки можно как от внутреннего сигнала (он берется с усилителя вертикального отклонения), так и от внешнего, подаваемого на гнезда или разъем «ВХОД СИНХР». Выбирают тот или иной режим переключателем (2) — ВНУТР.- ВНЕШН. синхронизация (на структурной схеме переключатель находится в положении «внутренняя синхронизация»).

Плавно регулируется синхронизация регулятором (5). Эту ручку можно поворачивать от крайнего левого положения (знак (–)) до крайнего правого (знак (+)). Это регулировка синхронизации развертки от сигнала соответствующей полярности. Когда ручка (5) находится в крайнем левом положении (–), генератор развертки синхронизируется отрицательным фронтом синусоидального напряжения), в крайнем правом (+) — положительным. В среднем положении ручки синхронизация выключается. В некоторых конструкциях осциллографов переключение синхронизации от (+) или от (–) осуществляется отдельным переключателем. В этом случае ручка (5) меняет амплитуду синхронизации, что способствует получению более устойчивого изображения на экране.

На приведенной блок-схеме осциллографа канал яркости Z представлен лишь цепью подачи с генератора развертки импульса, гасящего обратный ход развертки с тем, чтобы обратный ход не был виден на экране. В современных осциллографах в этот канал часто вводят усилитель канала Z, что позволяет выполнять некоторые специальные виды измерений. Нередко в этот канал вводят и генератор временных меток, позволяющий выполнять временные измерения сигналов.

3.4.3. Требования к усилителям осциллографа

Как мы уже установили, осциллографические трубки имеют низкую чувствительность к отклонению. У обычных трубок она не превышает 1 мм/В (или 1 В/мм). Это значит, что для получения на экране трубки изображения импульса или синусоиды с размеров в 1 см нужно на пластины Y подать импульс с амплитудой 10 В или синусоиду с такой же двойной амплитудой. Для достаточно точных измерений нужно иметь размах осциллограммы в несколько сантиметров, что требует от-

клоняющих напряжений уже в десятки В, а у трубок с низкой чувствительностью даже в сотни В.

Отсюда ясно, что осциллографы для исследования малых по уровню сигналов должны содержать *усилители канала Y* с достаточно большим усилением. Например, для получения чувствительности в 1 мм/мВ усилитель должен иметь коэффициент усиления порядка 1000. Поскольку напряжение с генератора развертки составляет единицы-десятки В, то коэффициент усиления усилителя горизонтального отклонения (канала X) может быть намного меньшим — порядка 10. Однако, если надо работать в внешними сигналами, подаваемыми на вход X, то усилитель горизонтального отклонения желательно иметь таким же, как усилитель вертикального отклонения.

К усилителям осциллографов предъявляются достаточно специфические требования:

- высокий уровень выходных сигналов (десятки, иногда сотни В), что предполагает построение выходных каскадов на электронных лампах или высоковольтных транзисторах;
- высокое входное сопротивление (обычно порядка 0,5—2 МОм с параллельной емкостью до 50 пФ);
- высокая линейность (коэффициент нелинейности не более 3—5 %);
- высокая стабильность коэффициента усиления, нередко достигаемая стабилизацией напряжения питания и иными мерами;
- низкая (10—20 Гц) нижняя граничная частота (в случае работы на постоянном токе нужна нулевая граничная частота и малый дрейф выходного сигнала);
- высокая верхняя граничная частота (от 1—5 МГц у простых осциллографов, до десятков и сотен МГц у широкополосных и скоростных осциллографах);
- малая неравномерность амплитудно-частотной характеристики, нередко порядка 0,5—1 дБ против —3 дБ, принимаемых обычно в качестве уровня отсчета для верхней граничной частоты обычных усилителей.

Эти требования намного жестче, чем у обычных усилителей для бытовой аппаратуры, например применяемых в телевидении. Они проистекают из того, что современный осциллограф является радиоизмерительным прибором довольно универсального назначения, а не просто осцилоскопом для просмотра формы сигнала. Некоторые требования противоречивы, например получение одновременно высокого коэффициента усиления и большой амплитуды сигналов одновременно с большой шириной полосы усиливаемых частот. Для преодоления подобных противоречий приходится усложнять схему усилителя или даже вводить кардинальные изменения в средствах осуществления усиления — например, переходя от усилителей с сосредоточенным усилением к усилителям с распределенным усилением.

Как правило, в усилителях современных осциллографов применяются многокаскадные усилители с широкополосными каскадами с малым усилением. Нередко используются усилители постоянного тока с гальваническими связями между каскадами. Это исключает искажения на низких частотах и позволяет использовать осциллограф для измерения постоянного напряжения и регистрации медленно изменяющихся сигналов. Однако при этом требуется обеспечить малый дрейф усилителя, что иногда требует значительного времени прогрева осциллографа.

Чаще всего частотные и временные параметры осциллографов определяются его усилителями, а не параметрами систем отклонения трубок (они у современных трубок достаточно высоки). Лишь у наиболее широкополосных и скоростных

(довольно дорогих) осциллографов их параметры более или менее одинаково обеспечиваются как характеристиками усилителей, так и отклоняющих систем ЭЛТ. Рассмотрим основные типы усилителей, используемых в осциллографах.

Импульсные усилители предназначены для усиления импульсных сигналов, которые могут иметь прямоугольную, трапецеидальную, экспоненциальную или другую форму. Импульсные усилители по принципу действия делятся на линейные и нелинейные. В линейных импульсных усилителях форма импульса воспроизводится с минимальными искажениями, а в нелинейных форма импульсов искажается преднамеренно для их преобразования либо по амплитуде, либо по длительности, либо одновременно по этим двум параметрам. В каналах X и Y осциллографов применяются линейные усилители, а в канале Z (яркости) часто применяют нелинейные усилители.

Частотный спектр реальных импульсных сигналов очень широк и простирается от единиц герц до единиц, а иногда и десятков гигагерц. Поэтому усилители импульсных сигналов должны быть одновременно и *широкополосными усилителями* — область усиливаемых частот у них простирается нередко до десятков и сотен МГц и выше. Наличие реактивных элементов (емкостей и индуктивностей) в схеме усилителя приводит к тому, что его усиление зависит от частоты входного сигнала. Поэтому коэффициент усиления по напряжению является комплексной величиной.

Линейные искажения усилителей можно оценить, зная искажения синусоидального сигнала, так как всякий сигнал другой формы можно разложить на гармонические составляющие, пользуясь рядом Фурье (для периодических сигналов) или интегралом Фурье (для непериодических сигналов).

Коэффициент усиления усилителя по напряжению при синусоидальном сигнале с круговой частотой ω в комплексной форме определяется выражением ($K = K_U$)

$$\dot{K}_U = K_U(\omega) \exp[i\varphi(\omega)]. \quad (3.30)$$

Годограф вектора комплексного коэффициента усиления, т. е. кривая, описываемая концом радиуса-вектора K_U при изменении частоты от 0 до ∞ , называется *амплитудно-фазовой характеристикой*. Таким образом, при помощи годографа можно одновременно установить зависимость усиления и фазового сдвига от частоты. Более четкое представление о характере и величине линейных искажений дает раздельное рассмотрение *амплитудно-частотной* $K_U = f(\omega)$ (АЧХ) и *фазо-частотной* $\varphi = f(\omega)$ (ФЧХ) характеристик. Примерный вид характеристик представлен на рис. 3.13.

Для количественной оценки частотных искажений вводится понятие *граничной частоты*. Это частота, при которой модуль $K(\omega)$ уменьшается до значения $K_0/\sqrt{2} \approx 0,7K_0$. При этом различают нижнюю граничную частоту ω_H и верхнюю ω_B . Разность частот $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$ называется полосой пропускания усилителя. Круговая частота связана с линейной: $\omega = 2\pi f$.

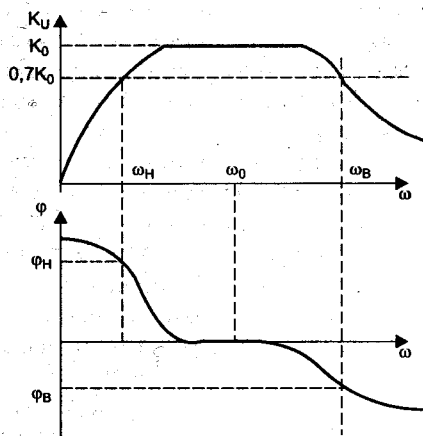


Рис. 3.13.
Амплитудно-частотная
и фазо-частотная
характеристики усилителя

Широкополосными принято называть усилители, у которых отношение верхней граничной частоты к нижней составляет несколько порядков и выше. Практически все осциллографы должны без заметных искажений давать осциллограммы сигналов с частотой промышленной сети переменного тока в 50 Гц. Поэтому нижняя граница полосы пропускания усилителей должна быть не более 10—20 Гц. Верхняя граничная частота даже у простых осциллографов редко бывает ниже 1 МГц. Так что усилители современных осциллографов всегда являются широкополосными, а при верхней частоте в единицы ГГц и выше даже *сверхширокополосными*.

Усилители постоянного тока имеют нижнюю граничную частоту равную 0 — рис. 3.14. Обратите внимание на то, что усиление на рис. 3.14 представлено в децибелах. Уровень спада усиления до 0,707 от максимального (на нулевой частоте) соответствует — 3 дБ, при этом за 0 дБ принято максимальное усиление. Такое представление АЧХ удобно для оценки частотных искажений (существуют и другие формы представления АЧХ). Название «усилители постоянного тока» не совсем верно, поскольку речь идет об усилении напряжения, а не тока. Правильнее было бы говорить об усилителях постоянного напряжения.

Для оценки линейных искажений, возникающих при передаче импульсных сигналов, удобно использовать *переходную характеристику* усилителя. Переходная характеристика $h(t)$ — это реакция усилителя на идеальный перепад (ступеньку) входного напряжения. Разность двух переходных характеристик, сдвинутых во времени на длительность импульса $t_{\text{и}}$, дает форму выходного импульса усилителя, получаемую при подаче на его вход идеального прямоугольного импульса (рис. 3.15).

Обычно вводятся понятия искажений реального импульса в области малых времен (искажения фронтов) и в области больших времен (искажения вершины импульсов). Соответствующие определения представлены на рис. 3.16. Реальным называют импульс с конечной длительностью фронтов, выбросами на них и другими искажениями, например, спадом плоской вершины импульса. Он отсутствует у усилителей постоянного тока (напряжения), но может быть у самого усиливаемого импульса.

В соответствии с этим используются следующие импульсные параметры усилителей:

t_{Φ} — *длительность фронта*, определяемая временем нарастания сигнала от уровня 0,1 до уровня 0,9 своего установившегося значения (иногда этот параметр также называют временем установления усилителя);

t_3 — *время задержки*, определяемое от момента появления сигнала на входе

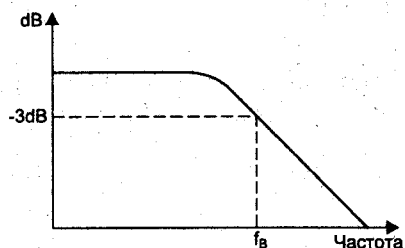


Рис. 3.14. АЧХ усилителя постоянного тока

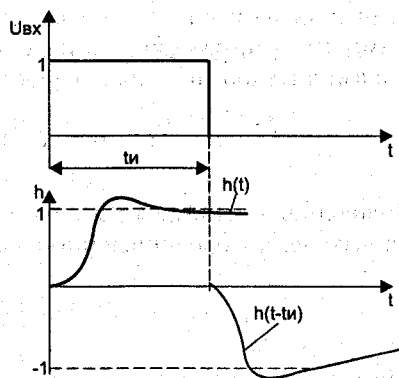


Рис. 3.15. Переходные характеристики усилителя

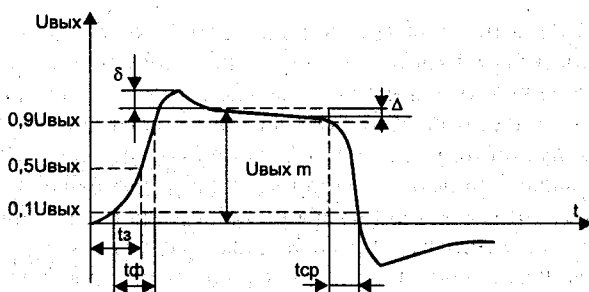


Рис. 3.16. Временные характеристики реальных импульсных сигналов

усилителя до момента достижения 0,1 уровня стационарного значения (иногда до достижения половины стационарного значения выходного напряжения);

t_{cp} — длительность среза, определяемая временем спада сигнала от уровня 0,9 до уровня 0,1 своего стационарного значения;

δ — выброс или относительная разность между максимальным значением выходного сигнала в области малых времен и его установившимся значением;

Δ — спад (подъем) вершины импульса — относительная разность между установившимся значением выходного сигнала в области больших времен и его текущим значением.

В линейных усилителях амплитудно-, фазочастотная и переходная характеристики жестко связаны между собой. Воспользуемся известным из теории линейных электрических цепей интегралом Дюамеля, записанным в виде

$$u_2(t) = h(0)u_1(t) + \int_M h'(t)u_1(t - \tau)d\tau, \quad (3.31)$$

где $u_2(t)$ — напряжение на выходе усилителя; $u_1(t)$ — напряжение на его входе; $h(t)$ — переходная характеристика усилителя; $h(0)$ — значение переходной характеристики при $t=0$; $h'(t)$ — производная функции $h(t)$.

Пусть $u_1 = 1 \cdot \exp(i\omega t)$, тогда из (3.31) получим:

$$u_2(t) = \left[h(0) + \int_M h'(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \right] \exp(i\omega t) = A(t) \exp(i\omega t) \quad (3.32)$$

Если на вход усилителя подать гармоническое колебание определенной частоты с амплитудой, равной единице, то на выходе получим напряжение той же частоты с амплитудой, изменяющейся во времени по закону

$$A(t) = h(0) + \int_M h'(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau. \quad (3.33)$$

Положив в этом выражении $t = \infty$, получим установившееся значение амплитуды на выходе, которое численно равно коэффициенту передачи (усиления)

$$K(i\omega) = h(0) + \int_M h'(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau. \quad (3.34)$$

Эта формула устанавливает связь между коэффициентом передачи и переходной характеристикой. Отсюда можно определить значение коэффициента передачи при $\omega = 0$ и $\omega = \infty$

$$K(0) = h(0) + \int_0^{\infty} h'(\tau) d\tau = h(\infty); \quad (3.35)$$

$$K(\infty) = h(0). \quad (3.36)$$

Выражения (3.34)—(3.36) показывают, что переходная характеристика импульсного усилителя однозначно определяется его частотными свойствами. Характеристики усилителя в области низких частот отражают поведение усилителя в области больших времен, т. е. определяют форму плоской вершины импульса, а характеристики усилителя в области высоких частот — поведение усилителя в области малых времен, т. е. определяют длительность фронта и среза импульсов. Чем шире полоса пропускания в сторону высоких частот, тем точнее воспроизводится фронт сигнала и уменьшаются искажения в области малых времен. При расширении полосы пропускания в сторону нижних частот усилитель лучше воспроизводит плоскую вершину импульса, т. е. уменьшаются искажения в области больших времен.

Для одиночного резисторного каскада с интегрирующей RC -цепью на выходе время нарастания и спада импульсов $t_{\Phi} = 2,2RC$. В тоже время граничная частота $f_B = 1/2\pi RC$. Отсюда можно получить значение длительности фронта выраженную через граничную частоту:

$$t_{\Phi} = \frac{2,2}{2\pi f_B} = \frac{0,35}{f_B}. \quad (3.37)$$

Оказалось, что эта простая формула довольно точно описывает соотношения между длительностью фронта и верхней граничной частотой и в случае многокаскадного усилителя, при условии, что амплитуда выбросов переходной характеристики не превышает 4—5 %. В связи с этим формула (3.37) является одной из важнейших в осциллографии и служит основой для определения времени фронта переходной характеристики осциллографа в целом на уровнях отсчета 0,1 и 0,9. Иногда указывают время установления переходной характеристики t_y за которое заканчиваются переходные процессы после отображения фронтов (уровень отсчета конца переходного процесса обычно берется равным 1% от начальной амплитуды колебательного процесса). Это время может оказаться в 3—4 раза большим, чем время t_{Φ} .

К сожалению, реальная длительность фронта выше t_{Φ} и определяется как:

$$t_p = \sqrt{t_{\Phi}^2 + (2,2\tau_{BX})^2},$$

где τ_{BX} — постоянная времени входной цепи осциллографа, равная $C_{BX}R_{BX}$. Даже при низкоомном входе $R_{BX} = 50$ Ом и типовом значении $C_{BX} = 20$ пФ мы имеем $\tau_{BX} = 1$ нс. Это уже дает $t_p = 2,2$ нс даже при $t_{\Phi} \rightarrow 0$. Отсюда вытекает острая необходимость уменьшения входной емкости C_{BX} осциллографов. Некоторые современные интегральные широкополосные усилители имеют C_{BX} порядка 1 пФ.

В области низких частот спад вершины импульса с длительностью t_H можно оценить приближенным выражением:

$$\Delta \approx t_H / \tau_H \quad (3.38)$$

У большинства современных осциллографов используется усилитель канала Y с гальваническими связями (усилитель постоянного тока). В этом случае формулу (3.38) можно применить для расчета постоянной времени RC разделительной

цепи, включаемой на входе усилителя в случае, когда желательно исключить постоянную составляющую сигнала.

3.4.4. Особенности широкополосных осциллографических усилителей

В широкополосных усилителях обычно используют резисторные каскады, так как они имеют наилучшие частотные, фазовые и переходные характеристики. Для расширения усиливаемой каскадом полосы частот, изменения формы частотной и переходной характеристик в широкополосных импульсных усилителях используют дополнительные корректирующие цепи. Они рассчитываются так, чтобы выбросы переходной характеристики усилителей не превышали 4—5%.

По применяемой элементной базе усилители осциллографов делятся на следующие типы:

- ламповые усилители;
- усилители на биполярных транзисторах;
- усилители на полевых транзисторах;
- операционные усилители;
- усилители на специализированных микросхемах.

Усилители на электронных лампах имеют, пожалуй, только одно важное преимущество — позволяют легко получать высокие выходные напряжения. Анодное напряжение большинства ламп составляет сотни В, при токах анода в единицы-десятки мА. Показателем широкополосности ламп является отношение их крутизны S к полной емкости лампы и монтажа C_0 . Емкость монтажа обычно берется равной 10 пФ и добавляется к входной и выходной емкостям лампы. Нетрудно показать, что отношение $S/2\pi C_0$ определяет произведение коэффициента усиления резисторного каскада с общим катодом K на его верхнюю граничную частоту $f_{вс}$, практически равную ширине полосы усиливаемых частот. Ниже представлены данные нескольких типов электронных ламп [12], которые широко применялись в ламповых осциллографах:

Тип лампы	S [мА/В]	$C_{вх}$ [пФ]	$C_{вых}$ [пФ]	$S/2\pi C_0$ [МГц]
6Ж5П	9,0	8,5	2,2	70
6Ж9П	17,0	8,0	3,5	130
6Ж21П	17,0	5,0	1,8	160
6Ж22П	30,0	9,0	2,4	220
6Э5П	30,5	16,0	2,6	110

Хотя выше приведены данные наилучших для конца 50-х годов прошлого века ламп, видно, что предельные частоты (при единичном усилении) едва достигают 100—200 МГц. Поэтому ширина полосы пропускания ламповых осциллографов с приемлемым усилением сигналов редко превышала 10—20 МГц. Лишь распределенные усилители, у которых коэффициенты усиления складываются, а не перемножаются, позволяли получать приемлемое усиление в десятки раз при частотах до 0,2—1 ГГц. Однако осциллографы с такими усилителями имели размеры холодильника, были дорогими и уникальными приборами. Их вес достигал многих десятков кг.

В ламповых усилителях применяются, в основном, резистивные усилители на каскадах с общим катодом. Иногда используются различные схемы индуктивной коррекции, позволяющие увеличить показатель широкополосности до 2 раз. Катодные повторители с их большим входным и малым выходным сопротивлениями иногда применяются во входных каскадах и, реже, в выходных каскадах (обеспечивая быстрый заряд и разряд емкости пластин ЭЛТ). Используются и специальные каскодные схемы, представляющие собой комбинацию каскадов с общим анодом и общей сеткой.

Маломощные полевые транзисторы значительно уступают электронным лампам по уровням рабочих напряжений (до 20 В), значениям крутизны (единицы мА/С) и показателю широкополосности $S/2\pi C_0$. Единственным их серьезным преимуществом является весьма высокое входное сопротивление. Поэтому они получили применение во входных каскадах некоторых транзисторных осциллографов, например С1-68 — рис. 3.17 [13].

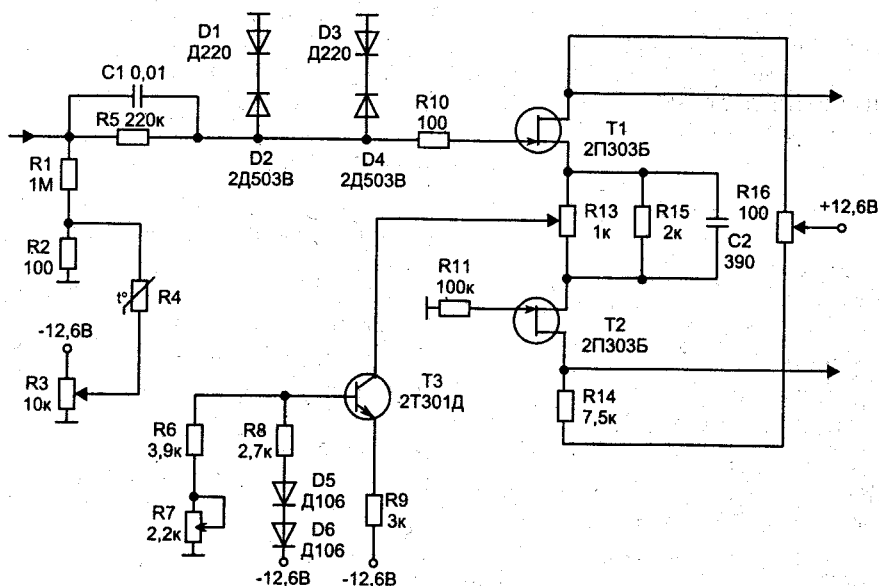


Рис. 3.17. Входной каскад усилителя Y осциллографа С1-68

Входной усилитель рис. 3.17 представляет собой типичный дифференциальный каскад на двух полевых транзисторах Т1 и Т2. Благодаря применению полевых транзисторов не вызывает труда получение высокого входного сопротивления — практически оно равно 1 МОм и задается величиной резистора R3. Транзисторы каскада защищены от пробоя двухсторонним ограничителем напряжения на цепи R5C1 и диодах Д1-Д4 с последовательным и встречным включением.

Цепь R2-R4 с термистором уменьшает температурный дрейф каскада. В цепи истока полевых транзисторов включен стабилизатор тока на транзисторе Т3, что резко уменьшает чувствительность каскада к синфазной составляющей входного сигнала. В результате входной каскад усиливает только противофазную составляющую. Каскад обеспечивает парафазный выход на предварительный усилитель канала Y .

Биполярные транзисторы 50-х годов также заметно уступали лампам как по показателю широкополосности, так и по уровням рабочих напряжений. Поэтому

их применение в осциллографах было ограниченным. Однако, уже в 60-х годах ситуация изменилась кардинальным образом. Были созданы СВЧ-транзисторы с рабочими напряжениями в десятки В, что открыло перспективы их применения в осциллографах с полосой частот до 100—500 МГц. В это время электронные лампы были полностью вытеснены биполярными транзисторами.

На рис. 3.18 представлена схема предварительного усилителя одного из первых скоростных осциллографов тех времен С1-71 с полосой частот усилителя вертикального отклонения 100 МГц и временем нарастания 3,5 нс. Усилитель состоит из двух дифференциальных каскодных каскадов. *Каскодом* (не путайте с каскадом) принято называть неделимую и интегрированную в одну схему пару каскадов, например каскад с общим эмиттером и каскад с общей базой. Такие каскады обеспечивают наивысшую широкополосность.

Первый каскад построен на транзисторах Т1-Т4 с параллельным питанием, а второй на транзисторах Т5-Т8 с последовательным питанием. В каскадах применена высокочастотная автотрансформаторная коррекция, позволяющая увеличить верхнюю частоту среза в 2,75 раза, что позволяет получить ее значения до 200 МГц (напомним, что общая граничная частота усилителя, включая оконечные каскады, составляет 100 МГц).

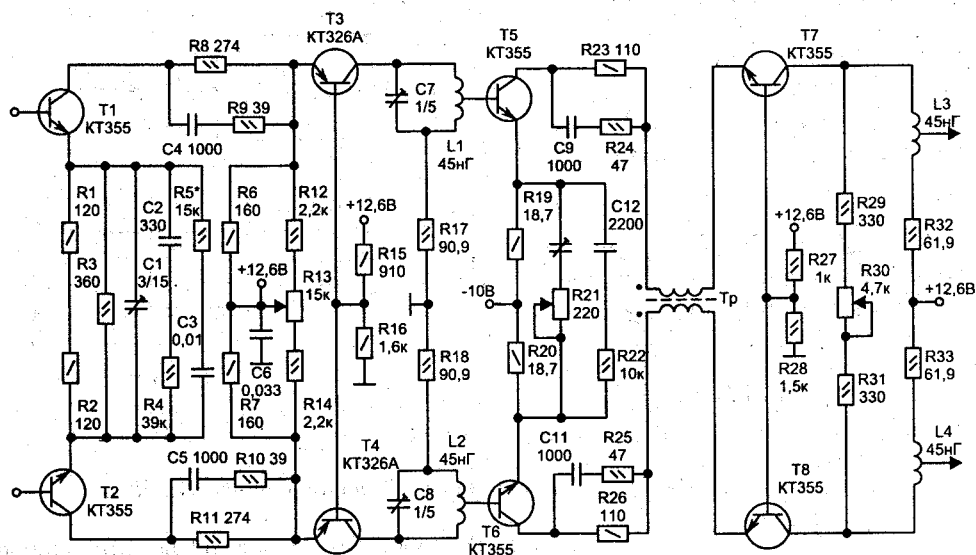


Рис. 3.18. Предварительный усилитель осциллографа С1-71

В подобных усилителях особое внимание приходится уделять не только коррекции, но и обеспечению устойчивости усилителя. Для этого применяется высококачественное экранирование каскадов, включение корректирующих RC-цепей и применение трансформаторов на ферритовом кольце (Тр на рис. 3.18) для коррекции выбега фазовых характеристик и предотвращения самовозбуждения.

На рис. 3.19 представлена схема оконечного каскада усилителя вертикального отклонения осциллографа С1-73. Она также выполнена на основе дифференциального каскодного усилителя с корректирующим выбег фазы трансформатором на ферритовом сердечнике Тр. Выход усилителя прямо нагружен на распределенную отклоняющую систему ЭЛТ 11ЛО101М. Линия нагружена только со стороны вы-

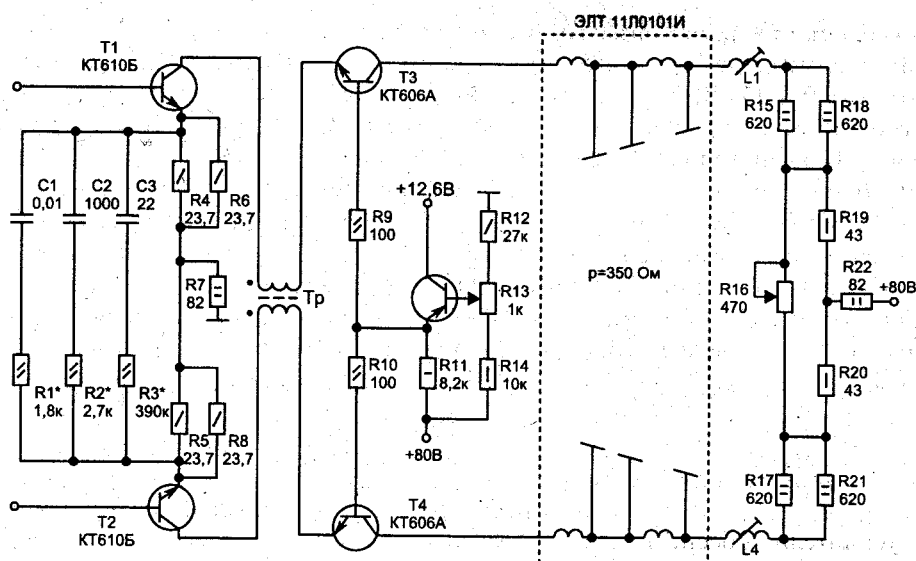


Рис. 3.19. Оконечный усилитель вертикального отклонения осциллографа С7-71

хода на резистор с сопротивлением, равным волновому сопротивлению линии (360 Ом). В усилителе применена сложная эмиттерная коррекция.

Следует отметить, что проектирование таких усилителей является сложной задачей и, наряду с теоретическими положениями, надо учитывать множество практически важных деталей проектирования — оптимальное расположение компонентов, их тщательный выбор, экранирование, принятие мер против самовозбуждения, коррекция мелких «дефектов» переходных характеристик, обеспечение временной и тепловой стабильности, коррекция температурного дрейфа и т. д. Это делает проектирование таких усилителей не столько наукой, сколько искусством. Можно, к примеру, поражаться тому, что на недостаточно высокочастотных транзисторах тех лет удалось реализовать усилители с полосой частот до 100—250 МГц [13]. В наше время характеристики транзисторов намного улучшились, но описанные выше достижения схемотехники по-прежнему используются в новых моделях осциллографов, позволяя довести полосу частот до 500—1000 МГц, иногда и выше. Более того, они используются при создании сверхширокополосных интегральных усилителей.

Обычные усилители имеют коэффициенты усиления больше 1. При каскадировании они перемножаются, что позволяет увеличивать коэффициент усиления до желаемой величины, определяемой нужными коэффициентами отклонения. Однако если коэффициент усиления становится равным 1 и ниже, каскадирование обычных каскадов оказывается бесполезным — общий коэффициент усиления при перемножении падает, а не растет.

В связи с этим в наиболее широкополосных усилителях используются иные принципы усиления, основанные на сложении коэффициентов усиления отдельных каскадов. Это, прежде всего, давно известные *усилители с распределенным усилением* на линиях передачи с сосредоточенными и распределенными элементами. Однако такие усилители громоздки и трудны в наладке.

Фирма Tektronix (США) реализовала эту идею без применения линий передачи. Она использовала принцип *сложения и вычитания токов* от нескольких каска-

дов. Усиление на уровне токов позволяет получить предельные граничные частоты. В осциллографах 475 и 485 этой фирмы были получены полосы усиливаемых частот до 250 и 350 МГц. При этом секции таких усилителей имеют верхнюю граничную частоту, доходящую до 1 ГГц. Были также созданы распределенные усилители с «транзисторным резонансом» и *схемы Джильберта*, основанные на усилении токов в цепях с логарифмическими передаточными характеристиками [14].

Примерно к тому же времени относится бурное развитие микроэлектроники и происходит массовый переход от устройств на дискретных транзисторах на устройства, выполненные на интегральных микросхемах. В микроэлектронных устройствах паразитные емкости и индуктивности цепей усилителей сводятся к минимуму, что позволяет существенно повысить широкополосность усилителей.

Особую популярность получили высококачественные усилители постоянного тока с огромным коэффициентом усиления (десятки тысяч — миллионы) — *операционные усилители*. Они допускали работу с глубокими отрицательными обратными связями, позволяющими снизить усиление до нужного уровня порядка десятков-сотен при одновременном реком повышении стабильности усиления. Такие усилители обеспечивали ничтожный дрейф нуля за счет применения дифференциальных каскадов на идентичных и близко расположенных интегральных транзисторах. Однако динамические показатели, малое выходное напряжение (до ± 12 —15 В) и малая ширина полосы пропускания (редко превышающая 10 МГц) ограничили применение операционных усилителей в осциллографах, в основном, промежуточными каскадами усиления.

Наилучшие результаты были получены при построении осциллографических усилителей на специализированных интегральных микросхемах — чаще всего гибридно-пленочных. В таких усилителях были реализованы все появившиеся новинки электронной схемотехники: каскодные усилители, усилители на мощных СВЧ биполярных и полевых транзисторах, токовые сверхширокополосные усилители со сложением и вычитанием токов, усилители с распределенным усилением и микрополосковыми линиями передачи, усилители Джильберта и др. Это позволило создать транзисторные аналоговые осциллографы с частотным диапазоном усиливаемых сигналов до 0,3—0,5 ГГц, а иногда и заметно выше. Они используются для осциллографии в реальном времени.

К весьма перспективным приборам для осциллографических усилителей относятся *мощные полевые транзисторы*. Они уже сейчас намного превосходят лучшие из приемно-усилительных ламп по всем важнейшим параметрам, включая уровень рабочих напряжений (есть приборы до 1000 В), крутизне (доли-единицы А/В) и показателю широкополосности $S/2\pi C_0$. Параметры и схемотехника полевых транзисторов описана в [15].

Несколько слов стоит сказать об усилителях канала X. В принципе в них используются те же схемные решения, что и в усилителях канала Y. Однако коэффициент усиления усилителей канала X обычно намного меньше, поскольку генератор развертки обеспечивает напряжение не меньше нескольких В. Кроме того, от усилителя горизонтального отклонения не требуется столь широкой полосы частот, как в канале Y. Это позволяет упростить усилитель канала X и обеспечить более высокий уровень выходных напряжений.

Широкополосные усилители применяются и в канале Z. В них не имеет смысла использовать дифференциальные каскады, поскольку управляющий электрод трубки один. Для обострения фронтов импульсов усилитель канала Z часто вы-

полняется нелинейным. Особых проблем при конструировании усилителей канала Z не возникает — используются стандартные схемные решения.

Примеры построения транзисторных усилителей каналов X и Y можно найти в книгах [13, 14]. Возможности применения в них современных полевых транзисторов отражены в [15].

3.4.5. Принципы построения генераторов развертки

Генератор развертки осциллографа служит для выработки линейно-изменяющегося напряжения (рис. 3.20), которое усиливается усилителем канала X и используется для раскачки пластин вертикального отклонения. Это обеспечивает линейное перемещение светового пятна от электронного пучка ЭЛТ по поверхности экрана.

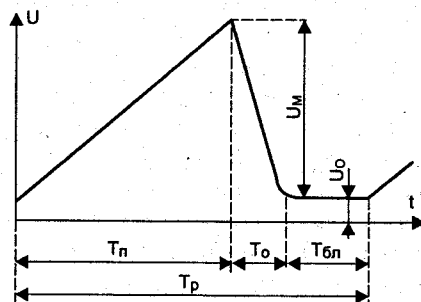


Рис. 3.20. Пилообразное напряжение развертки

Параметрами напряжения развертки являются:

- U_0 — начальное напряжение развертки;
- U_M — амплитуда напряжения развертки;
- T_p — время прямого хода;
- T_o — время обратного хода;
- $T_{бл}$ — время блокировки (в случае ждущего режима);
- T_p — общее время одного цикла развертки.

Кроме того, характерным параметром развертки является коэффициент нелинейности пилообразного напряжения

$$K_H = \frac{(du/dt)_{\max} - (du/dt)_{\min}}{(du/dt)_{\min}} 100\%. \quad (3.37)$$

Он определяется относительным изменением крутизны пилообразного напряжения и обычно выражается в процентах.

В зависимости от вида работы осциллографа используются горизонтальные развертки трех типов:

- автоколебательная;
- ждущая (иногда неточно именуемая однократной);
- универсальная.

Вне зависимости от типа развертки принцип создания линейно-изменяющегося напряжения базируется на заряде линейного конденсатора C от источника

тока. Как известно, протекающий через линейный конденсатор ток, связан с напряжением на конденсаторе следующей зависимостью:

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}. \quad (3.38)$$

Если сделать ток постоянным ($i_c(t) = I = \text{const}$) то из (3.38) получим:

$$I = C \frac{du_c(t)}{dt}. \quad (3.39)$$

Очевидно, что постоянство тока возможно только в том случае, если крутизна изменения напряжения на конденсаторе неизменна, т. е. если напряжение меняется по линейному закону (растет при $I > 0$ или падает при $I < 0$).

К этому выводу можно прийти и из другого известного для емкости интегрального выражения:

$$u_c(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt.$$

Если положить $i_c(t) = I = \text{const}$, по получим:

$$u_c(t) = u_c(0) + \frac{I \cdot t}{C}. \quad (3.40)$$

Отсюда видно, что напряжение на конденсаторе меняется, начиная с начального уровня $u_c(0) = U_0$, по линейному закону. Крутизна изменения напряжения равна I/C . Она может меняться в широких пределах — обычно дискретным изменением емкости конденсатора C и плавным изменением тока I .

Простейшим способом получения почти линейно-нарастающего напряжения является заряд конденсатора C от источника напряжения E через резистор R . Обобщенная схема генератора развертки, реализующего этот принцип, показана на рис. 3.21.

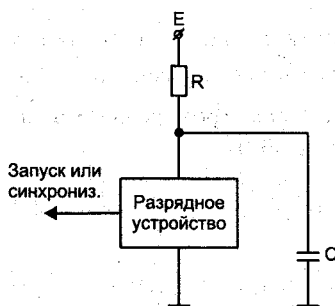


Рис. 3.21. Обобщенная схема генератора развертки

Пусть ключевое устройство вначале замыкает конденсатор C на землю. Тогда он будет разряжен и напряжение $u_c(0) = U_0 = 0$ (если это напряжение несколько отлочно от нуля, то принципиальных отличий это не вызовет). При закрывании ключевого устройства напряжение на конденсаторе начнет меняться по экспоненциальному закону:

$$u_c(t) = E(1 - e^{-t/RC}).$$

Если ограничить рост напряжения значением $u_c(t_n) = U_m$, при $U_m \ll E$, то используя разложение в ряд экспоненты можно получить следующее приближенное выражение:

$$u_c(t) \approx \frac{E}{RC} t.$$

Нетрудно показать, что коэффициент нелинейности в данном случае составит величину:

$$K_H = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max} = U_m / E.$$

Например, если $E = 100$ В, то для получения коэффициента нелинейности в 5% допустимое значение U_m должно составлять 5 В. Это говорит о необходимости усиления напряжения развертки.

Для разряда конденсатора надо открыть разрядное устройство. Чаше всего это устройство является обычным транзисторным ключом и для управления им можно применить триггер или ждущий мультивибратор. Таким образом, осуществляется ждущая развертка.

Простейшим типом автоколебательной развертки стал емкостной релаксатор на приборе с S-образной вольтамперной характеристикой. Схема рис. 3.17 при этом не меняется, просто разрядное устройство будет представлять собой прибор с S-образной вольтамперной характеристикой. В таких генераторах применялись все известные приборы такого рода: неоновые лампы, тиратроны, тиристоры, однопереходные транзисторы и лавинные транзисторы. Все они, кроме лавинных транзисторов, оказались слишком инерционными и могли использоваться в генераторах развертки с частотами до 10–50 кГц. Например, тиратроны применялись в дешевых массовых осциллографах ОЭУ, ЭО-7 и др. Подача на управляющий электрод прибора синхронизирующих импульсов позволяет осуществлять синхронизацию развертки.

Ряд интересных схем генераторов пилообразного напряжения на лавинных транзисторах описан в [16]. По своим параметрам они вполне отвечают требованиям к осциллографам. Однако широкого применения в серийных приборах такие схемы все же не получили из-за крайне ограниченной номенклатуры серийно выпускаемых лавинных транзисторов. В СССР, к примеру, выпускался лишь один германиевый лавинный транзистор ГТ338, предназначенный для построения генераторов стробирующих импульсов для стробоскопических осциллографов. Применение обычных транзисторов в лавинном режиме, теоретически и практически вполне возможное, в серийных приборах было исключено, поскольку лавинный режим работы не был гостирован.

Как уже отмечалось в главе 2, существует три основных способа генерации пилообразного напряжения с высокой линейностью:

- замена резистора R токостабилизирующей цепью;
- осуществление емкостной отрицательной обратной связи;
- применение компенсирующей ЭДС.

Первый способ реализуется довольно легко, поскольку вольтамперные характеристики многих активных приборов (лампы пентоды, биполярные и полевые транзисторы) имеют протяженные участки, в пределах которых ток слабо зависит от напряжения. Например, стабилизатором тока может служить полевой транзистор с нормально открытым каналом у которого затвор соединен с истоком. Такая

цепь является токостабилизирующим двухполосником и ее можно включать вместо резистора R . Для расчета коэффициента нелинейности в этом случае достаточно заменить E на $E_3 = I_0 R_i$ и R на R_i , где R_i — внутреннее сопротивление токостабилизирующего двухполосника

Схемы с емкостной обратной связью на лампах-пентодах обеспечивали фантастически высокую линейность — коэффициент нелинейности достигал значение порядка 0,01% и ниже. Возможно поэтому схемы такого рода назывались *фантастропами* [17]. Малую нелинейность можно получить и от схем на биполярных и полевых транзисторах и, особенно, на операционных усилителях. Однако для скоростных разверток последние не подходят из-за низких динамических показателей и низкой граничной частоты.

Для реализации метода компенсирующей ЭДС последовательно с источником постоянной ЭДС E надо включить компенсирующую ЭДС $u_k(t) = Ku_c(t)$. Для этого применяют ламповый или транзисторный повторитель напряжения с коэффициентом передачи K и цепь положительной обратной связи. Коэффициент нелинейности при этом становится равным $k_n(1-K)$ и стремится к нулю при $K=1$.

В некоторых осциллографах используется так называемая *задержанная развертка*. Это дополнительный генератор пилообразного напряжения с большой крутизной его изменения, запускаемый от основной развертки с регулируемым уровнем запуска. Такая развертка позволяет получить растянутый фрагмент изображения, например фронта импульса или его части. Можно сказать, что таким образом реализуется «лупа времени». Такая развертка широкого распространения не получила из-за усложнения схемы осциллографа и необходимости размещения на его передней панели дополнительных органов управления. Некоторые дорогие осциллографы позволяют наблюдать обычную и растянутую осциллограммы одновременно.

3.4.6. Узлы синхронизации осциллографов

Канал синхронизации осциллографа призван поддерживать период повторения непрерывной (автоколебательной) развертки строго кратным периоду сигнала. В простых осциллографах это достигается подачей на вход разрядного устройства рис. 3.21 части входного сигнала. Обычно уровень синхронизации делается регулируемым с помощью потенциометра и ручки «Синхронизация». Это дает приемлемый результат при просмотре синусоидальных колебаний.

Однако некоторые сигналы, включая синусоидальные, меняются плавно, что может создать нестабильность запуска развертки. Поэтому в осциллографах высокого класса применяются специальные схемы синхронизации, формирующие для запуска развертки короткие импульсы с малым временем нарастания. Обычно для этого используются широкополосные усилители — ограничители и дифференцирующие RC-цепи. Часто применяются и регенеративные устройства, например, на основе триггера Шмита или высокоскоростного триггера на основе туннельного диода.

3.4.7. Блоки питания осциллографов

Важное значение для стабильной работы осциллографа имеют блоки его питания (как правило от сети переменного тока 110/127/220 В при частоте 50/60 Гц). Для питания осциллографов требуется несколько различных напряжений:

- переменное напряжение 6,3 В при токе до 1 А для питания нити накала ЭЛТ;
- напряжение порядка сотен вольт для питания фокусирующих анодов;

- напряжение до нескольких тысяч В для питания ускоряющего электрода;
- напряжение 50—150 В для питания оконечных усилителей каналов Y, X и Z;
- напряжение 12—24 В для питания предварительных усилителей, канала запуска развертки, канала синхронизации и др.

Уровни напряжений указаны приблизительно. В блоке питания применяется трансформатор и обычные выпрямители — однополупериодные для высоких напряжений и двухполупериодные (со средней точкой и мостовые) для низких напряжений.

Низковольтные источники питания нередко выполняются стабилизированными для уменьшения дрейфа усилителей и стабилизации их коэффициента усиления. Используются стандартные схемы выпрямителей и стабилизаторов напряжений (от простейших на кремниевых стабилитронах до компенсационных стабилизаторов на специализированных интегральных микросхемах). В высоковольтных выпрямителях часто применяют схемы умножения напряжений.

Чем выше класс осциллографа и меньше допускаемая погрешность измерений, тем выше должна быть стабильность питающих напряжений. Для первичной питающей сети характерна нестабильность напряжения до 10—20%, тогда как желательная нестабильность напряжений питания осциллографа часто не должна быть выше 1%. В связи с этим схемы стабилизированных блоков питания современных осциллографов приходится резко усложнять, вводя стабилизаторы напряжений для большинства питающих напряжений. А это снижает КПД блоков питания, увеличивает рассеиваемую ими мощность и ведет к увеличению нагрева осциллографа.

Как известно, существенное повышение КПД обеспечивают импульсные источники электропитания. Однако они излучают импульсные помехи с широким спектром. Они весьма нежелательны для осциллографов, поскольку создают шумы и наводки, с которыми чрезвычайно трудно бороться. Поэтому широкого применения импульсные источники питания в осциллографах не получили. Исключением являются портативные осциллографы с питанием от аккумуляторных батарей — в них применение импульсного преобразователя неизбежно.

3.5. Принцип действия и устройство цифрового запоминающего осциллографа

3.5.1. Блок-схема цифрового запоминающего осциллографа

Цифровыми осциллографами называют приборы для наблюдения осциллограмм, у которых входной сигнал преобразуется в поток цифровых данных и запоминается в блоке памяти [52]. Несколько упрощенная (без делителей, усилителей входного сигнала и цепей синхронизации) блок-схема одноканального цифрового осциллографа представлена на рис. 3.22.

Входной сигнал $e(t)$ после некоторой нормировки (усиления или ослабления) подается на вход блока *выборки и запоминания*. Запоминание в блоке выборки обычно является аналоговым (реализуется с помощью конденсатора, заряжаемого до мгновенного значения сигнала) и необходимо для поддержания почти неизменным уровня сигнала вплоть до следующей выборки. Моменты выборок задаются блоком управления с микропроцессором, тактируемым с заданной частотой $f_{\text{такт}}$. Каждая расширенная выборка обрабатывается аналого-цифровым скоростным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и превращается в число. По-

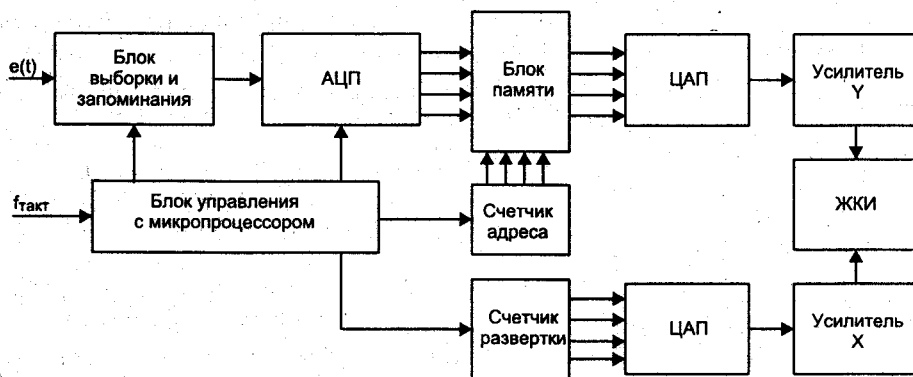


Рис. 3.22. Упрощенная блок-схема одноканального цифрового запоминающего осциллографа

ток чисел, несущих информацию о точках (выборках) сигнала запоминается в запоминающем устройстве (блок памяти). В этом состоит главное и принципиальное отличие цифровых запоминающих осциллографов от обычных аналоговых.

Для управления запоминающим устройством служит *счетчик адресов*. Он задает последовательное извлечение данных из ячеек памяти. Цифро-аналоговый преобразователь (*ЦАП*) преобразует полученный при этом поток цифр, обычно поступающий в ином (чаще всего замедленном) темпе вновь в аналоговый сигнал, который после усиления усилителем канала *Y* поступает на жидко-кристаллический индикатор (*ЖКИ*) или пластины тракта *Y* ЭЛТ (если индикатором осциллографа является обычная осциллографическая трубка). Следует отметить, что большинство современных цифровых запоминающих осциллографов имеет *ЖКИ*, разумеется, со своим устройством преобразования сигналов в точечное изображение.

Развертка цифрового осциллографа чаще всего построена на основе *счетчика развертки*. С помощью второго *ЦАП* последовательность цифр со счетчика развертки преобразуется в линейно (точнее ступенчато) нарастающий сигнал, который после усиления усилителем канала *X* поступает также на индикатор осциллографа.

Общее управление последовательностью работы узлов цифрового осциллографа осуществляет *блок управления*, снабженный микропроцессором. Блок-схема цифрового осциллографа содержит ряд узлов, характерных для компьютера. Прежде всего это микропроцессор, цифровые схемы управления и память. Поэтому управление этими узлами и микропроцессором осуществляется с помощью программного обеспечения, хранящегося в постоянном запоминающем устройстве. Оно входит в блок управления. Программное обеспечение цифрового осциллографа может выполнять множество функций, например усреднение сигнала с целью его очистки от шумов, быстрое преобразование Фурье для получения спектров сигнала и т. д.

3.5.2. Достоинства и недостатки цифровых запоминающих осциллографов

Цифровые запоминающие осциллографы это новый класс осциллографических устройств, имеющих как серьезные достоинства, так и некоторые недостатки. Детально они будут отражены во всех последующих материалах этой книги, а здесь мы отметим только самые важные из них.

Важное принципиальное достоинство (и одновременно недостаток) цифрового осциллографа заключается в отсутствии сквозного тракта усиления сигнала — от входа до индикатора. Именно этот тракт ограничивает полосу частот аналогового осциллографа и требует применения широкополосных усилителей с большим выходным напряжением. Их построение трудная задача, а потому широкополосные аналоговые осциллографы очень дороги, громоздки и имеют большой вес.

Однако отсутствие сквозного входного тракта с других позиций является недостатком. В аналоговом осциллографе практически вся информация о входном сигнале (с учетом, разумеется, некоторого ограничения спектра сигнала) доходит до пластин вертикального отклонения. Это значит, что, в принципе, из такой информации ничего не исчезает и аналоговый осциллограф в принципе способен уловить любую тонкость входного сигнала. На практике современный аналоговый осциллограф способен отразить до 99% временной зависимости сигналов. Другое дело, что короткие и редко повторяющиеся выбросы сигнала мы, чаще всего, не успеваем отметить. Их фиксация требует применения запоминающих ЭЛТ — очень дорогих и редких.

Цифровой осциллограф вначале накапливает в цифровой форме данные о входном сигнале при минимальном его усилении, а затем в резко замедленном темпе строит осциллограмму сигнала. При этом нередко только 1—2% от текущего времени уходит на использование и запоминание выборок сигнала. Остальные 98—99% времени цифровой осциллограф выводит уже зарегистрированный короткий фрагмент входного сигнала. Таким образом он принципиально плохо приспособлен для регистрации сигналов во всем интервале времени.

Ситуация тут однако не является тупиковой. Многие сигналы являются периодическими и с их просмотром на экране цифрового осциллографа проблем не возникает. Кроме того, если цифровой осциллограф оснастить достаточно большой памятью, то можно разместить в ней оцифрованные выборки за достаточно большой промежуток времени, достаточный для фиксации особенностей или аномалий реальных сигналов. Затем можно просматривать фрагменты сигнала, вызывая их из памяти и храня на экране сколь угодно длительное время. Есть множество и других тонкостей, помогающих решить проблему доступности всей временной области действия сигналов. Они будут описаны в последующих главах.

Цифровой осциллограф требует входных усилителей с малым выходным напряжением, достаточным для работы блока выборки. Это напряжение составляет доли-единицы В против десятков В у аналоговых осциллографов. Поэтому существенно упрощается решение проблемы расширения полосы частот входных усилителей и они строятся на основе широкополосных интегральных усилителей с очень малым уровнем дрейфа выходного напряжения, высоким входным сопротивлением и очень малой (до 1 пФ) входной емкостью.

Это бесспорное достоинство цифровых осциллографов. Но и тут не обходится без недостатка. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигнала в тракте Y всегда выполняется с конечной *разрядностью*, что ведет к появлению характерных шумов квантования, принципиально отсутствующих у аналоговых осциллографов. Шум квантования виден на осциллограммах ряда цифровых осциллографов, особенно дешевых с малой разрядностью АЦП и ЦАП. Необходимость в применении высокоскоростного АЦП перед блоком памяти также является специфическим недостатком цифровых осциллографов.

В приведенной ниже таблице суммируются основные достоинства и недостатки современных цифровых запоминающих устройств.

Достоинство	Недостаток
Малый коэффициент усиления входных усилителей и их малое выходное напряжение	Нет
Широкая полоса пропускания входных усилителей	Чувствительность к импульсным и ВЧ наводкам (характерна и для аналоговых осциллографов)
Цифровая форма представления сигнала	Наличие шумов квантования, потеря информации между выборками
Применение вместо ЭЛТ плоского ЖКИ с точечным построением изображений	Конечное геометрическое разрешение и высокая стоимость ЖКИ, наблюдение осциллограмм с мелкими ступеньками
Преобразование временного масштаба при отображении сигнала и отсутствие высокоскоростной аналоговой развертки	Потеря информации о большей части сигнала и необходимость в специальных решениях для устранения этого
Получение осциллограмм как после нулевого отсчета времени, так и после него	Нет
Запоминание осциллограмм после их построения и их вывод	Нет
Программная реализация ряда функций, например, спектрального анализа	Нет
Автоматизация настройки осциллографа, хранение нескольких настроек	Нет
Автоматизированное измерение множества параметров сигналов	Нет
Подключение к компьютеру, возможность управления осциллографом от него, запись в файл осциллограмм	Нет
Уменьшение габаритов и веса вследствие отказа от громоздкой ЭЛТ и высоковольтных источников питания	Нет

Нетрудно заметить, что достоинств у цифрового осциллографа гораздо больше, чем недостатков. В целом сейчас за умеренную цену можно приобрести цифровой осциллограф с 2—5 раз большей полосой частот усиливаемых сигналов (по сравнению с аналоговым осциллографом), с меньшими габаритами, массой, весом и потребляемой мощностью и с огромным числом новых возможностей, таких как автоматически выполняемые вычисления множества параметров сигналов, проведение спектрального и статистического анализа сигналов и др.

Разумеется, цифровые приборы с уникальными параметрами (например, широкополосные стробоскопические осциллографы с полосой частот выше 10 ГГц) являются и в наше время очень дорогими и элитными приборами Hi-End класса. Место таких приборов — это крупные научные лаборатории, компании ведущие разработку новейшего электронного и телекоммуникационного оборудования [53], сервисные центры по ремонту и отладке современных электронных и радиотехнических устройств.

3.5.3. Получение спектрограмм сигнала цифровыми осциллографами

Как уже отмечалось, цифровой осциллограф, в отличие от аналогового, позволяет легко получать спектрограммы оцифрованных исследуемых сигналов, что

резко расширяет его функциональные возможности. Однако при построении графика спектральной характеристики реальных сигналов возникают две серьезные проблемы. Первая заключается в *растекании спектра*. Она возникает тогда, когда конечная точка сигнала отличается от его начальной точки. Это означает возникновение разрыва сигнала, спектр которого накладывается на спектр «идеального» сигнала без разрыва. В результате и происходит растекание спектра (spectrum leakage) и спектральная линия даже синусоиды приобретает множество соседних линий с плавно спадающей амплитудой, расположенных по обе стороны от основной линии спектра [51—53].

Вторая проблема связана с неизбежным наличием *шумов* в сигнале. Это могут быть как шумы самого сигнала, так и шумы квантования цифрового осциллографа. Такие шумы ведут к появлению в спектре хаотически изменяющихся по уровню спектральных линий. Поэтому приводимые в учебниках спектры в виде четко видимых вертикальных черточек на частотной оси оказываются не более чем идеализированной картиной.

Кроме того, спектрограмма обычно строится вообще не в виде черточек, а в виде линии, соединяющей вершины отсчетов спектральной функции. В технике принято фиксировать эти отсчеты в логарифмическом масштабе, т. е. в децибелах. В результате спектр даже одиночной синусоиды представляется в виде острого пика с боковыми скатами, опирающегося на хорошо видимую хаотическую шумовую дорожку — спектр шума. Благодаря логарифмическому масштабу более четко выделяются пики, соответствующие высшим гармоникам сигнала, но и усиливается видимость шумовых составляющих спектра.

Подобный спектр удобен для вычисления частот составляющих спектра сигналов, но неудобен для оценки амплитуд частотных составляющих спектра. Для повышения разрешающей способности спектрограмм применяется техника *оконного спектрального анализа*. Фактически она означает введение в спектральный анализ техники цифровой обработки дискретных сигналов. С позиций этой техники, описанный выше, спектральный анализ означает анализ в прямоугольном окне, ширина которого совпадает с длиной дискретной последовательности сигнала. Значительно повысить разрешение спектрограмм и их представительность можно, уменьшив ширину окна и перейдя к окнам специальной формы.

Практически оконное преобразование означает введение в формулу ДПФ весовых множителей W_k , т. е. выполнение прямого ДПФ по формуле:

$$\dot{Y}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k W_k \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right).$$

В большинстве цифровых осциллографов оконный спектральный анализ реализуется программным методом, также как это реализовано в современных системах компьютерной математики [1, 2, 47, 48]. Число типов окон ограничено 4—6. Ниже представлены данные о наиболее распространенных типах окон с указанием рисунков, на которых даны реальные спектрограммы треугольных импульсов, полученные 250-МГц цифровым осциллографом DS-1250 фирмы EZ Digital при использовании окон различного типа.

Тип окна	Выражение для окна W_k	Свойство окна
Прямоугольное (Rectangle). Рис. 3.23.	1	Очень узкий основной лепесток, хорошее частотное разрешение, плохое амплитудное разрешение, хорошее подавление белого шума.
Блэкмана (Blackman) Рис. 3.24.	$0.42 - 0.5\cos(2\pi k/N) + 0.08\sin(4\pi k/N)$	Широкий основной лепесток, заметный спад боковых лепестков, хорошее амплитудное разрешение
Хэннинга (Hanning) Рис. 3.25.	$0.5(1 - \cos(2\pi k/N))$	Достаточно широкий входной лепесток, быстрый спад боковых лепестков, хорошее разрешение
Хэмминга (Hamming) Рис. 3.26.	$0.54 - 0.46 \cos(2\pi k/N)$	Умеренно широкий основной лепесток, постоянный уровень боковых лепестков, неплохое разрешение.
С плоской вершиной (Flat Top) Рис. 3.27.		Хорошее разрешение по амплитуде, но плохое по частоте, размытые пики

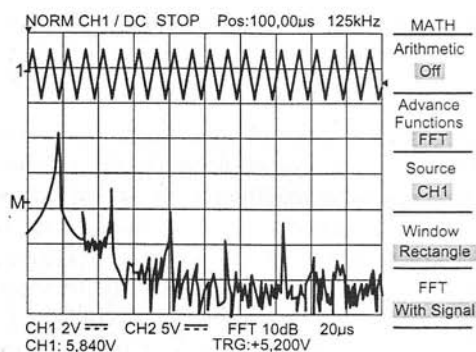


Рис. 3.23. Спектрограмма
треугольного импульса с
прямоугольным окном

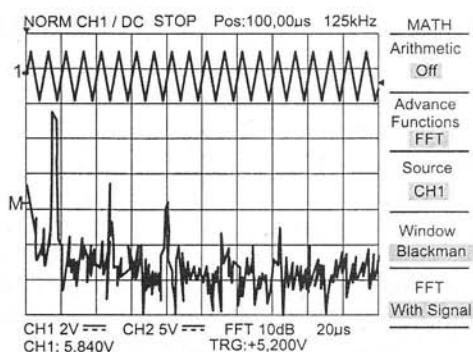


Рис. 3.24. Спектрограмма
треугольного импульса с окном
Блэкмана

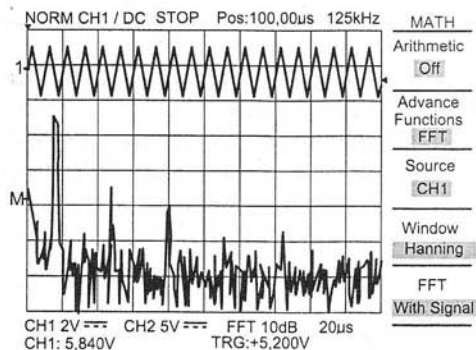


Рис. 3.25. Спектрограмма
треугольного импульса с окном
Хэннинга

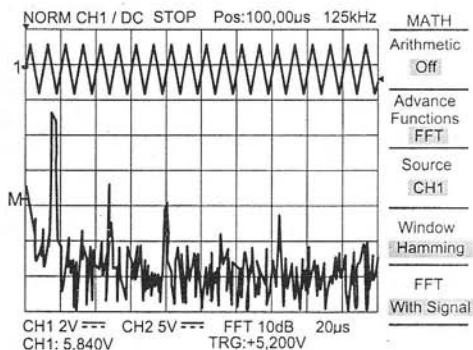


Рис. 3.26. Спектрограмма
треугольного импульса с окном
Хэмминга

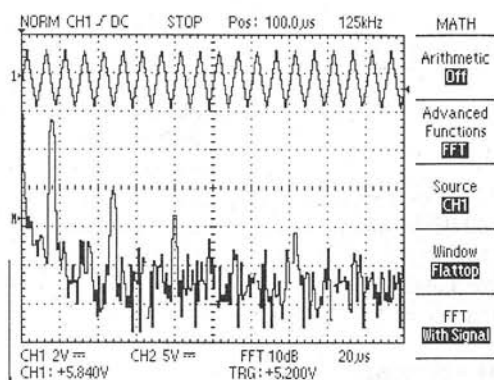


Рис. 3.27. Спектрограмма треугольного импульса с окном Flat Top

Нетрудно заметить, что нет окна, которое было бы наилучшим для любого вида анализируемого сигнала. В некоторых дорогих осциллографах используются и другие типы окон. Подробное их описание можно найти в [47, 48, 51].

3.6. Параметры и выбор электронных осциллографов

3.6.1. Основные параметры

Классический электронный осциллограф является аналоговым прибором, работающим в реальном масштабе времени. Это означает, что во всем тракте усиливаются непрерывные сигналы и принимаются меры по уменьшению их искажений. Например, в тракте Y исследуемый сигнал сохраняет свою форму, но его уровень растет от входа усилителя его канала до его выхода и пластин ЭЛТ. Позже мы отметим специфику аналогово-цифровых и, тем более, цифровых, осциллографов, а пока остановимся на системе параметров аналоговых осциллографов. Согласно ГОСТ на осциллографы и [18–22] параметры осциллографов делятся на: основные и дополнительные параметры. К основным относят следующие параметры:

- Значения коэффициентов отклонения, погрешность коэффициента отклонения или связанная с ним погрешность измерения напряжения.
- Значения коэффициентов развертки, погрешность коэффициента развертки или связанная с ним погрешность измерения временных интервалов.
- Параметры переходной характеристики (ПХ), включая: время нарастания; выброс; неравномерность вершины и время установления.
- Параметры входа каналов вертикального и горизонтального отклонения, включая: активное входное сопротивление; входная емкость; коэффициент стоячей волны; допускаемое суммарное значение постоянного и переменного напряжения.
- Диапазон длительностей развертки и погрешность измерения временных интервалов.
- Параметры синхронизации, включая: диапазон частот; предельные уровни; нестабильность.

В дальнейшем эти параметры будут описаны достаточно подробно. Пока же отметим, что коэффициенты отклонения указываются в мВ/дел или В/дел (иногда

в мВ/дел или в В/дел). Например, если указано 2 мВ/см, то это означает, что сигнал в 2 мВ вызовет отклонение луча на 1 см. Коэффициенты разверток указывают, за сколько наносекунд, микросекунд или секунд луч осциллографа пройдет путь в 1 см.

Переходная характеристика в первом приближении есть реакция осциллографа на быстрый перепад напряжения (теоретически с нулевой длительностью). *Время нарастания* переходной характеристики оценивается как время нарастания осциллограммы сигнала от уровня 10% от его перепада до уровня в 90% от величины перепада. Оценивается (в процентах) также короткий выброс переходной характеристики и медленный спад в области больших времен. Иногда вводится параметр — *время установления*, который характеризует время в течении которого завершаются переходные процессы реакции на короткий перепад. Оно нередко в несколько раз больше времени нарастания.

3.6.2. Дополнительные параметры

К дополнительным параметрам электронных осциллографов относятся:

- Параметры АЧХ, включая: полосу пропускания; нормальный диапазон частот; расширенный диапазон частот и опорная частота.
- Коэффициент развязки между каналами.
- Есть и ряд эксплуатационных параметров:
- Размер экрана трубки по диагонали (в сантиметрах. или дюймах).
- Число делений масштабной сетки по вертикали и горизонтали.
- Габариты и масса.
- Напряжение питания и потребляемая мощность.
- Температурные и иные условия эксплуатации.

Разумеется, что перечень этих параметров может быть расширен. Например, может указываться диаметр пятна от электронного луча на экране трубки, предельная скорость регистрации процессов, нелинейность пилообразного напряжения развертки и т. д. Основные параметры цифровых осциллографов (скорость выборки и объем памяти) будут рассмотрены при их описании в главе 3.

3.6.3. Выбор осциллографов

Выбор осциллографов редко бывает простым делом.

Для всякой задачи выбора существует алгоритм ее оптимального решения. Мы предлагаем примерный алгоритм оценки технических характеристик приборов при выборе «правильного» осциллографа (рис. 3.28). При этом неважно, кто конкретно является производителем осциллографов — следование данному алгоритму поможет оценить каждый прибор объективно.

Поэтому, прежде чем приступить к выбору осциллографа, рекомендуется четко определиться с тем, какие задачи предстоит решать с помощью этого прибора. При этом, естественно, необходимо иметь в виду и перспективы: оборудование приобретается не на один год.

Шаг 1. Какой выбрать: аналоговый или цифровой?

Цифровые и аналоговые осциллографы имеют свои достоинства и недостатки. Постоянное совершенствование цифровых технологий позволяет создавать цифровые приборы более мощными и производительными по сравнению со своими

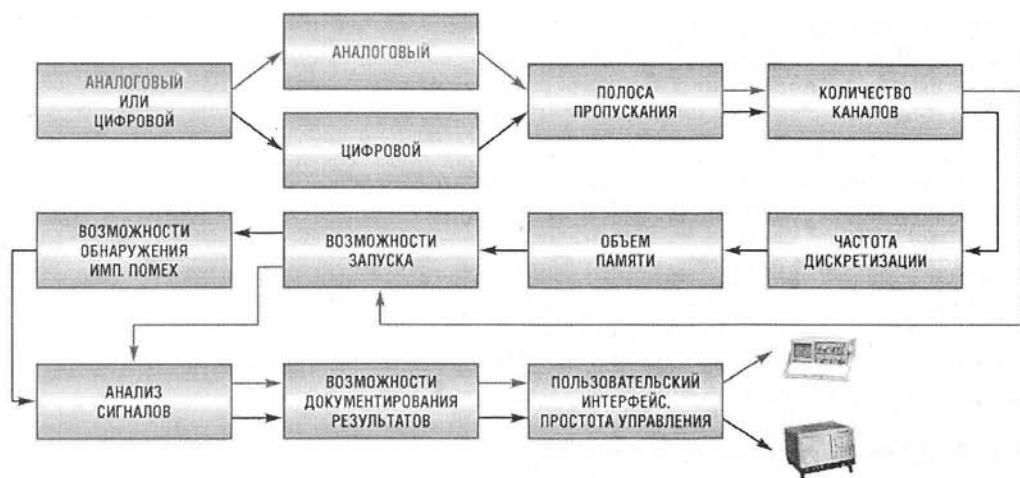


Рис. 3.28. Алгоритм выбора осциллографа

аналоговыми собратьями. В то же время, имея в виду наиболее простые модели цифровых приборов, разница в стоимости постоянно сокращается.

Еще раз перечислим достоинства и недостатки цифровых и аналоговых осциллографов.

Достоинства аналоговых осциллографов:

- возможность непрерывного наблюдения аналогового сигнала в реальном масштабе времени;
- привычный интерфейс;
- прямые, понятные средства управления для часто используемых настроек (чувствительность, скорость развертки, смещение сигнала, уровень запуска и т. д.);
- невысокая стоимость.

Недостатки аналоговых осциллографов:

- низкая точность;
- мерцание и/или малая яркость экрана в зависимости от частоты сигнала и скорости развертки;
- невозможность отображения и изучения сигнала до момента запуска;
- полоса пропускания ограничена полосой аналогового тракта;
- ограниченные средства измерения параметров сигналов.

Достоинства цифровых осциллографов:

- возможность «замораживания» экрана на произвольное время;
- высокая точность измерений;
- яркий, хорошо сфокусированный экран на любой скорости развертки;
- возможность отображения сигнала до момента запуска (в «отрицательном» времени);
- возможность детектирования импульсных помех между выборками сигнала;
- автоматические средства измерения параметров сигналов;
- возможность подключения к внешним регистрирующим устройствам;
- широкие возможности математической и статистической обработки сигнала;

- средства автодиагностики и автокалибровки.

Недостатки цифровых осциллографов:

- более высокая стоимость;
- более сложные в управлении;
- в отдельных случаях, отображение несуществующих сигналов.

Шаг 2. Определите необходимую полосу пропускания

Одной из основных характеристик осциллографа, влияющих на выбор прибора, является полоса пропускания, которая зависит от того, какие сигналы и с какой точностью необходимо измерять.

Полоса пропускания является одним из параметров амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), описывающей динамические свойства осциллографа (рис. 3.29):

На рис. 3.29 основные параметры АЧХ осциллографа: $f_{оп}$ — опорная частота; $\Delta f_{н}$ — нормальный диапазон, в котором неравномерность АЧХ не превышает погрешности коэффициента отклонения; $\Delta f_{р}$ — расширенный диапазон, в котором неравномерность АЧХ не превышает 10%; Δf — полоса пропускания, соответствующая уменьшению коэффициента передачи на 3 дБ относительно $k_{ном}$.

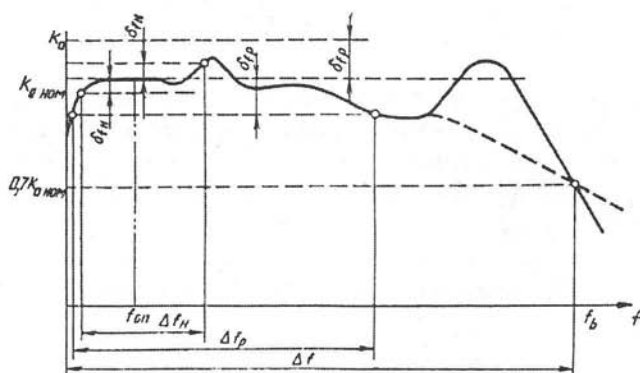


Рис. 3.29. Основные параметры АЧХ осциллографа

Каждый цифровой осциллограф имеет два принципиально разных значения полосы пропускания: полоса для повторяющихся сигналов (или аналоговая) и полоса для однократных сигналов. Многие цифровые осциллографы имеют полосу пропускания для повторяющихся сигналов гораздо более высокую, чем та, которую, казалось бы, может обеспечить их частота дискретизации. Однако, если сигнал повторяющийся, то осциллографу не обязательно оцифровывать весь сигнал сразу. Прибор может захватить только часть сигнала при каждом запуске и затем воспроизвести на экране весь сигнал за несколько циклов запуска, причем этот процесс протекает обычно настолько быстро, что он практически не заметен. Таким образом, полоса пропускания повторяющихся сигналов не зависит от частоты дискретизации, а является характеристикой аналогового тракта цифрового осциллографа.

Полоса пропускания для однократных сигналов применима только для непериодических (или однократных) сигналов, которые захватываются и оцифровываются осциллографом за один такт. Таким образом, полоса для однократных сиг-

налов зависит от частоты дискретизации данного осциллографа (более подробно о влиянии частоты дискретизации на полосу пропускания см. шаг 4).

Следует отметить, что большинство реальных сигналов содержит частотные компоненты, частота которых во много раз превышает частоту основного компонента. Так, например, прямоугольный импульс может содержать частотные составляющие, которые имеют частоту, по крайней мере, в десять раз больше основной частоты сигнала. Поэтому осциллографы с большей полосой пропускания способны предоставить более детальную информацию об этих высокочастотных составляющих. На рис. 3.30 приведены осциллограммы одного и того же прямоугольного сигнала с частотой 50 МГц, измеренные осциллографами с различной полосой пропускания.

Как видно из рисунков, наиболее полную информацию о сигнале и наилучшее воспроизведение фронтов сигнала обеспечивает осциллограф с наиболее широкой полосой пропускания. Осциллограф с полосой 20 МГц, т. е. меньшей, чем основная частотная составляющая прямоугольного импульса очень сильно искажает сигнал: фронты сигналов кажутся более длинными, кроме того, наблюдается уменьшение амплитуды.

Объясняется это очень просто. Как известно, длительность фронта наблюдаемого сигнала $\tau_{изм}$ определяется по формуле:

$$\tau_{изм} = \sqrt{\tau_n^2 + \tau_\phi^2},$$

где τ_n — время нарастания переходной характеристики осциллографа, вычисляемое по формуле $\tau_n = 0,35/\Delta f$; τ_ϕ — время нарастания фронта входного сигнала.

Отсюда вытекает правило измерения временных параметров: чем больше соотношение длительности фронта сигнала и фронта осциллографа, тем меньше ошибка измерения (см. табл.).

Соотношение τ_ϕ/τ_n	Ошибка измерений
1:1	41,4%
3:1	5,4 %
5:1	2,0%
10:1	0,5%

Таким образом, при проведении точных измерений временных характеристик величина полосы пропускания осциллографа должна по крайней мере в три раза превышать значение основной частотной составляющей наиболее быстрого ожидаемого сигнала. А для точных измерений амплитуды желательно, чтобы полоса пропускания осциллографа была в десять раз больше, чем частота измеряемого сигнала.

Кроме того, следует помнить, что:

- на точность результатов измерений также влияют пробники и щупы;
- в спецификациях на некоторые осциллографы указывается только наилучшее значение полосы пропускания и только для определенных диапазонов чувствительности, в то время как для на других диапазонах значение полосы может значительно отличаться от наилучшего;
- полоса пропускания аналоговых осциллографов редко превышает 400 МГц, в то время как цифровые осциллографы могут иметь полосу до 50 ГГц.

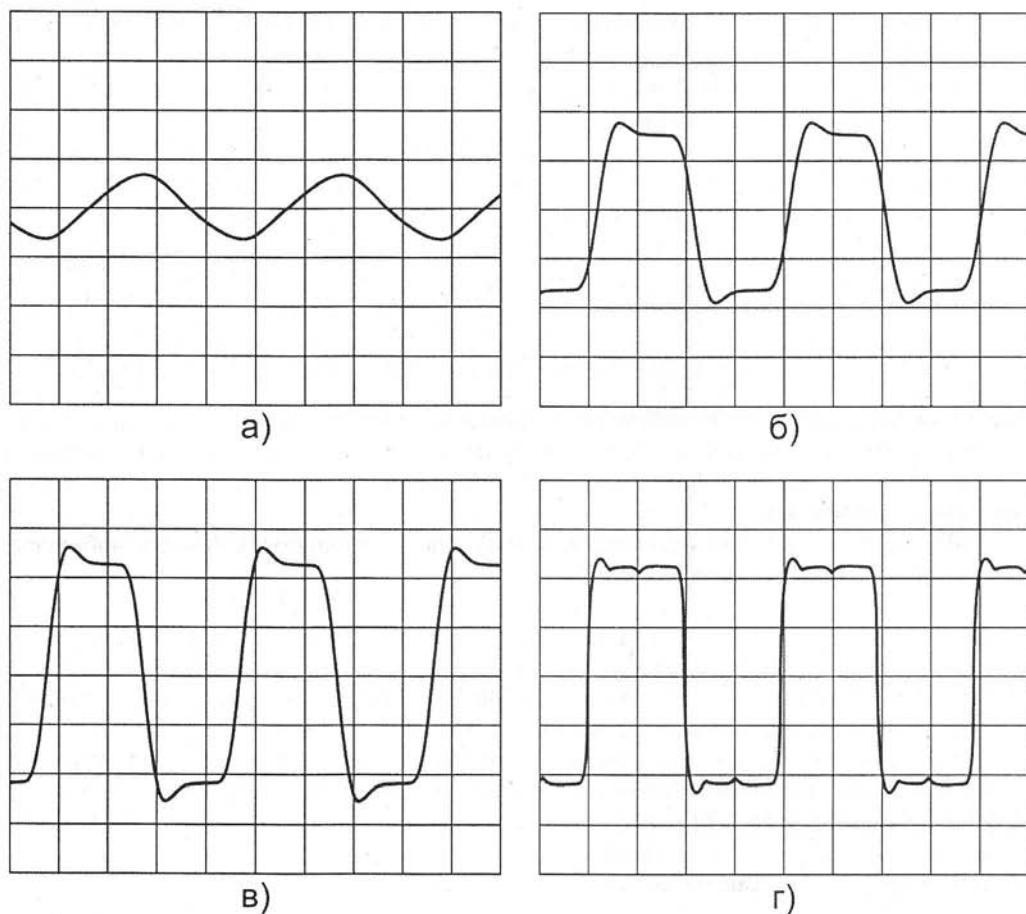


Рис. 3.30. Осциллограмма прямоугольного сигнала частотой 50 МГц, измеренная осциллографом с полосой пропускания:
 а) 20 МГц; б) 50 МГц; в) 150 МГц; г) 500 МГц

Шаг 3. Определите необходимое количество каналов

Количество необходимых каналов зависит от исследуемого изделия и вида решаемых задач.

Пока наибольшей популярностью пользуются двухканальные осциллографы. Однако в последнее время все больший спрос находят четырехканальные модели, поскольку удельная стоимость канала у них меньше, чем у двухканальных моделей, а возможности существенно шире.

Некоторые замечания:

- Есть ли необходимость получать данные одновременно по нескольким каналам? Если да, то есть смысл выбирать осциллограф с одновременным запуском или отдельными АЦП для каждого канала. Если исследуемые сигналы повторяются, одновременный сбор данных по разным каналам не требуется.
- Некоторые осциллографы, обозначенные в спецификации «2+2», имеют 2 полных канала и 2 дополнительных канала с ограниченным диапазоном чув-

ствительности. В этом случае в осциллографе имеются только 2 аналого-цифровых преобразователя (АЦП), входы которых разделены между 4 каналами. Дополнительные каналы могут использоваться, например, для анализа цифровых сигналов.

- На двуканальных осциллографах желательно иметь отдельный канал внешнего запуска, т. к. в этом случае нет необходимости использовать один из основных каналов в качестве входа сигнала внешней синхронизации.
- Если при проведении временных измерений цифровых сигналов обнаруживается, что 4 каналов недостаточно, то целесообразно приобретение логического анализатора. Хотя логические анализаторы не позволяют измерить амплитуду сигнала, зато они предоставляют большее число каналов и дополнительные возможности по запуску прибора и обработке информации.

Шаг 4. Определите необходимую частоту дискретизации

Для задач, связанных с изменением однократных или переходных процессов, частота дискретизации имеет первостепенное значение. Параметр «частота дискретизации» обозначает скорость, с которой осциллограф может оцифровывать входной сигнал. Более высокая частота дискретизации определяет более широкую полосу пропускания для однократных сигналов и дает большее временное разрешение.

Большинство производителей цифровых осциллографов используют отношение между частотой дискретизации и полосой для однократных сигналов на уровне 4:1 (если есть средства интерполяции) или 10:1 (без средств встроенной интерполяции) для предотвращения искажения сигнала.

Некоторые модели осциллографов имеют функцию управления частотой дискретизации, что дает возможность независимо настраивать частоту дискретизации и количество информации, отображаемой на экране осциллографа, что позволяет поддерживать требуемое временное разрешение.

Некоторые замечания:

- Указанная в спецификации частота дискретизации может относиться к производительности только одного канала. В некоторых осциллографах при задействовании нескольких каналов одновременно частота дискретизации пропорционально уменьшается. Это увеличивает вероятность появления искаженных сигналов, если учитывать зависимость между частотой дискретизации и полосой пропускания для однократных сигналов. Поскольку память осциллографа, как правило, также ограничена по объему, большинство осциллографов работают на максимальной частоте дискретизации только на самых быстрых скоростях развертки. На медленных скоростях развертки частота дискретизации уменьшается.
- При исследовании однократных сигналов необходимо иметь в виду важность объема памяти наравне с частотой дискретизации. Если требуется исследовать серию импульсов без прерываний, потребуется осциллограф с достаточно большим объемом памяти, чтобы зафиксировать весь сигнал с достаточным разрешением по времени.
- Частота дискретизации не связана с частотой обновления экрана.
- Аналого-цифровые осциллографы имеют, как правило, небольшую частоту дискретизации и не могут обеспечить детального изучения запомненного сигнала, но успешно позволяют исследовать сигналы в низкочастотной области, работать в режиме самописца и т. п.

Шаг 5. Определите необходимый объем памяти

Требуемый объем памяти зависит от общей длительности сигнала, параметры которого необходимо исследовать, и желаемого разрешения по времени. Если исследуются сигналы в большом промежутке времени с большим разрешением, то потребуется большая память. Большой объем памяти позволит использовать более высокую частоту дискретизации на медленных скоростях развертки, уменьшая вероятность получения искаженного сигнала и обеспечивая получение большего объема информации о сигнале.

Требуемый объем памяти можно подсчитать, исходя из следующего соотношения:

$$\text{Объем памяти} = \text{время сбора данных (с)} / \text{разрешение (с)}$$

Следует иметь в виду, что увеличение объема памяти может привести к сильному замедлению работы осциллографа, поскольку ему потребуется обрабатывать больший массив данных.

Традиционно считается, что наибольший объем памяти (при прочих равных условиях) имеют приборы, выпускаемые компанией LeCroy, однако осциллографы Tektronix последних серий, например, DPO7000, оснащены памятью еще большего объема — до 40 Мвыборок на канал в стандартной комплектации с возможностью расширения до 400 Мвыборок на канал.

Шаг 6. Определите требуемые возможности по запуску прибора

Для большинства пользователей осциллографов общего назначения просто запуск по фронту (перепаду) сигнала часто бывает недостаточно. Для решения многих задач бывает также полезно иметь дополнительные возможности по запуску, позволяющие обнаружить события, которые иначе очень трудно отследить. Для цифровых применений, например, бывает необходимо произвести запуск по комбинации логических состояний по всем каналам осциллографа. Кроме того, запуск по логическому состоянию позволяет синхронизировать комбинацию логических состояний с фронтом тактового сигнала. Запуск по импульсной помехе дает возможность запустить прибор по нарастающему или спадающему фронту помехи или импульсу с заданной длительностью (меньшей, равной или большей определенной величины). Указанные возможности особенно полезны, когда ведется поиск неисправностей. Вы можете запустить развертку прибора по сбою и проследить по времени (используя регулятор цифровой задержки или горизонтального положения) причину сбоя. Но, если требуется более расширенный диапазон возможностей по запуску, вам необходимо использовать логический анализатор (или осциллограф смешанных сигналов компании Agilent Technologies, объединяющий в себе функции двухканального осциллографа и 16-канального логического анализатора). Кстати, осциллографы Tektronix последних серий, например, DPO7000 или DPO70000, имеют возможности по запуску, не уступающие логическим анализаторам: они обеспечивают запуск более чем по 1400 комбинациям.

Возможность запуска по телевизионному (ТВ) сигналу позволяет настроить прибор на определенный полукадр или строку. На некоторых осциллографах эта функция не является стандартной, поэтому ее приходится заказывать отдельно. Во многих аналоговых осциллографах имеется синхронизация по кадровому или строчному синхроимпульсу, но возможности изучения ТВ-сигналов с такой разверткой, тем не менее, сильно ограничены из-за отсутствия функции выбора ТВ-строки с заданным номером. Приятным исключением является АСК-1053,

единственная из современных аналоговых моделей, которая дает возможность синхронизации по выбранной ТВ-строке.

Ранее считалось, что исследование телевизионных синхрои импульсов реально возможно только аналоговыми осциллографами. Однако в последнее время, в связи с развитием цифровой техники и значительным увеличением частоты дискретизации появились цифровые модели, которые позволяют детально изучать любые ТВ-сигналы, в том числе, и цифровые.

Шаг 7. Определите требуемые возможности по обнаружению импульсных помех

В принципе, любой аналоговый осциллограф всегда способен отобразить импульсные помехи и дрожания сигнала. Вопрос состоит лишь в том, достаточно ли скорости нарастания в канале вертикального отклонения (в конечном счете — полосы пропускания) и яркости осциллограммы для исследования этих процессов.

Что касается цифровых осциллографов, то следует выделить три важнейших фактора, влияющих на их способность обнаруживать импульсные помехи.

1. *Частота обновления экрана.* Цифровые осциллографы сначала должны оцифровать входной сигнал, затем его обработать и только после этого воспроизвести осциллограмму на экране. Чем быстрее осциллограф выполняет все эти три операции, тем больше частота обновления экрана. Осциллограф с высокой частотой обновления имеет больше шансов обнаружить редкие по природе импульсные помехи. Скорость обновления экрана зависит, в первую очередь, от производительности процессора прибора. Осциллографы с многопроцессорной архитектурой могут иметь частоту обновления экрана и скорость ответной реакции, сравнимые с возможностями аналоговых осциллографов. Так, к примеру, осциллографы LeCroy серии WaveRunner способны обновлять экран со скоростью порядка 200—400 раз в секунду, приборы компании Agilent Technologies — около 2000 раз в секунду, а осциллографы Tektronix серии TDS7000 — более 200000 раз в секунду!

2. *Возможности определения амплитуды.* Большинство цифровых осциллографов могут уменьшать частоту дискретизации на медленных скоростях развертки путем простого отбрасывания промежуточных выборок (т.н. прореживание выборок). Это приводит к тому, что короткие импульсы или помехи, которые видны на быстрых скоростях развертки, могут исчезать при уменьшении скорости развертки. В некоторых моделях осциллографов имеется специальный режим (который называется «режимом обнаружения пиковой амплитуды» или «режимом обнаружения помех»), позволяющий поддерживать частоту дискретизации на максимальном уровне на всех скоростях развертки. При этом минимальное и максимальные значения, которые появляются во время взятия каждой выборки, записываются в память. Отметим, что минимальная длительность импульса, которая может быть зафиксирована, является функцией частоты дискретизации осциллографа. Кроме того, некоторые приборы имеют функцию «пикового детектора», которая помогает обнаруживать импульсные сигналы между выборками.

3. *Возможности запуска по импульсной помехе.* Осциллографы с возможностями запуска по импульсной помехе позволяют выделять трудно обнаруживаемые импульсные помехи и производить по ним запуск осциллографа. Эта дополнительная возможность очень полезна при поиске причины ненормальной работы исследуемой схемы.

Шаг 8. Определите требуемые возможности по анализу сигналов

Функции автоматических измерений и встроенные средства анализа сигналов могут значительно сэкономить время и сделать работу более легкой. Цифровые осциллографы часто предоставляют целый набор функциональных возможностей, которые невозможны на аналоговых осциллографах.

Кроме сложения и вычитания сигналов, которые часто доступны и в аналоговых осциллографах, цифровые осциллографы позволяют производить умножение, деление, интегрирование, дифференцирование и целый ряд других математических операций. Статистический анализ результатов измерений (минимальное, максимальное и среднее значение, стандартное отклонение и т. п.) дает представление о разбросе параметров сигнала, помогает оценить точность измерений, а также имеет важное значение при исследовании временных параметров зашумленных сигналов. Большинство современных цифровых осциллографов предоставляют возможность анализа сигналов в частотной области с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Следует отметить, что многих инженеров больше интересует наличие интерфейса для передачи данных в персональный компьютер для их последующей обработки и, в меньшей степени — наличие математических функций в самом приборе. Это, как говорится, дело вкуса. Но практика показывает, что такой подход при выборе прибора может оказаться ошибочным. Если осциллограф сам выполняет математическую обработку в реальном времени и при этом имеет хорошие возможности по документированию результатов, то и подключение к ПК нужно только для целей автоматизации управления измерениями. Тем более, что в последние годы самые «продвинутые» модели осциллографов от различных производителей сами способны выступать в роли компьютера (пример — TDS7404).

Шаг 9. Определите требуемые возможности по документации результатов измерений

Большинство цифровых и аналого-цифровых осциллографов могут взаимодействовать с персональным компьютером, принтером или плоттером через интерфейсы GPIB, RS-232 или Centronics. В последние годы все чаще используется интерфейс USB.

Многие современные цифровые осциллографы оснащены дисковыми или съемными для флэш-памяти, которые позволяют сохранять изображения экрана с осциллограммами (в различных форматах) и результаты измерений в числовом виде, а затем быстро перенести их в компьютер для дальнейшей обработки. Эти возможности позволяют экономить время, когда, например, требуется вставить изображение с экрана осциллографа в отчет или скопировать данные сигналов электронную таблицу.

Шаг 10. Испытайте приборы, которые подходят для решения задач

Выполнение девяти предыдущих шагов, скорее всего, сузило поле выбора до ограниченного количества моделей, каждая из которых в той или иной степени удовлетворяет предъявляемым требованиям. Теперь желательно испытать эти модели и сравнить их между собой. На что следует обратить внимание во время испытаний приборов?

Во-первых, это *простота использования*. Имеются ли на передней панели специальные переключатели и регуляторы для наиболее частых настроек, например, чувствительности, скорости развертки, положения сигнала и уровня запуска? Сколько кнопок требуется нажать, чтобы перейти от одной функции к другой?

Возможно ли интуитивное управление прибором в то время, когда основное внимание уделяется исследуемой схеме? Сразу отметим, что в процедуре сравнения интерфейсов управления осциллографов очень много субъективизма: есть любители традиционного управления приборами, а кому-то более удобным может показаться «компьютерный» стиль с использованием клавиатуры, мыши или сенсорного экрана. Существенно упрощает процесс управления прибором новая дополнительная функция, доступная пока только с осциллографами от Agilent Technologies и Tektronix: управление голосом. В этом случае руки оператора остаются свободными, и он полностью может сосредоточиться на работе с тестируемым устройством. К сожалению, пока приборы «понимают» только английский, немецкий, французский, испанский и некоторые другие языки, но не русский.

Во-вторых, это *скорость реакции экрана*. При выборе следует обратить внимание на скорость реакции осциллографа на команды. Это важный фактор в тех случаях, когда прибор используется для поиска неисправностей или сбора больших массивов информации. Как быстро сменяются изображение на экране осциллографа при изменении установок чувствительности, скорости развертки или положения сигнала? Рекомендуется включить некоторые функциональные возможности и оценить, насколько сильно замедляется при этом работа осциллографа.

В-третьих, целесообразно обратить внимание на *возможности прибора по записыванию* (на диске или на флэш-карте) настроек прибора, позволяющие быстро входить в ранее установленный режим измерений.

Таким образом, выполнив весь приведенный алгоритм и оценив все предлагаемые модели, вы уже можете решить, какой именно прибор наиболее полно удовлетворяет вашим требованиям.

В последующих главах мы обзорно рассмотрим принципы построения, конструкции и параметры осциллографов различного типа — от простейших аналоговых до самых сложных и дорогих цифровых и стробоскопических осциллографов. Особое внимание при этом уделено их инструментальным возможностям и практике проведения измерений. Будут впервые описаны не только новейшие осциллографы ведущих фирм «классического» настольного типа, но и миниатюрные осциллографы с батарейным питанием, осциллографы-мультиметры, осциллографические платы и приставки к персональным компьютерам и даже компьютеризированные лаборатории на их основе.

Глава 4. Аналоговые электронные осциллографы

В этой главе описаны классические аналоговые осциллографы, выполненные на основе осциллографических электронно-лучевых трубок. Эти приборы и сейчас просто незаменимы в целом ряде измерений, например при просмотре модулированных сигналов. Описана эволюция разработки осциллографов — от простых ламповых осциллографов первого поколения до новейших моделей этих универсальных и мощных приборов. Особое внимание уделено «бюджетным» моделям аналоговых осциллографов.

4.1. Осциллографы первого и второго поколений

4.1.1. Первое поколение ламповых осциллографов

В 50—60-х годах двадцатого века электронный осциллограф из уникального физического прибора превратился в массовый инструмент физических, радиотехнических и иных лабораторий. Во многом этому содействовало применение в нем электронных ламп, на которых можно было строить усилители вертикального и горизонтального отклонения, генераторы разверток, узлы синхронизации и стабилизированные источники электропитания.

В эти годы выпускалось множество аналоговых осциллографов на электронных лампах, например ЭОЗ, ЭО4, ЭО5, ЭО6, ИО4, СИ1 и т. д. Это были электронные осциллографы *первого поколения*. Число ламп в некоторых осциллографах достигало нескольких десятков, что вело к большим размерам этих аппаратов и их большому весу. Были образцы двухканальных и даже многоканальных осциллографов. К концу 60-х годов полоса пропускания многих ламповых осциллографов обычного применения достигала 25—30 МГц за счет построения балансных и дифференциальных усилителей на высокодобротных электронных лампах.

В эти годы было создано немало уникальных приборов, например сверхскоростные осциллографы с усилителями и ЭЛТ на линиях с бегущей волной. Эти мастодонты измерительной техники были способны отображать и измерять сигналы с частотами до нескольких ГГц. Однако такие большие, тяжелые (вес до 70 кг), дорогие и уникальные приборы были мало доступны большинству инженеров и даже научных работников и применялись, в основном, специалистами в области скоростных измерений в атомной технике и физике быстропротекающих процессов.

4.1.2. Массовые советские транзисторные осциллографы 60-х годов

В 60-х годах 20-го века окончательно сформировался переход элементной базы осциллографов на транзисторы вместо ламп. Так зародилось *второе поколение* аналоговых осциллографов — транзисторных. К осциллографам *третьего поколения* относятся приборы с широким применением интегральных микросхем.

Указанное время было временем бурного расцвета отечественной микроэлектроники, успешно работающей на оборонные заказы и фундаментальные исследования. Для развития науки и техники тех лет требовались крупные и обширные научные разработки и исследования. Осциллографы стали одними из первых вос-

требуемых инструментов. И они выпускались в огромном количестве, даже превосходящем потребности оборонного комплекса СССР. Часто они по многу лет хранились на складах войск в виде ЗИП и неприкосновенных запасов. В то же время реальные потребности системы образования и радиолюбительства явно не удовлетворялись — в магазинах осциллографы не продавались и поставлялись централизованно в явно недостаточных количествах.

После распада СССР и фактического разрушения научной индустрии России распалось огромное число научных организаций. В результате множество осциллографов тех лет попало в комиссионную торговлю и стало достоянием даже радиолюбителей. В наше время можно найти предложения по продаже этих надежных и умеренных по цене аппаратов со складов их долговременного хранения. Однако в целом наметился переход на применение наиболее массовых и дешевых осциллографов тех специализированных фирм (в основном зарубежных), которые сумели создать их массовое производство на основе наиболее современных, качественных и дешевых компонентов.

Ниже, в табл. 4.1 представлены характеристики отечественных осциллографов тех лет. Все приборы имеют канал Y с нулевой нижней граничной частотой и верхней граничной частотой f_v . В книгах [13, 14] можно найти довольно подробное описание схем узлов этих осциллографов. В основном они выполнялись на обычных дискретных транзисторах по вполне обычным схемам (см. главу 1, где схемные решения транзисторных осциллографов были отражены).

Таблица 4.1

*Характеристики транзисторных электронных осциллографов
60-х годов 20-века*

Тип	Лучей/ каналов	Размер экрана мм	f_v МГц	t_y нс	K_y , В/дел	Погреш- ность, %	Размер, мм	Вес кг
C1-48	1/1	60×80	1	350	0,002-50	10/10	490×175×475	20
C1-68	1/2	60×80	1	350	0,001-50	5/5	225×160×360	10
C1-69	2/2	40×100	2	175	0,001-0,02	5/5	360×200×420	17
C1-45	1/1	30×60	5	70	0,01-30	10/10	174×220×425	8
C1-49	1/1	36×60	5	70	0,01-20	10/10	170×223×430	8,5
C1-73	1/1	40×60	5	70	0,01-30	-	200×80×250	3
C1-83	1/2	100×120	5	70	0,001-20	5/5	260×160×360	10
C1-67	1/1	42/60	10	35	0,01-20	5/5	225×160×360	10
C1-72	1/1	36×60	10	35	0,02-10	10/10	225×140×360	8,5
C1-77	1/2	60×80	10	35	0,005-10	-	225×160×360	10
C1-55	2/2	42×60	10	35	0,01-20	10/10	300×180×420	15
C1-93	1/2	100×120	15	23	0,004-10	5/5	260×160×360	10
C1-63	1/2	48×80	25	18	0,02-10	6/6	300×180×420	18
C1-65	1/1	48×80	35	10	0,005-20	5/5	300×180×420	16
C1-78	1/1	80×100	35	10	0,005-20	5/5	360×200×420	19
C1-64	1/2	48×80	50	7	0,001-10	5/5	300×200×420	19
C1-71	1/1	48×80	100	3,5	0,005-10	-	300×200×420	19

Тип	Лучей/ каналов	Размер экрана мм	$f_{\text{в}}$ МГц	$t_{\text{у}}$ нс	$K_{\text{у}}$, В/дел	Погреш- ность, %	Размер, мм	Вес кг
C1-79	1/2	48×80	100	3,5	0,002-5	5/5	300×200×420	10
C1-75	1/2	60×100	250	1,5	0,01-1	5/7	408×220×545	23
C1-52	TV	60×80	12	29	0,1-5	5/5	410×198×455	25
C9-1	TV	80×100	20	18	0,01-5	3/5	480×160×475	22
C1-81	1/1	80×100	20	18	0,01-5	2/5	360×200×480	18

Из приведенных данных можно сделать вывод, что уже в 60-х годах прошлого века (звучит сильно, ибо не стоит забывать, что новый век только-только начался) уровень технических показателей осциллографов был достаточно высок. В частности уже были модели с полосой частот исследуемых сигналов от 100 до 250 МГц. Правда весили такие приборы более 20 кг, были большими по размерам, а главное очень дорогими и малодоступными.

4.1.3. Осциллографы для радиолюбителей

В бывшем СССР предпринимались определенные попытки разработки *осциллографов для радиолюбителей*. Целесообразность таких попыток диктовалась массовостью радиолюбительского движения. Из радиолюбителей выросли многие серьезные специалисты и научные работники. Однако дальше разработки нескольких довольно примитивных осциллографов дело не пошло — в СССР эти приборы были предметами пресловутого ширпотреба, разработка которого была обычно свалена на предприятия оборонного комплекса, занятые ответственными разработками.

Примером одной из таких разработок является осциллограф радиолюбителя Н313 производственного объединения «Краснодарский ЗИП» (рис. 4.1). Это один из немногих осциллографов, который поступал в радиомагазины и был доступен (в принципе) радиолюбителям. В приборе использовалась миниатюрная ЭЛТ 5ЛО2И, так что размеры экрана составляли всего 24×40 мм для рабочей части экрана. Естественно, что считать такой прибор измерительным можно с большой натяжкой. Гарантированная погрешность измерения составляла 20% и только после калибровки прибора по внешним приборам класса 2,5% может составлять 10%.

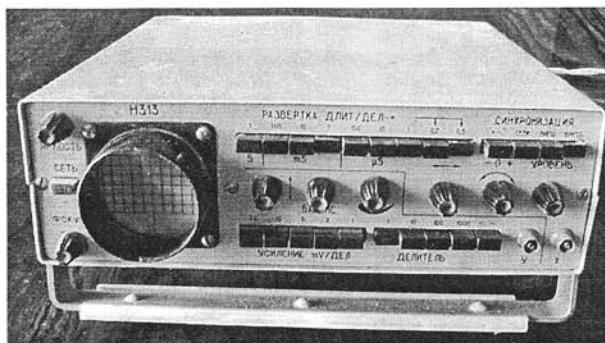


Рис. 4.1. Осциллограф для радиолюбителей Н313

Усилитель канала Y этого осциллографа выполнен по довольно навороченной схеме — в нем истоковый повторитель на полевом транзисторе, два операционных усилителя и 8 биполярных транзисторов. Естественно, что верхняя граничная частота такого «агрегата» всего 1 МГц при неравномерности АЧХ 20%. Развертка прибора имеет 21 фиксированную скорость от 0,2 мкс/дел до 1 с/дел. Таким образом, можно было просматривать импульсы с длительностью от 1 мкс до 1 с. Осциллоскоп Брауна это «чудо» техники, конечно, многократно превосходит, но до требований к серьезному массовому осциллографу явно не дотягивает. Кстати, хотя прибор и имеет малые габариты 245×70×278 мм (с кирпич) весит он не мало — 3,2 кг.

Более современный, но тоже уже устаревший, хотя продаваемый и поныне, сервисный осциллограф С1-94 уже вполне удовлетворяет требованиям к такого рода приборов. Рабочая область экрана 40×60 мм. Он имеет полосу канала Y от 0 до 10 МГц и время нарастания не более 35 нс (время установления переходной характеристики 120 нс). Входное сопротивление прибора 1 Мом параллельно с емкостью 40 пФ. Чувствительность прибора от 10 мВ/дел до 5 В/дел. Длительность развертки (ждушей и автоколебательной) от 0,1 мкс/дел до 50 мс/дел (18 позиций). Погрешность измерения 5%.

В наше время выпускается модификация этого аппарата С1-94/3 (рис. 4.2). Прибор имеет полосу пропускания 15 МГц, а с корректирующим делителем напряжения 1:10 даже до 30 МГц при времени нарастания соответственно 28 и 12 нс. Входной импеданс усилителя Y 1 Мом параллельно с емкостью 30 пФ, максимальное входное напряжение 30 В (с делителем до 300 В). Чувствительность прибора по вертикали от 5 мВ/дел до 5 В/дел, диапазон разверток (автоколебательной и ждушей) от 0,2 мкс/дел до 50 мс/дел. Погрешность измерения напряжения и длительности не более 5%. Размеры рабочей области экрана 60×40 мм, габариты 100×90×280, масса 3,2 кг.

К сожалению, даже такие приборы для большинства радиолюбителей достаточно дороги. Поэтому многие собирают осциллографы самостоятельно. Впрочем, вряд ли в этом есть смысл, если параметры нужного осциллографа достаточно серьезные. Проще отыскать нужный прибор на рынке уцененных товаров.



Рис. 4.2. Миниатюрный сервисный осциллограф С1-94/3

4.2. Современные сервисные аналоговые осциллографы

4.2.1. Сервисные осциллографы серий ОСУ и МРС

В наше время простые и вполне современные транзисторные осциллографы часто именуют *сервисными*, поскольку такие приборы широко используются в радио- и телевизионных мастерских, на рабочих местах предприятий, где осуществляется осциллографический контроль различных изделий, в учебных лабораториях.

ях и в радиолюбительской практике. Несмотря на разработку новейших цифровых осциллографов, потребность в простых сервисных осциллографах остается большой в силу целого ряда причин:

- аналоговые осциллографы намного дешевле цифровых;
- с ними проще работать;
- работа в реальном времени исключает искажения, принципиально присущие цифровым приборам и связанные с квантованием сигналов, пропуски сигналов и задержки в их выдаче на экран;
- ремонт аналоговых приборов намного проще и дешевле, чем цифровых.

Можно выделить два характерных типа таких приборов:

- малогабаритные одноканальные осциллографы с полосой частот от 0 до 5—10 МГц и массой 2—3 кг;
- двухканальные осциллографы с полосой частот от 0 до 10—30 МГц и массой 6—8 кг.

Несколько таких осциллографов выпускается под маркой ОСУ — осциллографы сервисные универсальные. Это самые дешевые из представленных ныне на рынке осциллографов. Впрочем, называть осциллографы серии ОСУ отечественными можно только с натяжкой. Эти приборы по конструкции и характеристикам аналогичны приборам китайской корпорации MPC Corp. (Шанхай). Иногда они продаются под маркой MPC.

Осциллограф ОСУ10А (в вертикальном исполнении) и ОСУ10В (в горизонтальном исполнении) — самый простой и дешевый (цена около 5000 руб.) прибор из этой серии. Это одноканальный осциллограф с полосой частот от 0 до 10 МГц и чувствительностью по оси Y от 5 мВ/дел до 5 В/дел, диапазон разверток (автоколебательной и ждущей) от 0,1 мкс/дел до 100 мс/дел. Входной импеданс усилителя Y 1 Мом параллельно с емкостью 30 пФ, максимальное входное напряжение 400 В. Погрешность измерения напряжения и длительности не более 3%. Размеры рабочей области экрана 60×50 мм, габариты 220×90×270, масса 3 кг.

ОСУ20 простой и дешевый (цена около 10000 руб.) двухканальный осциллограф — рис. 4.3. Он имеет полосу частот от 0 до 20 МГц и чувствительность по оси Y от 5 мВ/дел до 20 В/дел, диапазон разверток (автоколебательной и ждущей) от 0,2 мкс/дел до 0,2 с/дел с возможностью растяжки в 10 раз. Входной импеданс усилителя Y 1 Мом параллельно с емкостью 30 пФ, максимальное входное напряжение 400 В (с делителем 1:19).

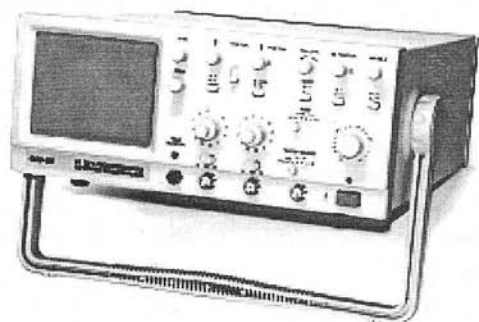


Рис. 4.3. Двухканальный сервисный универсальный осциллограф ОСУ20

Режимы отображения: канал 1, канал 2, изменение полярности в канале 2, суммирование сигналов каналов 1 и 2, поочередная коммутация каналов 1 и 4. Погрешность измерения напряжения и длительности не более 3%. Размеры рабочей области экрана 100×80 мм, габариты 316×132×410, масса 7,8 кг. Прибор имеет входы каналов X и Z, что позволяет выполнять различные специальные осциллографические измерения, например, контролировать частоты по фигурам Лиссажу или наблюдать вольтамперные характеристики нелинейных приборов.

Заметим, что в первом режиме отображения можно наблюдать поочередно сигналы с каналов 1 и 2, т. е. исследовать независимо два процесса, отличающихся по длительности. Это ценная особенность при проведении исследования сложных устройств. К сожалению линии задержки и задержанной развертки в этих приборах нет.

4.2.2. Отечественные сервисные осциллографы

К отечественным сервисным осциллографам относится портативный осциллограф C1-118. Он выполнен в пластмассовом корпусе и имеет габариты: 336×212×133, размер экрана 60×80, массу 4,5 кг. C1-118 один из немногих портативных осциллографов, имеющий 2 канала, полосу пропускания 20 МГц и развертку с возможностью синхронизации телевизионным сигналом.

Современный сервисный осциллограф C1-159 (рис. 4.4) это очень простой в обращении малогабаритный осциллограф. Он может быть рекомендован специалистам по ремонту бытовой аудио-видео техники, радиолюбителям, а также для применения в качестве учебного пособия в средних школах и профессионально-технических учебных заведениях для обучения работе с осциллографом. Этот прибор, как последующие приборы, описанные в этом разделе, выпускается Минским приборостроительным заводом (www.belvar.com).

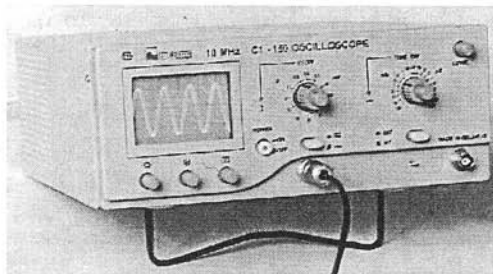


Рис. 4.4. Сервисный универсальный осциллограф C1-159

Технические характеристики C1-159:

- Количество каналов 1
- Полоса пропускания 10 МГц
- Диапазон частот синхронизации до 15 МГц
- Время нарастания 35 нс
- Коэффициенты отклонения 2 мВ/дел...10 В/дел
- Входной импеданс 1 МОм/30пФ.
- Макс. входное напряжение 250 В
- Коэффициенты развертки 20 нс/дел...0,02 с/дел
- Погрешность измерения сигнала и времени $\pm 5\%$

- Источники синхронизации: внутренний, внешний
- Экран 60×40 мм (10×6 дел)
- Диапазон рабочих температур: +5 ... +35 °C
- Питание: 220 В ±10%, 50 Гц
- Потребляемая мощность: 25 ВА
- Габаритные размеры: 350×260×110 мм
- Масса: 4 кг

Семейство сервисных осциллографов серии С1-137 разработано для специалистов по ремонту и обслуживанию радиоэлектронной аппаратуры, устройств автоматики, средств связи, а также для радиолюбителей. Наличие режима синхронизации ТВ-сигналом (раздельно по строкам и полю) обеспечивает стабильное отображение формы видео-сигналов с телевизора или видеомagneтофона. Выбор определенной модели осциллографа позволяет решать разнообразные измерительные задачи наиболее оптимальным образом.

Двухканальный осциллограф С1-137 с полосой пропускания 25 МГц является базовой моделью этой серии и отличается компактной конструкцией, небольшой массой и простотой управления. Высокая чувствительность прибора (до 2 мВ/дел) позволяет производить обнаружение помех, шума, наложения и искажения на малых амплитудах исследуемого сигнала.

Модель С1-137/1 может быть использована в качестве базы для создания небольшой измерительной лаборатории радиомастера. Этот комбинированный прибор, объединяющий в одном корпусе двухканальный осциллограф и 3,5 разрядный цифровой мультиметр с индикацией показаний на ЖК-индикаторе, обеспечивает независимые одновременные измерения.

Серия сервисных осциллографов С1-160 (рис. 4.5), С1-160/1 предназначена для визуального наблюдения электрических сигналов в полосе частот от 10 Гц до 30 МГц и измерения электрических сигналов в реальном масштабе времени в диапазоне напряжений от 4 мВ до 40 В и длительностью от 40 нс до 1 с в полосе частот от 10 Гц до 25 МГц для С1-160 и в полосе частот от 10 Гц до 20 МГц для С1-160/1.

Осциллограф С1-160, кроме того, может использоваться для наблюдения параметров двухполюсников и трехполюсников при помощи встроенного тестера компонентов. Высокая чувствительность приборов позволяет производить обнаружение помех, шума и искажений на малых амплитудах исследуемого сигнала. Нали-

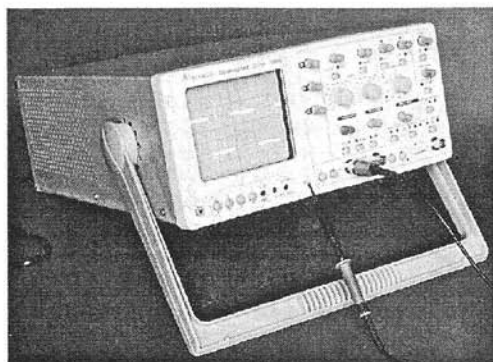


Рис. 4.5. Сервисный универсальный осциллограф С1-160

чие режима синхронизации TV-сигналом (по строкам и кадрам) обеспечивает стабильное отображение формы видео-сигнала.

Технические характеристики приборов серии С1-160:

- Полоса пропускания, МГц: 25 (для С1-160) и 20 (для С1-160/1)
- Диапазон частот синхронизации и полоса частот наблюдаемого сигнала: до 30 МГц
- Количество каналов 2
- Диапазон коэффициентов отклонения от 1 мВ/дел до 5 В/дел
- Пределы допускаемой основной относительной погрешности коэффициентов отклонения, % — $\pm 4,0$ — для положений 1 мВ/дел и $\pm 5,0$ — для положений 2 мВ/дел.
- Параметры переходной характеристики (не более): время нарастания 14 нс (для С1-160), 17,5 нс (для С1-160/1); время установления 75 нс, выброс 9 %; неравномерность не более 3 %, неравномерность на участке установления 9 % и 15% — для 5 В/дел.
- Входное активное сопротивление $1 \pm 0,03$ Мом, входная емкость не более 30 пФ
- Диапазон коэффициентов развертки: от 100 нс/дел до 0,1 с/дел
- Пределы допускаемой основной относительной погрешности коэффициентов развертки: $\pm 4,0\%$ без растяжки и $\pm 6,0\%$ с растяжкой
- Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения временных интервалов для коэффициента развертки 0,1 мкс/дел $\pm 5,0\%$ без растяжки и $\pm 6,0\%$ с растяжкой
- Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения амплитуды и частоты следования импульсов калибратора: $\pm 1,0\%$
- Диапазон наблюдения вольт-амперных характеристик в режиме тестера компонентов (для С1-160): по напряжению (ось X), ± 12 В; по току (ось Y), ± 12 В
- Потребляемая мощность не более 65 В А
- Средняя наработка на отказ не менее 8000 ч
- Габаритные размеры 410×310×145 мм
- Размеры экрана 100×80 мм
- Масса 7,5 кг
- Рабочие условия применения: температура +5 ... +40 °С, влажность 80 % при 25 °С, атмосферное давление от 70 до 106 кПа или от 537 до 800 мм рт. ст.
- Напряжение питающей сети 220 В, частота питающей сети 50 ± 1 Гц.

4.3. Современные отечественные универсальные осциллографы

4.3.1. Отечественные универсальные осциллографы

Современные универсальные осциллографы отличаются от сервисных в основном более широкой полосой частот (50 МГц и выше) и более современной элементной базой, позволившей улучшить параметры приборов. Это открывает возможности широкого применения таких приборов в научных исследованиях и разработках, а также в качестве инструментального средства наладки сложных технических изде-

лий в промышленности. Обширная номенклатура этих приборов выпускается Минским приборостроительным заводом. Эти приборы могут использоваться в научных исследованиях и в конструкторских организациях, занятых разработкой самой различной аппаратуры.

Осциллограф универсальный С1-126 (рис. 4.6) — это мощный четырехканальный прибор. Он предназначен для исследования и измерения параметров однократных и периодических электрических сигналов в полосе частот (0—100) МГц путем визуального наблюдения изображения формы на ЭЛТ. Применяется для наладки, испытаний и ремонта электронной аппаратуры в лабораторных, цеховых и полевых условиях. Может быть использован для научных и экспериментальных исследований в жестких условиях эксплуатации.

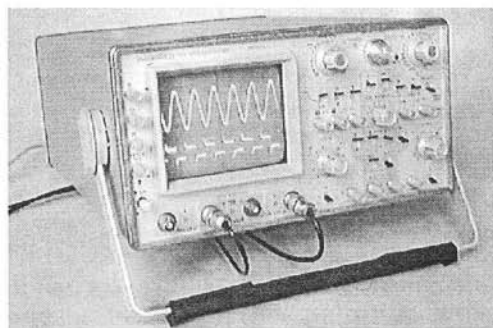


Рис. 4.6. Универсальный 4-канальный осциллограф С1-126

Каналы осциллографа могут работать в режиме поочередного, прерывистого и автономного режима коммутации. Сигналы в разных каналах и в разной последовательности могут суммироваться или вычисляться с последующим воспроизведением результата на экране ЭЛТ. Два канала являются основными, два других — дополнительными, предназначенными в основном для исследования сигналов цифровых устройств.

Осциллограф имеет две развертки: основную и задержанную. Основная развертка может работать в режиме однократного запуска. Задержанная развертка позволяет детально исследовать интересующий участок осциллограммы, а также повышает точность измерения временных параметров импульсных сигналов.

Технические характеристики С1-126:

- Количество каналов 2+2
- Режимы отображения: канал А, канал В, изменение полярности сигнала в канале В, канал С, канал D, суммирование сигналов в каналах А+D, поочередная или прерывистая коммутация каналов А,В,С, D
- Полоса пропускания: 100 МГц
- Время нарастания: 3,5 нс
- Коэффициенты отклонения по вертикали 5 мВ/дел — 5 В/дел (А и D), 0,1 В/дел — 0,5 В/дел (В и С) и 1 мВ/дел — 1 В/дел в режиме х5 (А)
- Погрешность измерения напряжения: $\pm 3\%$ (А и D), $\pm 10\%$ (В и С)
- Входной импеданс: 1 Мом/25 пФ
- Максимальное входное напряжение: 100 В (эффективное значение), 300 В (с делителем 1:10)

- Коэффициенты разверток: основной 20 нс/дел — 0,2 с/дел (с умножением на 10), задержанной 20 нс/дел — 20 мс/дел (с удвоением на 10)
- Погрешность разверток: основной $\pm 3\%$, задержанной $\pm 3\%$
- Режимы развертки: автоколебательный, ждущий и однократный
- Источники синхронизации: канал А, канал В, канал С, канал D, от сети
- Внутренняя синхронизация: от каналов А и D в диапазоне частот 10 Гц ... 50 МГц и 10 Гц ... 100 МГц для каналов В и С, внешняя синхронизация до 100 МГц
- Полоса частот в режиме X — Y: 20 Гц ... 5 МГц (3 дБ)
- Калибратор: меандр (1 кГц, 0,6 В)
- Экран: 100×80 мм (10×8 дел)
- Ускоряющее напряжение 15 кВ
- Рабочий диапазон температур: минус 30 — плюс 50 °С
- Питание: 220 В $\pm 10\%$ 50 — 60 Гц, 115/220 В $\pm 5\%$ 400 Гц
- Потребляемая мощность: 100 ВА
- Габаритные размеры 432×338×171 мм
- Масса 8,5 кг

Удобство и прочность конструкции, высокая временная и температурная стабильность характеризуют портативный осциллограф С1-127 (рис. 4.7). В нем есть возможность работы дополнительно от источника постоянного напряжения 27 В. (например, от аккумулятора), что позволяет применять прибор не только в стационарных, но и походных условиях. Для этого в осциллографе имеется специальный преобразователь постоянного напряжения.

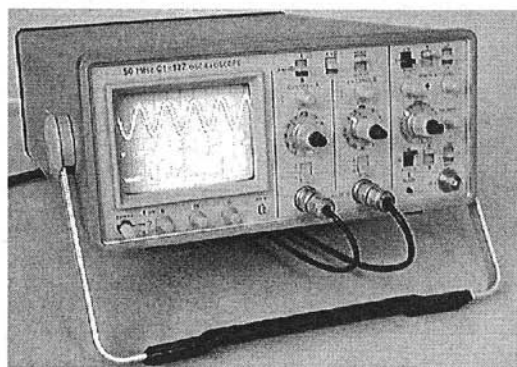


Рис. 4.7. Универсальный портативный осциллограф С1-127 для работы с стационарных и походных условиях

Осциллограф имеет два канала тракта вертикального отклонения, которые могут работать в следующих режимах: наблюдение сигналов в канале А; наблюдение каналов в сигнале Б; алгебраическое суммирование сигналов каналов А и Б; изменение полярности сигналов в канале Б. Благодаря широкому применению микросборок частного применения, а так же импульсного блока питания достигнуто значительное снижение веса, габаритных размеров, потребляемой мощности прибора. Все это существенно облегчает обслуживание и диагностику неисправностей оборудования на труднодоступных объектах и при движении на различных транспортных средствах. Наличие режимов X-Y, яркостной модуляции (Z вход), рас-

ширенный диапазон частот синхронизации предоставляют дополнительные функциональные возможности для отображения исследуемых сигналов.

Технические характеристики С1-127:

- Количество каналов 2
- Режимы отображения: канал А, канал В; изменение полярности в канале В; суммирование сигналов каналов А и В; поочередная или прерывистая коммутация каналов А и В
- Полоса пропускания: 50 МГц
- Диапазон частот синхронизации: до 75 МГц
- Время нарастания: 7 нс (5 мВ/дел ... 5 В/дел), 35 нс (1 мВ/дел ... 2 мВ/дел)
- Коэффициенты отклонения по вертикали: 1 мВ/дел ... 5 В/дел
- Погрешность измерения напряжения: $\pm 3\%$ (5 мВ/дел ... 5 В/дел), $\pm 4\%$ (1 мВ/дел ... 2 мВ/дел)
- Входной импеданс: 1 Мом/25 пФ
- Макс. входное напряжение: 100 В (эффективное значение), 300 В (с делителем 1:10)
- Коэффициенты развертки: 50 нс/дел ... 0,2 с/дел (с умножением на 10)
- Погрешность измерения времени: $\pm 3\%$ и $\pm 4\%$ (в режиме умножения на 10)
- Режимы развертки: автоколебательный, ждущий, однократный
- Источники синхронизации: канал А, канал В, внешний, от сети
- Внутренняя синхронизация: на частотах 10 Гц ... 75 МГц
- Внешняя синхронизация: на частотах 10 Гц ... 75 МГц
- Режим X — Y: полоса частот 20 Гц ... 3 МГц, коэффициент отклонения 2 В/дел
- Калибратор: меандр (1 кГц, 0,6 В)
- Размера экрана: 80×60 мм (10×8 дел), ускоряющее напряжение 8 кВ
- Питание 220 В $\pm 10\%$, 50 Гц; 115/220 В $\pm 5\%$, 400 Гц; 27 В $\pm 10\%$ (С1 — 127)
- Диапазон рабочих температур: минус 30 — плюс 50 °С (для С1-127); плюс 5 — плюс 40 °С (для С1-127/1)
- Потребляемая мощность: сеть 220 В 50 ВА; от источника постоянного тока 27 В, 30 Вт
- Габаритные размеры: 405×295×130 мм
- Масса: 5,5 кг

Осциллограф универсальный С1-147 (рис. 4.8) обеспечивает визуальное наблюдение и измерение амплитудных и временных параметров электрических сигналов по шкале экрана электронно-лучевой трубки. Переключаемый ВЧ-НЧ фильтр сигнала синхронизации предоставляет возможность получить устойчивое изображение сигнала при наличии помех. Наличие режима X — Y позволяет исследовать функциональную зависимость между двумя сигналами.

Технические характеристики С1-147:

- Количество каналов: 2
- Режимы отображения: канал 1, канал 2, изменение полярности в канале 2, суммирование сигналов каналов 1 и 2, поочередная коммутация каналов 1 и 2
- Полоса пропускания: 70 МГц
- Диапазон частот синхронизации: до 100 МГц

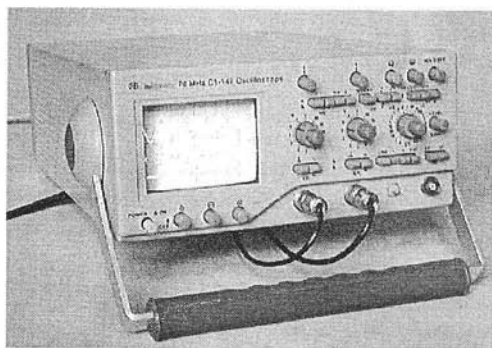


Рис. 4.8. Универсальный 70-МГц осциллограф C1-147

- Время нарастания: 4,6 нс (на пределах 5мВ/дел-5 В/дел) ; 35 нс (на пределах 1мВ/дел-2 В/дел)
- Коэффициенты отклонения по вертикали: 1 мВ/дел...5 В/дел
- Погрешность измерения напряжения: $\pm 3\%$ (5 мВ/дел...5 В/дел), $\pm 4\%$ (1 мВ/дел...2 В/дел)
- Входной импеданс: 1 МОм/25 пФ
- Максимальное входное напряжение: 100 В (эффективное значение), 300 В (с делителем 1:10)
- Коэффициенты развертки: 50 нс/дел...0,2 с/дел (с возможностью умножения на 10)
- Погрешность измерения времени: $\pm 3\%$, $\pm 4\%$ (в режиме умножения на 10)
- Режимы развертки: автоколебательный, ждущий, однократный
- Источники синхронизации: канал 1, канал 2, внешний, от сети
- Диапазон частот внутренней синхронизации: 10 Гц ... 100 МГц
- Диапазон частот внешней синхронизации: 10 Гц ... 70 МГц
- В режим X — Y: полоса пропускания 20 Гц-3 МГц, коэффициенты отклонения 2 В/дел
- Калибратор: меандр (1 кГц, 0,6 В)
- Размеры экрана: 80×60 мм (10×8 дел)
- Ускоряющее напряжение ЭЛТ: 8 кВ
- Диапазон рабочих температур: 5—40 °С
- Питание: сеть 220 В $\pm 10\%$, 50 Гц
- Потребляемая мощность: 50 ВА
- Габаритные размеры: 410×300×130 мм
- Масса: 5,5 кг.

Осциллограф C1-157 (рис. 4.9) является универсальным портативным прибором и предназначен для исследования электрических сигналов в полосе частот от 0 до 100 МГц , измерения их амплитудных и временных параметров по шкале экрана ЭЛТ. В прибор встроен тестер радиокомпонентов, с помощью которого можно проводить анализ характеристик полупроводниковых приборов.

Технические характеристики C1-157:

- Количество каналов: 2

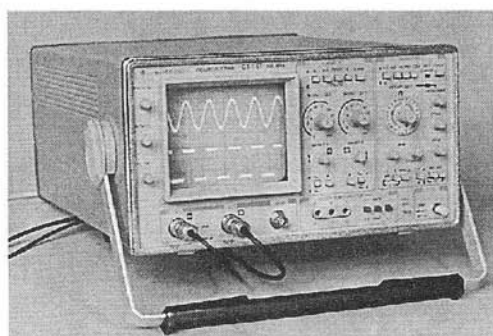


Рис. 4.9. Универсальный 100-МГц осциллограф С1-157

- Режимы отображения: канал 1, канал 2, изменение полярности в канале 2, суммирование сигналов каналов 1 и 2, поочередная коммутация каналов 1 и 2
- Полоса пропускания: 0—100 МГц
- Время нарастания: 3,5 нс
- Коэффициенты отклонения по вертикали: 5 мВ/дел ... 5 В/дел
- Погрешность измерения напряжения: $\pm 3\%$
- Входной импеданс: 1 МОм/25 пФ
- Максимальное входное напряжение: 100 В (эффективное значение), 300 В (с делителем 1:10)
- Коэффициенты развертки: 20 нс/дел ... 0,2 с/дел
- Погрешность измерения времени: $\pm 3\%$
- Режимы развертки: автоколебательный, ждущий, однократный
- Частоты внутренней синхронизации: 10 Гц ... 30 МГц, 10 Гц ... 100 МГц
- Частоты внешней синхронизации: до 100 МГц
- Режим X — Y: полоса пропускания 20 Гц — 3 МГц (3 дБ)
- Калибратор: меандр (1 кГц, 0,6 В)
- Размеры экрана: 100×80 мм (10×8 дел)
- Ускоряющее напряжение 8 кВ
- Диапазон рабочих температур: 5—40 °С
- Питание: сеть переменного тока 220 В $\pm 10\%$, 50 Гц
- Потребляемая мощность: 75 ВА
- Габаритные размеры: 395×338×169 мм
- Масса: 8 кг

Универсальные осциллографы С1-164 (рис. 4.10) предназначены для исследования в двух каналах периодических электрических сигналов путем измерения в полосе частот от 10 Гц до 150 МГц их амплитудных параметров в диапазоне от 20 мВ до 40 В (с делителем 1:10 — до 250 В), временных параметров в диапазоне от 8 нс до 20 с по шкале экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) и с помощью маркеров, визуального наблюдения в полосе частот от 10 Гц до 200 МГц на экране ЭЛТ, а также для измерения параметров двух- и трехполюсников при помощи встроенного тестера компонентов.

В осциллографе применен современный PIC-контроллер, что позволило организовать электронное управление режимами работы и, с помощью маркеров, измерять амплитудные, временные и частотные параметры сигналов. Отличитель-

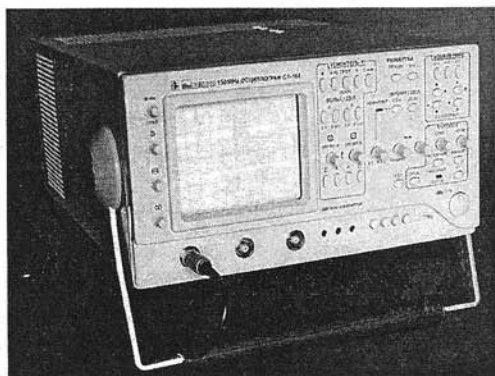


Рис. 4.10. Универсальный 150-МГц осциллограф C1-164

ной особенностью осциллографа является применение импортной ЭЛТ с повышенной яркостью и малыми геометрическими искажениями.

Область применения: ремонт, наладка, эксплуатация различных электронных приборов и узлов автоматики, вычислительной техники и связи. Технические характеристики C1-164:

- Полоса частот измеряемых сигналов: 150 МГц
- Диапазон частот синхронизации: до 200 МГц
- Диапазон коэффициентов отклонения по вертикали: от 5 мВ/дел до 5 В/дел
- Погрешность коэффициентов отклонения и цифрового измерения разности напряжений между курсорами: 3%, при работе с внешним делителем 1:10 $\pm 4\%$
- Время нарастания переходной характеристики: 2,3 нс (2,5 нс с делителем 1:10)
- Выброс переходной характеристики 9 % (10% — с делителем 1:10)
- Время установления переходной характеристики: 18 нс
- Неравномерность переходной характеристики 3%
- Неравномерность переходной характеристики на участке установления 9%
- Диапазон коэффициентов развертки: от 20 нс/дел до 0,2 с/дел
- Пределы допускаемой основной относительной погрешности коэффициентов развертки и измерения временных интервалов между курсорами для коэффициентов развертки от 0,1 мкс/дел до 0,2 с/дел: $\pm 3\%$ без растяжки и $\pm 4\%$ — с растяжкой
- В режиме X — Y: полоса пропускания 20 Гц — 2 МГц
- Рабочая часть экрана ЭЛТ: 100×80 мм
- Масса осциллографа: не более 8 кг
- Масса осциллографа в потребительской таре: не более 12 кг
- Габаритные размеры осциллографа: не более 415×405×170 мм
- Потребляемая мощность: не более 90 В А
- Средняя наработка на отказ: не менее 8000 ч
- Диапазон наблюдения вольтамперных характеристик: по напряжению (ось X), В, ± 12 , по току (ось Y), ± 12 В
- Рабочие условия применения: температура +5 ... +40 °С, влажность 90 % при 25 °С

Уровень отечественных (или точнее белорусских) осциллографов вполне соответствует среднему мировому уровню таких приборов. В этом нетрудно убедиться из описания наиболее массовых зарубежных моделей современных аналоговых осциллографов. Но по массогабаритным показателям и внешнему виду наши приборы проигрывают лучшим образцам осциллографов зарубежных фирм.

4.3.2. Современные универсальные осциллографы фирмы Good Will

На российском рынке измерительной аппаратуры широко представлены универсальные аналоговые осциллографы серии GOS компании Good Will (Instek). Их параметры и даже конструкция близки к параметрам и конструкции описанных выше осциллографов. В связи с этим рассмотрим приборы этой серии обзорно. Подробно с ними можно ознакомиться на сайте фирмы «Прист» www.prist.ru, продающей эти приборы на российском рынке.

Наиболее простыми в серии являются сервисные осциллографы GOS-305 с полосой частот 5 МГц и GOS-310 (рис. 4.11) с полосой 10 МГц. Осциллограф GOS-310 имеет дополнительно синхронизацию телевизионным сигналом. Приборы имеют режим X-Y, хороший дизайн и высокое значение отношения качества/цена.

Приборы GOS-620/620FG — это 20-МГц двухканальные осциллографы с высокой чувствительностью в канале Y (1 мВ/дел). Приборы имеют синхронизацию телевизионным сигналом, вход Z и выход канала CH1. Модель GOS620FG (рис. 4.12) имеет встроенный функциональный генератор, генерирующий синусоидальный, прямоугольный и треугольный сигналы с частотами от 0,1 Гц до 1 МГц и полной амплитудой до 14 В при выходном сопротивлении 50 Ом. Входной импеданс приборов 1 МОм параллельно с емкостью 25 пФ. Размеры прибора 310×150×455 мм, масса 8,5 кг.

Технические характеристики осциллографов GOS620/620FG представлены в таблице, показанной на рис. 4.13. Более новая серия приборов GOS-622G и GOS-626G имеет экранную графику и курсорные измерения.

Двухканальные осциллографы GOS-635G (рис. 4.14) имеют полосу частот вертикального отклонения от — до 35 МГц, максимальную чувствитель-

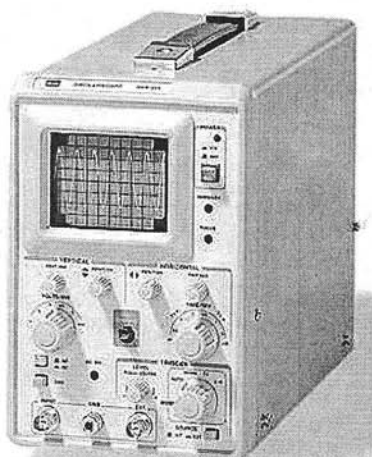


Рис. 4.11. Универсальный малогабаритный осциллограф GOS-310

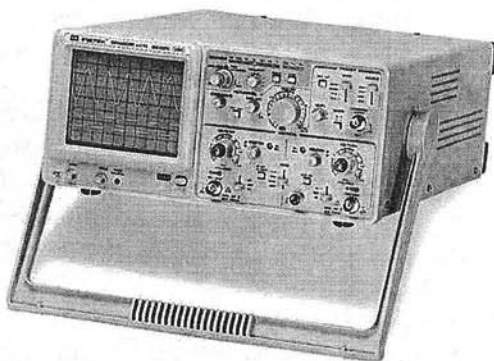


Рис. 4.12. Универсальный осциллограф GOS-620GF с встроенным функциональным генератором

Характеристики	Параметры	Значения
Канал вертикального отклонения	Полоса пропускания (-3 дБ) Козф. отклонения ($K_{откл.}$) Погрешность установки $K_{откл.}$ Регулировка $K_{откл.}$ Макс. входное напряжение Выход канала 1	0...20 МГц (0...7 МГц при усилении '5) 5 мВ/дел...5 В/дел (шаг 1-2-5), усиление '5 $\pm 3\%$ ($\pm 5\%$ при усилении '5) Плавное перекрытие в 2,5 раза 300 В (DC+AC пик, до 1 кГц) 20 мВ/дел на 50 Ом
Канал горизонтального отклонения	Козф. развертки ($K_{разв.}$) Погрешность установки $K_{разв.}$ Регулировка $K_{разв.}$ Режимы запуска развертки	0,2 мкс/дел...0,5 с/дел (шаг 1-2-5), растяжка '10 $\pm 3\%$ ($\pm 5\%$ при растяжке '10) Плавное перекрытие в 2,5 раза Автоколебательный, ждущий, ТВ
Функциональный генератор (GOS-620FG)	Частотный диапазон Форма выходного сигнала Выходной уровень Постоянное смещение Козф. гармоник Время нарастания/спада Асимметрия импульсов Выходное сопротивление	0,1 Гц...1 МГц (7 п/диапазонов, плавной регулировка) Синус, прямоугольник, треугольник До 14 В пик-пик, плавная регулировка ± 6 В $< 2\%$ (10 Гц...100 кГц) < 120 нс на 50 Ом $\pm 2\%$ (на 1 кГц) 50 Ом
Дополнительные возможности	Синхронизация X-Y вход Z-вход	Автовыбор синхросигнала Развертка внешним сигналом Модуляция яркости луча
Общие данные	ЭЛТ Напряжение питания Габаритные размеры Масса	8×10 дел (1 дел = 10 мм); 2 кВ 115/230 В ($\pm 15\%$), 50/60 Гц 310'150'455 мм 8,0 кг

Рис. 4.13. Технические характеристики осциллографов GOS620/620FG

ность 1 мВ/дел, синхронизацию телевизионным сигналом, вход канала Z, выход канала CH1, ряд дополнительных функций развертки.

Технические характеристики осциллографов серии GOS-6XX представлены в таблице рис. 4.15. Помимо осциллографов GOS-635G в ней представлены данные по родственным моделям GOS-652G/653G/658G.



Рис. 4.14 Универсальный 35-МГц осциллограф GOS-635G

Характеристики	Параметры	Значения
Канал вертикального отклонения	Полоса пропускания (-3 дБ) Коэф. отклонения ($K_{откл.}$) Погрешность установки $K_{откл.}$ Регулировка $K_{откл.}$ Задержка изображения (GOS-658G) Макс. входное напряжение Выход канала 1	GOS-622G/626G: 0...20 МГц (10 МГц – 1; 2 мВ/дел) GOS-635G: 0...35 МГц (10 МГц – 1; 2 мВ/дел) GOS-652G/653G/658G: 0...450 МГц (15 МГц – 1; 2 мВ/дел) 1 мВ/дел...5 В/дел (шаг 1-2-5) $\pm 3\%$ ($\pm 5\%$ при 1 мВ/дел...2 мВ/дел) Плавное перекрытие в 2,5 раза Возможно наблюдение переднего фронта 400 В (DC+AC пик, до 1 кГц) 50; 100 мВ/дел на 50 Ом
Канал горизонтального отклонения	Коэф. развертки А (основная) Коэф. развертки В (задержанная) (GOS-653G/658G) Погрешность установки $K_{разв.}$ Регулировка $K_{разв.}$ Задержка запуска развертки В Режимы запуска развертки Режимы работы разверток	0,1 мкс/дел...0,5 с/дел (шаг 1-2-5), растяжка $\times 10$ 0,1 мкс/дел...0,5 мс/дел (шаг 1-2-5), растяжка $\times 10$ $\pm 3\%$ ($\pm 5\%$ при растяжке $\times 10$) Плавное перекрытие в 2,5 раза 1 мкс...5 мс, плавная регулировка Однократный (GOS-626G/652G/653G/658G), автоколебательный, ждущий, ТВ А, А подсвеченная В, В
Курсорные измерения (GOS-626G/658G)	Функции Разрешение Диапазон эфф. измерений Погрешность измерения	DV, DV%, DVdB, DT, 1/DT, DT%, Dj 1/25 деления По вертикали ± 3 дел, по горизонтали ± 4 дел $\pm 3\%$ в эффективном диапазоне
Дополнительные возможности	Синхронизация X-Y вход Z-вход Экранная графика	Автовывбор синхросигнала (2-кан. режим); регулировка стабильности запуска GOS-626G/653G: Автоустановка уровня Развертка внешним сигналом Модуляция яркости луча GOS-626G/658G
Общие данные	ЭЛТ Напряжение питания Габаритные размеры Масса	8×10 дел (1 дел = 10 мм); 12 мВ (65xG); 2 кВ 100/120/220/230В ($\pm 10\%$), 50/60Гц 310*150*455 мм 8,2 кг

Рис. 4.15. Технические характеристики осциллографов серии GOS-6XX

Новая серия четырехканальных двухлучевых осциллографов GOS-6000 содержит 30 МГц приборы GOS-6030/6031 и 50 МГц приборы GOS-6050/6051. Чувствительность приборов по вертикали от 1 мВ/дел до 20 В/дел. Приборы GOS-6031/6051 имеют расширенные возможности: курсорные измерения, 6-разрядный цифровой измеритель частоты, 10 установок памяти для записи осциллограмм. У всех приборов есть синхронизация телевизионным сигналом, выход канала CH1, вход канала Z, звуковая и ЖКИ-индикация. Размеры приборов 275x130x370 мм. На рис. 4.16 показан внешний вид осциллографов GOS-6030/6050. Пустое место на передней панели занято дополнительными органами управления приборов GOS-6031/6051.

Серия GOS-6112/6103/6103C — 100 МГц двухканальные осциллографы (рис. 4.17). В модель GOS-6103C встроен 6-разрядный частотомер. В GOS-6103/GOS-6103C предусмотрено 10 установок памяти. В приборах GOS-6103/GOS-6103C предусмотрена автоматическая установка оптимальной длительности развертки. У всех приборов имеются 7 режимов курсорных измерений, панель цифровых контрольных функций, светодиодные и звуковые индикаторы, телевизионная синхронизация, выход триггера, вход канала Z.

Наиболее широкополосными являются 200 МГц двухканальные осциллографы GOS-6200 (рис. 4.18) со встроенным 6-разрядным цифровым измерителем. Осо-

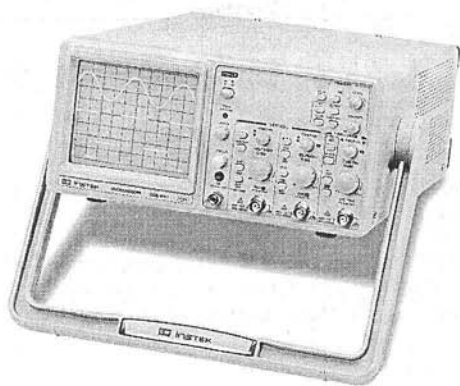


Рис. 4.16. Осциллографы универсальные GOS-6030/6050



Рис. 4.17. Универсальный 100 МГц осциллограф GOS-6103

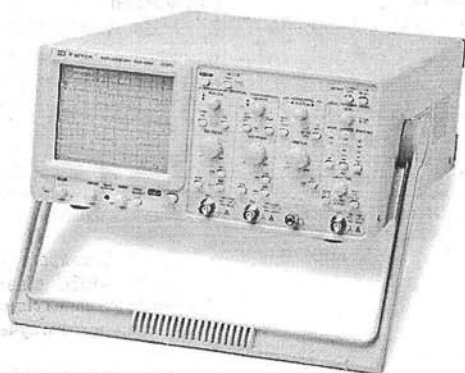


Рис. 4.18. Универсальный 200 МГц осциллограф GOS-6200

бенность осциллографов — возможность выделения из телевизионного сигнала различных систем (NTSC, PAL, SECAM) отдельных телевизионных строк. Есть 10 установок памяти, 7 видов курсорных измерений, панель установок цифрового мультиметра, звуковая и светодиодная индикация, выход триггера развертки, вход канала яркости Z.

Подробные технические характеристики осциллографов серий GOS-61XX/6200 представлены на рис. 4.19. Эти приборы являются самыми «мощными» среди аналоговых универсальных осциллографов фирмы Good Will Instruments.

4.3.3. Современные универсальные осциллографы серии АСК

Обширную номенклатуру на российском рынке осциллографов предлагает объединение АКТАКОМ. Под этой маркой представлены производители измерительной техники из России и ряда зарубежных стран. От АКТАКОМ на рынок поступает ряд аналоговых осциллографов серии АСК с типовыми для этого класса устройств возможностями. Данные о них можно найти на сайте этого объединения www.aktacom.ru и на сайте фирмы «ЭЛИКС», осуществляющей продажу осциллографов (www.eliks.ru/product/kip/oscall.htm).

4.3. Современные отечественные универсальные осциллографы

Характеристики	Параметры	Значения
Канал вертикального отклонения	Полоса пропускания (-3 дБ) Козф. отклонения ($K_{откл.}$) Погрешность установки $K_{откл.}$ Регулировка $K_{откл.}$ Задержка изображения Макс. входное напряжение	GOS-61xx: 0...100 МГц (20 МГц - 2 мВ/дел) GOS-6200: 0...200 МГц (20 МГц - 2 мВ/дел) Ограничение полосы пропускания – до 20 МГц 2 мВ/дел...5 В/дел (шаг 1-2-5) $\pm 3\%$ при размере изображения 5 дел. Плавное перекрытие в 2,5 раза Возможно наблюдение переднего фронта 400 В (DC+AC пик, до 1 кГц)
Канал горизонтального отклонения	Козф. развертки А (основная) Козф. развертки В (задержанная) Погрешность установки $K_{раз.}$ Регулировка $K_{раз.}$ Задержка запуска развертки В Режимы запуска разверток Режимы работы разверток	GOS-61xx: 50 нс/дел...0,5 с/дел (1-2-5), растяжка '10 GOS-6200: 20 нс/дел...0,5 с/дел (1-2-5), растяжка '10 GOS-61xx: 50 нс/дел...50 мс/дел (1-2-5), растяжка '10 GOS-6200: 20 нс/дел...50 мс/дел (1-2-5), растяжка '10 $\pm 3\%$ ($\pm 5\%$ при растяжке '10) Плавное перекрытие в 2,5 раза 1 мкс...5 с, плавная регулировка Автоколебательный, ждущий, ТВ А, А и В, В
Курсорные измерения	Функции Разрешение Диапазон эфф. измерений Погрешность измерения	ΔV , $\Delta V\%$, $\Delta V/\Delta t$, Δt , $1/\Delta t$, $\Delta t\%$, $\Delta \phi$ 1/100 деления По вертикали ± 3 дел, по горизонтали ± 4 дел $\pm 3\%$ в эффективном диапазоне
Автоматические измерения (GOS-6103C/6200)	Функции Частотный диапазон Формат индикации Погрешность измерения	f, T, t, (t/T) $\times 100\%$ (коэф. заполнения) 50 Гц...100 МГц (6103C); 200 МГц (6200) 6 разрядов $\pm 0,01\%$ (1 кГц...100/200 МГц), $\pm 0,05\%$ (50 Гц...1 кГц)
Дополнительные возможности	Синхронизация Блок выделения ТВ строк (GOS-6200) Автоустановка X-Y вход Z-вход Экранная графика Сохранение профилей Блокировка лицевой панели	Регулировка стабильности запуска NTSC, PAL, SECAM GOS-6200: В/дел, с/дел, уровень синхросигнала GOS-6103/6103C: с/дел Развертка внешним сигналом Модуляция яркости луча Да Запись/считывание до 10 профилей (кроме 6112) Да
Общие данные	ЭЛТ Напряжение питания Габаритные размеры Масса	8 \times 10 дел (1 дел = 10 мм); 16 кВ; 12 кВ (6112) 100В/120В/230В ($\pm 10\%$), 50/60 Гц 310'150'455 мм 9,0 кг

Рис. 4.19. Технические характеристики осциллографов серий GOS-61XX/6200

Параметры и возможности осциллографов серии АСК вполне соответствуют современному уровню развития этих приборов. Следует отметить элегантный внешний вид приборов, особенно младших моделей. У них часто используются цветные детали передней панели. Такие приборы выглядят изящно и ярко на фоне уныло серых измерительных приборов. Впрочем, внешний вид не дает им каких либо преимуществ в отношении технических характеристик и параметров этих приборов. Они вполне обычные. В связи с этим ограничимся приведением лишь самых общих характеристик этих приборов. Ниже представлены данные об этих приборах, находящихся широкое применение в службе сервиса, в промышленности и в системе образования. Приборы внесены в Государственный реестр РФ СИ.

Приборы младшей группы — серии АСК-1021 это «стандартные» аналоговые осциллографы, так сказать «без особых претензий». Как отмечалось, приборы этого класса относят к сервисным осциллографам.

АСК-1021

Аналоговый осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 25 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,1 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 14 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ. Режимы синхронизации: автоколебательный, ждущий, телевизионный; источники синхронизации СН1, СН2, сеть, внешний. Дополнительные функции: Z-вход, задержка развертки. Питание: 220 В; габариты: 324×132×398 мм; масса 7,6 кг

А вот приборы серии АСК1051/1052/1053 — это уже осциллографы с рядом дополнительных функций и средств измерений.

АСК-1051

Аналоговый осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 50 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,1 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 5,8 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ. Режимы разверток: автоколебательный, ждущий, телевизионный, X-Y. Источники синхронизации: СН1, СН2, сеть, внешний. Дополнительные функции: встроенный мультиметр, измерение ВАХ радиокомпонентов, Z-вход, задержка развертки; питание: 220 В; габариты: 324×132×398; масса 7,8 кг Этот прибор по существу представляет собой целую измерительную лабораторию.

АСК-1052

Аналоговый осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 50 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,1 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 5,8 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ. Режимы разверток: автоколебательный или ждущий, телевизионный, X-Y. Источники синхронизации: СН1, СН2, сеть, внешний. Дополнительные функции: курсорные измерения, задержка развертки. Питание: 220 В; габариты: 324×132×398; масса 8,5 кг

АСК-1053

Аналоговый осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 50 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,1 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 5,8 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ. Режимы разверток: автоколебательный или ждущий, телевизионный, X-Y. Источники синхронизации: СН1, СН2, сеть, внешний. Дополнительные функции: выделение сигналов яркости, цветности, высокочастотной насадки, любой из 625 строк полного ТВ-сигнала, задержка развертки. Питание: 220 В; габариты: 324×132×398; масса 8,5 кг. Этот прибор особенно удобен для исследования и разработки различных телевизионных систем и устройств.

Новая серия приборов АСК-2XXXX это самые современные приборы с целым набором средств автоматизированных вычислений [27]. Они имеют множество дополнительных функций, присущих и приборам ряда других марок:

- выполнение удобных и точных курсорных измерений;
- отображение результатов измерений и настроек прибора на экране ЭЛТ;
- работа в режиме цифрового запоминания осциллограмм и самописца;
- удобное кнопочное управление с цифровым вводом информации;
- наличие интерфейсов для связи с персональным компьютером.

Приборы серии АСК-2XXXX дают эти возможности при более широкой полосе частот и при меньшей потребляемой мощности. Серия начинается с обычного 60-МГц осциллографа с минимумом дополнительных функций.

АСК-21060

Аналоговый осциллограф (рис. 4.20): 2 канала, полоса пропускания 60 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, максимальное входное напряжение 250 В, время установления 5,8 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ; режимы разверток: автоколебательный, ждущий, телевизионный, сложение сигналов ADD, X-Y; источники синхронизации: CH1, CH2, сеть, внешний; дополнительные функции: задержка развертки; Z-вход; питание: 220 В; габариты: 320×140×430; масса 7,7 кг.

Три следующих прибора — самые современные 100-МГц осциллографы с рядом дополнительных средств и функций. Среди них особо следует отметить курсорные измерения, облегчающие выполнение измерений путем отсчетки характерных уровней осциллограмм с помощью курсорных пунктирных линий, которые можно перемещать по экрану. Соответствующие параметры линий отображаются в виде цифр на экране. В этих приборах в выходных каскадах применены каскодные схемы с резистивной нагрузкой (без высокочастотной коррекции) на сравнительно низковольтных транзисторах. Это обеспечивает получение расчетного значения времени нарастания и времени установления в 3,5 нс (у некоторых осциллографов других фирм из-за «звона» переходной характеристики время установления заметно превышает время нарастания).

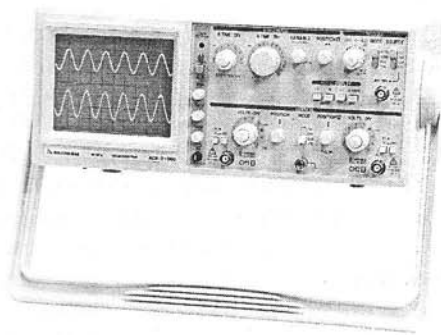


Рис. 4.20. Аналоговый осциллограф АСК-21060

АСК-21100

Аналоговый осциллограф (рис. 4.21): 4 канала, полоса пропускания 100 МГц, ЭЛТ 8×10 см, чувствительность 2 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,05 мкс/дел...0,5 с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 3,5 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ. Режимы разверток: автоколебательный, ждущий, телевизионный, однократный, сложение сигналов ADD, X-Y. Источники синхронизации: CH1, CH2, сеть, внешний. Дополнительные функции: автоматическая установка настроек осциллографа, квазиэлектронное управление, курсорные измерения, задержка развертки Z-вход. Питание: 220 В; габариты: 328×153×392; масса 8 кг. Отличительная особенность данного прибора — импульсный блок питания, позволивший уменьшить габариты и массу осциллографа. При этом обеспечивается работа при изменении напряжения сети от 90 до 250 В без каких либо переключений.

Осциллограф АСК-21100 имеет встроенный микропроцессор. Он позволил реализовать функцию Autotest, обеспечивающую автоматическую установку наиболее подходящих режимов работы при наблюдении сигналов с неизвестными параметрами. Для переключения режимов работы осциллографа используются реле с практически идеальными контактами. Это, в частности, обеспечило получение

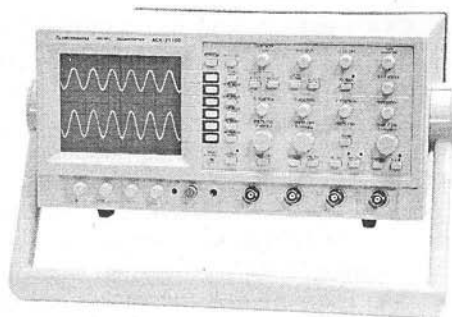


Рис. 4.21. Аналоговый осциллограф АСК-21100

монотонной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) до 100 МГц с плавным спадом до -3 дБ. В приборе применена высококачественная и высокочувствительная ЭЛТ 150СВ31 фирмы TOSHIBA.

Экран осциллографа АСК-21100 (рис. 4.22) выполняет три основные функции: представление осциллограмм (основная часть экрана), вывод результатов курсорных вычислений (снизу экрана) и контроль за режимами работы осциллографа (справа экрана). Благодаря этому удалось резко сократить число надписей у органов управления осциллографом, особенно цифровых. Для управления осциллографом используются высоконадежные кнопки без фиксации и ручки типа энкодеров, называемых также «Шатлами». Каждая манипуляция сопровождается звуковым сигналом, который можно выключить. Для переключений режимов работы используются электромеханические реле, обеспечивающие резкое снижение помех и наводок на сигнальные цепи.

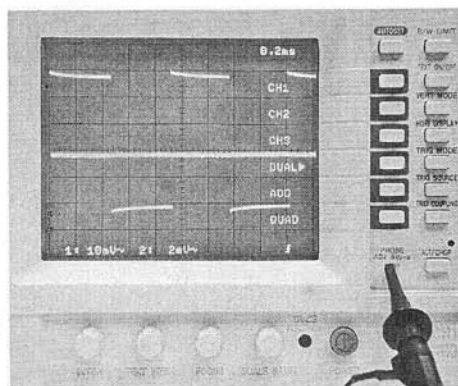


Рис. 4.22. Экран осциллографа АСК-21100

ACK-21102

Аналоговый осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 100 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 2 мВ/дел...5 В/дел, 0,1 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 250 В, время установления 3,5 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ; режимы разверток: автоколебательный, ждущий, телевизионный, сложение сигналов ADD, X-Y; источники синхронизации:

CH1, CH2, сеть, внешний; дополнительные функции: задержка развертки, Z-вход; питание: 220 В; габариты 320×140×430; масса 8,5 кг

АСК-21103

Аналоговый осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 100 МГц, ЭЛТ 8×10 см, чувствительность 2 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,05 мкс/дел...0,5с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 3,5 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ; режимы разверток: автоколебательный, ждущий, телевизионный, однократный, сложение сигналов ADD, X-Y; источники синхронизации: CH1, CH2, сеть, внешний; дополнительные функции: автоматическая установка режимов работы, квазиэлектронное управление, курсорные измерения, задержка развертки, Z-вход; питание: 220 В; габариты: 328×153×392; масса 8 кг

Прибор АСК-24020 — это типичный сервисный осциллограф. Но он имеет отличительную особенность — встроенный функциональный генератор. Это позволяет использовать прибор для углубленного анализа сигналов и испытания радиоэлектронных схем.

АСК-24020

Аналоговый осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 20 МГц, ЭЛТ 8×10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,2 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 250 В, время установления 17,5 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ; режимы синхронизации: автоколебательный, ждущий, телевизионный; источники синхронизации CH1, CH2, Сеть, внешний; дополнительные функции: задержка развертки; функциональный генератор 0,1 Гц...1 МГц; питание: 220 В; габариты: 320×140×430; масса 7,4 кг.

Все осциллографы серий АСК-1XXX и АСК-2XXXX имеют входной импеданс 1 МОм/25 пФ, возможность пятикратного увеличения чувствительности по вертикали, ручки выбора режимов работы вертикального тракта, инверсию сигнала в канале CH2, работу в режиме X-Y, дополнительный выход канала CH1, фиксированное (с шагом 1, 2 и 5) и плавное изменение развертки, 10-кратное увеличение скорости развертки, запуск развертки положительным или отрицательным перепадами, различные источники синхронизации развертки и различные режимы ее работы (в том числе с запуском от телевизионного сигнала).

Некоторые модели приборов серии АСК, например АСК-21100, имеют ярко выраженные черты аналого-цифровых осциллографов, поскольку содержат встроенный микропроцессор и цифровые измерительные приборы. При этом, имея заметно расширенные функциональные возможности, они сохраняют все преимущества аналоговых осциллографов и, прежде всего, отсутствие специфических искажений, связанных с дискретизацией наблюдаемых сигналов.

Порт RS-232, имеющийся в этих приборах, обеспечивает простую связь с компьютером, что позволяет (при наличии соответствующего программного обеспечения) вести компьютерную обработку результатов измерений и осциллограмм. Таким образом, на основе этих приборов можно создавать компьютеризированные лаборатории. К сожалению, приборы, хотя они и дешевле подобных осциллографов других фирм, нельзя отнести к дешевым и широко доступным радиолюбителям. Они ориентированы на серьезные применения, например в научных исследованиях или отладке сложной электронной аппаратуры в промышленности.

4.3.4. Осциллографы АКТАКОМ-IWATSU Hi-End класса

Новейшее поколение аналоговых осциллографов японской фирмы IWATSU на российском рынке представляет объединение АКТАКОМ. Отличительные особенности этих приборов:

- Высочайшее японское качество
- Высокие технические характеристики на мировом уровне
- Локализация под Россию и сертификация
- Высокий уровень ремонтного сервиса
- Гарантия на 25 месяцев

Эти осциллографы наглядно демонстрируют, что несмотря на бурное развитие цифровой осциллографии, аналоговое осциллографирование и не думает сдавать свои позиции и продолжает развиваться бурными темпами. Современные аналоговые осциллографы высочайшего класса (их, по аналогии с электроакустическими аппаратами, именуют Hi-End) имеют перед цифровыми запоминающими осциллографами (ЦЗО) ряд принципиальных преимуществ:

- Простое обращение с прибором
- Повышенная степень достоверности отображения сигнала
- Легкость работы с неизвестным сигналом
- Корректное отображение сигнала на высоких частотах из-за отсутствия эффектов квантования и стробоскопического эффекта
- Высокая скорость обновления экрана — от 200 тысяч до миллиона осциллограмм в секунду
- Отображение полной информации (в обычных ЦЗО из-за большого времени обработки и вывода информации теряется до 99% времени наблюдения)
- Быстрый захват сигнала для его представления
- Повышенное разрешение и отсутствие его ограничений, связанных с квантованием сигналов (у большинства ЦЗО разрядность квантования равна 8, так что сигнал представляется всего 256 ступеньками, что явно заметно при его растяжении по вертикали)
- Наличие эффекта послесвечения, позволяющее накапливать множество осциллограмм на экране трубки.

В осциллографах АКТАКОМ-IWATSU ACK-8104 и 8064 применена конвертирующая ЭЛТ со сканирующей ПЗС-матрицей. Устройство этой малогабаритной трубки показано на рис. 4.23. Изображение создается и запоминается не на внешнем, а специальном внутреннем экране трубки. Затем с помощью световолоконной матрицы он переносится на прибор с зарядовой связью (ПЗС), который является хорошо проработанным устройством для преобразования оптического изображения в телевизионный сигнал (достаточно отметить массовое применение такого прибора в цифровых фотокамерах и в видеокамерах). Полученный сигнал используется как входной для жидкокристаллического индикатора большого размера с высоким (640×480 точек) разрешением. В целом это уменьшает габариты осциллографов и повышает качество изображения осциллограмм.

Выпускаемые на основе этой трубки сверхширокополосные аналоговые 4-канальные осциллографы АКТАКОМ-IWATSU ACK-8104 и 8064 (рис. 4.24) имеют полосу частот, соответственно, до 1 и 0,6 ГГц и ультравысокую скорость записи, достигающую 10 дел/нс и развертку с 15 линиями. Скорость захвата осцилло-

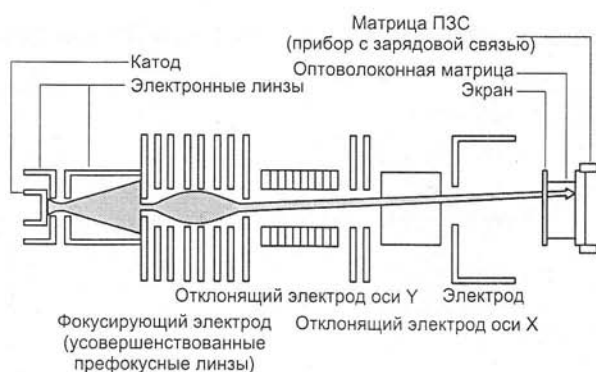


Рис. 4.23. Устройство конвертирующей ЭЛТ со сканирующей ПЗС-матрицей

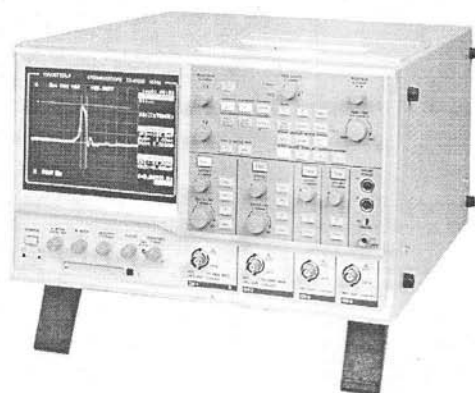


Рис. 4.24. Внешний вид сверхширокополосных осциллографов АКТАКОМ-IWATSU ACK-8104 и 8064

рамм достигает 1 млн в с. Яркость изображения при осциллографии одиночных и редко повторяющихся импульсов в 1000 раз больше, чем у осциллографов с обычными ЭЛТ, что делает осциллографы АКТАКОМ-IWATSU ACK-8104 и 8064 незаменимыми при исследовании в ядерной технике, где важна регистрация даже одиночных быстротекущих процессов.

Технические характеристики осциллографов АКТАКОМ-IWATSU ACK-8104 и 8064 представлены в таблице рис. 4.25. Они дают достаточно полное представление об этих уникальных приборах.

Уникальную технику высокоскоростного запоминания осциллограмм иллюстрирует рис. 4.26. Он заодно дает наглядное представление о форме представления осциллограмм и результатов вычислений на экране осциллографа. Хотя данные осциллографы рекламируются как аналоговые, они имеют все возможности аналого-цифровых осциллографов.

Осциллографы АКТАКОМ-IWATSU ACK-8104 и 8064 способны отлавливать и представлять короткие и редко повторяющиеся импульсы — рис. 4.27. При этом они обеспечивают уникально высокую яркость. Осциллограмма таких импульсов на три порядка превосходит ту, что дают осциллографы на обычных ЭЛТ.

Обширные возможности эти осциллографы открывают при исследовании телевизионных сигналов (рис. 4.28). Такие сигналы весьма сложны и представляют

Спецификация		АСК-8104	АСК-8064	АСК-7474	АСК-7404	
Дисплей	Тип	Цв. ЖК- дисплей	Цв. ЖК- дисплей	ЭЛТ	ЭЛТ	
	Размер	8x10 см	8x10 см	8x10см	8x10см	
Вертикальное отклонение	Ускор. напряжение			20 кВ	20 кВ	
	Подсветка шкалы	Да	Да	Да	Да	
	ADD/ALT/CHOP	Да	Да	Да	Да	
	Задержка	>20 нс	>20 нс	>20 нс	>20 нс	
	Каналы 1 и 2	Диапазон	5 мВ-5 В/дел	5 мВ-5 В/дел	2 мВ-5 В/дел	2 мВ-5 В/дел
	Точность	2 %	2 %	2 %	2 %	
	Плавная	~12.5 В/дел	~12.5 В/дел	~12.5 В/дел	~12.5 В/дел	
	Полоса пропускания	1 ГГц (50 Ом)	600 МГц(50 Ом)	470 МГц	400 МГц	
	Режимы входов	AC, DC, GND	AC, DC, GND	AC, DC, GND	AC, DC, GND	
	Импеданс	1 МОм/50 Ом	1 МОм/50 Ом	1 МОм/50 Ом	1 МОм/50 Ом	
Макс. напряжение (пик-пик)	250 В (1 МОм)	250 В (1 МОм)	400 В	400 В		
Фильтры	200 МГц, 20 МГц	200 МГц, 20 МГц	100 МГц, 20 МГц	100 МГц, 20 МГц		
Распознавание пробников	Да	Да	Да	Да		
Инвертирование Канала 2	Да	Да	Да	Да		
Захват пьедестала ТВ-сигнала	Да	Да	Да	Да		
Смещение	Да	Да	Да	Да		
Подстройка задержки в каналах K1 и K2	Да	Да	Да	Да		
Канал 3	Диапазон	100, 500 мВ/дел	100, 500 мВ/дел	100, 500 мВ/дел	100, 500 мВ/дел	
	Точность	2 %	2 %	3 %	3 %	
	Полоса	500 МГц	500 МГц	400 МГц	400 МГц	
	Режим входов	AC, DC	AC, DC	AC, DC	AC, DC	
	Импеданс	1 МОм	1 МОм	1 МОм	1 МОм	
	Распознавание пробников	Да	Да	Да	Да	
	Канал 4	Как в канале 3	Как в канале 3	Как в канале 3	Как в канале 3	
	Запуск развертки	Источник	K1, 2, 3, 4, Сеть	K1, 2, 3, 4, Сеть	K1, 2, 3, 4, Сеть	K1, 2, 3, 4, Сеть
		Режимы:	AC,DC,ФНЧ,ФВЧ	Да	Да	Да
		События: Номер, Длительность	Да	Да	Да	Да
ТВ-синхрониз:		HDTV	Да	Да	Да	
NTSC,PAL(SECAM)		Да	Да	Да	Да	
Выбор строки	Да	Да	Да	Да		
Горизонтальная развертка	А-развертка	Макс. развертка	2 нс/дел	5 нс/дел	5 нс/дел	
		Мин. развертка	200 нс/дел	200 нс/дел	500 нс/дел	
	Точность	2 %	2 %	2 %	2 %	
	В-развертка	Удержание	Да	Да	Да	Да
		Задержка запуска	Да	Да	Да	Да
	Макс. скорость	2 нс/дел	5 нс/дел	5 нс/дел	5 нс/дел	
	Мин. скорость	20 нс/дел	20 нс/дел	500 нс/дел	500 нс/дел	
	Точность	2 %	2 %	2 %	2 %	
	Вертикальное разделение трекер А и В	Да	Да	Да	Да	
		Двойная задержка	Да	Да	-	-
Режим ALT для А и В		Да	Да	Да	Да	
В в конце А		Да	Да	Да	Да	
Лупа времени	10 x	Да	Да	Да		
Макс. развертка	200 нс/дел	500 нс/дел	500 нс/дел	500 нс/дел		
Х-У	Полоса	10 МГц	10 МГц	2 МГц	2 МГц	
	Курсорные измерения	ΔV, Δt, 1/Δt	Да	Да	Да	
	Частотомер	Частотный диапазон/разрядность	1 ГГц/6 разряд	600 МГц/5 разряд	400 МГц/5 разряд	400 МГц/5 разряд
	Автоустановка	Развертки, синхронизация	Да	Да	Да	Да
	Сокр./вызов настроек	256	256	256	256	
	Яркий вход Z,	Полоса	5 МГц	5 МГц	5 МГц	5 МГц
	Выход сигнала	Канал 2 - полоса	500 МГц	300 МГц	200 МГц	200 МГц
	Видеовыход	Да	Да	-	-	
	Калибровка пробников	1 МГц / 0.6 В	Да	Да	Да	Да
	Питание пробников	Да	Да	Да	Да	
Питание	- от 100 В до 240 В	Да	Да	Да	Да	
	-100 В - 120 В/200 В - 240 В	-	-	-	-	
	-100, 110-120, 220, 230 В - 240 В	-	-	-	-	
	Частота сети	50 Гц - 60 Гц	50 Гц - 60 Гц	50 Гц -400 Гц	50 Гц - 400 Гц	
	Потребляем. мощность	200 ВА	200 ВА	120 ВА	120 ВА	
Размеры	Ш x В x Д (мм)	198x332x406	198x332x406	320x160x420	320x160x420	
Вес		10,0 кг	10,0 кг	8,5 кг	8,5 кг	
Станд. комплектация	Сетевой шнур, руководство по экпл. (1)	Да	Да	Да	Да	
	Предохранители	Да	Да	Да	Да	
	2 пробн. со считыванием	-	-	Да	Да	
	2 пробн. без считывания	-	-	-	-	
	Защитная крышка передней панели (1)	-	-	- сумка	- сумка	
Опция	Вход Z и выход K2	Да	Да	Да	Да	
		Да	Да	Да	Да	

Рис. 4.25. Технические характеристики осциллографов АКТАКОМ-IWATSU АСК-8104 и 8064

собой смесь импульсных и видеосигналов с большим числом строк и кадров. Система синхронизации осциллографов АКТАКОМ-IWATSU АСК-8104 и 8064 имеет расширенные возможности в выделении любых строк и кадров и в детальном ис-

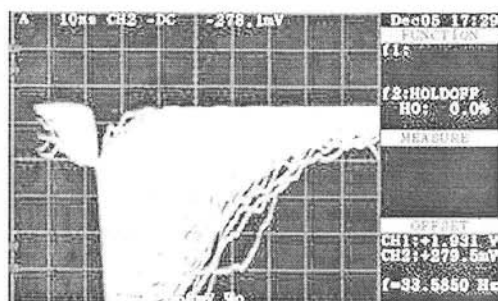


Рис. 4.26. Пример осциллографии импульсных сигналов с запоминанием множества осциллограмм

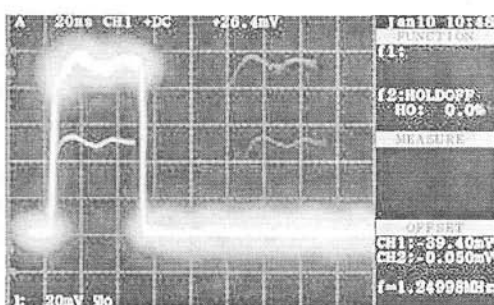


Рис. 4.27. Захват и представление одиночных и редко повторяющихся импульсов

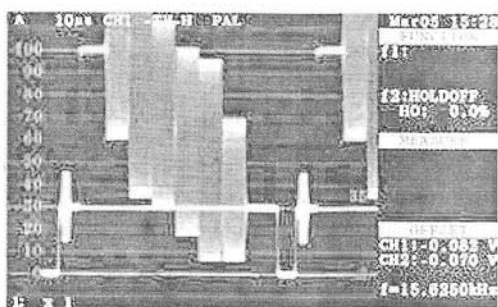


Рис. 4.28. Осциллография телевизионных сигналов



Рис. 4.29. Внешний вид широкополосных осциллографов АКТКОМ-IWATSU АСК-7474/7404/7304

следовании любого малого или большого участка телевизионного сигнала. Поддерживаются измерения с телевизионными сигналами различных стандартов, в том числе телевидения высокой точности с заметно расширенным спектром видеосигналов.

Серия 4-канальных приборов с 10 линиями развертки АСК-7474/7404/7304 имеют полосу частот вертикального отклонения 470/400/300 МГц. Внешний вид приборов представлен на рис. 4.29. Приборы имеют: две развертки (основная и задержанная для создания «лупы времени», быстрые функции установки, запоминание 10 установок, полная телевизионная синхронизация с выбором заданного кадра и строки, 5-разрядный встроенный частотомер и курсорные измерения.

Выпускаются и более простые аналоговые осциллографы АКТКОМ-IWATSU АСК-7203 (200 МГц), АСК-7103 (100 МГц), АСК-7042 (40 МГц) и АСК-7022 (20 МГц). Это типичные универсальные осциллографы с несколько расширенными возможностями.

4.3.5. Универсальные осциллографы фирмы HITASHI

Японская корпорация HITASHI — известный поставщик радиоэлектронного оборудования для армии Японии, является разработчиком и производителем ряда современных моделей электронных осциллографов. Ниже представлены краткие

данные о выпускаемых этой фирмой универсальных аналоговых осциллографах. Стоимость приборов примерно вдвое выше, чем у приборов Юго-Восточной Азии. Это плата за имя престижной фирмы и повышенную надежность приборов.

V-252

2 канала, 20 МГц, ускоряющее напряжение 2 кВ, максимальная чувствительность 1 мВ ($\times 5$), максимальная скорость развертки 100 нс ($\times 10$), автоматическое установление скорости развертки, автоматическая синхронизация, ТВ-синхронизация, прост в обращении.

V-552

2 канала, 50 МГц, максимальная скорость развертки 20 нс ($\times 10$), максимальная чувствительность 1 мВ ($\times 5$), ТВ-синхронизация, ДС-смещение, растяжка развертки.

V-555

2 канала, 50 МГц, максимальная скорость развертки 20 нс ($\times 10$), максимальная чувствительность 1 мВ ($\times 5$), ТВ-синхронизация, ДС-смещение, растяжка развертки, курсорные измерения.

V-695

2 канала, 60 МГц, задержка развертки, частотомер, максимальная скорость развертки 5 нс ($\times 10$), максимальная чувствительность 2 мВ, автоматическое установление скорости развертки и уровня синхронизации, замок синхронизации, курсорные измерения.

V-1560

2 канала, 100 МГц, задержка развертки, максимальная скорость развертки 5 нс ($\times 10$), максимальная чувствительность 2 мВ, частотомер, автоматическая установка скорости развертки и уровня синхронизации, замок синхронизации, ТВ-синхронизация, курсорные измерения. Входной импеданс прибора 1 МОм/23 пФ. Размер экрана трубки 15 см, габариты 275×130×360 мм, вес около 6 кг, потребляемая мощность не более 40 Вт.

V-1565

2 канала, 100 МГц, задержка развертки, максимальная скорость развертки 5 нс ($\times 10$), максимальная чувствительность 2 мВ, частотомер, автоматическая установка скорости развертки и уровня синхронизации, замок синхронизации, ТВ-синхронизация, курсорные измерения.

V-1585

4 канала, 100 МГц, задержка развертки, максимальная скорость развертки 5 нс ($\times 10$), максимальная чувствительность 2 мВ, частотомер, автоматическая установка скорости развертки и уровня синхронизации, независимая синхронизация А/В каналов, замок синхронизации, ТВ-синхронизация, курсорные измерения

Сводная таблица с параметрами осциллографов фирмы Hitachi представлена на рис. 4.30. С их данными можно познакомиться на сайте компании Эликс (его адрес был приведен выше).

4.3.6. Осциллографы фирмы PİNTEK

К сравнительно дешевым приборам из Юго-Восточной Азии относятся осциллографы тайваньской фирмы PİNTEK, появившиеся на российском рынке несколько лет назад. Они ориентированы на отладку электронного оборудования, ре-




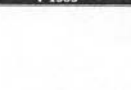
V-252	V-552/V-555	V-695/V-1565	V-1505
			
2-канальный аналоговый осциллограф	2-канальный аналоговый осциллограф	2-канальный аналоговый осциллограф	4-канальный аналоговый осциллограф
<ul style="list-style-type: none"> ЭЛТ с диагональю 6" Полоса пропускания 20 МГц 1 мВ/дел — макс. чувствительность от 0,2 мс/дел до 0,2 с/дел — диапазоны горизонтальной развертки Синхронизация (Auto, Norm, TV-N & TV-V) Запуск: внутренний, внешний, от линии 2 Пробника 2 года гарантии 	<ul style="list-style-type: none"> ЭЛТ с диагональю 6" Полоса пропускания 50 МГц 1 мВ/дел — макс. чувствительность 20 мс/дел...0,2 с/дел — диапазоны горизонтальной развертки 100 V DC — смещение по одному каналу Функция Alt/Magnify (увеличить) ЭЛТ с функцией «read-out» (V-555) Курсорные измерения напряжения и времени (V-555) Синхронизация (Auto, Norm, TV-N & TV-V) Запуск: внутренний, внешний, от линии 2 Пробника 2 года гарантии 	<ul style="list-style-type: none"> ЭЛТ с диагональю 6" Полоса пропускания: 60 МГц (V-695) 100 МГц (V-1565) Ограничение полосы 2 мВ/дел — макс. чувствительность Двойная развертка Автоматический выбор горизонтальной развертки 5 мс/дел...0,5 с/дел — диапазоны горизонтальной развертки Режимы отображения: А-развертка, В-развертка или А/В попеременно ЭЛТ с функцией «read-out» Курсорные измерения для напряжения, времени и частоты Встроенный 4-разрядный частотомер Синхронизация (Auto, Norm, Single, TV-N & TV-V) Функция Trigger Lock Цифровое хранение записки Запуск: внутренний, внешний, от линии 2 Пробника 2 года гарантии 	<ul style="list-style-type: none"> ЭЛТ с диагональю 6" 4 канала Полоса пропускания 100 МГц Ограничение полосы 2 мВ/дел — макс. чувствительность (каналы 1 и 2) 0,1 В/дел или 0,5 В/дел — макс. чувствительность (каналы 3 и 4) Двойная развертка Диапазоны горизонтальной развертки авто/гайфолд 5 мс/дел...0,5 с/дел — диапазоны горизонтальной развертки Режимы отображения: А-развертка, В-развертка или А/В попеременно Курсорные измерения для напряжения, времени и частоты Встроенный 4-разрядный частотомер Синхронизация А-развертки (Auto, Norm, Single, TV-N & TV-V) Синхронизация В-развертки (Auto & Norm) Функция Trigger Lock Цифровое хранение записки Запуск: внутренний (каналы от 1 до 4), внешний, от линии 2 Пробника 2 года гарантии
V-252 — недорогой 20 МГц аналоговый осциллограф, прекрасно подходит для учебных целей в школе, университетах и компаниях	V-552/V-555 — недорогие 50 МГц аналоговые осциллографы с простым управлением, хорошо подходят для электротехнических измерений	V-695/V-1565 — недорогие 60/100 МГц аналоговые осциллографы с простым управлением и рядом измерительных функций. Хорошо подходит для всех видов измерений в электронике, там, где не подходят цифровые осциллографы	V-1505 — недорогой 100 МГц 4-х канальный аналоговый осциллограф с простым управлением и рядом измерительных функций. Хорошо подходит для всех видов измерений в электронике, там, где не подходят цифровые осциллографы

Рис. 4.30. Технические характеристики аналоговых осциллографов фирмы Hitachi

монтаж и лабораторные исследования. Данные об осциллографах этой фирмы можно найти на ее Интернет-сайте www.pintek.com.tw/.

Самым простым прибором этой компании является сервисный аналоговый 20-МГц двухканальный осциллограф PS-200 (рис. 4.31). Он имеет экран 8×10 дел (1 дел = 1 см). Чувствительность прибора по вертикали от 5 мВ/дел до 5 В/дел, возможно ее увеличение в 5 раз. Погрешность измерения 3% и 5% (в режиме умножения чувствительности). Входной импеданс 1 МОм/25 пФ. Длительность развертки от 0,1 мкс/дел до 2 с/дел, погрешность временных измерений без растяжки развертки 3% и 6% при растяжке. Имеет обычные режимы работы с двумя каналами и обычными режимами запуска и синхронизации развертки. Модель PS-205 имеет встроенную линию задержки.

Основные данные нескольких аналоговых осциллографов фирмы PİNTEK представлены в следующей таблице:

Тип прибора	PS-200/205	PS-250/257	PS-605/608	PS-1000/1005
Полоса частот	0-20 МГц	0-25 МГц	0-60 МГц	0-100 МГц
Развертка	(0,1 мкс..1 с)/дел	(0,1 мкс..2 с)/дел	(0,1 мкс..1 с)/дел	(20нс..5 с)/дел

Остальные параметры этих приборов аналогичны приведенным для модели PS-200. Приборы выпускаются в стандартных корпусах и внешне отличаются числом ручек управления и цветом оформления передней панели. Приборы имеют размеры 324×398×132 мм и массу 8,5 кг.

В осциллограф PS-257 встроен цифровой мультиметр, измеряющий постоянное напряжение до 1000 В, переменное до 750 В и сопротивление до 50 МОм. Он позволяет также прозванивать цепи и проверять диоды. Осциллограф PS-705 имеет задержанную развертку — «лупу времени» и простейший характериограф для наблюдения вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов.

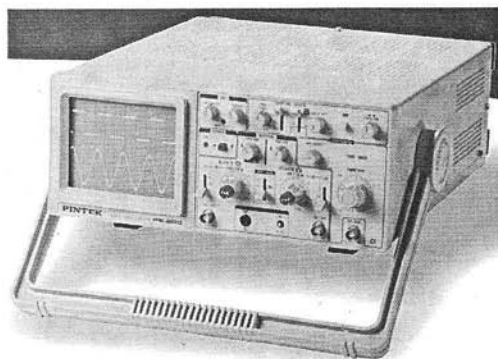


Рис. 4.31. Осциллограф PS-200 фирмы PINTEK

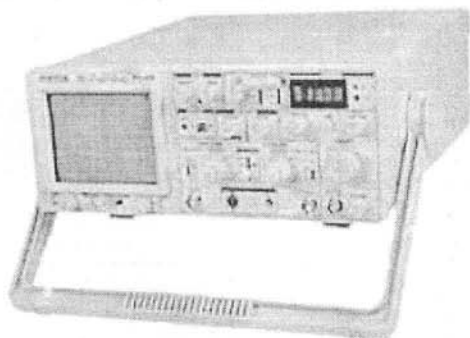


Рис. 4.32. Осциллограф PS-460 фирмы PINTEK с встроенным цифровым частотомером

В новейший 40-МГц двухканальный осциллограф PS-460 встроен цифровой частотомер (рис. 4.32). Прибор имеет чувствительность по вертикали до 1 мВ/дел и разрешение развертки в 10 нс. Частотомер с индикатором на красных светодиодах измеряет частоты от 0,1 Гц до 50 МГц с разрешением в 0.001 Гц и автоматическим выбором предела измерения. Чувствительность частотомера 1 мВ.

4.3.7. Аналоговые осциллографы фирмы EZ Digital

Южнокорейская компания EZ Digital получила известность своими разработками «бюджетных» аналоговых и цифровых осциллографов. Они представлены на российском рынке компаниями «Платан», «Чип и Дип» и др., и ныне пользуются заслуженной популярностью. Серия аналоговых осциллографов представлена приборами, в названии которых фигурируют буквы «OS». Приборы неприхотливы в работе, имеют эстетичный внешний вид и умеренную (в сравнении с осциллографами других фирм) стоимость.

Самым простым и наиболее затребованным является осциллограф OS-5020. Этот типичный сервисный осциллограф по цене (около 500 \$) вполне доступен для ремонтных мастерских и даже радиолюбителей. Внешний вид прибора показан на рис. 4.33. Оформление прибора вполне традиционное и достаточно строгое.

Параметры этого прибора тоже вполне обычные:

- полоса пропускания осциллографа: 20 МГц;
- чувствительность осциллографа 1 мВ/деление;
- высокочувствительная синхронизация;
- режим попеременной развертки;
- режим X-Y (фигуры Лиссажу) до 50 КГц;
- выход сигнала 1-го канала осциллографа;
- лупа времени: до 20 нсек/деление;
- синхронизация: обычная и кадров и строк ТВ сигналов;
- потребляемая мощность: 45 ВА;
- габаритные размеры: 316×143×406 мм;
- вес: 7,2 кг;
- комплект поставки: инструкция, предохранители 2 шт., шнур питания;
- опции: щупы 2 шт.

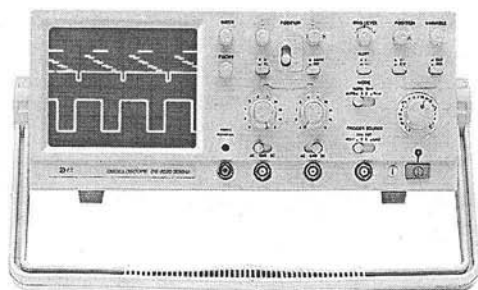


Рис. 4.33. Внешний вид аналогового осциллографа OS-5020

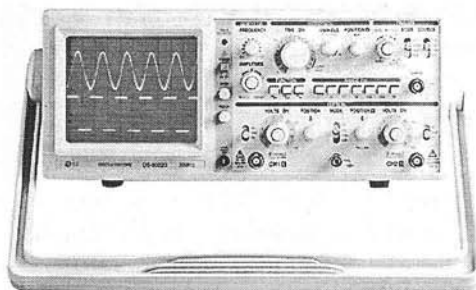


Рис. 4.34. Внешний вид аналогового осциллографа OS-5020G

Однако изюминки у этого простого прибора есть — это не только двухканальный, но и двухлучевой осциллограф. Последнее позволило исключить коммутатор входных сигналов, который применяется для отображения двух сигналов на экране однолучевой трубки. Коммутатор неизбежно создает специфические искажения, видимость которых зависит от соотношения частот сигналов и коммутации.

Но главное — прибор позволяет отображать на экране два некогерентных (с разной частотой повторения) сигнала. Эта возможность напрочь отсутствует у подавляющего большинства аналоговых сервисных осциллографов, имеющих на нашем рынке и придает осциллографам фирмы EZ Digital ярко отличительную черту. Лупа времени с разверткой до 20 нс также присуща далеко не всем осциллографам и позволят просматривать тонкие детали осциллограмм. Она очень полезна при исследовании сложных сигналов, например телевизионных, и процессов.

Режим X-Y ныне есть практически во всех сервисных осциллографов. Он позволяет наблюдать фигуры Лиссажу, измерять частоты и фазы сигналов и строить на основе осциллографа простые характериографы для наблюдения на экране вольтамперных характеристик различных электронных приборов, например диодов и транзисторов. Правда, для ослабления фазовых искажений частотный диапазон в этом режиме ограничен частотами до 50 кГц.

Осциллографы OS-5020G (рис. 4.34) имеют дополнительно встроенный функциональный генератор с частотами до 1 МГц. Он генерирует синусоидальные, прямоугольные и треугольные сигналы, позволяющие испытывать различные электронные цепи и устройства. Другие характеристики этого прибора аналогичны приведенным выше для осциллографа OS-5020. Очень удобны такие приборы для образовательных учреждений при постановке лабораторных работ по обработке сигналов. При этом осциллограф заменяет два прибора и занимает на рабочем столе меньше места, чем отдельно эти приборы.

Первая цифра в названии осциллографов фирмы EZ Digital указывают на номер серии, а остальные на полосу пропускания усилителей вертикального отклонения Y. Так, осциллограф OS-5040 имеет полосу частот 40 МГц, а OS-5060A (рис. 4.35) — 60 МГц. Дополнительно у последнего предусмотрена синхронизация развертки для сложных сигналов (в том числе телевизионных) и модуляция по оси Z (яркости).

Широкополосный 100-МГц осциллограф OS-5100 является базовой моделью серии OS-5100**. Он имеет превосходные функциональные характеристики, включая широкую полосу пропускания, высокую чувствительность, два независимых генератора развертки, задержку развертки и запуск по телевизионному сигналу.

Все это позволяет уменьшить ошибки измерений. Полезно наличие у приборов кабельной линии задержки в каналах вертикального отклонения. Такая задержка позволяет наблюдать фронт импульсов без пропадания его начальной части, связанного с задержкой запуска развертки.

Прибор имеет ЭЛТ с экраном 6 дюймов с внутренней флуоресцентной шкалой (8×10 делений, размер деления 1 см), что позволяет фотографировать наблюдаемую форму сигнала и получать высококачественные фотографии осциллограмм вместе с мерной сеткой. Трубка осциллографа имеет высокое (9 кВ) ускоряющее напряжение, что обеспечивает хорошую фокусировку и высокую яркость изображения. Есть корректировка угла наклона осциллограммы и регулируемая яркость.

Основные параметры осциллографа OS-5100:

- полоса пропускания на уровне — 3 дБ: 0 — 100 МГц и 0 — 20 МГц (2 мВ/дел.);
- режимы работы каналов: CH1, CH2, ALT, CHOP, ADD;
- режимы входа: DC (открытый вход) — AC (закрытый вход), GND (земля);
- время нарастания: менее 3.5 нс (менее 17.5 нс: 2 мВ/дел.);
- выход CH1: 20 мВ/дел при 50 Ом: 50 Гц — 30 МГц (–3 дБ);
- инверсия полярности: только для CH2;
- коэффициенты отклонения 2 мВ/дел — 5 В/дел, 11 калиброванных ступеней с шагом 1-2-5; плавная регулировка до 1:4.5 на каждой ступени;
- погрешность коэффициента отклонения в нормальном режиме: $\pm 3\%$;
- входной импеданс: 1 Мом параллельно с емкостью 25 пФ;
- максимальное входное напряжение: на входе прибора: 250 В (постоянное + амплитуда переменного); на входе пробника в соответствии с его спецификацией;
- задержка сигнала для просмотра фронта: кабельная;
- режимы развертки: A, A INT, B, X-Y, B TRIG'D;
- коэффициенты развертки A: 0.1 мкс/дел — 0,5 с/дел, 21 калиброванная ступень с шагом 1-2-5, плавная регулировка в пределах ступени до 2,5 раз;
- задержка изображения сигнала относительно начала развертки (HOLD OFF) регулируемая;
- коэффициенты развертки B: 0.1 мкс/дел — 10 мкс/дел, калиброванные ступени с шагом 1-2-5;
- задержка развертки B: от 1 дел. и менее до 10 дел. и более;
- растяжка развертки 10-кратная (максимальная скорость развертки 10 нс/дел.);
- погрешность коэффициента развертки: $\pm 3\%$, $\pm 5\%$ ($\times 10$);
- режим X-Y: полоса пропускания 0 Гц — 2 МГц, DC (открытый вход) 10 Гц — 2 МГц, AC (закрытый вход), разрешение для разности фаз X-Y не менее 3° (при частоте 0 — 100 кГц);
- калибратор для регулировки пробника: прямоугольные импульсы (меандр) с частотой около 1 кГц, амплитуда 0,5 В ($\pm 3\%$);

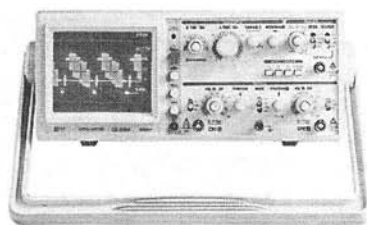


Рис. 4.35. Внешний вид аналогового осциллографа OS-5060A

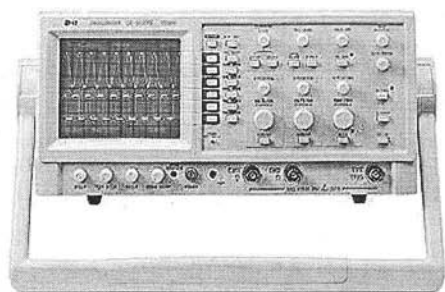


Рис. 4.36. Внешний вид аналогового осциллографа OS-5100BA

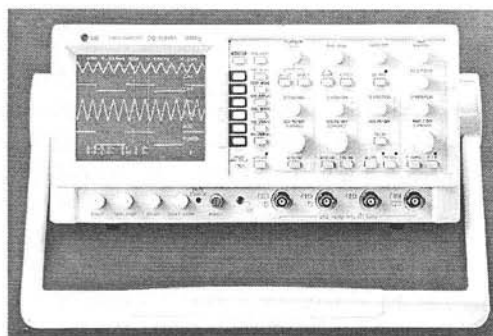


Рис. 4.37. Внешний вид аналогового осциллографа OS-5100RA

- масса 8.5 ± 1 кг;
- габаритные размеры: $320 \times 140 \times 430$ мм;
- диапазон рабочих температур: $+10^\circ\text{C} \sim +35^\circ\text{C}$ ($+50^\circ\text{F} \sim +95^\circ\text{F}$);
- относительная влажность при эксплуатации: 45% — 85%.

Широкополосные 100-МГц осциллографы OS-5100BA (рис. 4.36) и OS-5100RA относятся к наиболее продвинутому аналоговым осциллографам корпорации EZ Digital. Они имеют встроенный цифровой частотомер и средства для проведения курсорных вычислений повышенной точности.

Самым мощным осциллографом этого класса является четырехканальный 100-МГц осциллограф OS-5100RA (рис. 4.37), позволяющий одновременно наблюдать 8 сигналов (по 2 в каждом канале). Прибор выпускается корпорацией LG.

Он имеет следующие технические характеристики:

- число лучей и каналов: 4 канала 8 лучей;
- полоса пропускания осциллографа: 100 МГц;
- максимальное входное напряжение: 400 В;
- число независимых генераторов развертки: 2;
- НЧ/ВЧ фильтр для синхронизации развертки осциллографа;
- функция автоматической настройки для оптимального изображения по входному сигналу;
- синхронизация развертки для сложных сигналов (режим Hold-off);
- лупа времени (5 нсек/деление);
- точное измерение параметров сигнала (по меткам);
- частотомер (в режиме автоматической настройки);
- выход сигнала 1-го канала осциллографа;
- синхронизация кадров и строк ТВ сигналов;
- режим X-Y (фигуры Лиссажу) до 50 КГц;
- потребляемая мощность: 50 ВА;
- габаритные размеры: $328 \times 153 \times 392$ мм;
- вес: 8,0 кг;
- комплект поставки: инструкция, предохранители 2 шт., шнур питания;
- опции: щупы 2 шт.

Со всеми приборами поставляются щупы-пробники серии НР (рис. 4.38). Они отличаются полосой пропускания, обычно согласованной с полосой пропускания осциллографа, наличием или отсутствием делителя напряжения 1/10 и входными параметрами (входным сопротивлением и емкостью). Применение делителя позволяет увеличить входное сопротивление и уменьшить входную емкость, но уменьшает чувствительность осциллографа. Кроме того, щупы с делителем нужны для просмотра сигналов с большим уровнем — десятки и сотни В. Щупы оснащены рядом насадок, облегчающих их подключение к цепям электронных устройств.

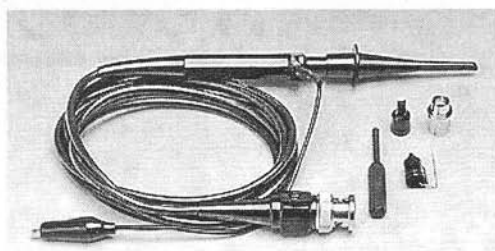


Рис. 4.38. Щуп НР-2040

Описанные выше приборы могут найти применение не только в службах ремонта и сервиса, но и в научных организациях и в образовательных учреждениях. К сожалению, сертификации Госстандарта РФ эти приборы пока не имеют.

Глава 5. Стационарные цифровые и стробоскопические осциллографы

Новейшие цифровые и стробоскопические стационарные осциллографы составляют цель описания в этой главе. В ней даны основы и принципы построения этих мощных приборов, описаны системы их параметров, основные возможности и специфические свойства — как достоинства, так и недостатки. Особое внимание уделено «бюджетным» настольным цифровым осциллографам. Даются сведения и о наиболее мощных Hi-End осциллографах с полосой исследуемых частот до 50—100 ГГц.

5.1. Цифровое представление аналоговой информации

5.1.1. Общие принципы построения цифровых осциллографов

Основной трудностью в создании аналоговых осциллографов является проектирование широкополосных и сверхширокополосных усилителей с высоким выходным напряжением, достаточным для возбуждения отклоняющих систем ЭЛТ. Между тем, чтобы получить изображение формы сигнала вовсе не обязательно усиливать его до уровня возбуждения пластин ЭЛТ в десятки и сотни В. Можно воспользоваться цифровым кодированием сигнала и использовать давно известные и широко используемые в вычислительной технике преобразования сигналов в цифровую форму и затем представление их на экранах низкочастотных осциллографов, ЭЛТ с магнитным отклонением — кинескопов и даже на экранах плоских жидкокристаллических дисплеев.

Функциональная схема *цифрового осциллографа* упрощенно показана на рис. 5.1. Исследуемый сигнал, пройдя делитель Д и аналоговый усилитель с малым выходным напряжением А, поступает на схему выборки СВ и *аналого-цифровой преобразователь* (АЦП). Для этого сигнал $y(t)$ представляется рядом равномерно распределенных во времени выборок y_1, y_2, \dots, y_N , которые представляются в цифровой форме и размещаются в устройстве памяти цифрового осциллографа. Это говорит о том, что такой осциллограф заодно является запоминающим. Такие приборы часто называют *цифровыми запоминающими осциллографами* (ЦЗО).

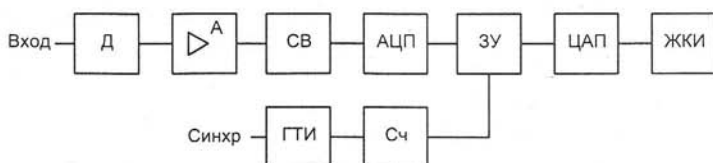


Рис. 5.1. Функциональная схема цифрового осциллографа

Новым важным параметром осциллографа является *объем памяти* (как общий, так и на канал или осциллограмму). Цифровые данные из памяти могут быть записаны на магнитные диски в виде файлов, храниться на них неограниченно долгое время и использоваться по мере необходимости.

Извлекаемые из памяти цифровые данные подаются на цифро-аналоговый преобразователь ЦАП и могут быть превращены вновь в аналоговый сигнал, но трансформированный во времени. Он отображается на ЭЛТ или ЖКИ. В случае применения цифрового ЖКИ, ЦАП может и не потребоваться. Для создания развертки обычно используется тактовый генератор и счетчик импульсов. Последний управляет адресами выборки цифровых данных из памяти.

Помимо объема памяти, другим важным параметром АЦП является частота его работы или *частота выборки*. В случае сложных форм исследуемых сигналов она должна быть в десятки, а иногда и в сотни раз выше частоты повторения периодического сигнала. В случае регистрации однократных сигналов с длительностью t_{Π} для его представления также надо иметь определенное число N отсчетов, так что период равномерного по времени квантования сигнала будет равен $dt = t_{\Pi}/N$, а частота квантования $f_k = 1/dt = N/t_{\Pi}$. Например, если сигнал с длительностью $t_{\Pi} = 0,1$ мкс представить 100 отсчетами, то получим $dt = 1$ нс и $f_k = 1$ ГГц. Чтобы исключить путаницу между обычной граничной частотой и частотой выборок последнюю обычно указывают в числе выборок в секунду, например Мвыб/с или Мв/с.

Этот пример наглядно иллюстрирует основную проблему в построении цифровых осциллографов, работающих в реальном масштабе времени, — необходимость в быстродействующих АЦП. Частота квантования сигналов АЦП должна хотя бы на порядок превышать максимальную частоту наблюдаемого сигнала, с тем, чтобы на самый короткий сигнал пришлось бы хотя бы десять отсчетов. При этом возможно исследование как однократных, так и периодических сигналов. В случае периодических сигналов возможна статистическая обработка отсчетов, например усреднением тем или иным способом и построение усредненной осциллограммы.

Промышленность выпускает множество АЦП и наиболее скоростные из них могут использоваться для создания цифровых осциллографов с эффективной полосой тракта Y до 50—100 МГц. Это означает, что АЦП для таких осциллографов должны иметь частоты дискретизации до 0,5—1 ГГц. Однако для получения более высоких частот нужны специализированные АЦП. Они создаются либо фирмами, разрабатывающими скоростные цифровые осциллографы, либо сторонними фирмами по заказу. Бесспорным лидером в разработке скоростных АЦП для цифровых осциллографов является корпорация Tektronix — мировой лидер в разработке осциллографических измерительных приборов. Она имеет свои уникальные АЦП с частотой квантования до 10—20 ГГц.

Другим важным параметром АЦП является их *разрядность* — число уровней квантования сигнала в двоичной форме. Подавляющее большинство АЦП для стробоскопических осциллографов имеет стандартную разрядность, равную 8. Это значит, что число различимых уровней сигнала составляет $2^8 = 256$. Этого вполне достаточно для общего представления синусоидального сигнала и большинства сигналов достаточно сложной формы. Однако при этом ступенчатость осциллограмм обычно заметна на глаз. Поэтому некоторые АЦП для цифровых осциллографов могут иметь большую разрядность. Эту разрядность не надо путать с разрядностью встроенного в осциллограф управляющего микропроцессора — она обычно равна 16 или даже 32 битам.

В конечной разрядности квантования (как по уровню, так и по времени) и кроется «ахиллесова пята» цифровой осциллографии. Например, если в осциллограмме сложного сигнала присутствуют мелкие детали, то цифровой осциллограф их может просто не заметить. Между тем аналоговый осциллограф с помощью растяжки изображения по вертикали и по горизонтали вполне в состоянии раз-

вернуть изображение детали на весь экран или на большую его часть. Впрочем, эта деталь будет воспроизводиться без искажений только в случае больших запасов по ширине полосы пропускания аналогового осциллографа.

И, наконец, третьим специфическим параметром цифровых осциллографов является *объем памяти* — общий и на одну осциллограмму. Большинство современных цифровых осциллографов способно хранить в памяти несколько осциллограмм и выводить их на экран своего дисплея. Чем выше объем памяти, тем больше информации об исследуемом процессе можно накопить в памяти и в дальнейшем изучить ее по частям или обработать встроенными в осциллограф средствами. Многие осциллографы поставляются со стандартной небольшой или средней памятью, но опционально она может быть наращена до большой памяти.

Не следует забывать, что три перечисленные выше параметра являются хотя и важными, но дополнительными. Кроме них цифровой осциллограф характеризуется рядом тех же параметров, что и аналоговые осциллографы. Прежде всего это относится к ширине полосы частот и времени нарастания канала Y, чувствительности и диапазона длительностей развертки.

Первые осциллографы с оцифровкой сигналов были построены на основе обычных аналоговых осциллографов с обычной ЭЛТ. Они обладали всеми параметрами, характерными для аналоговых осциллографов. Вначале цифровые методы использовались лишь для измерения параметров исследуемых сигналов с выводом их значений на экран дисплея или на отдельный светодиодный или жидкокристаллический индикатор. Затем стала использоваться трансформация высокоскоростных сигналов в низкоскоростные, отображаемые обычной ЭЛТ.

Такие приборы обычно называются *аналого-цифровыми осциллографами*, поскольку они содержат аналоговый тракт, задающий частотно-временные параметры осциллографа и цифровую часть. Они выпускаются и поныне, но этот выпуск постепенно сокращается из-за дороговизны таких приборов, их больших размеров и массы. В тоже время выпуск чисто цифровых приборов постоянно растет. Это связано с применением в новых моделях цифровых осциллографов малогабаритных плоских ЖКИ-дисплеев (нередко цветных), расширенными средствами цифровой обработки осциллограмм и возможностью уменьшения габаритов и веса приборов. Но цифровые осциллографы среднего класса стоят намного дороже аналоговых приборов, так что к числу общедоступных их не отнесешь.

Несколько слов следует сказать о стробоскопических осциллографах. Они похожи на цифровые (наличием блока выборки с запоминанием), но для построения трансформируемого по времени (растянутого) изображения используют отсчеты от разных периодов исследуемого сигнала, со сдвигом отсчетов от периода к периоду. Это означает, что такие осциллографы могут отображать только периодические сигналы с множеством повторяющихся периодов. Это крупный недостаток стробоскопических осциллографов. Исследовать однократные и редко повторяющиеся процессы они не могут. Кроме того, преобразований выборок в числа у таких осциллографов нет, так что к цифровым они не относятся.

В первое время после появления стробоскопических осциллографов только эти осциллографы были способны регистрировать повторяющиеся сигналы с временами нарастания и спада в доли наносекунды и частотами порядка 1 ГГц и выше [38]. Но сейчас ситуация в корне изменилась. Современные цифровые осциллографы в реальном масштабе времени способны отображать даже однократные сигналы с частотами их спектра до 10—20 ГГц, при этом максимальная фиксирован-

ная частота выборок достигает 50 ГГц. Стробоскопический эффект в таких осциллографах является скорее вредным, чем полезным явлением.

В связи с этим круг применения стробоскопических осциллографов заметно сузился. Основной областью их применения стало исследование сверхскоростных процессов с частотами выше 10–20 ГГц. Массовыми такие измерения уже не назовешь. В связи с этим описание стробоскопических осциллографов в данной книге сильно сокращено, хотя характеристики некоторых уникальных приборов этого класса отмечены. С основами построения стробоскопических осциллографов можно познакомиться по книгам [1, 11, 38].

5.1.2. О выборе числа отсчетов и восстановлении сигналов

Принципиально важным теоретически и практически является вопрос о выборе числа отсчетов сигнала для его преобразования в цифровую форму и дальнейшего восстановления сигнала по его отсчетам. Как часто надо делать равномерные выборки произвольного сигнала, чтобы после преобразования в цифровую форму, а затем снова в аналоговую была сохранена форма сигнала? Ответ на этот важный вопрос дает теорема об отсчетах или *теорема Котельникова* (за рубежом именуемая также теоремой Найквиста, теоремой об отсчетах и т. д.): «Если спектр сигнала $e(t)$ ограничен высшей частотой f_B , то он без потери информации может быть представлен дискретными отсчетами с числом, равным $2 \cdot f_B$ ». При этом сигнал восстанавливается по его отсчетам $e(k \cdot dt)$, следующим с интервалом времени $dt = 1/f_B$, с помощью фильтра, реализующего восстановление по формуле:

$$e(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e(k \cdot dt) \frac{\sin(\pi(t - k \cdot dt) / dt)}{\pi(t - k \cdot dt) / dt} \quad (5.1)$$

Для восстановления непрерывного сигнала по его выборкам достаточно располагать функцией $\text{sinc}(t) = \sin(t)/t$ с учетом ее особого значения $\text{sinc}(t) = 1$ при $x = 0$. Рис. 5.2 показывает пример дискретизации некоторого сигнала (нарастающая, а затем спадающая экспоненты) с периодом квантования dt и затем восстановления сигнала по выражению (5.1). Несмотря на малое число отсчетов (их 11) восстановленная форма сигнала близка к форме исходного сигнала.

Чтобы восстановить исходный сигнал по его отсчетам надо иметь численные значения их и значение интервала дискретизации dt . Все эти данные нетрудно хранить в запоминающем устройстве. Если увеличить dt при восстановлении сигнала по формуле (5.1) в k раз, то восстановленный сигнал без изменения формы будет растянут в k раз и его можно отобразить на экране достаточно низкочастотной ЭЛТ с простым низкочастотным усилителем.

Для восстановления сигнала не обязательно пользоваться фильтром на основе базиса Котельникова. Возможно применение и более простых фильтров, вплоть до обычного конденсатора или RC -фильтров нижних частот. Правда, при этом нужно несколько увеличивать частоту выборок.

Обычно низкочастотные сигналы воспроизводятся с тем же шагом, что и при их дискретизации. Это означает работу в реальном масштабе времени. Однако высокочастотные сигналы обычно воспроизводятся при умножении периода дискретизации. Этот переход иногда замечен и бросается в глаза. К тому же он реализуется различно в различных типах осциллографов [28–37], что часто служит причиной недоразумений при их сравнении. Наивысшими частотами, реализующими режим реального времени обладают осциллографы фирмы Tektronix, имеющие наиболее скоростные АЦП [32–34]. В последнее время им «на пятки» явно насту-

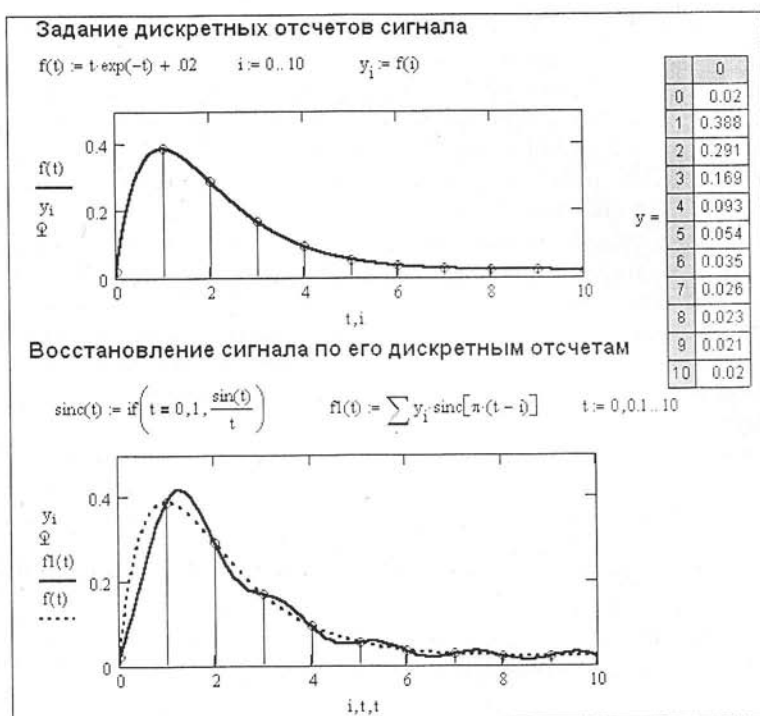


Рис. 5.2. Демонстрация дискретизации и восстановления сигнала в системе компьютерной математики Mathcad

пают осциллографы фирмы LeGroy [35—37], построенные на базе компьютерной платформы Intel-IBM с микропроцессорами Pentium 4.

Однако увеличение частоты работы АЦП является не единственным путем повышения временной разрешающей способности современных цифровых и аналогово-цифровых осциллографов. У некоторых моделей осциллографов для повышения разрешающей способности вместо равномерно распределенных отсчетов используются неравномерно распределенные отсчеты с периодом, уменьшающимся при высокой крутизне изменения входного сигнала. Другой путь — выполнение дискретизации при случайном положении отсчетов. Для высокочастотных периодических сигналов такая мера вместе со статистической обработкой (накоплением, усреднением и сглаживанием) нередко позволяет резко повысить разрешающую способность осциллографа во времени, упростить построение осциллографов и сделать их цену более доступной.

5.1.3. Об интерполяции в цифровых осциллографах

Итак, специфика цифровых осциллографов заключается в представлении реальных процессов их отдельными отсчетами. Для того чтобы получить изображение процесса не в виде отдельных точек, а непрерывных линий, нужно использовать тот или иной вид интерполяции. Напомним, что математически *интерполяция* является вычислением значений некоторой функции, заданной отдельными узловыми точками, в промежутках между узлами.

Простейшей является *линейная интерполяция*, которая сводится к соединению узловых точек отрезками прямых. Она легко реализуется математически и про-

граммно и потому часто применяется как в системах компьютерной математики, так и в программах для цифровых осциллографов, «рисующих» осциллограммы на экране осциллографа. Однако при отображении даже простых плавных процессов, например синусоидальных, получаемая из отрезков прямых осциллограмма выглядит очень грубой, если число отсчетов порядка 10 и менее. При большом числе отсчетов, порядка 100 и более, результат оказывается намного лучше и, вообще говоря, он перестает зависеть от примененной интерполяции.

Это дает повод разработчикам осциллографов переходить от более сложной интерполяции (см. ниже) к простой линейной интерполяции. К сожалению, не всегда ясно, в какой момент исследования происходит этот переход и на каком уровне — аппаратном или программном. Это служит причиной многих недоумений и недоразумений при сравнении весьма дорогостоящих аппаратов и даже служит причиной недоверия к результатам осциллографирования с помощью цифровых осциллографов.

В большинстве случаев (но вовсе не всегда) было бы желательно применять более тонкую интерполяцию, обеспечивающую плавность осциллограмм. Наиболее распространенной стала интерполяция вида $\sin(t)/t$. Почему именно она? Ответ на этот вопрос вполне очевиден из предшествующего раздела — имена эта интерполяция является базисом Котельникова и, согласно его теореме, обеспечивает точное восстановление сигнала. Есть правда небольшая проблема — суммирование в (5.1) от $-\pi$ до $+\pi$. Однако если спектр сигнала ограничен частотой f_{\max} , то можно использовать приближенную формулу интерполяции:

$$e(t) \cong \sum_i^{2f_{\max}T} e(i \cdot dt) \frac{\sin(2\pi f_{\max}(t - i \cdot dt))}{2\pi f_{\max}(t - i \cdot dt)}. \quad (5.2)$$

Эта формула и задает интерполяцию вида $\sin(t)/t$, применяемую в современных цифровых осциллографах. Эта интерполяция дает неплохие результаты в большинстве случаев осциллографирования достаточно плавных сигналов. Однако пафосней от всех бед и эта интерполяция служить не может. Причина кроется в том, что на самом деле точная зависимость сигнала в промежутках между узлами нам неизвестна, поэтому любая частная зависимость, например, линейная или $\sin(x)/x$, не может быть теоретически точной или даже предпочтительной для любых форм сигнала.

Пользователю цифровыми осциллографами не следует доверять рекламным сообщениям их разработчиков о предельной простоте работы с такими осциллографами — на самом деле это сложнейшие приборы и применять их надо не только грамотно, но и осторожно. Особенно это относится к применениям на пределах возможностей таких приборов, где результаты могут оказаться обескураживающими и просто недостоверными.

5.2. Современные аналого-цифровые осциллографы

5.2.1. Аналого-цифровые осциллографы АКТАКОМ

Достаточно большую номенклатуру аналого-цифровых осциллографов различных фирм поставляет на российский рынок объединение АКТАКОМ [27–29]. Ниже представлено краткое описание моделей этих осциллографов, взятое из сайта www.aktakom.ru. Внешний вид аналогово-цифровых осциллографов вполне традиционный, разве что приборы имеют несколько больше кнопок и ручек управления.

АСК-2021

Аналогово-цифровой осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 20 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,1 мкс/дел...0,5 с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 17,5 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ; режимы разверток: автоколебательный или ждущий, телевизионный, X-Y. Источники синхронизации: СН1, СН2, сеть, внешний; цифровой режим. Память 2 Кб/канал, разрешение по горизонтали 2048 точек на 10 делений, предзапись, одиночный запуск, самописец. Дополнительные функции: задержка развертки, выход на принтер; питание: 220 В; габариты: 324×132×398, масса 8,5 кг.

АСК-2031

Аналогово-цифровой осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 30 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,1 мкс/дел...0,5 с/дел, максимальное входное напряжение 400 В, время установления 11,7 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ. Режимы разверток: автоколебательный или ждущий, телевизионный, X-Y. Источники синхронизации: СН1, СН2, сеть, внешний; цифровой режим. Память 2 кб/канал, разрешение по горизонтали 2048 точек на 10 делений, предварительная запись осциллограмм, одиночный запуск, самописец. Дополнительные функции: задержка развертки, RS-232, выход на принтер. Питание 220 В/50 Гц; габариты: 324×132×398; масса 8,5 кг.

АСК-22020

Аналогово-цифровой осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 20 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,2 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 250 В, время установления 17,5 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 25 пФ. Режимы разверток: автоколебательный, ждущий, телевизионный, X-Y. Источники синхронизации: СН1, СН2, сеть, внешний; цифровой режим: память 1 кб/канал, разрешение по горизонтали 100 точек/дел., по вертикали — 25 точек/дел, усреднение, удержание, сортировка, предварительная запись, одиночный запуск, самописец. Дополнительные функции: курсорные измерения, задержка развертки, RS-232, выход на принтер, выход канала 1, Z-вход. Питание: 220 В; габариты: 320×140×430; масса 8,5 кг.

АСК-22060

Аналогово-цифровой осциллограф: 2 канала, полоса пропускания 60 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,2 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 250 В, время установления 5,8 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 30 пФ. Режимы разверток: автоколебательный, ждущий, телевизионный, X-Y. Источники синхронизации: СН1, СН2, сеть, внешний. Дополнительные функции: курсорные измерения, задержка развертки, RS-232, выход на принтер, выход канала 1, Z-вход. Питание: 220 В; габариты: 320×140×430; масса 8,5 кг.

5.2.2. Аналого-цифровые осциллографы фирмы Good Will

Корпорация Good Will Instruments Co, LTD выпускает несколько моделей аналого-цифровых осциллографов. Так, приборы типа GOS 6103/6103C/ имеют диапазон частот от 0 до 100 МГц. В приборе GOS 6103C имеется возможность авто-

матического измерения основных параметров исследуемого сигнала. Есть типичный набор возможностей такого рода приборов: курсорные измерения, 7 функций экранной графики, автоматическая установка длительности основной развертки, задержанная развертка, автоматическая установка уровня синхронизации, синхронизация телевизионным сигналом (покадровая и построчная), выход канала синхронизации, вход канала Z, светодиодная индикация и звуковое предупреждение. В приборах GOS 6103/8103C имеется память на 10 установок органов управления.

Еще более совершенный прибор GOS6200 имеет полосу пропускания от 0 до 200 МГц. Этот осциллограф двухлучевой и двухканальный, что позволяет одновременно наблюдать на экране 4 сигнала. Остальные возможности прибора аналогичны описанным для моделей GOS 6103/6103C/ 6112. Стоит отметить более совершенную синхронизацию от телевизионного сигнала, позволяющую выделить любую заданную строку и наблюдать сигналы основных телевизионных стандартов NTSC, PAL и SECAM.

Двухканальные аналогово-цифровые осциллографы GOS 6031/6030 (рис. 5.3) имеют полосу частот от 0 до 30 МГц и характеризуются высокой чувствительностью — до 1 мВ/дел. Модель GOS 6031 имеет дополнительно встроенный 6-разрядный цифровой частотомер. Есть дополнительный выход канала CH1 и возможность просмотра сигнала при основной и растянутой развертках. Остальные возможности прибора типичны для таких осциллографов: курсорные измерения, 7 функций экранной графики, автоматическая установка длительности основной развертки, задержанная развертка, автоматическая установка вида синхронизации, синхронизация телевизионным сигналом (покадровая и построчная), выход канала синхронизации, вход канала Z, светодиодная индикация и звуковое предупреждение.

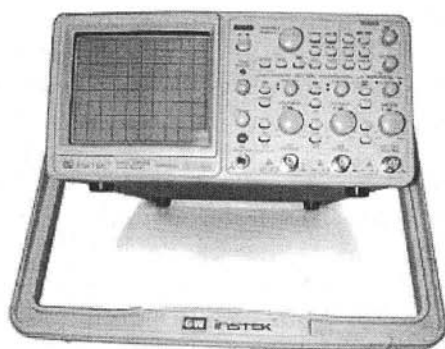


Рис. 5.3. Внешний вид аналого-цифровых осциллографов GOS 6031

5.2.3. Аналого-цифровой осциллограф C1-137/2

Ряд аналогово-цифровых приборов выпускает Минский приборостроительный завод. Аналого-цифровой осциллограф C1-137/2 построен на базе аналогового осциллографа C1-137 и предназначен для исследования формы электрических сигналов, измерения их амплитудно-цифровых параметров и визуального наблюдения в реальном времени или после записи в цифровую память. При этом существенно увеличиваются возможности прибора в плане качественного отображения без мерцаний медленно изменяющихся процессов или редко повторяющихся сигналов, «режим самописца» позволяют непрерывно регистрировать эти процессы. Предпусковая запись обеспечивает регистрацию процессов, предшествующих моменту синхронизации, а наличие интерфейса RS — 232 передачу формы сигналов на персональный компьютер для автоматической распечатки осциллограмм.

Технические характеристики приборов серии C1-137:

- Количество каналов вертикального отклонения: 2
- Режимы отображения: канал 1, канал 2, суммирование сигналов каналов 1 и 2, поочередная коммутация каналов 1 и 2.

- Полоса пропускания: 25 МГц
- Время нарастания: 14 нс
- Коэффициенты отклонения по вертикали: 2 мВ/дел ... 5 В/дел
- Погрешность измерения напряжения: $\pm 4\%$
- Входной импеданс: 1 МОм/20 пФ
- Макс. входное напряжение: 100 В (эффективное значение), 300 В (с делителем 1:10)
- Цифровая память (C1-137/2): частота дискретизации 1 МГц, число разрядов АЦП 8, объем памяти на канал 0,5 Кбайт, предзапись 50 %
- Коэффициенты развертки: 200 нс/дел ... 0,2 с/дел (растяжка $\times 10$ раз), 20 нс/дел ... 10 с/дел для C1-137/2
- Погрешность измерения времени: $\pm 4\%$, $\pm 5\%$ (в режиме $\times 10$)
- Режимы развертки: автоколебательный и ждущий
- Источники синхронизации: канал 1, канал 2, внешний, ТВ (строка, поле)
- Диапазон частот внутренней синхронизации 10 Гц ... 25 МГц
- Диапазон частот внешней синхронизации: 10 Гц ... 25 МГц
- В режиме X — Y: полоса пропускания 1 МГц (3 дБ), коэффициенты отклонения 2 мВ/дел ... 5 В/дел, погрешность измерений $\pm 10\%$
- Цифровой мультиметр (C1-137/1): диапазон измерения напряжения постоянного тока 2 мВ ... 1000 В (погрешность 0,7 %), диапазон измерения среднеквадратичного значения напряжения переменного тока 2 мВ ... 700 В (погрешность 2,5 %), входное сопротивление 1 МОм $\pm 0,1\%$, диапазон измерения постоянного тока 0,02 мА ... 2 А (погрешность 0,4 %), диапазон измерения сопротивления постоянному току 1 Ом ... 2 МОм (погрешность 1,5 %)
- Калибратор: меандр (1 кГц, 1 В)
- Размер экрана 60×80 мм (8×10 дел)
- Ускоряющее напряжение ЭЛТ 8 кВ
- Диапазон рабочих температур 5 — 40 °С
- Питание 127/220 В $\pm 10\%$, 50 Гц
- Потребляемая мощность 40 ВА
- Габаритные размеры C1-137, C1-137/2 375×270×130 мм, C1-137/1 375×270×160 мм
- Масса: C1-137 5 кг C1-137/1 5,3 кг, C1-137/2 5,5 кг

5.3. Цифровые осциллографы

5.3.1. Цифровые осциллографы Минского приборостроительного завода

К цифровым осциллографам относятся приборы, не просто имеющие цифровые средства (например, микропроцессорное управление или встроенные мультиметры), а осуществляющие цифровое преобразование аналоговых сигналов, их запоминание в памяти и осуществляющие вывод сигналов, представленных в цифровой форме.

Двухканальный цифровой осциллограф С8-33 (рис. 5.4) Минского приборостроительного завода имеет с полосу частот от 0 до 20 МГц. Он может работать с

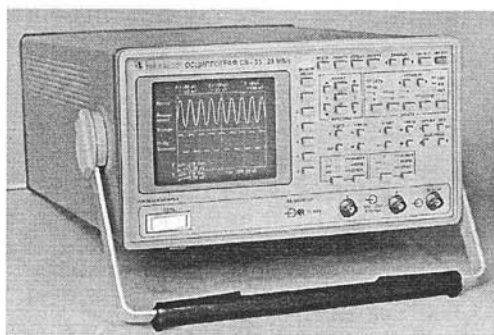


Рис. 5.4. Аналогово-цифровой осциллограф C8-33

скоростью выборки 20 Мв/с и имеет объем памяти 4 Кбайт/канал. Предусмотрены курсорные измерения и возможность подключения к компьютеру через порт RS-232. Экран прибора имеет размер 80×100 мм, масса прибора 8,0 кг.

Еще один осциллограф C8-37 того же завода (рис. 5.5) имеет два канала с полосой пропускания от 0 до 100 МГц; частота выборок 100 Мв/сек; объем памяти 32 Кбайт/кан; автомат/курс-22 вида измерения; БПФ; RS-232; экран SVGA 15"; масса 6,5 кг (блок осциллографа). Отличительная особенность этого прибора — применение стандартного дисплея от компьютера, что заметно упростило конструкцию осциллографического блока. Осциллограф имеет и стандартную клавиатуру от компьютера и даже графический манипулятор — мышь. Они позволяют удобно управлять работой осциллографа.

Осциллограф C8-37 регистрирует одиночные события с частотой выборки до 100 Мвыб/с на канал и повторяющиеся сигналы — до 10 Гв/с. Осциллограф создан на основе новейших достижений электроники с применением современной элементной базы ведущих зарубежных фирм и технологии поверхностного монтажа. Программное обеспечение осциллографа C8-37, реализованное в операционной системе Windows -95 максимально ориентировано на работу с пользователем и обеспечивает управление режимами оцифровки, накопления, отображения и

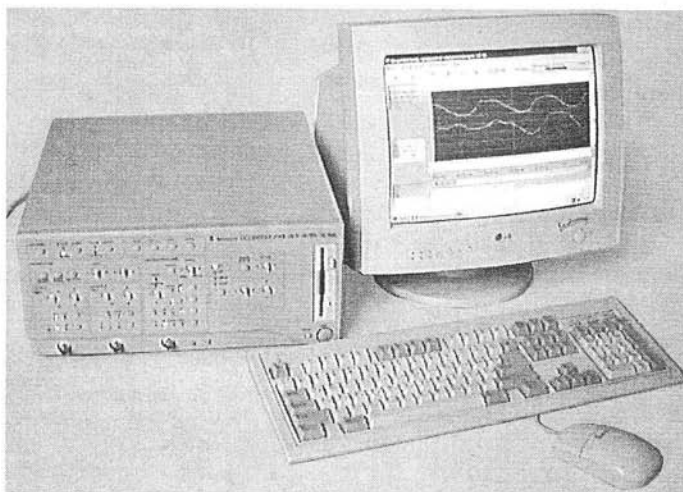


Рис. 5.5. Цифровой осциллограф C8-37

математической обработки измеряемых сигналов. Большое количество стандартных высокоэффективных программ может быть легко использовано в таком приборе для дополнительной обработки, документирования измерительной информации, построения графиков и т. д.

Удобный пользовательский интерфейс обеспечивает широкий выбор аппаратных и программных установок и предустановок: амплитудные и временные масштабы и диапазоны, типы входов, режимы синхронизации, единицы измерения, цвета элементов и многое другое. Разнообразные детальные измерения с помощью курсоров очень помогают в работе, результаты постоянно присутствуют в строке статуса. Имеются большие возможности дополнительной математической обработки измерительной информации: усреднение, сглаживание измеряемых сигналов, интерполяция между отсчетами, спектральный анализ (прямое и обратное преобразования Фурье). Все текущие измерения автоматически фиксируются в рабочей области программы и снабжаются рабочими этикетками. Их можно затем просматривать, сохранять, удалять, переименовывать, снабжать комментариями, вызывать ранее измеренные данные. Большой цветной экран с высоким разрешением (SVGA) обеспечивает качественное отображение сигнала.

Технические характеристики осциллографа:

- Полоса частот регистрируемых периодических сигналов: 100 МГц
- Максимальная частота дискретизации: 100 МГц
- Вертикальное разрешение: 8 бит
- Время нарастания переходной характеристики: 3,5 нс
- Диапазон частот синхронизации: до 110 МГц
- Диапазон исследуемых сигналов: 0,002—40 В (250 В с дел. 1:10)
- Число каналов: 2
- Число разрядов АЦП: 8
- Объем памяти на канал: 32 Кбайт
- Предварительный запуск и послезапуск: $\pm 100\%$
- Основная погрешность измерений: -амплитудных параметров 2 %, временных параметров 1,5 %
- Входной импеданс: 1 МОм/25 пФ
- Размер экрана: стандартный 15" SVGA монитор
- Диапазон рабочих температур: +10...+35 °С
- Питание: 220 В $\pm 10\%$, 50 — 60 Гц
- Потребляемая мощность: 210 ВА
- Габаритные размеры: 408×362×165 мм (блока осциллографа)
- Масса блока осциллографа: 6 ,5 кг

Осциллограф С8-40 (рис. 5.6) имеет полосу пропускания 200 МГц и максимальная частота дискретизации 200 МГц. Представляет собой 2х-канальный цифровой осциллограф с диапазоном частот исследуемых сигналов до 200 МГц. Прибор регистрирует одиночные события с частотой выборки до 200 Мв/с на канал и повторяющиеся сигналы — до 10 Гв/с. Осциллограф создан на основе новейших достижений электроники с применением современной элементной базы ведущих зарубежных фирм и технологии поверхностного монтажа.

Осциллограф С8-40 разработан с применением в своем составе ПЭВМ типа IBM PC. Программное обеспечение осциллографа С8-40, реализованное в операционной системе Windows, в максимальной степени ориентировано на работу с пользо-

вателем и обеспечивает управление режимами оцифровки, накопления, отображения и математической обработки измеряемых сигналов в операционной системе Windows 2000/XP. Большое количество стандартных высокоэффективных программ может быть легко использовано в таком приборе для дополнительной обработки, документирования измерительной информации, построения графиков и т. д.

Удобный пользовательский интерфейс обеспечивает широкий выбор аппаратных и программных установок и предварительных установок: амплитудные и временные масштабы и диапазоны, типы входов и временные масштабы и диапазоны, режимы синхронизации, единицы измерения, цвета элементов и многое другое. Разнообразные детальные измерения с помощью курсоров очень помогают в работе, результаты постоянно присутствуют в строке статуса. Имеются обширные возможности дополнительной математической обработки измерительной информации: усреднение, сглаживание измеряемых сигналов, интерполяция между отсчетами, спектральный анализ (прямое и обратное преобразования Фурье). Все текущие измерения автоматически фиксируются в рабочей области программы и снабжаются рабочими этикетками. Их можно затем просматривать, сохранять, удалять, переименовывать, снабжать комментариями, вызывать ранее измеренные данные. Большой цветной экран с высоким разрешением (SVGA) обеспечивает качественное отображение сигнала.

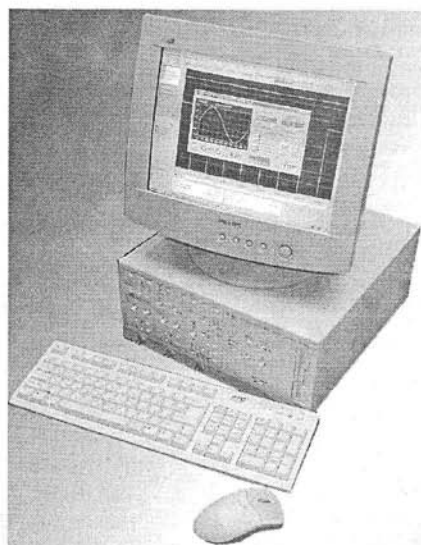


Рис. 5.6. Цифровой осциллограф C8-40

Технические характеристики осциллографа C8-40:

- Полоса частот регистрируемых периодических сигналов: 200 МГц
- Максимальная частота дискретизации: 200 МГц
- Вертикальное разрешение: 8 бит
- Время нарастания переходной характеристики: 3,5 нс
- Диапазон исследуемых сигналов: 0,002 — 40 В (250 В с дел. 1:10)
- Число каналов: 2
- Число разрядов АЦП: 8
- Объем памяти на канал: 128 Кбайт
- Пред- и послезапуск: $\pm 100\%$
- Основная погрешность измерений: амплитудных параметров 2 %, временных параметров 1,5 %
- Входной импеданс: 1 МОм/25 пФ
- Размер экрана: стандартный 15" SVGA монитор
- Диапазон рабочих температур: +10...+35 °C
- Питание: 220 В $\pm 10\%$, 50 — 60 Гц
- Потребляемая мощность: 250 ВА
- Габаритные размеры: 408×362×165 мм (блока осциллографа)
- Масса (блока осциллографа): 6,5 кг.

Осциллограф С8-40 относится к новому поколению цифровых осциллографов, которые построены на основе персонального компьютера (ПК) с архитектурой IBM PC. В такие осциллографы нередко встраивается стандартная системная плата персонального компьютера с современным микропроцессором — вплоть до Pentium 4. Разработка ПК достигла весьма высокого уровня и ныне компьютер с процессором, работающим на частоте около 3—4 ГГц, стоит меньше 500 \$. Конструкторам осциллографов остается дополнить его измерительными блоками и специальным программным обеспечением.

5.3.2. Цифровые осциллографы фирмы Good Will

Ряд цифровых осциллографов выпускает фирма Good Will [30, 31]. Вот уже несколько лет на российском рынке присутствуют ее цифровые запоминающие осциллографы серий GDS 820/840 (рис. 5.7). Они продаются компанией «Прист». Ниже приведенные данные этих приборов взяты из Интернет страниц компании «Прист» (www.prist.ru).

Осциллографы этой серии выполнены в прямоугольных корпусах и имеют простые органы управления. Благодаря этому на передней панели расположено небольшое число ручек, кнопок. Основные режимы работы осциллографов задаются функциональными кнопками, расположенными справа от экрана и индицируются на нем. На задней стенке приборов GDS 820S/840S (рис. 5.8) расположены разъемы портов для подключения компьютера (параллельный, последовательный RS-232 и USB). Осциллограф GDS 820C имеет цветной дисплей, у остальных приборов используется монохромный дисплей.

Эти двухканальные приборы рассчитаны на наблюдение сигналов с частотами до 150 (GDS 820) и 250 (GDS 840) МГц. Подробные технические характеристики и возможности цифровых запоминающих осциллографов GDS 820/840 представлены в таблице рис. 5.9.

Выпускаются также 100-МГц цифровые запоминающие осциллографы GDS830 с частотой выборки в реальном масштабе времени 100 Мв/с. Приборы имеют высокую точность развертки — 0,01%, автоматический выбор синхронизации, 15 предустановок режимов работы, меню режимов, высокое разрешение экрана (480×640 точек), меню настройки ЭЛТ, LPT и RS-232 интерфейсы для работы с персональным компьютером, высокую надежность и качество. Впрочем все это присуще и другим, отмеченным выше приборам этой фирмы. Технические характеристики осциллографов GDS830 представлены на рис. 5.10.



Рис. 5.7. Внешний вид цифровых запоминающих осциллографов GDS 820/840

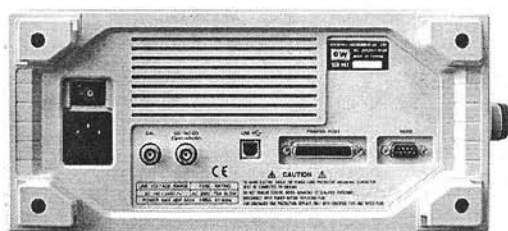


Рис. 5.8. Вид на заднюю панель цифровых запоминающих осциллографов GDS 820/840

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	820 СЕРИЯ	840 СЕРИЯ
КАНАЛ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ	Полоса пропускания (-3 дБ)	0...150 МГц	0...250 МГц
	Коэф. отклонения ($K_{откл}$)	Ограничение полосы пропускания до 20 МГц 2 мВ/дел...5 В/дел (шаг 1-2-5)	
	Погрешность установки $K_{откл}$	$\pm 3 \%$	
	Время нарастания	$\leq 2,3$ нс	$\leq 1,4$ нс
	Входной импеданс	1 МОм ($\pm 2 \%$) / 22 пФ	
	Макс. входное напряжение	300 В (DC+AC пик, до 1 кГц)	
КАНАЛ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ	Режимы работы	Канал 1, канал 2, канал 1 (2) инвертированный, канал 1 и 2	
	Математика	Кан 1 + Кан 2; Кан 1 – Кан 2; БПФ	
	Коэф. развертки ($K_{раз}$)	1 нс/дел...10 с/дел (шаг 1-2-5)	
СИНХРОНИЗАЦИЯ	Погрешность установки $K_{раз}$	$\pm 0,01 \%$	
	Режимы работы	Основной, окно, ZOOM окна, самописец, X-Y	
	Источники синхросигнала	Канал 1, канал 2, сеть, внешний	
	Режимы запуска развертки	Автоколебательный, ждущий, однократный, ТВ (NTSC, PAL / SECAM), пред. (20 дел.) и послезапуск (1000 дел.), по времени (100 нс...1,3 мс), по событию (2...65000), по уровню (ТТЛ, ЭСЛ, ± 20 В), по фронту, по длительности импульса (20 нс...10 с)	
	Фильтры синхронизации	ФНЧ, ФВЧ, фильтр шума, связь AC, связь DC	
	Внешняя синхронизация	Чувствительность: 50 мВ (0...30 МГц), 100 мВ (30...150 МГц)	Чувствительность: 50 мВ (0...30 МГц), 100 мВ (30...150 МГц), 150 мВ (150...250 МГц)
АНАЛОГ-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ	Вход внешней синхронизации	Уровни: постоянное ± 15 В; переменное 2 В пик. Макс. уровни: 300 В (DC+AC пик, до 1 кГц) 1 МОм ($\pm 2 \%$) / 22 пФ	
	Разрешение по вертикали	8 бит	
	Частота дискретизации	До 100 МГц на канал	
	Эквив. частота дискретизации	До 25 ГГц на канал	
	Длина записи	125 Кбайт на канал	
	Пиковый детектор	10 нс	
КУРСОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ	Режимы работы	Выборка, пик, детектор (> 10 нс); усреднение (2 /.../ 256); накопление; выбор длины записи (0,5 К /.../ 125 К)	
	Функции	ΔU ; ΔT ; $1/\Delta T$	
	Автоматические измерения	U пик-пик; U; U ср. кв.; $U_{\text{дл}}$; -U; +U; U макс.; U мин. f; T; t нарастания; t среза; +; -; коэф. заполнения	
ЧАСТОТОМЕР	Разрешение	6 разрядов	
	Диапазон измерений	10 Гц...150 МГц	10 Гц...250 МГц
	Погрешность измерения	$\pm 2 \%$	
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ	Интерфейс (кроме GDS-820)	USB; RS-232C; GPIB (опция); LPT;	
	Синхронизация	Автовывбор синхросигнала (2-кан. режим)	
	Автозащелка	В/дел, с/дел, параметры синхросигнала	
	Режим X-Y	X – кан 1; Y – кан 2; разность фаз $< 3^\circ$ до 100 кГц	
	Глубокая память	Запись/считывание: 2 осциллограммы; 15 профилей	
	Функции	Сравнение формы сигнала с шаблоном; автовоспроизведение профилей с авто- или курсорными измерениями	
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	ЖК-дисплей	8 x 12 дел (разрешение 320 x 240)	
	Напряжение питания	100...240 В, 48...63 Гц (автовывбор)	
	Габаритные размеры	254 x 142 x 310 мм	
	Масса	4,1 кг	
	Комплект поставки	Шнур питания (1), делитель 1:1/1:10 (2)	

Рис. 5.9. Технические характеристики цифровых запоминающих осциллографов GDS 820/840

5.3.3. Цифровые осциллографы АКТАКОМ

Объединение АКТАКОМ представляет на российский рынок несколько современных моделей цифровых осциллографов [24]. Рассмотрим кратко их номенклатуру и основные технические характеристики. Более подробные данные о цифровых осциллографах этой фирмы можно найти на ее сайте www.aktakom.ru.

АСК-2150

Этот цифровой осциллограф является, судя по всему, аналогом осциллографа DS-1150 фирмы EZ Digital. Он имеет 2 канала, полоса пропускания 150 МГц, частоту дискретизации 100 МГц (2 канала) или 200 МГц — 1 канал, в режиме стробоскопа частота дискретизации равна 25 ГГц, разрядность АЦП 8 бит, емкость памяти 32КБ, чувствительность 2 мВ/дел- 5 В/дел, максимальное входное напряжение

Характеристики	Параметры	Значения
Канал вертикального отклонения	Полоса пропускания (-3 дБ)	0...100 МГц
	Кэф. отклонения ($K_{откл.}$)	Ограничение полосы пропускания – до 20 МГц
	Погрешность установки $K_{откл.}$	2 мВ/дел...5 В/дел (шаг 1-2-5)
	Макс. входное напряжение	$\pm 2\%$ 300 В (DC+AC пик, до 1 кГц)
Канал горизонтального отклонения	Кэф. развертки ($K_{разв.}$)	2 нс/дел...5 с/дел (шаг 1-2-5)
	Погрешность установки $K_{разв.}$	$\pm 0,01\%$
	Режимы запуска развертки	Автоколебательный, ждущий, однократный, ТВ, пред- (10 дел) и послезапуск (500 дел), задержка по времени (100 нс...1,3 мс), по событию (2...65000), по уровню (ТТЛ, ЭСЛ, ± 12 В)
	Режимы работы	Основной, окно, ZOOM окна, самописец, X-Y
Аналого-цифровое преобразование	Разрешение по вертикали	8 бит
	Частота дискретизации	До 100 Мвыборок/с
	Эфф. частота дискретизации	До 25 Гвыборок/с
	Объем памяти	125 Кбайт на канал
	АЦП однократного сигнала	≤ 10 МГц; длина записи до 125 Кбайт на канал
	Пиковый детектор	20 нс (10 мкс/дел...5 с/дел)
	Режимы работы	Выборка, пиковый детектор (20 нс); усреднение (2.../256); накопление; выбор длины записи (0,5 К.../125 К)
	Режимы работы	
Курсорные измерения	Функции	DV, DT
Автоматические измерения	Функции по вертикали	V пик-пик; V пик; V ср. кв.; V ср.; -V; +V; V макс.; V мин.
	Функции по горизонтали	f, T, t нарастания; t среза; +t; -t; коэф. заполнения
Дополнительные возможности	Интерфейс	RS-232C; GPIB (опция); LPT; VGA
	Синхронизация	Автоматическая синхронизация (2-кан. режим)
	Блок выделения ТВ строк	PAL; NTSC
	Автоустановка	В/дел, с/дел, уровень синхросигнала
	X-Y вход	Развертка внешним сигналом
Общие данные	Сохранение профилей	Записи/считывание до 15 профилей
	Дисплей	8" 10 дел (разрешение 640 x 480)
	Напряжение питания	100...240 В, 48...63 Гц
	Габаритные размеры	330*155*385 мм
	Масса	7,0 кг

Рис. 5.10. Технические характеристики цифровых запоминающих осциллографов GDS 830

400 В, входной импеданс 1 МОм/20 пФ. Горизонтальная развертка с длительностью 2 нс/дел — 5 с/дел, режимы разверток: автоколебательный, ждущий, однократный, X-Y. Дополнительные возможности: автоматические измерения, курсорные измерения, режим анализатора спектра, память на 10 осциллограмм, предварительная запись осциллограмм, самописец, стробоскоп; источники синхронизации: CH1, CH2, ТВ, сеть, внешний; габариты: 370×167×338 мм; масса 5,5 кг. Прибор имеет пик-детектор 10 нс, ЖКИ 5,8 дюйма с разрешением 320×240, интерфейсы для подключения персонального компьютера Centronix, RS-232 и USB.

АСК-2022/2023

Цифровые запоминающие осциллографы АСК-2022/2023 принадлежат к новому поколению миниатюрных осциллографов, выполненных в ударопрочном пластмассовом цветном корпусе — рис. 5.11. Они имеют кнопочное управление и единственную вращающуюся ручку для просмотра длинных осциллограмм. Эти приборы могут использоваться как цифровые частотомеры, а прибор АСК-2023 может применяться еще и как цифровой мультиметр и логический анализатор, используемый для отладки сложных логических схем.

На рис. 5.12 показаны фотографии экрана осциллографа АСК-2023 при отображении осциллограмм (снимок сверху) и при отображении результатов работы логического анализатора (снимок снизу). Нетрудно заметить детальность и большой объем представляемой информации.

Основные технические данные осциллографической части приборов представлены на рис. 5.13. Нетрудно заметить, что по частотным свойствам приборы подобны аналоговым сервисным осциллографам с предельными частотами 20 МГц. Это не случайно. Данные осциллографы предназначены для сервисного обслуживания различного оборудования, нередко в полевых условиях. Для этого они питаются не только от сети переменного тока 229 В (через внешний адаптер), но и встроенной NiCd аккумуляторной батареи с напряжением 4,5 В. При этом время непрерывной работы от аккумулятора составляет 3,5 часа. Масса приборов менее 2 кг, габариты 287×153×82 мм.

В роли мультиметра осциллограф АСК-2023 может измерять постоянные и переменные напряжения и токи, а также резистивность (сопротивление). Приборы АСК-2022/2023 могут использоваться в качестве цифровых частотомеров с отображением частоты большими числами с большими размерами знаков. Диапазон частот частотомера от 5 Гц до 20 МГц, возможно и измерение длительности от 50 нс до 0,2 с. Наряду с отображением результатов измерений в цифровой форме (3 1/2 — разрядный индикатор, максимальное число 4000), предусмотрен линейный индикатор уровня измеряемых сигналов.

Возможен также комбинированный режим отображения — осциллограммы вместе с данными измерений цифрового мультиметра (рис. 5.14). Численные данные измерения отображаются со всех сторон экрана, кроме правой.

Для применения прибора АСК-2023 в качестве логического анализатора используется специальный блок такого анализатора, показанный на рис. 5.15. Шлейф с разъемом подключается к осциллографу, а провода с миниатюрными зажимами к исследуемым точкам испытываемой логической схемы.

Для подключения к компьютеру по порту RS-232 к осциллографам прилагается специальный кабель. Вместе с мобильным компьютером — ноутбуком осциллографы АСК-2022/2023 могут образовать переносную лабораторию с весьма высокими функциональными возможностями. Некоторые фирмы, например HITACHI, уже выпускают подобные осциллографы.

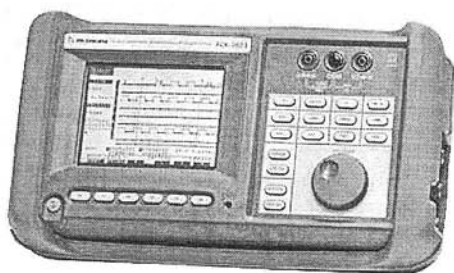


Рис. 5.11. Цифровой осциллограф АСК-2023

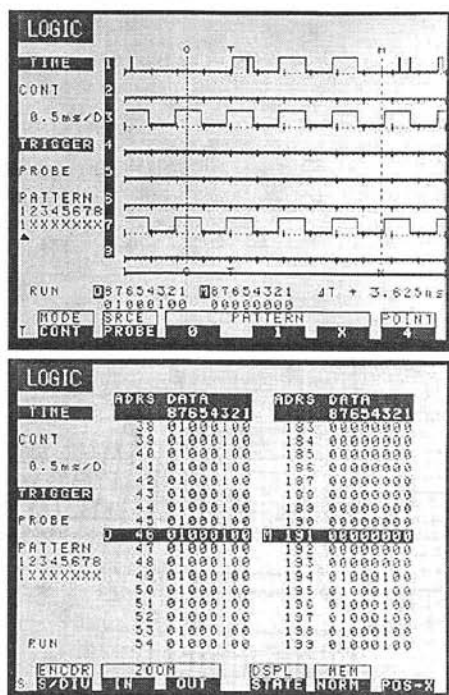


Рис. 5.12. Представление осциллограмм (сверху) и данных логического анализатора (снизу)

Параметр	Значение
Система вертикального отклонения:	
Число каналов	2
Полоса пропускания	макс. 20 МГц
Коэффициент отклонения	5 мВ/дел...20 В/дел
Вертикальное разрешение	8 бит (20 точек на 1 деление экрана)
Входной импеданс	1 МОм/35 пФ
Макс. входное напряжение	42 В (пост.+пик. перемен.)
Система горизонтального отклонения:	
Частота дискретизации	20 МГц
Коэффициент развертки	50 нс/дел...20 с/дел
Объем памяти	8 экранов
Режим Zoom	×10
Общие характеристики:	
Тип экрана	ЖКИ, монохромный
Размер экрана	96×72 мм, 320×240 точек
Сигнал калибратора	прямоугольный, 1 кГц, 5 В

Рис. 5.13. Основные технические данные цифровых осциллографов АСК-2022 / 2023

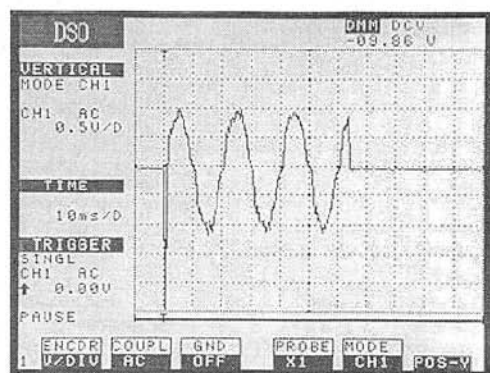


Рис. 5.14. Вид экрана осциллографа АСК-2023 в режиме комбинированного режима отображения информации

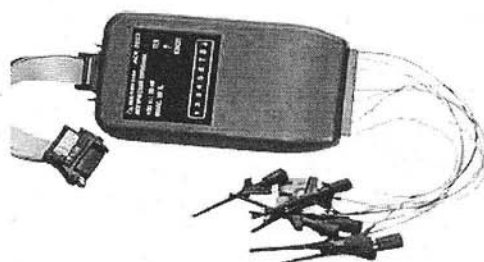


Рис. 5.15. Блок логического анализатора для осциллографа АСК-2023

АСК-2122

Внешний вид нового цифрового осциллографа АСК-2122 показан на рис. 5.16. Это двухканальный прибор с полосой частот вертикального отклонения до 100 МГц вполне может заменить как настольный осциллограф, так и переносной. Он может питаться от аккумуляторных батарей или от адаптера сети переменного тока. Чувствительность прибора по вертикали от 2 мВ/дел до 10 В/дел, диапазон развертки от 1 мкс/дел до 0,1 с/дел. Прибор имеет встроенный калибратор (3 В от пика до пика, 1 кГц), курсорные и автоматические вычисления, автоматическую настройку на сигнал и др.

5.3.4. Цифровые осциллографы фирмы HITACHI

На российском рынке можно встретить некоторые модели цифровых осциллографов японской компании Hitachi, известной своими поставками электронного оборудования для вооруженных сил Японии. Кратко отметим их возможности.

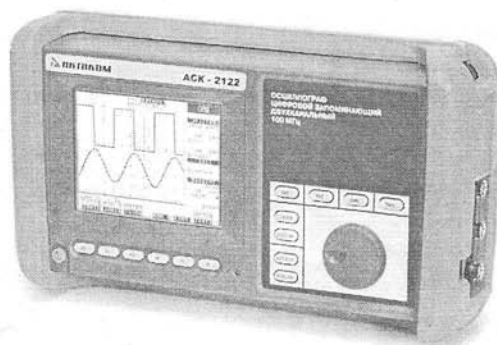


Рис. 5.16. Внешний вид цифрового запоминающего осциллографа АСК-2122

VC-6523

2 канала, 20 МГц, ЭЛТ, максимальная скорость выборки 20 МС/с, одновременная выборка на всех каналах 10 Кслов/с, память 2 Кслова/канал, вертикальное разрешение 8 бит, максимальная чувствительность 1 мВ (x5), RS-232, выход на плоттер, курсорные измерения, режим усреднения.

VC-6525

2 канала, 50 МГц, ЭЛТ, максимальная скорость выборки 20 МС/с, одновременная выборка на 2-х каналах 20 МС/с, память 2 Кслова/канал, вертикальное разрешение 8 бит, максимальная чувствительность 2 мВ, частотомер, автоустановка скорости развертки, RS-232, выход на плоттер, курсорные измерения, режим усреднения.

VC-6545

2 канала, 100 МГц, ЭЛТ, максимальная скорость выборки 40 МС/с, одновременная выборка на 2-х каналах, память 4 Кслова/канал, вертикальное разрешение 8 бит, максимальная чувствительность 2 мВ, цифровой частотомер, автоматическая установка скорости развертки, RS-232, выход на плоттер, курсорные измерения, режим усреднения.

5.3.5. Цифровые осциллографы фирмы TEKTRONIX

Корпорация Tektronix издавна занимает лидирующее место в разработке электронных осциллографов высшего класса [32—34]. В последние годы это, прежде всего, цифровые осциллографы, работающие в реальном масштабе времени (рис. 5.17) и стробоскопические осциллографы. Корпорация Tektronix занимает около половины рынка таких приборов. Рассмотрим основные типы цифровых осциллографов, предлагаемых на нашем российском рынке (увы не очень обширном из-за низкой покупательной способности наших научных организаций, которые используют подобные уникальные приборы).

Осциллографы фирмы Tektronix можно сразу узнать по их характерному прямоугольному корпусу и строгому виду в стиле «ретро». В приборе используются кнопки с плавными обводами и круглые ручки, по виду напоминающие ручки в старых радиоприемниках. Экран занимает значительную часть площади передней панели и позволяет отображать осциллограммы и результаты измерений. У многих осциллографов экран цветной. Цифровых надписей на передней панели практически нет — все, что необходимо отражается на экране осциллографа.

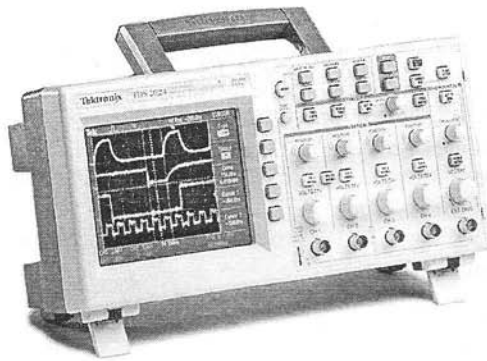


Рис. 5.17. Цифровой 200-МГц осциллограф TDS-2024 фирмы Tektronix

Серия TDS1000

Приборы с частотой исследуемых сигналов от 0 до 60 или 100 МГц, 2 или 4 канала, дискретизация 1 или 2 ГГц, монохромный или цветной ЖКИ, память 2,5 кБ/канал, вертикальное разрешение 8 бит, развертка по горизонтали 2 мВ — 5 В/дел., по горизонтали 5 нс — 50 с/дел., режим спектроанализатора (БПФ), 11 автоизмерений, видео синхронизация с выбором строки, синхронизация по длительности импульса.

Опционально поставляются:

TDS-2CMAH — интерфейсный модуль для ПК (RS232, GPIB, Centronix, кабель, ПО «OpenChoice».

TDS-2MEM — интерфейсный модуль для ПК (RS232, CompactFlash, Centronix) кабель, ПО «OpenChoice».

Отличия приборов:

TDS-1002: 60 МГц, 2 канала, дискретизация 1 ГГц, развертка по горизонтали 5 нс — 50 с/дел., 11 автоизмерений, монохромный ЖКИ.

TDS-1012: 100 МГц, 2 канала, дискретизация 1 ГГц, развертка по горизонтали 5 нс — 50 с/дел., монохромный ЖКИ.

Серия TPS2000

100 или 200 МГц, 2 или 4 гальванически изолированных канала и изолированный вход внешней синхронизации, дискретизация 1 или 2 ГГц, цветной ЖКИ, память 2,5 кБ/канал, вертикальное разрешение 8 бит, развертка по горизонтали 2 мВ...5 В/дел., по горизонтали 5 нс...50 с/дел., режим спектроанализатора (БПФ), сохранение данных на карту памяти CompactFlash, 11 автоизмерений, 6 разрядный частотомер, видео синхронизация с выбором строки, синхронизация по длительности импульса, аккумуляторное питание, RS-232, LPT.

Опционально поставляются:

TPS2PBND — набор для измерения мощности для TPS2000. Включает 4 пробника P5120 (пассивных, высоковольтных) и ПО для измерения и анализа мощности TPS2PWR1.

TPS2PWR1 — ПО для измерения и анализа мощности. Мгновенный анализ осциллограмм и мощности, гармонический анализ, потери переключения, фазовый угол, измерения DV/Dt и DI/Dt в месте нахождения курсоров.

Отличия приборов:

TDS-2002: 60 МГц, 2 канала, дискретизация 1 ГГц, развертка по горизонтали 5 нс — 50 с/дел., цветной ЖКИ.

TDS-2012: 100 МГц, 2 канала, дискретизация 1 ГГц, развертка по горизонтали 5 нс — 50 с/дел., цветной ЖКИ.

TDS-2014: 100 МГц, 4 канала, дискретизация 1 ГГц, развертка по горизонтали 5 нс — 50 с/дел., цветной ЖКИ.

TDS-2022: 100 МГц, 4 канала, дискретизация 2 ГГц, развертка по горизонтали 2.5 нс — 50 с/дел., цветной ЖКИ.

TDS-2024: 200 МГц, 4 канала, дискретизация 2 ГГц, развертка по горизонтали 2.5 нс — 50 с/дел., цветной ЖКИ.

Серия TDS3000B

Приборы на 2 или 4 канала (1 МОм/50 Ом), 100, 200, 300, 400, 500 или 600 МГц, цифровой запоминающий, DPO, большой цветной ЖКИ, частота дискретизации 1,25/2,5/5 ГГц, длина записи 10 тыс. точек/канал, расширенный набор синхронизации (в т.ч. по видеосигналу), детектирование аномалий сигнала, БПФ, автоматические и курсорные измерения, FDD 5.5", выход для принтера и Ethernet, вход внешней синхронизации, небольшой, легкий.

Опционально поставляются:

TDS3VID — модуль для работы с аналоговым видеосигналом;

TDS3SDI — цифровое видео;

TDS3AAM — расширенная математика;

TDS3LIM — тестирование в пределах;

TDS3TMT — телекоммуникационные маски;

TDS3GV — модуль для подключения к ПК (RS-232, GPIB, выход VGA);

TDS3BAT(B), TDS3CHG — питание от аккумулятора;

Отличия приборов:

TDS-3012B: 2 канала, 100 МГц, дискретизация до 1,25 ГГц;

TDS-3014B: 4 канала, 100 МГц, дискретизация до 1,25 ГГц, есть опция «BND»;

TDS-3024B: 4 канала, 200 МГц, дискретизация до 2,5 ГГц;

TDS-3032B: 2 канала, 300 МГц, дискретизация до 2,5 ГГц;

TDS-3034B: 4 канала, 300 МГц, дискретизация до 2,5 ГГц, есть опция «BND»;

TDS-3044B: 4 канала, 400 МГц, дискретизация до 5 ГГц;

TDS-3052B: 2 канала, 500 МГц, дискретизация до 5 ГГц;

TDS-3054B: 4 канала, 500 МГц, дискретизация до 5 ГГц, есть опция «BND»;

TDS-3064B: 4 канала, 600 МГц, дискретизация до 5 ГГц.

Серия TDS5000B

Осциллографы с 2 или 4 каналами (1 МОм/50 Ом), полоса пропускания 350, 500 или 1000 МГц, частота дискретизации до 5 ГГц, DPO/DPX до 100 000 осциллограмм в сек, Windows-архитектура, большой цветной ЖКИ, длина записи 8 Мб (стандарт), 16 Мб (опция). Развертка по вертикали 1 мВ-10 В/дел. Развертка по горизонтали 200 пс/дел — 1000 с/дел. Вертикальное разрешение 8 бит (в режиме усреднения 11 бит). Погрешность 1,5%. 14 типов синхронизации, Фильтры по входам и синхронизации. Пиковый детектор для импульсов с длительностью от 1 нс и выше. Интерфейсы GPIB, Centronics, RS-232, VGA-out, CD-RW. Есть также индивидуальная настройка интерфейса (MyScope (tm)), Математический редактор, статистика, гистограммы, спектроанализатор. Опционально поставляются:

встроенный принтер, сенсорный экран, увелич. память 16 МБ, программные пакеты для измерения мощности, джиттера и др.

Отличия приборов:

TDS-5032B: 350 МГц, 2 канала;

TDS-5034B: 350 МГц, 4 канала;

TDS-5052B: 500 МГц, 2 канала;

TDS-5054B: 500 МГц, 4 канала;

TDS-5104B: 1 ГГц, 4 канала.

Серия TDS6000B

Полоса 6 ГГц или 8 ГГц, 4 канала 50 Ом, частота дискретизации до 20 ГГц по всем каналам, DSO, Windows-архитектура, встроенный ПК: 512М, HDD, CDRW, 10" сенсорный цв. ЖКИ, длина записи 2 МБ/канал до 32 МБ/канал (опция). Развертка по вертикали 2 мВ-10 В/дел. Развертка по горизонтали 25 пс/дел — 40 с/дел. Вертикальное разрешение 8 бит (в режиме усреднения 11 бит). Погрешность 2%. Синхронизация PINPOINT(tm) — 1400 комбинаций, MultiView Zoom(tm), Фильтры по входам и синхронизации. Пиковый детектор для импульсов с частотой от 50 пс. Выходные порты: GPIB, LAN 10/100/1000Base-T, Centronics, USB2.0, RS-232, VGA, Audio.

Отличия приборов:

TDS-6604B: 6 ГГц;

TDS-6804B: 8 ГГц — (50 пс — скор. нарастания по 10-90%) — с помощью DSP или 7 ГГц — (62 пс) — аналоговая полоса.

TDS7000(B)

Полоса 500 МГц, 1 ГГц, 1,5 ГГц, 2,5 ГГц, 4 ГГц или 7 ГГц, 4 канала, частота дискретизации до 20 ГГц, DPO/DPX более 400 000 осциллограмм в сек, Windows-архитектура, встроенный ПК: 256М, FDD, HDD, CD-ROM, 10" сенсорный цв. ЖКИ), длина записи 4 МБ — 64 Мб. Развертка по вертикали 1 мВ-10 В/дел. Развертка по горизонтали 200 пс/дел — 40 с/дел. Вертикальное разрешение 8 бит (в режиме усреднения 11 бит). Погрешность 1%. 11 типов синхронизации, Фильтры по входам и синхронизации. Пиковый детектор для импульсов с длительностью от 1 нс. Выходные порты: GPIB, LAN 10/100Base-T, Centronics, USB, RS-232, VGA, Audio.

Отличия приборов:

TDS-7054: 500 МГц, 4 канала (1МОм/50 Ом), частота дискретизации до 5 ГГц, VGA-ЖКИ, длина записи 4 МБ — 16 Мб. Развертка по вертикали 1 мВ-10 В/дел. Развертка по горизонтали 200 пс/дел — 40 с/дел.

TDS-7104: 1 ГГц, 4 канала (1МОм/50 Ом), частота дискретизации до 10 ГГц, VGA-ЖКИ, длина записи 4 МБ — 16 Мб. Развертка по вертикали 1 мВ-10 В/дел. Развертка по горизонтали 200 пс/дел — 40 с/дел.

TDS-7154B: 1.5 ГГц, 4 канала (50 Ом), частота дискретизации до 20 ГГц, XGA-ЖКИ, длина записи 4 МБ — 64 Мб. Развертка по вертикали 2 мВ — 1 В/дел. Развертка по горизонтали 50 пс/дел — 10 с/дел.

TDS-7254B: 2.5 ГГц, 4 канала (50 Ом), частота дискретизации до 20 ГГц, XGA-ЖКИ, длина записи 4 МБ — 64 Мб. Развертка по вертикали 2 мВ — 1 В/дел. Развертка по горизонтали 50 пс/дел — 10 с/дел.

TDS-7404B: 4 ГГц, 4 канала (50 Ом), частота дискретизации до 20 ГГц, XGA-ЖКИ, длина записи 4 МБ — 64 Мб. Развертка по вертикали 2 мВ — 1 В/дел. Развертка по горизонтали 50 пс/дел — 10 с/дел.

TDS-7704B: 7 ГГц, 4 канала (50 Ом), частота дискретизации до 20 ГГц, XGA-ЖКИ, длина записи 4 МБ — 64 МБ. Развертка по вертикали 2 мВ — 1 В/дел. Развертка по горизонтали 50 пс/дел — 10 с/дел.

Серия TDS8000B

70-ГГц модульный цифровой сэмплирующий (проще говоря — стробоскопический) осциллограф, до 8 каналов (электрических и оптических сменных модулей), длина записи до 4000 точек, развертка по горизонтали — 0,5 пс/дел — 5 мс/дел., сенсорный цветной 10-дюймовый ЖКИ с разрешением 640×480 точек. Это уникальный прибор, который есть только в самых престижных лабораториях мира.

Серия THS700

100 или 200 МГц, 2 гальванически развязанных канала, встроенный мультиметр, частота дискретизации 500 или 1000 МГц. Память на 10 файлов (форм сигнала). ч/б ЖКИ, длительность записи 2,5 Кб/канал. Чувствительность 5 мВ-50 В/дел. Развертка 5 нс-50 с/дел. Вертикальное разрешение 8 бит. Погрешность 2%. Максимальное входное напряжение (1 МОм) — 300 В RMS. Курсорные измерения. 25 автоизмерений, 11 видов синхронизации. Режим регистратора. Подключение к ПК через RS232. Аккумулятор, вес 1,45 кг, 177×217×51 мм.

Отличия приборов:

THS-720A: 100 МГц, 2 канала, частота дискретизации 500 МГц;

THS-720P: 100 МГц, 2 канала, частота дискретизации 500 МГц, дополнительно анализ гармоник, автоматические измерения мощности, синхронизация по двигателю с приводом ИШМ, пробники с максимальным напряжением 1 кВ;

THS-730A: 200 МГц, 2 канала, частота дискретизации 1 ГГц.

Сводная таблица осциллографов фирмы Tektronix, которые на российском рынке предлагает компания Эликс, представлена на рис. 5.18. Приведенные данные можно использовать для выбора осциллографа для тех или иных работ.

Стоит остановиться на некоторых технических новинках, введенных в цифровые осциллографы фирмы Tektronix [50]. Прежде всего, это касается организации входных портов осциллографов с полосой пропускания в несколько гигагерц и выше. Стандартный высококачественный коаксиальный ВЧ-разъем BNC пригоден только до частот около 4 ГГц. Кроме того, он плохо приспособлен для работы с активными пробниками, поскольку пропускает только один сигнал, а для пробников нужны еще цепи питания. Еще в середине 80-х годов Tektronix создала входной порт TekProbe™ (рис. 5.19) на базе разъема BNC с дополнительными цепями питания и контактами для распознавания типа пробника.

Современные осциллографы фирмы Tektronix оснащены еще более совершенным интеллектуальным входным портом TekConnect™, полоса частот коаксиального 50-Ом разъема BMA которого доходит до 18 ГГц. Помимо возможностей входного интерфейса в новых портах предусмотрены возможности каскадирования аксессуаров, калибровки и поддержки средств программного управления.

Представленная на рис. 5.20 таблица дает наглядное впечатление о технических новинках (ноу-хау корпорации Tektronix), которые введены в ее серийный цифровой осциллографы. Часть этих новинок, ныне введенных и в осциллографы других фирм, мы рассмотрим в дальнейшем, в частности в главе 7, посвященной осциллографическим измерениям.

Большинство цифровых осциллографов имеет средства выполнения автоматических измерений ряда параметров исследуемых сигналов. По числу таких вычислений явно лидируют осциллографы фирмы Tektronix (рис. 5.21).

МОДЕЛЬ	TDS700	TDS1000	TDS2000	TPS2000	TDS3000B	TDS5000B	TDS6000B	TDS7000/B	CSA7000/B	TDS9000B	CSA9000B
	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф	осциллограф
Каналы	2***	2	2,4	2,4***	2,4	2,4	4	4	4	Up to 8	Up to 8
Полоса (макс.)	от 100 МГц до 200 МГц	от 60 МГц до 100 МГц	от 60 МГц до 200 МГц	100 МГц или 200 МГц	от 100 МГц до 500 МГц	от 350 МГц до 1 ГГц	6 или 7 (8 DSP) ГГц	от 2,5 МГц до 7 ГГц	1,5 ГГц, 4 ГГц	от 2,5 ГГц до 70 ГГц	от 2,5 ГГц до 70 ГГц
Время нарастания	до 3,5 нс	от 5,83 нс до 3,5 нс	от 5,83 нс до 1,75 нс	от 3,6 нс до 1,75 нс	от 2,5 нс до 400 пс	от 800 пс до 400 пс	от 70 пс	от 800 пс до 100 пс	от 560 пс до 100 пс	7 пс	7 пс
Макс. частота дискретизации в реальном времени	до 500 МС/с	1 GS/s	2 GS/s	1 или 2 GS/s	от 1,25 GS/s до 5 GS/s	5 GS/s	20 GS/s по 4 каналам	от 5 GS/s до 20 GS/s	от 5 GS/s до 20 GS/s	200 GS/s (sequential)	200 GS/s (sequential)
Тип осциллографа	DSO	DSO	DSO	DSO	DSO (до 3600 осцилл./с)	DSO/DSX до 100000 осцилл./с	DSO	DSO/DSX до 400000 осцилл./с	DSO/DSX до 400000 осцилл./с	Стереоскоп	Стереоскоп
Макс. длина записи (в т.ч. опционально)	2,5 кБ	2,5 кБ	2,5 кБ	2,5 кБ	10 кБ	16 МБ	32 МБ	64 МБ	64 МБ	4 кБ	4 кБ
Типы синхронизации	Фронт, Импулсы, Видео, Внешняя, Мотор	Фронт, Видео, Импулсы (Глитч)	Фронт, Видео, Импулсы (Глитч)	Фронт, Видео, Импулсы (Глитч)	Фронт, Видео, Логич. состояние, импульсы (глитч, ширина, разл. по времени), Соплт	Фронт, Видео, Логич. состояние, импульсы (глитч, ширина, разл. по времени), Переход, Осмо, Ладер и синхронизация	Фронт, логические состояние, импульсы (глитч, ширина, разл. по времени), Соплт и послед. шаблоны	Фронт, логические состояние, импульсы (глитч, ширина, разл. по времени), Соплт и послед. шаблоны	Все типы для TDS7000 + Sоплт и последовательный шаблон	Фронт, Внутренняя тактовая частота, Восстановление тактовой частоты	Фронт, Внутренняя тактовая частота, Восстановление тактовой частоты
Подключение к ПК	Базовое	Улучшенное через опцию TDS2CMA	Улучшенное через опцию TDS2CMA	Базовое	Расширенное	Расширенное	Расширенное	Расширенное	Расширенное	Расширенное	Расширенное
Специальные возможности	Анализ цифровых цепей	Быстрое преобразование Фурье (БПФ)	Быстрое преобразование Фурье (БПФ)	Быстрое преобразование Фурье (БПФ)	Соплт, Video	Джиттер, Disk Drive, USB	USB, Джиттер, Соплт	Джиттер, Disk Drive, USB 2.0	Соплт, Джиттер, Disk Drive, USB 2.0	Соплт, TDR	Соплт, TDR
Обработка и анализ осциллограмм	Базовое	Базовое плюс БПФ стандартно	Базовое, плюс БПФ стандартно	Базовое, плюс БПФ стандартно	Базовое, плюс БПФ стандартно	Базовое (Расширенное - опция)	Расширенное	Расширенное	Расширенное	Расширенное	Расширенное
Другие особенности	Портативный, батарейное питание	Вход внешней синхронизации, меню автоустановки, проверка пробников, автономизмерения	Вход внешней синхронизации, меню автоустановки, проверка пробников, автономизмерения	Изолированный вход внешней синхронизации, автономизмерения, частотмер, батарейное питание	Портативный (3,2 кг) стандартно	Встроенный CD-RW, принтер (опция)	Тестирование по компьютерным или телеком. наборам, запуск по последовательному шаблону, Восстановление тактовой частоты	Сенсорный дисплей, Графический интерфейс, Синхр. и неинсинхр. режимы, самописцы	Встроенный оптич. приемник, Восстановление тактовой частоты, Маски	Оптические и электрические модули с опцией Восстановление тактовой частоты	Оптические и электрические модули с опцией Восстановление тактовой частоты

Рис. 5.18. Внешний вид и технические характеристики цифровых осциллографов компании Tektronix

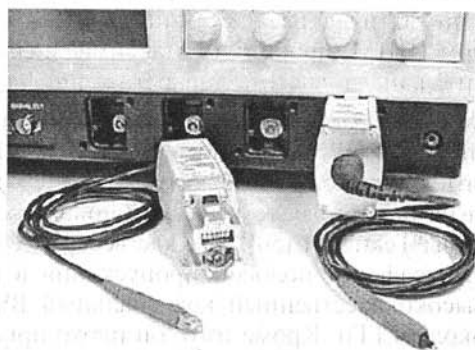


Рис. 5.19. Входные порты TekProbe™ и пробники осциллографов Tektronix

Технология	TDS1000/TDS2000	TDS3000B	TDS5000	TDS7000/TDS7000B	CSA7000/CSA7000B	TDS9000
Цифровой фосфор	-	+	+	+	+	-
Скорость захвата, осциллограмм/сек	180	3600	100000	400000	400000	100
FISO	+	+	-	-	-	+
FastFrame	+	+	-	-	-	+
Усреднение, кол-во осциллограмм	до 128	-	до 10000	до 10000	до 10000	до 10000
Пик-детектор	12 нс	+	до 1 нс	400 пс	до 50 пс	до 50 пс
Отбрасывающая	-	+	до 2·10 ⁹	до 2·10 ⁹	до 2·10 ⁹	до 2·10 ⁹
HiRes	-	+	+	+	+	+
Гистограмма	-	-	опция	+	+	+
Кол-во автономизмерений	11	25	25	37	53	37
Длина памяти, 1/2/4 канала	2500 точек на канал, фнкс.	10000 точек на канал, фнкс.	400/200/100К, опц. до 8 Мбайт	2М/1М/500К, опц. до 64 Мбайт	2М/1М/500К, опц. до 1000 ГГц	250/250/125
Стереоскопический режим	-	-	до 250 ГГц Tekprobe™	до 1000 ГГц Tekprobe™	ТекConnect™, оптич. вход R/Ros	до 1000 ГГц ТекConnect™
Интерфейс пробников	BNC	-	-	опция SM опция ST	+	опция SM опция ST
Восстановление тактовой частоты	-	-	-	-	-	-
Запуск по последовательному шаблону	-	-	-	-	-	-

Рис. 5.20. Технические новинки, введенные в цифровые осциллографы корпорации Tektronix

Измеряемый параметр		TDS1000/ TDS2000	TDS3000B	TDS5000	TDS7000	TDS6000
Амплитуда		—	+	+	+	+
Область		—	—	+	+	+
Циклическая область		—	—	+	+	+
Длительность вспышки		—	+	+	+	+
Среднее значение периода		—	+	+	+	+
Среднеквадратичное значение цикла		+	+	+	+	+
Задержка		—	+	+	+	+
Время спада		+	+	+	+	+
Частота		+	+	+	+	+
Высокий уровень		—	+	+	+	+
Низкий уровень		—	+	+	+	+
Максимум		+	+	+	+	+
Среднее		+	+	+	+	+
Минимум		+	+	+	+	+
Отрицательная скважность		—	+	+	+	+
Отрицательный выброс		—	+	+	+	+
Длительность отрицательного импульса		+	+	+	+	+
Пиковая амплитуда (размах)		+	+	+	+	+
Фаза		—	+	+	+	+
Период		+	+	+	+	+
Положительная скважность		—	+	+	+	+
Положительный выброс		—	+	+	+	+
Длительность положительного импульса		+	+	+	+	+
Время нарастания		+	+	+	+	+
Среднеквадратичное значение		—	+	+	+	+
Среднее значение		—	—	+	+	+
Медиана		—	—	+	+	+
Стандартное отклонение		—	—	+	+	+
Число точек в окне гистограммы		—	—	+	+	+
Число осциллограмм		—	—	+	+	+
Число пиковых значений		—	—	+	+	+
Размах		—	—	+	+	+
Максимум		—	—	+	+	+
Минимум		—	—	+	+	+
Среднее (1 ст. отклонение)		—	—	+	+	+
Среднее (2 ст. отклонения)		—	—	+	+	+
Среднее (3 ст. отклонения)		—	—	+	+	+

Рис. 5.21. Автоматические измерения, осуществляемые осциллографами корпорации Tektronix

5.3.6. Цифровые осциллографы фирмы LeGroy (общая оценка)

Фирма LeGroy сравнительно новый игрок на рынке цифровых широкополосных осциллографов. Но она быстро зарекомендовала себя как серьезный конкурент фирм Tektronix и Agilent Technologies. Продажа приборов этой фирмы орга-

низована ОАО «Прист». Подробные данные об осциллографах фирмы LeCroy можно найти на Интернет-страницах www.lecroyscope.ru и в описаниях этих осциллографов [35—37].

Тут уместно отметить, что в наше время СВЧ устройства вторгаются в нашу жизнь поразительно быстрыми темпами. Достаточно отметить микроволновые печи, сотовую и мобильную телефонию на СВЧ, беспроводные интерфейсы для компьютеров, микропроцессоры с тактовой частотой до 4 ГГц и т. д. и т. п. Для разработки, производства и ремонта таких устройств стали остро необходимы осциллографы с диапазоном рабочих частот в несколько ГГц, а в отдельных случаях и до десятков ГГц.

Создание таких устройств оказалось чрезвычайно сложным делом. Достаточно отметить, что создание и промышленное производство современных крупных авиалайнеров успешно освоено рядом крупных фирм в 5 странах мира. А создание осциллографов с частотами до 5—7 ГГц и выше освоено только на трех указанных выше фирмах — Tektronix, Agilent Technologies и LeCroy. Можно сказать, что на этих трех китах и держится мир современной высокоскоростной осциллографии.

Успех фирмы LeCroy во многом обязан не только доступом к сверхскоростной элементной базе, но и ориентацией фирмы на разработку осциллографов на базе стандартной открытой платформы персональных компьютеров, с новейшими микропроцессорами корпорации Intel — Pentium 4. Говоря проще, основой вычислительной мощи осциллографов фирмы LeCroy является системная плата от обычного ПК с микропроцессором Pentium 4 с тактовой частотой 2,6 ГГц. Никогда еще цифровые осциллографы не имели такого «мощного и высокооборотного двигателя».

Такой подход не только упрощает построение цифровой части осциллографов, но и позволяет использовать мощный встроенный видеоадаптер системной платы и обычный ЖКИ дисплей. Большой цветной дисплей (26×26 см) осциллографов позволяет отображать очень четкие и хорошо различимые осциллограммы. Разумеется, высокие характеристики осциллографов получены и благодаря тщательной отработке осциллографических блоков. Толщина осциллографа всего в 15—16 см и вертикальная ориентация корпуса обеспечивают малое место, нужное для установки осциллографа на рабочем столе инженера или ученого.

В современных осциллографах компании LeCroy для обработки входного сигнала применена новая технология X-Stream, позволяющая в десятки и сотни раз быстрее обрабатывать входной сигнал, чем у аналогичных моделей конкурентов. А при исследовании СВЧ сигнала с помощью цифровых запоминающих осциллографов (ЦЗО или DSO), обладающих, как известно рядом недостатков, остро встает проблема увеличения скорости захвата осциллограмм и уменьшения времени обработки входного сигнала при выводе на дисплей. Технология X-Stream позволяет решить эту техническую проблему.

X-Stream технология основана на том, что входной сигнал поступает на SiGe АЦП (на основе гетеропереходов, дающих самое высокое быстродействие транзисторов) и оцифровывается в реальном времени с частотой до 10 Гв/с. После чего сигнал разбивается на пакеты, и храниться в быстрой КМОП-памяти (DRAM) тракта оцифровки. По двум высокоскоростным каналам сигнал из памяти передается в центральный процессор (ЦП). ЦП производит необходимую математическую обработку сигнала и вывод на ЖК-дисплей.

Программно-аппаратная реализация собственных уникальных технологий позволили обеспечить непревзойденную другими производителями скорость преоб-

разования входного сигнала, вывода и продвижения цифрового потока данных X-Stream после работы АЦП, а также синхронную и взаимоувязанную работу памяти DRAM и центрального процессора (фактически ПЭВМ) посредством использования шины PCI и 1 гигабитного Ethernet. Такое ускорение продвижения данных в конечном итоге формирующих на экране ЦЗО исследуемый сигнал в реальном формате времени, в том числе при наблюдении длительных (распределенных по времени) сигналов, позволяет задействовать значительные объемы памяти для обеспечения всестороннего и полного их анализа.

Кроме того, применение технологии X-Stream позволяет программные процедуры и задачи, написанные при помощи таких средств как MATLAB, Mathcad, Excel или Visual Basic, корректно помещать (инкапсулировать) в поток цифровых данных.

В таких отраслях промышленности, как радиоэлектроника, в сферах телекоммуникаций и связи, при производстве компьютерной техники и многих других, в которых необходимо тестировать и оценивать происходящие переходные, неустойчивые пикосекундные процессы, применяются осциллографы фирмы LeCroy.

5.3.7. Цифровые осциллографы LeCroy WaveRunner

Осциллографы LeCroy WaveRunner 6030A, 6050A, 6051A, 6100A, 6200A, 6030, 6050, 6051, 6100, 6200 (рис. 5.22) рекламируются как предназначенные для ежедневной работы. В этой серии приборов инженеры LeCroy реализовали свою мечту создать простой, доступный и необыкновенно производительный осциллограф. До недавнего времени, вы должны были выбирать либо дорогостоящий, сложный, мощный осциллограф для ежедневной аналитической работы, либо покупать дешевую маломощную модель низшего класса и малых возможностей. Лабораторный осциллограф серии WaveRunner 6000 устраняет эту проблему трудного выбора.

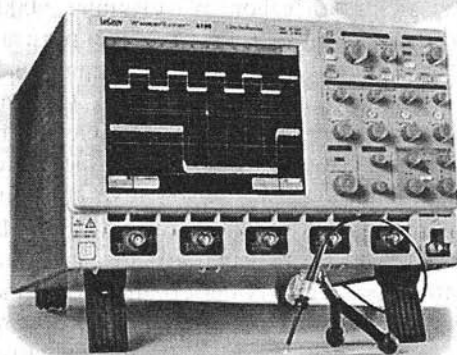


Рис. 5.22. Цифровой универсальный осциллограф серии LeCroy WaveRunner

Выпускаются следующие модификации осциллографов:

- WaveRunner 6030 / WaveRunner 6030A 4 канала 350 МГц 2,5 Гб/с
- WaveRunner 6050 / WaveRunner 6050A 4 канала 500 МГц 5 Гб/с
- WaveRunner 6051 / WaveRunner 6051A 2 канала 500 МГц 5 Гб/с
- WaveRunner 6100 / WaveRunner 6100A 4 канала 1 ГГц 5 Гб/с
- WaveRunner 6200 / WaveRunner 6200A 4 канала 2 ГГц 5 Гб/с

Приборы с индексом «А» относятся к обновленной линейке (анонсирована LeCroy в конце 2004 года). Она обладают улучшенными техническими характеристиками:

- Изменена схема и элементная база входного усилителя, что привело к значительному снижению шума каналов вертикального отклонения.
- В стандартной комплектации длина внутренней памяти увеличена до 2М.
- Применен новый высококонтрастный ЖКИ, обладающей более значительной светоотдачей, что сделало картинку на экране более четкой, даже при сильном освещении в помещении.
- Применена новая интеллектуальная схема управления вентиляторами, что позволило значительно снизить акустический шум от работающего осциллографа.
- В качестве операционной среды используется Windows XP.
- В программном обеспечении ЦЗО добавлена новая функция «LabNotebook™», что позволяет создавать, корректировать и отправлять отчеты на основе полученных осциллограмм прямо из ПО осциллографа (ранее для этого требовалось использование трех различных ПО из ОС Windows).

С помощью панели управления WaveRunner 6000 можно контролировать просмотр и измерение необходимых форм сигналов. Двухуровневый пользовательский интерфейс позволяет кончиками пальцев решать общие задачи, а при более глубоком анализе достаточно просто двух легких прикосновений к сенсорному экрану. Установка коэффициента отклонения, смещения, изменение масштаба, установленные процедуры, курсоры и документирование все находятся под управлением кончиков пальцев и органов управления.

Серия лабораторных осциллографов WaveRunner 6000 поддерживает полосу пропускания от 350 МГц до 2 ГГц и частоту дискретизации от 2,5 до 10 Гв/с. Стандартная длина памяти составляет 1 Мб, расширяемая до 12 Мб на всех каналах, а в случае объединения 2х каналов до 24 Мб. Осциллографы WaveRunner с данными параметрами работы стоят намного меньше своих предшественников со старыми технологиями. Так, даже при небольшом бюджете, вы можете позволить себе уверенность, предоставляемую передовой технологией.

Новый пассивный делитель PP007 на частоты до 500 МГц поставляется в комплекте с серией WaveRunner 6000. Делитель имеет размер иглы 2,55 мм и позволяет производить измерения в маленьких пространствах без касания другого устройства. Малая емкость (<9,5 пФ) и плоская АЧХ гарантируют хорошее согласование с высокоомным входным усилителем WaveRunner. Делитель совместим с более чем 30 приспособлениями, включая зажимы, крючки, наконечники, земляные провода и адаптеры BNC. Это позволяет применять его в различных областях. PP007 является одним из 25 пассивных, активных, электрических и дифференциальных пробников от LeCroy, которые совместимы с WaveRunner 6000.

Осциллографы серии WaveRunner 6000 используют те же технологии SiGe, которая применяется в высокоскоростных осциллографах WaveMaster от LeCroy (они описаны ниже). Высокие частоты дискретизации в сочетании с низким значением джиттера (3 пс) и высокостабильным опорным генератором дают такое разрешение по времени, которое могут дать только осциллографы других фирм, стоящие в два раза дороже.

Память осциллографа WaveRunner 6000 сохраняет тысячи событий, которые могут быть использованы для просмотра на досуге. Можно воспроизводить историю сигнала, искать и просматривать сигнал от развертки к развертке и останавливать сигнал, если пользователя что-то заинтересовало.

Компания LeCroy внедрила собственную X-Stream технологию в осциллографы WaveRunner 6000, что значительно позволило увеличить производительность и повысить скорость отображения на дисплее. Собственные алгоритмы обработки, КМОП память, а также усилители и АЦП на основе SiGe полупроводниковой технологии позволяют захватывать и обрабатывать данные в 10—100 раз быстрее, чем осциллографы конкурентов. По крайней мере так утверждают разработчики этих приборов.

Серия WaveRunner 6000 сконструирована таким образом, что при увеличении потребностей пользователей растут ее возможности и производительность. Дополнительные пакеты программ позволяют этому многофункциональному лабораторному осциллографу выполнять самые сложные математические и аналитические задачи с большой легкостью, независимо от сложности применения. Более того, цена на данный осциллограф намного меньше цен его конкурентов, которые не являются столь же многофункциональными и не имеют столько дополнительных приспособлений и программ. Впрочем, специалисты конкурирующей компании Tektronix оспаривают эти доводы и справедливо отмечают, что при регистрации однократных процессов ее осциллографы имеют определенные преимущества.

Возможности подобных приборов во многом определяются не только совершенством их аппаратных решений, но и программными средствами. Ориентация WaveRunner на самую массовую операционную систему Windows XP способствует разработке пакетов программ для осциллографов этой серии. Например, расширенный математический пакет XMATH предоставляет Вам полный набор инструментальных средств, предназначенных для выполнения анализа формы сложных сигналов. Он позволяет использовать более 30 стандартных математических функций и выполнять измерения более 40 параметров. Он дает возможность измерений со слежением, расширенное БПФ (до 24 Мб), расширенное построение гистограмм и построение графиков различных параметров во времени вплоть до одного миллиона событий. Для максимально глубокого выполнения анализа можно подключать неограниченное количество функций. Для использования этой возможности XMATH обладает графическим интерфейсом, который позволяет осуществлять связь с источником входного сигнала, выполнять измерение и отображать пиктограммы для весьма простого выполнения расширенного анализа.

Расширенный пакет индивидуального анализа XDEV позволяет Вам создавать свои собственные программы для параметров измерений или математических функций с использованием таких программных обеспечений, как Excel, MATLAB и Mathcad. XDEV позволяет Вам интегрировать без каких-либо дополнительных настроек свои индивидуальные измерения непосредственно в информационный канал осциллографа, устраняя необходимость выполнения программ по отдельности. Вы можете также использовать XDEV для настройки интерфейса осциллографа. Если Вам необходимо создать шаблон для специальной задачи или для конкретной аудитории (например, для технического персонала предприятия или студентов) или даже если Вы просто любите настраивать интерфейс на свой собственный вкус, Вы без труда сможете это сделать.

Осциллографы серии WaveRunner 6000 обладают многочисленными опциями, касающимися программирования. В дополнение к унаследованному от LeCroy

языку команд дистанционного управления можно использовать COM-команды или драйверы IVI и LabView. Операционная система осциллографа WaveRunner 6000, построенная по принципу открытой платформы Windows, предоставляет возможность устанавливать любое Windows-совместимое программное обеспечение, позволяя использовать наилучшие программные средства и периферийные устройства, подключаться к интернету и даже работать с осциллографом дистанционно.

Пакет DFP2 позволяет вам применять любой из линейно-фазовых фильтров с конечной импульсной характеристикой. Данный пакет расширяет ваши возможности в исследовании важных компонентов сигнала с помощью отфильтровывания нежелательных спектральных компонентов, например шума. Вы можете воспользоваться стандартными фильтрами или создать свои собственные.

Пакет измерений для дисковых приводов (DDM2) включает в себя множество новых измерений, предназначенных для дисковых приводов. DDM2, в сочетании с расширенной системой синхронизации, предлагает идеальное решение для выполнения анализа неисправности при проверке дисковых приводов.

Только для WaveRunner 6200 поставляется пакет для проверки локальных сетей Ethernet.

Данный пакет (ENET) позволяет Вам выполнять полную проверку сигналов для стандартов Ethernet 1000Base-T, 100Base-TX, и 10Base-T. Измерения джиттера и по маске импульса выполняются с автоматическим совмещением формы сигнала, а все полученные результаты имеют индикатор прохождения или непрохождения тестирования в соответствии с проверяемым стандартом IEEE 802.3-2000 и ANSI X5.265.

Пакет JTA2 используется для определения эффектов модуляции и дрожания неустойчивого сигнала, для отслеживания изменений по времени и для выполнения измерений во временных, частотных и статистических областях. Просмотр дрожания сигнала и гистограмма дрожания сигнала позволяют Вам вести наблюдения за системой такими способами, о которых Вы ранее даже не предполагали.

Для анализа и измерения мощности служит пакет PMA2, занимающий ведущую роль в промышленных областях применения, автоматизирует и расширяет возможности по выполнению анализа устройств и схем преобразования энергии. Использование вспомогательных принадлежностей, типа дифференциальных усилителей, дифференциальных датчиков, датчиков тока и приспособлений для компенсации сдвига по фазе способствует полному решению поставленной задачи измерения и анализа мощности.

Пакет средств SDM, благодаря расширенной памяти и собственному низкому значению джиттера цифрового запоминающего осциллографа WaveRunner, предоставляет возможность измерения параметров характеристик последовательных шин. Пакет SDM позволяет выбрать необходимую маску из обширного перечня стандартных глазковых диаграмм или создать свой собственный шаблон. Нарушения условий шаблона ясно обозначаются на дисплее, поэтому Вам не нужно постоянно теряться в догадках. SDM также позволяет использовать программное обеспечение «Golden PLL», предназначенное для восстановления глазковой диаграммы, получаемой из долговременного сбора данных. Измерения выполняются очень быстро и при этом устраняется явление джиттера синхроимпульса, предоставляя Вам наиболее точный результат измерения. Поставляется и ПО для тестирования протоколов передачи интерфейса USB 2.0 (только для WaveRunner 6200).

Порт USB2 полностью обеспечивает сбор и анализ данных для устройств с интерфейсом USB 2.0.

Осциллографы компании LeCroy разработаны, произведены и тестированы так, чтобы обеспечить высокую надежность работы. На них дается трехгодичная гарантия. Для минимизации потерь от простоя LeCroy осуществляет обновление версий ПО, поверки, страховки и пересылки ваших приборов, находящихся на гарантийном обслуживании, без взимания платы. Долгосрочная поддержка осуществляется в течении семи лет.

5.3.8. Цифровые осциллографы LeGroy WaveSurfer

Еще одна серия приборов фирмы LeCroy — осциллографы серии WaveSurfer (рис. 5.23). Эти приборы в еще большей степени ориентированы на массовые применения. Они имеют полосы частот вертикального тракта 200, 350 и 500 МГц. Панель управления несколько упрощена.

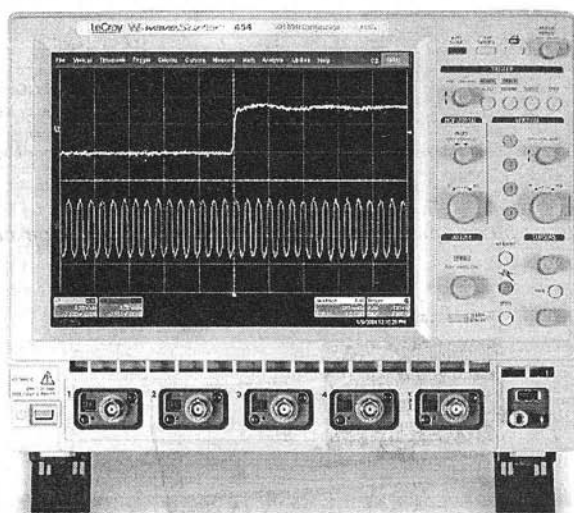


Рис. 5.23. Цифровой осциллограф серии WaveSurfer

Основные технические характеристики осциллографов серии WaveSurfer представлены на рис. 5.32. Они дают достаточно полное представление об этой серии осциллографов.

5.3.9. Цифровые осциллографы LeGroy WavePro

Серия цифровых осциллографов LeCroy WavePro (рис. 5.25) оснащена АЦП и входными усилителями, выполненными по технологии SiGe, в них также применена технология X-Stream™. Серия WavePro 7000 предоставляет возможности по быстрым и точным измерениям в полосах 1 ГГц и 3 ГГц.

Просмотр сигнала на экране с высоким разрешением является необходимым, однако сегодняшние инженерные задачи требуют возможности проведения новых видов измерений и анализа формы сигнала. Такие возможности дают большую уверенность в результатах измерений и позволяют сделать измерения более быстрыми, более точными и достоверными. Этому способствует высокая частота диск-

Основные характеристики

Тип осциллографа	424	422	434	432	454	452
Полоса пропускания	200 МГц		350 МГц		500 МГц	
Время нарастания	2 нс		1,15 нс		800 пс	
Количество каналов	4	2	4	2	4	2
Частота дискретизации	1 Гвыб/с, (при однократном запуске); 2 Гвыб/с (при объединении каналов)					
Эквивалентная частота дискретизации	50 Гвыб/с					
Стандартная длина памяти	250 К (500К при объединении каналов)					
Максимальная длина памяти (при использовании опции)	1М (2М при объединении каналов)					
Стандартное время захвата сигнала	250 мкс при максимальной частоте дискретизации					
Максимальное время захвата сигнала (при использовании опции расширения памяти)	1 мс при максимальной частоте дискретизации					
Вертикальное разрешение АЦП	8 бит					
Коэффициент отклонения	1 мВ/дел - 10 В/дел (1 МОм) 1 мВ/дел - 2 В/дел (50 Ом);					
Погрешность измерения напряжения	$\pm(0.015 \cdot U + 0.005 \cdot K)$ U - измеренное значение напряжения, В; K - величина численно равная установленному значению коэффициента отклонения, В.					
Ограничение полосы пропускания	20 МГц		20 МГц, 200 МГц			
Максимальное входное напряжение	400В пикового значения					
Связь входа	постоянная переменна, заземлено					
Входное сопротивление	1МОм (16пФ) 50 Ом 1%					
Тип делителей	разъем BNC или ProBus®					
Делитель (стандартный)	PP007 (500 МГц) на каждый канал					
Коэффициент отклонения	1 мс/дел - 1000 мс/дел в режиме самописца от 500 мс/дел до 1000 мс/дел					
Погрешность измерения временных интервалов	10 ppm					

Рис. 5.24. Основные характеристики цифровых осциллографов серии WaveSurfer

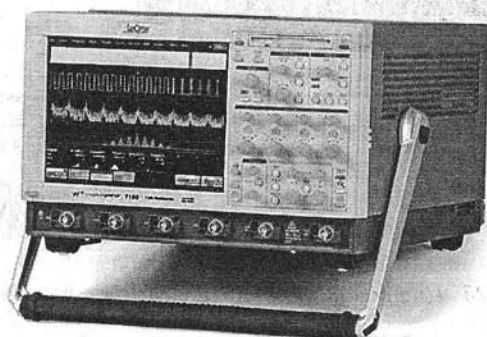


Рис. 5.25. Внешний вид осциллографа LeCroy серии WavePro

ретизации в реальном времени 10 ГГц (20 ГГц при объединении каналов), захват до 48 миллионов точек для анализа сложных сигналов при высоких частотах дискретизации и входные переключаемые сопротивления 1 МОм или 50 Ом. Осциллографы имеют малый джиттер (дрожание фронта импульсов) на уровне 2 пс.

Уникальный процесс обработки сигналов дает возможность добавлять собственные виды измерений в программу.

Приборы серии WavePro делятся по полосе пропускания канала Y:

- WavePro 7300 4 канала 3 ГГц
- WavePro 7200 4 канала 2 ГГц
- WavePro 7100 4 канала 1 ГГц
- WavePro 7000 4 канала 1 ГГц

В запатентованной технологии X-Stream компании LeCroy реализована высокоскоростная потоковая архитектура, позволяющая избежать проблем выбора между большими объемами записей и быстрой обработкой. WavePro с технологией X-Stream может проводить анализ в 10—100 раз быстрее, чем любой другой осциллограф с полосой пропускания 1 ГГц — 3 ГГц. Это делает их отличными приборами для исследований в таких проектах как: разработка устройств Datacom/telecom, высокоскоростной Ethernet, USB 2.0 и т. д.

Осциллографы WavePro имеют множество других возможностей, которые упрощают работу. Среди них новая структуризация настроек для измерения и анализа, большой цветной сенсорный экран, а также быстрый доступ к мощным возможностям по анализу сигнала.

Осциллографы WavePro являются единственными приборами с такой полосой пропускания, которые могут точно измерить длинные сложные сигналы, применяемые в современных устройствах. Основа этому собственная технология компании LeCroy X-Stream. Никакая другая компания не может предложить технологию, аналогичную X-Stream. Только LeCroy дает Вам ту уверенность в результатах измерений, в которой Вы нуждаетесь.

Технология X-Stream обеспечивает:

- захват и анализ длинных сигналов быстрее чем когда-либо;
- расширенный набор инструментов для детального анализа сигнала;
- настройку режимов измерений под потребности пользователя;
- отображение сигнала наряду с обычными осциллограммами в трехмерном виде и в виде гистограмм.

КМОП — память, также являющаяся собственной разработкой компании LeCroy, принимает 10 Гб данных в секунду в реальном времени от каждого аналогово-цифрового преобразователя SiGe, объединяет их в пакеты и передает данные через два гигабитных канала Ethernet. Как только данные попадают в центральный процессор, то алгоритмы программного обеспечения, являющиеся собственностью компании LeCroy, «захватывают» каждый пакет и выполняют требуемые вычисления в кэше первого уровня центрального процессора. Этот процесс устраняет «получение» данных и математических инструкций из оперативной памяти для минимизации времени вычисления. Он позволяет также пользователю разрабатывать собственные функции анализа и виды измерений и вставлять их в процесс обработки данных, используя опцию XDEV.

Операционная система MS Windows® 2000 осциллографов WavePro работает под ОС, обеспечивающей устойчивую работу, а также интуитивный и информативный пользовательский интерфейс. Приборы имеют большой объем памяти 1 Мб на канал в стандартной комплектации, возможно расширение памяти до 24 Мб на канал.

Есть ряд и дополнительных функций, например, автоматически растяжка всех разверток в 10 раз, а также «аналоговое послесвечение» — выбор между цифровым режимом отображения и режимом аналоговой эмуляции для исследования модуляции сигнала. Автоматическая настройка сигнала возможна нажатие одной кнопки, что обеспечивает захват сигнала и его вывод на дисплей. Большой сенсорный экран SVGA с размером по диагонали 26,4 см имеет на 200% большую площадь, чем у других осциллографов.

Еще одна серия цифровых осциллографов WavePro 7000 характерна применением аналогово-цифрового преобразователя SiGe, большого экрана с высоким разре-

шением, операционной системы Windows и технологии X-Stream. SiGe усилители осциллографа обеспечивают очень равномерную АЧХ. Используется частота дискретизации 10 ГГц (5 ГГц для модели 7000). Модель 7100 является первым осциллографом с полосой пропускания 1 ГГц при частоте дискретизации 10 ГГц. Стандартная память — 1 Мб на канал (500 кб для модели 7100) с опцией расширения до 24 Мб на канал (48 Мб при объединении каналов). Уровень джиттера в 2 пс позволяет обнаружить даже слабые искажения в сигнале. Осциллограф WavePro 7300 является первым осциллографом, который предоставляет возможность работы как с входным сопротивлением 1 МОм, так и 50 Ом в полосе частот до 3 ГГц. Такая гибкость позволяет WavePro 7300 захватывать низкочастотные сигналы до 500 МГц при работе с высокоомным входом и высокочастотные до 3 ГГц при сопротивлении 50 Ом. Прибор легок в обращении и прост при просмотре результатов.

Управление цифровым запоминающим осциллографом WavePro является простым и интуитивным. Регулируйте временную развертку, коэффициент отклонения и курсоры при помощи кнопок на передней панели или используйте сенсорный экран с пользовательским интерфейсом. Доступ к режимам измерений является быстрым и визуальным. Это является очень удобным. ОС Windows 2000 помогает реализовать режимы ниспадающих меню и возможности ввода/вывода информации, а также устойчивость в работе.

Просмотр результатов является таким же легким, как и их сбор. Все модели WavePro оснащены 26.4 см SVGA сенсорным экраном с площадью на 200% большей, чем у других осциллографов. Кроме того, LeCroy разработал для WavePro возможности, которые позволяют просматривать сигнал во временной, частотной или статистической областях. Например, осциллографы WavePro могут создать до восьми самостоятельных окошек с разными масштабами или математическими процедурами, каждое из которых предназначено для анализа различных сегментов сигнала. Вычисления могут быть и при включении масштабирования. Особенности режима растяжки позволяют просматривать коррелированные временные события, а для прокрутки сигнала есть функция AutoScroll.

Другой уникальной особенностью просмотра являются гистограммы, маленькие иконки просмотра гистограмм, которые обеспечивают визуальный просмотр вида распределений измеряемого параметра. Одновременно может быть отображено до восьми гистограмм и статистика по ним, что не влияет на время обработки.

Сегодня осциллографы WavePro имеют пакет для анализа входного сигнала, который позволяет инженерам искать неисправности в цепях на частотах 1—3 ГГц теми способами, которые ранее не были доступны. Пакет ХМАР дает осциллографам возможности, которые обычно использовались для приборов, работающих в более высоком диапазоне частот и ценовой категории.

Представьте себе захват большого количества данных и их графическое представление в интуитивной и понятной форме. Возможности построения гистограмм и графиков позволяют Вам использовать большую память цифрового запоминающего осциллографа WavePro с максимальными преимуществами. Расширенные алгоритмы БПФ обеспечивают уникальные возможности по спектральному анализу, упрощают ваше пользование осциллографом, когда Вы хотите задать собственные настройки для измерений или математических операций.

Анализ джиттера и временных параметров позволяет измерять период, длительность и другие параметры. Результаты могут быть представлены в виде статистики, гистограмм или временных графиков. Пользователи могут также изучить сигнал с помощью БПФ, которое обеспечивает спектральный анализ. Приборы

обеспечивают различные виды математической обработки сигналов, курсорные измерения, включение в работу новых функций и методов анализа, работу совместно языком программирования Visual Basic, математическими системами MATLAB, Mathcad и др, с электронными таблицами Excel. и без каких-либо проблем встроить его в процесс обработки сигнала вашим осциллографом. Пакет программ компании LeCroy CustomDSO позволяет создавать пользовательский интерфейс под ваш процесс, начиная с панели управления.

Дистанционное управление осциллографами WavePro может быть также настроено пользователем. Используя стандартный язык команд компании LeCroy или LabView, осциллографы WavePro можно соединять с любым программным обеспечением. Команды Active-X Microsoft также можно использовать для интеграции в большинство программ на основе Windows. Дистанционное управление может осуществляться через стандартную сеть 10/100Base-T или через дополнительный интерфейс КОП.

5.3.10. Цифровые осциллографы LeCroy WaveMaster

Серия осциллографов LeCroy WaveMaster (рис. 5.26) расширяет возможности анализа сигналов в диапазоне до 3—6 ГГц. WaveMaster — первый многофункциональный запоминающий осциллограф, обеспечивающий работу в широком диапазоне частот, высокую частоту дискретизации, большую память при регистрации сигнала. Передовая технология X-Stream позволяет быстро и удобно проводить анализ формы регистрируемого сигнала. Современные математические пакеты XMATH и XDEV повышают скорость и гибкость работы, позволяя решать уникальные задачи быстрее, чем когда-либо. В этих приборах используются усилитель, аналого-цифровой преобразователь и схема синхронизации на базе SiGe технологии, а также технология X-Stream. Приборы имеют интуитивный пользовательский интерфейс, с ними поставляются математические пакеты XMATH и XDEV.

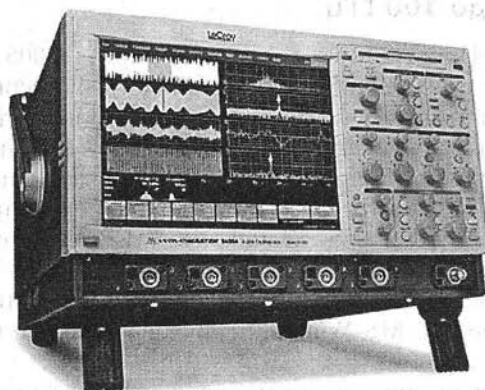


Рис. 5.26. Цифровые запоминающие осциллографы WaveMaster фирмы LeCroy

Приборы классифицируются по полосе пропускания:

- WaveMaster 8620A 4 канала 6 ГГц
- WaveMaster 8600A 4 канала 6 ГГц
- WaveMaster 8500A 4 канала 5 ГГц
- WaveMaster 8300A 4 канала 3 ГГц

WaveMaster первый цифровой запоминающий осциллограф с полосой пропускания 6 ГГц (ЦЗО), обладающий частотой дискретизации входного сигнала в реальном времени 20 ГГц и объемом памяти до 100 Мб. Поскольку такие высокие скорости дискретизации входного сигнала требуют большого объема памяти даже для обработки коротких временных интервалов, осциллографы серии WaveMaster в стандартной комплектации уже оснащены 1 Мб памяти на каждый канал. Схема синхронизации в осциллографе WaveMaster обеспечивает самую широкую полосу пропускания в режиме запуска по фронту импульса (до 5 ГГц) и уникальную чувствительность.

Стандартный объем памяти в осциллографе WaveMaster составляет 1 Мб на канал (с возможностью расширения до 50 Мб на канал). Осциллограф WaveMaster использует КМОП-память (оригинальная разработка компании LeCroy), которая во много раз превосходит по скорости аналогичные устройства. SMART память компании LeCroy дает значительные преимущества при анализе формы сигнала и позволяет избежать нежелательных искажений сигнала, которые могут появиться при работе с небольшой памятью в цифровых осциллографах.

Источник опорной частоты осциллографа WaveMaster имеет относительную погрешность $1 \cdot 10^{-6}$, а джиттер прибора составляет около 1 пс. При этом достигается погрешность измерения временных интервалов не более (0,06/Фдискр+10⁻⁶*Тизм). SiGe система синхронизации осциллографа WaveMaster гарантирует запуск развертки в диапазоне частот до 5 ГГц и высокую чувствительность даже при захвате импульсных сигналов малой амплитуды. Джиттер системы синхронизации составляет не более 2,5 пс. Дополнительные возможности синхронизации по захвату кратковременных импульсных помех (гличей) и логических последовательностей обеспечиваются при помощи интеллектуальных режимов запуска схемы синхронизации.

5.3.11. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц

По данным ЗАО «Прист» (www.prist.ru) 04 апреля 2005 г компания LeCroy представила цифровые стробоскопические осциллографы серии WaveExpert 9000 и SDA 100G, которые на этот момент стали самыми высокочастотными осциллографами в мире с полосой пропускания 100 ГГц и памятью, которая может наращиваться до 512 Мбайт. Одновременно чуть раньше была полностью завершена работа по локализации осциллографов производства компании LeCroy. С апреля 2005 года, при покупке любой модели цифрового ЦЗО LeCroy (серий WaveSurfer, WaveRunner, WavePro, WaveMaster, SDA, WaveExpert, SDA 100G), вы получаете прибор имеющий: панель на русском языке, русифицированное ПО осциллографа, русифицированную ОС MS Windows и руководство по эксплуатации на русском языке.

Ныне компания LeCroy представляет цифровые стробоскопические осциллографы серии WaveExpert 9000 и SDA 100G с полосой пропускания 100 ГГц и работающие на основе эксклюзивной патентованной технологии когерентных интервалов стробирования (КИС). Развертка КИС позволяет захватывать и отображать длинную последовательность входных данных без применения внешнего запуска по шаблону.

WaveExpert — это первый осциллограф в мире, соединяющий в себе высокую полосу пропускания и высокую достоверность измерения, присущую стробоскопическим осциллографам, с высокой скоростью сбора данных, гибкостью и про-

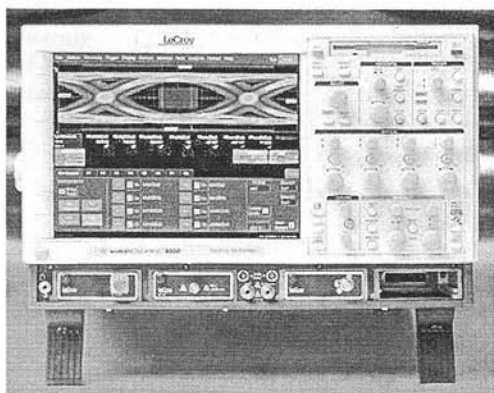


Рис. 5.27. Стробоскопический осциллограф WaveExpert фирмы LeCroy с полосой частот до 100 ГГц

стотой управления, присущей осциллографам реального времени. Внешний вид осциллографа представлен на рис. 5.27.

Осциллографы WaveExpert и SDA 100 G имеют скорость сбора данных 10 Мбит в секунду, что в 100 раз превышает скорость сбора данных для осциллографов такого класса, существующих в мире на настоящий момент. Приборы построены на модульном принципе, что позволяет использовать совместно с ними 4 различных модуля сбора информации. Дополнительно осциллографы имеют опциональные модули генераторов сигналов. Генератор сигналов воспроизводит псевдослучайную последовательность PRBS, которая обычно используется для тестирования коэффициента ошибок различных устройств передачи. Дополнительный модуль рефлектометра может выдавать в линию импульс длительностью менее 20 пс с малым временем нарастания, что позволяет производить измерения неоднородности сопротивления линий передачи.

Развертка КИС, разработанная LeCroy, создает импульс дискретизации, используя опорный генератор стабильной частоты с применением ФАПЧ. Среднеквадратическое значение джиттера КИС составляет менее 500 фс. Результатом применения КИС является высокая частота дискретизации и точное воспроизведение сигнала при любой скорости передачи. Когерентная дискретизация позволяет осциллографу захватить шаблон из потока данных и точно и просто определить его длину. В результате параметры входного сигнала, отображаемого на экране осциллографа, могут быть измерены или преобразованы такими же методами и способами, как и у осциллографа реального времени.

Полоса пропускания 100 ГГц является вершиной разработки технологий осциллографов на сегодняшний день. Это достижение стало возможным при использовании монолитной смесительной головки, разработанной с использованием патентованной технологии нелинейной линии передачи (НЛЛП). Тут уместно отметить, что сокращение фронта импульсов при прохождении через нелинейную линию до 0 (и даже до отрицательных величин, что означает, что вершина волны-импульса обгоняет основание и имеет место разрыв в импульсе) было описано еще в книге [11]. НЛЛП используется для генерирования серии стробирующих импульсов с почти прямоугольной апертурой. Все предыдущие смесители имели форму апертуры, приближенную к гауссовской. Прямоугольная апертура стробирующих импульсов позволяет увеличить на 60 % эффективность стробирования, расширить полосу пропускания, снизить джиттер. Монолитная конструкция сме-

сителя позволила увеличить частоту дискретизации, по сравнению с предыдущими моделями стробоскопических осциллографов.

Осциллографы WaveExpert и SDA 100G специально разработаны для решения прикладных задач отображения и анализа высокоскоростных сигналов, используемых сегодня. Измерения в современных системах передач на скоростях свыше 3 Гб/с, требуют средств измерения с высокой полосой пропускания и малым временем нарастания. Отличительной особенностью этих приборов является свойство отображения входного сигнала также, как и на осциллографе реального времени, обеспечение измерения как суммарного, так и случайного и систематического джиттера устройств. Объем стандартной памяти составляет 4 миллиона точек на канал, что позволяет анализировать джиттер в длинных кодовых посылках. Расширение памяти до 512 миллионов точек на канал дает возможность захвата, отображения и измерения шаблона с длиной в несколько миллионов бит.

Удобный пользовательский интерфейс дает возможность быстрого и легкого доступа к более, чем 50-ти измерениям и математическим функциям. Сохранение преимущественности построения пользовательского интерфейса с осциллографами реального времени LeCroy, дает возможность инженерам-пользователям быстрого перехода к использованию стробоскопических осциллографов без какого-либо дополнительного обучения. Пользовательский интерфейс осциллографов WaveExpert и SDA 100 G так же позволяет комбинировать и создавать свои собственные функции измерения.

WaveExpert и SDA 100G имеют возможность отображения и исследования высокоскоростных сигналов реального времени, таких как PCI Express, SAS, Fibre channel и FB-DIMM.

WaveExpert и SDA 100G предназначены и для использования в области общего применения, включая рефлектометрию, построение глазковых диаграмм и анализа по шаблону, анализ джиттера. Программное обеспечение осциллографа WaveExpert может производить анализ глазковых диаграмм и джиттера в соответствии с различными стандартами передачи данных. Осциллограф SDA 100G разработан специально для использования в системах последовательной передачи данных и имеет когерентную развертку, прекрасно подходящую для измерения всех параметров джиттера. В дополнение к двум основным блокам осциллографа существуют несколько дополнительных вставных модулей, предназначенных для измерения электрических или оптических сигналов. Модули преобразования электрических сигналов имеют полосы пропускания 20 ГГц, 30 ГГц, 50 ГГц, 70 ГГц и 100 ГГц. Модули преобразования электрических сигналов имеют полосы пропускания 25 и 50 ГГц. Данные модули разработаны с упором на то, чтобы дать клиенту возможность конфигурирования осциллографов WaveExpert и SDA 100G с учетом стоящих перед ним задач на основе гибкой модульной системы, позволяющей в любой момент расширить возможности осциллографа при расширении круга выполняемых задач.

Так же существуют модули восстановления тактовой частоты. Эти модули используются для восстановления тактовой частоты сигнала из потока данных, когда доступен только непосредственно поток данных. Модули могут быть предназначены как для работы с электрическими, так и с оптическими сигналами. Диапазон восстанавливаемых частот составляет от 622 Мб/с до 13,5 Гб/с.

Осциллографы WaveExpert и SDA 100G включают полный комплект масок, предназначенных для исследования сигналов в кодах RZ и NRZ. Когерентная развертка обеспечивает быстрое тестирование по маскам — около 3 миллионов точек

в секунду, что в 75 раз быстрее существующих на сегодняшний день технических решений. Этот уровень сбора данных, на сегодняшний день, обеспечивает самую высокую степень достоверности и минимальные погрешности.

WaveExpert 9000 стробоскопический осциллограф — основной блок. SDA 100G это стробоскопический анализатор систем последовательной передачи данных. Для них поставляются:

- SE 100 смеситель 100 ГГц
- SE 70 смеситель 70 ГГц
- SE 50 смеситель 50 ГГц
- SE 30 смеситель 30 ГГц
- ST 20 модуль рефлектометра 20 ГГц
- SO 50 оптический модуль 50 ГГц
- SO 25 оптический модуль 25 ГГц

Таким образом, осциллографы серии WaveExpert и SDA перекрывают диапазон частот до 20—100 ГГц. Конечно это уникальные приборы, отражающие наивысшие достижения в технике осциллографии. К сожалению объем продаж этих дорогих приборов в России составляет от силы несколько единиц в год.

5.3.12. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies

Фирма Agilent Technologies еще один крупный производитель на рынке высококачественных (их называют High End) осциллографов. Эта, одна из немногих фирм, владеющих новейшей технологией производства новейших цифровых осциллографов, выпускает ряд серий таких осциллографов с частотами от десятком МГц до десятков ГГц. На российском рынке эта фирма представлена слабо, скорее всего, вследствие очень высокой цены большинства ее осциллографов. С характеристиками ее осциллографов можно ознакомиться на Интернет-сайте этой компании www.home.agilent.com.

Серия Agilent 54600

Серия Agilent 54600 это элитные цифровые запоминающие осциллографы с цветными дисплеями и диапазоном верхних частот от 50 до 500 МГц. Приборы способны выводить до 100 000 кривых в секунду при 256 уровнях интенсивности. Число каналов 2 или 4, но у некоторых приборов может быть расширено еще на 16 каналов. Частоты стробирования от 200 Мв/с до 2 Гв/с. Стоимость приборов от 2800 \$ до 11000 \$.

Серия Agilent 6000

Новая серия Agilent 6000 это осциллографы с диапазоном верхних частот от 0,3 до 1 ГГц. Внешний вид приборов этой серии показан на рис. 5.28. Частота выборки у этих приборов от 2 до 4 Гв/с, емкость памяти 1 Мб с расширением опционально до 2 или 8 Мб. Цена приборов доходит до 6000 \$.

Серия Agilent 8000

Серия 4-канальных цифровых осциллографов Agilent 8000 это сверхширокополосные осциллографы с верхними частотами от 8 до 12—13 ГГц. Прибор этой серии DSO80804A с верхней частотой 8 ГГц и частотами квантования 20 Гв/с при использовании одного канала и 40 Гв/с при использовании двух каналов. Стоимость 10 и 12 ГГц осциллографов этой серии достигает (нервному читателю лучше не читать) — 94 000 и 115 000 \$. Это самые дорогие из приборов фирмы Agilent.

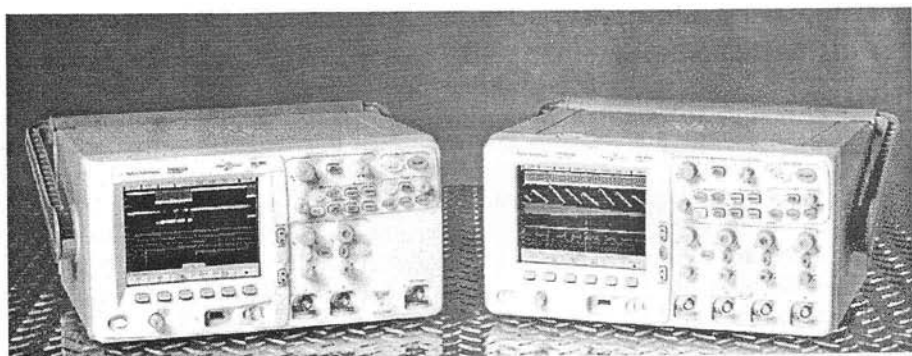


Рис. 5.28. Внешний вид цифровых осциллографов серии Agilent 6000

Цифровой осциллограф этой серии DSO81304A (рис. 5.29) имеет полосу рабочих частот до 12—13 ГГц при частоте квантования до 40 Гв/с. Нестабильность запуска менее 0,5 пс. В приборе использованы электронные аттенюаторы. Усилители канала Y минимизированы по уровню шумов. Стоимость такого прибора около 75 000 \$.

Самым широкополосным прибором фирмы Agilent является осциллограф 86100C DCA-J (рис. 5.30). Прибор объединяет 4 инструмента в одном: цифровой анализатор коммуникационных устройств, временной рефлектометр TDR для импедансного анализа, осциллограф с полосой частот до 80 ГГц и анализатор джиттера для сверхскоростных электронных и оптических устройств. Удивительно, но цена этого прибора «все-го-то» 17 834 \$ при поставке в течении трех недель.

Приборы фирмы Aligent Technologies, как и отмеченные выше стробоскопические осциллографы фирм LeGroy и Tektronix, представляют высшие достижения осциллографической техники сегодняшнего дня. Они позволяют ученым заглянуть в тайны микромира и оценить чудеса сверхскоростных процессов. Но даже они не способны унять гонку за гонкой высокоскоростной микроэлектроники. Как уже отмечалось, кремниевые микротранзисторы корпорации Intel уже работают на частотах выше 1000 ГГц (1 ТГц), а кремниевые-германиевые транзисторы с гетеропереходами на еще более высоких частотах. Это подстегивает гонку в разработке сверхширокополосных осциллографов.

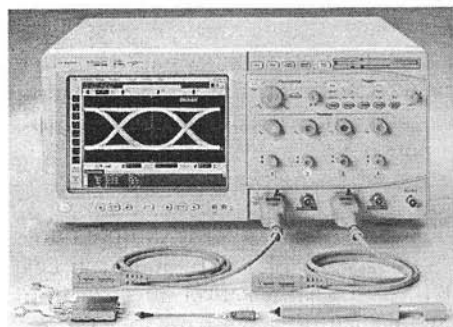


Рис. 5.29. Цифровой 12 ГГц-осциллограф DSO81304A

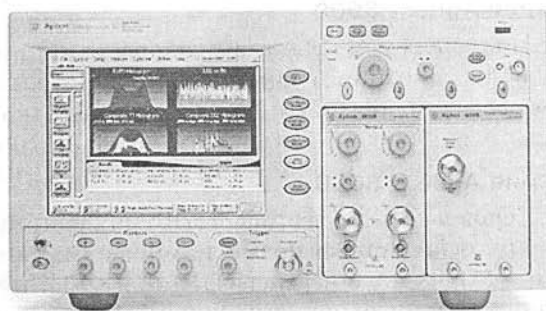


Рис. 5.30. Осциллограф с частотой до 80 ГГц Agilent 86100C DCA-J

5.4. «Бюджетные» цифровые запоминающие осциллографы

5.4.1. Какие из цифровых осциллографов можно отнести к бюджетным

Уровень финансирования бюджетной сферы у нас настолько низок, что приобретение современных цифровых осциллографов для научных и учебных лабораторий стало довольно затруднительным делом. Это, кстати, характерно и для большинства зарубежных научных и учебных лабораторий. В связи с этим возник термин «бюджетные приборы», т. е. приборы с достаточно низкой ценой, но, тем не менее, имеющие характерные признаки типовых рыночных моделей той или иной фирмы. К «бюджетным» цифровым осциллографам относятся приборы, стоимость которых не превышает 1000—1500 \$.

В последнее время даже такие известные производители рынка осциллографов, как Tektronix и Agilent Technologies, сочли нужным дополнить ряды своей продукции «бюджетными» моделями, спрос на которые намного превышает спрос на куда более дорогие обычные модели. Отнесение приборов к категории «бюджетных» достаточно условное. Некоторые типы «обычных» цифровых осциллографов, рассмотренные выше (например, приборы фирмы Good Will) по своим возможностям и стоимости уже приближаются к «бюджетным» моделям. Этому способствует разработка типовой унифицированной элементной базы для массовых цифровых осциллографов.

Цифровые осциллографы этого класса характеризуются прежде всего частотой выборок или числом выборок сигналов в единицу времени (Мв/с или Гв/с). Такие приборы делятся на два обширных класса:

1. Приборы с частотой выборки, изменяющейся по случайному закону со средней величиной, близкой к максимальной частоте исследуемых сигналов.
2. Приборы с высокой неизменной частотой выборки, которая примерно на порядок превышает максимальную частоту исследуемого сигнала.

Большинство «бюджетных» цифровых осциллографов сейчас относятся к типу 1 или к комбинированному типу (для периодических высокочастотных сигналов используется высокая частота выборки). Лишь осциллографы корпорации Tektronix относятся к типу 2 и обеспечивают наблюдение сигналов в реальном времени, без частых срывов в стробоскопический режим, характерный для наиболее высокоскоростных стробоскопических осциллографов. Все цифровые приборы имеют память для хранения осциллограмм и являются, как правило, запоминающими осциллографами. Многие приборы имеют возможности автоматического измерения ряда (до 10—20) параметров сигналов и обычные для цифровых приборов интерфейсы: USB, GPIB и RS-232.

5.4.2. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы TEKTRONIX

Осциллографы фирмы Tektronix, даже низшей категории, можно сразу узнать по их характерному прямоугольному корпусу и строгому виду в стиле «ретро». Это относится и к самым дешевым приборам серии TDS-1000 этой фирмы (рис. 5.31). В приборах используются кнопки с плавными обводами и круглые ручки, по виду напоминающие ручки в старых радиоприемниках. Экран занимает значительную часть площади передней панели и позволяет отображать осциллограммы и резуль-

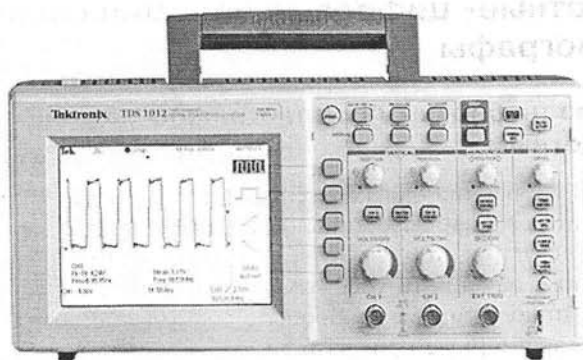


Рис. 5.31. «Бюджетный» двухканальный цифровой осциллограф TDS-1012 фирмы Tektronix с монохромным дисплеем

таты измерений. У многих осциллографов экран цветной. Цифровых надписей на передней панели практически нет. Все, что необходимо отражается на экране осциллографа.

Цифровые осциллографы серии TDS-1000 фирмы Tektronix пока единственные приборы этой фирмы, которые можно действительно отнести к «бюджетным». Так, осциллографы с полосой 60 МГц имеют стоимость около 1000 \$. Однако по мере увеличения полосы частот стоимость приборов фирмы TEKTRONIX быстро возрастает.

5.4.3. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы Agilent

В последнее время даже фирма Agilent Technologies, известная своими уникальными и дорогими приборами, реализует программу выпуска относительно дешевых осциллографов. Так, серия Agilent 54600 это цифровые запоминающие осциллографы с цветными дисплеями и диапазоном верхних частот от 50 до 500 МГц. Приборы способны выводить до 100 000 кривых в секунду при 256 уровнях интенсивности. Число каналов 2 или 4, но у некоторых приборов может быть расширено еще на 16 каналов. Частоты стробирования от 200 Мв/с до 2 Гв/с. Однако стоимость этих приборов от 2800 \$ до 11000 \$, так что к «бюджетным» их не отнесешь.

Новая серия Agilent 3000 это осциллографы низшего ценового диапазона — от чуть ниже 1000 \$ для прибора с полосой частот до 60 МГц и 1895 \$ для осциллографа с полосой частот до 200 МГц. Внешний вид цифрового 60 МГц осциллографа серии Agilent 3062 показан на рис. 5.32. Частота выборок у этих приборов 1 Гбит/с, предусмотрено автоматическое измерение 20 параметров и задание 4 математических функций, включая быстрое преобразование Фурье. Возможны обычные для цифровых приборов интерфейсы: USB, GPIB и RS-232. На рис. 5.32 хорошо видна работа «лупы времени». Выделенный на верхней осциллограмме участок просматривается на нижней осциллограмме в увеличенном масштабе. Это лишь одна из многих возможностей, присущих этим аппаратам.

5.4.4. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы EZ Digital

EZ Digital — южно-корейский производитель измерительной техники высокой надежности и качества, отличающейся вполне умеренной ценой. Фирма выпускает как аналоговые, так и цифровые осциллографы с полосой пропускания до

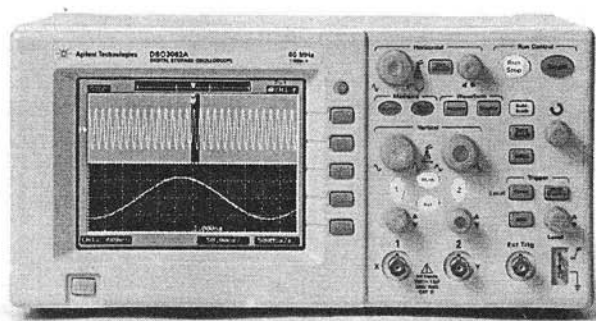


Рис. 5.32. Внешний вид цифровых осциллографов серии Agilent 3062

250 МГц. Эти вполне современные приборы, ввиду их дешевизны и привлекательного вида, хорошо подходят к категории «бюджетных» цифровых осциллографов.

OS-310M

Рассмотрение цифровых осциллографов фирмы EZ-Digital начнем с прибора необычной конструкции OS-310M (рис. 5.33). Этот компактный прибор с откидывающейся крышкой-дисплеем занимает мало места на рабочем столе и может легко переноситься. Прибор работает как от сети (через адаптер), так и от комплекта Ni-Cd аккумуляторных перезаряжаемых батарей. С помощью встроенного мультиметра можно проводить обычные измерения параметров электрических сигналов.



Рис. 5.33. Портативный осциллограф OS-310M с принтером для печати осциллограмм

OS-310M — двухканальный осциллограф с полосой пропускания каждого канала от 0 до 100 МГц. Для выборки сигналов используется метод случайного изменения положения выборок, что дает эквивалентную частоту выборок 5 Гв/с. Встроенный мультиметр имеет дисплей с разрядностью 3-3/4 (4000 значений) и запускается при пуске в режиме автоматической настройки осциллографа. К компьютеру или принтеру осциллограф подключается через последовательный порт RS-232C.

OS-3***D

Серия цифровых запоминающих осциллографов классической конструкции OS-3***D содержит базовые модели с полосами пропускания тракта вертикально-

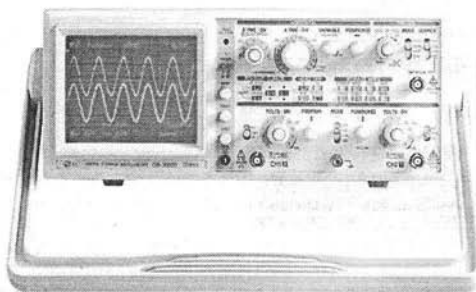


Рис. 5.34. Внешний вид цифрового запоминающего осциллографа OS-3020D

го отклонения 20, 40 и 60 МГц. На рис. 5.34 показан внешний вид осциллографа OS-3020D с полосой исследуемых частот до 20 МГц.

Приведем основные технические характеристики этого прибора:

- полоса пропускания осциллографа: 20 МГц;
- кол-во каналов: 2
- частота выборки: 20 Мвыб/с;
- входной импеданс: 1 МОм, 20 пФ;
- чувствительность по вертикали: 5 мВ/дел...5 В/дел;
- максимальное входное напряжение: 30 В (DC+AC ампл.), с делителем 250 В;
- погрешность измерения напряжения: 3...5%;
- усреднение сигнала: до 256 изображений;
- память: на 2 экрана, емкость памяти 2К слов на канал;
- специальные возможности: полное изображение медленно меняющихся сигналов, линейная и синусоидальная интерполяция изображения, электронная лупа для детального анализа сигнала;
- связь с компьютером: RS-232C;
- потребляемая мощность: 65 ВА;
- габаритные размеры: 320×140×430 мм;
- вес: 8,5 кг;
- комплект поставки: инструкция, предохранители 2 шт., шнур питания;
- опции: щупы, программное обеспечение RS-232C (LS-3000).

OS-3060D запоминающий осциллограф той же серии, но с полосой пропускания 60 МГц. Этот прибор является хорошим выбором по соотношению цена/качество/функциональность. Он имеет следующие технические характеристики:

- кол-во каналов: 2;
- частота выборки: 20 Мв/с;
- входной импеданс: 1 МОм, 20 пФ;
- чувствительность по вертикали: 5 мВ/дел...5 В/дел;
- максимальное входное напряжение: 30 В (DC+AC ампл.);
- погрешность измерения напряжения: 3...5%;
- время нарастания: 5,8 нс;
- длительность развертки: 0,1 мкс/дел...5 с/дел;
- режимы синхронизации: автоматический, нормальный, TV-V, TV-H;
- источник синхронизации: CH1, CH2, EXT, LINE;

- память: 2 осциллограммы;
- емкость памяти: 1000 слов/канал;
- габаритные размеры: 430×140×320 мм;
- вес: 8,5 кг.

DS-1***

Серия цифровых осциллографов DS-1*** содержит наиболее продвинутые модели с полосой пропускания 80, 100, 150 и 250 МГц. Внешне они различаются только надписью, указывающей на тип осциллографа (после 1 в названии осциллографов указывается их полоса пропускания в мегагерцах). На рис. 5.35 показан внешний вид двухканального осциллографа DS-1250 с полосой частот 250 МГц.

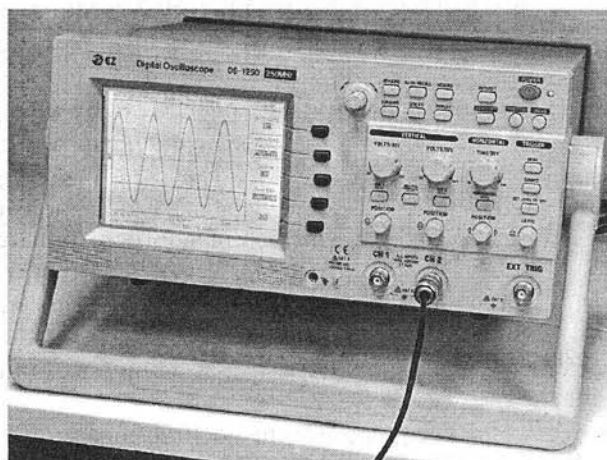


Рис. 5.35. Внешний вид двухканального осциллографа DS-1250 с полосой частот 250 МГц

Приведем характеристики прибора DS-1250:

- полоса пропускания: 0—250 МГц (−3 дБ);
- входной импеданс: 1 МОм и 20 пФ;
- чувствительность: 2 мВ/дел — 5 В/дел (шаг 1-2-5, 12 ступеней);
- погрешность измерения уровня сигналов: 3%;
- связь с источником сигнала: AC, DC, GROUND;
- максимально допустимое входное напряжение: 300 В пиковое (постоянное + переменное пиковое на частоте 1 кГц);
- время нарастания сигнала: около 1,4 нс;
- разрешающая способность развертки по времени: около 80 пс;
- погрешность развертки: 0.01%;
- время развертки: в эквивалентном режиме: 2 нс/дел — 0,1 мкс/дел, в режиме реального времени 0,25 мкс/дел — 0,1 с/дел, в режиме самописца 0,2 с/дел — 5 с/дел;
- регулировка по горизонтали: не менее 10 делений;
- сбор данных: максимальная частота отсчетов 200 Мвыб/с для одного канала;
- 100 Мвыб/с на 2 каналах одновременно в режиме реального времени, 25 Гв/с на 2 каналах одновременно в эквивалентном режиме;

- пиковый детектор: захват импульсных помех длительностью до 10 нс;
- память дисплея: 32 К слов на канал;
- усреднение: от 2 до 128 осциллограмм;
- послесвечение (persistence): в режиме реального времени;
- синхронизация: по фронту, TV, Авто, Норм., однократный пуск;
- полярность сигнала синхронизации: + / -;
- источник синхронизации: CH1, CH2, EXT (внешний), LINE (от сети);
- вход синхронизации: AC, DC, НЧ режекторный, ВЧ режекторный, синхронизация телевизионных сигналов: кадровая, строчная;
- регулировка уровня синхронизации ручная или автоматическая 50%;
- точность автоматической установки на 50%: $\pm 0,2$ деления;
- дисплей: ЖК с диагональю 5,7 дюйма с подсветкой флуоресцентной лампой с холодным катодом;
- разрешающая способность дисплея: 320×240 пикселей;
- регулировки регулировка яркости на передней панели осциллографа;
- автоматические измерения: амплитуда (среднее, среднеквадратичное и пиковое значения), частота, длительность переднего и заднего фронтов, период повторения, ширина импульса (положительного, отрицательного), скважность сигнала;
- арифметические действия: сложение, вычитание, инверсия, сравнение с заданной зоной;
- утилиты: системный статус, просмотр журнала ошибок, опционные настройки, автокалибровка;
- запоминание: запись и воспроизведение до 10 изображений и до 10 режимов работы;
- быстрое преобразование Фурье с окнами: прямоугольным, Хэннинга и Хэмминга;
- автоматическая настройка под сигнал 50 Гц — 250 МГц при амплитудном размахе сигнала свыше 60 мВ;
- интерфейс (дополнительно): RS-232C, Centronics, USB;
- печать изображения: через RS-232C или Centronics;
- поддерживаемые принтеры: HP Desk Jet, Laser Jet с PCL level 3, SANEI Printy 2 RS-232C термопринтер;
- электропитание: напряжение сети 90 — 250 В, частота 48 — 440 Гц, потребляемая мощность не более 30 Вт;
- климатические: рабочая температура 10 °C — 35 °C (при выполнении автокалибровки при температуре 25 °C \pm 5 °C), макс. диапазон рабочих температур 0 °C — +40 °C при относительной влажности 45% — 80%, температура хранения -10 °C — +60 °C при относительной влажности 35% — 85%;
- электромагнитная совместимость: CE (EN55011, EN50082-1);
- размеры: 370×167×338 мм;
- вес: 6 кг;
- гарантийный срок: 1 год;
- комплект поставки: инструкция, предохранители 2 шт., шнур питания;
- опции: карта с USB, RS-232 и принтерным портами для подключения принтера и компьютера, программное обеспечение к карте.

Цифровой осциллограф DS-1250 самый широкополосный среди цифровых осциллографов фирмы EZ Digital. Скоростной 16-битный АЦП этого осциллографа отображает на дисплее до 100 000 точек в секунду. Максимальная частота отсчетов в реальном времени 200 Мвыб/с, а в эквивалентном режиме достигает 25 Мвыб/с. Осциллограф обеспечивает захват и отображение импульсных сигналов и помех с длительностью от 10 нс, автоматические измерения параметров и быстрый анализ Фурье. Обеспечивается сохранение в памяти 10 осциллограмм и 10 произвольных настроек осциллографа. Имеется режим приостановки HOLD-OFF и режим накопления — «послесвечения». Память 32 Кслов на канал позволяющая растягивать осциллограмму для детального исследования функцией ZOOM.

Осциллограф DS-1250С оснащен цветным дисплеем. Отличие его от DS-1250 заметно лишь в цветовом оформлении экрана и передней панели. По техническим характеристикам модель практически аналогична DS-1250.

Привлекательной возможностью цифровых осциллографов серии DS-1*** является возможность подключения к ним периферийного оборудования. Однако для этого необходимо вставить сзади приборов специальную интерфейсную карту. EZ Digital выпускает два типа карт — одна с последовательным портом RS-232 и параллельным LPP, другая имеет дополнительно еще и порт USB. Нужно и программное обеспечение для такой работы. К осциллографам может подсоединяться (по портам RS-232 и LPP) принтер или компьютер (по портам RS-232 и USB). Приятно отметить, что на российском рынке предлагаются, укомплектованные картой, кабелями и программным обеспечением осциллографы этой серии.

Для подключения к осциллографом серии DS-1*** периферийных устройств необходима вполне обычная установка драйверов и программы SoftView, которая прилагается на CD-ROM. Окно программы SoftView представлено на рис. 5.36. Нетрудно заметить, что на вкладке Scope программа имитирует осциллограф, но с несколько иным видом передней панели — более удобным для наблюдений осцилло-

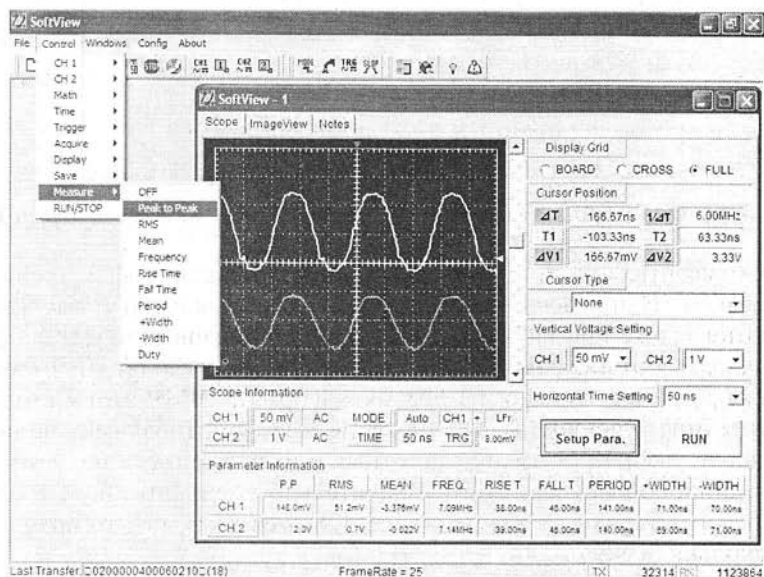


Рис. 5.36. Окно программы SoftView с открытой вкладкой Scope

рамм. Например, осциллограммы даже осциллографов с монохромным дисплеем представляются в цвете, снизу видна панель с результатами всех автоматических измерений (осциллограф позволяет выводить разом только 5 измерений).

С окна программы можно управлять осциллографом. Кроме того, обширные возможности для такого управления есть в позиции меню Control — на рис. 5.36 это меню открыто и виден обширный список позиций меню с командами управления. Но возможности ввода осциллограмм в компьютер реализованы по минимуму. Есть возможность представления осциллограмм в осциллографическом формате файлов .DSO и в формате монохромных рисунков .BMP. Утилиты, преобразующие файлы этих форматов в более простые (например, текстовые) форматы, не поставляются. Так что забота об их поиске или подготовке ложится на пользователя.

На вкладке ImageView можно получить изображение экрана осциллографа в том виде, как оно представляется в файле рисунка с расширением .BMP (рис. 5.37). С помощью контекстного меню правой клавиши мыши можно выбрать одну из двух осциллограмм, например для ее оцифровки. Другая вкладка Notes позволяет записать текстовый комментарий, который полезно хранить с изображением экрана осциллографа и имеющимися на нем осциллограммами.

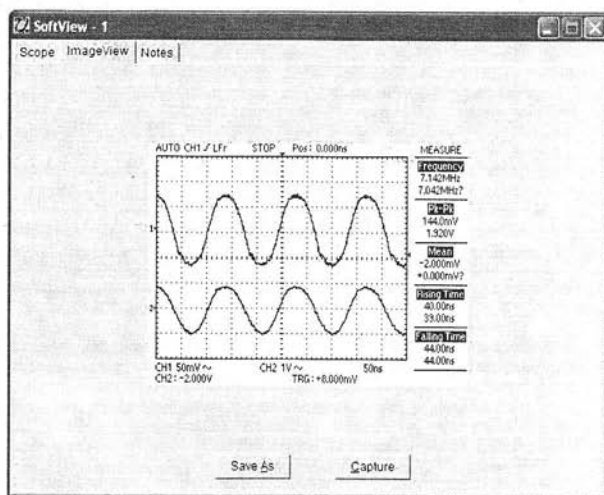


Рис. 5.37. Окно программы SoftView с открытой вкладкой ImageView

Следует отметить, что применение подобных осциллографов требует определенных навыков. Например, неприятным моментом является высокий уровень шума, заметного даже при внутреннем заземлении входов. Для уменьшения видимости шума разработчик рекомендует применять светофильтр и отрегулировать контраст изображения. Однако, на рисунках формата .BMP этот «номер» не проходит и шумы отчетливо видны. Если вход не заземлен, то уровень шумов заметно возрастает из-за различных высокочастотных и импульсных помех, что вполне естественно в широкой полосе частот. Значительно уменьшить шумы удастся применением режима усреднения (по 2, 4, ..., 128 отсчетам), но его время может достигать нескольких секунд.

При снятии осциллограмм высокочастотных (особенно модулированных) сигналов придется немало повозиться, чтобы получить устойчивое и качественное

изображение на экране. Поневоле начинаешь сомневаться в том, такой ли вид имеет сигнал на самом деле! Осциллограф позволяет легко получить спектрограмму сигнала. Однако разрешение спектрограмм невысокое. К примеру, получить спектрограмму АМ-сигнала с частотой 100 кГц и частотой модуляции в 1 кГц практически нереально (боковые полосы сливаются с несущей).

5.4.5. «Бюджетные» осциллографы фирмы WENS

Три модели «бюджетных» цифровых осциллографов нового поколения выпускает молодая южнокорейская компания WENS (рис. 5.38). По своим характеристикам и идеологии управления с помощью меню эти приборы очень напоминают рассмотренные выше приборы фирмы EZ Digital. Но есть и интересные отличия: к приборам может подключаться компьютерная мышь, возможно применение флэш-памяти, до 125 Кбайт расширена емкость памяти. В приборах используется многоязыковое меню, есть возможность возврата к предшествующим установкам с помощью кнопки Undo, имеется режим обучения.



Рис. 5.38. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы WENS серии 3000

Выпускается три модели приборов этой серии: 150 МГц осциллограф с монохромным экраном WENS 3001, 150 МГц и 300 МГц осциллографы с цветным экраном WENS 3002 и 3005. Приборы с частотами до 150 МГц имеют время нарастания переходной характеристики 2,3 нс, а приборы с частотами до 300 МГц — 1,4 нс. Чувствительность канала вертикального отклонения от 2 мВ/дел до 5 В/дел (погрешность 2 %), скорость развертки от 1 нс/дел до 5 В/дел (погрешность 0,01%).

Вслед за номером в названии осциллографов используются три буквы: 1 — S (стандартная память) или F (флэш-память), 2 — буква В для приборов с возможностью питания от батарей и 3 — буква G при наличии интерфейса GRID. При использовании обычной PS-2 мыши возможно управление прибором от нее, например переключение режимов работы, изменение условий просмотра осциллограмм и т. д. Применение флэш-памяти дает альтернативный метод ввода данных с осциллографа в компьютер.

5.4.6. Цифровые осциллографы фирмы RIGOL

Известным производителем цифровых осциллографов является также фирма RIGOL. Ее интересы на российском рынке представляет ОАО «Прист». В реклам-

5.4. «Бюджетные» цифровые запоминающие осциллографы

ном проспекте этой фирмы представлена серия осциллографов DC 5000 CA/C/MA/M, насчитывающая 15 моделей. Внешний вид одной из моделей показан на рис. 5.39. Приборы фирмы RIGOL захватывают область «бюджетных» цифровых осциллографов, но по мере роста полосы частот исследуемых сигналов переходят в область цифровых осциллографов среднего класса.

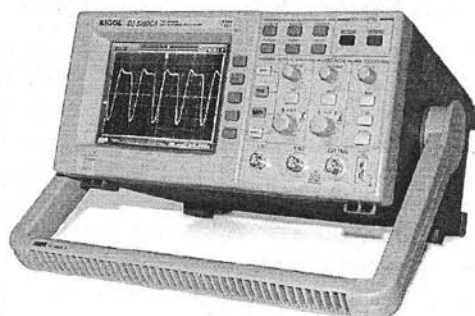


Рис. 5.39. Внешний вид цифрового запоминающего осциллографа фирмы RIGOL

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	DS 5022CA	DS 5102 CA/MA/C/M	DS 5102 CA/MA/C/M	DS 5002 CA/MA/C/M	DS 5042 M	DS 5022 M
КАНАЛ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ	Полоса пропускания (-3 дБ)	200 МГц	150 МГц	100 МГц	80 МГц	40 МГц	25 МГц
		Ограничение полосы пропускания до 20 МГц					
	Коэф. отклонения ($K_{откл}$)	2 мВ/дел...5 В/дел (шаг 1-2-5), плавная регулировка					
	Погрешность установки $K_{откл}$	$\pm 3\%$ ($\pm 4\%$ при 2...5 мВ/дел)					
	Время нарастания	$< 1,8$ нс	$< 2,3$ нс	$< 3,5$ нс	$< 5,8$ нс	$< 8,7$ нс	< 14 нс
	Входной импеданс	1 МОм ($\pm 2\%$) / (12 ± 2) пФ 50 Ом ($\pm 2\%$) в моделях DS502/5152					
	Макс. входное напряжение	400 В при 1 МОм и пробниках $\times 10$ 5 В при 50 Ом					
КАНАЛ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ	Коэф. развертки ($K_{разв}$)	1 нс...50 с/дел (шаг 1-2-5)					
	Погрешность установки $K_{разв}$	$\pm 0,01\%$					
СИНХРОНИЗАЦИЯ	Источник синхросигнала	Канал 1 (2), сеть, внешний, внешний 1:5					
	Режимы запуска развертки	Автоколлапс, ждущий, Т8 (NTSC, PAL / SECAM)					
	Вид связи входа синхронизации и фильтры	Открытый, закрытый, ФНЧ, ФВЧ					
	Внешняя синхронизация (1:1)	Чувствительность: 200 мВ Уровни: $\pm 1,6$ В					
АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ	Разрешение по вертикали	8 бит					
	Частота дискретизации	250 МГц (C / M); 1 ГГц (CA / MA); эквив. 50 ГГц					
	Объем памяти	4 нс на канал					
	Режимы сбора данных	Стандартная выборка, усреднение (2 / 4 / 8 / 16 / 32 / 64 / 128 / 256)					
	Интерполяция	(64x)хх					
КУРСОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ	Ручной режим	ДЛ: ДТ: V/ΔT					
АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	По вертикали	Пик-пик, амплитуда, максимальное, минимальное, «высокий» уровень, «низкий» уровень, среднее, среднеквадратическое, выбросы из вершины и в плече					
	По горизонтали	Частота; период; время нарастания и спада; ϕ -ширина импульса; ϕ -скажность; задержка					
ПРОБНИКИ	Режим работы	X 1			X 10		
	Полоса пропускания	6 МГц			200 МГц		
	Коэффициент деления	1:1			10:1		
	Входное сопротивление	1 МОм $\pm 2\%$ // 85-115 пФ			10 МОм $\pm 2\%$ // 14,5-17,5 пФ		
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ	Интерфейс	Возможна установка коммуникационного модуля с интерфейсами RS-232 и GPIB					
	Математика	Функции сложения, вычитания, умножения, деления, БПФ					
	Документирование результатов	Возможность сохранения 10 осциллограмм и 10 профилей настроек					
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	ЖК-дисплей	Диагональ 145 мм (разрешение 320 x 240)					
	Напряжение питания	100...240 В ($\pm 10\%$), 50 Гц					
	Габаритные размеры	233 x 350 x 145 мм					
	Масса	4,5 кг					
	Комплект поставки	Щуп питания (1), делитель 1:1/1:10 (2), руководство по эксплуатации (1)					

Рис. 5.40. Характеристики основных моделей цифровых осциллографов фирмы RIGOL

Характеристики наиболее распространенных моделей цифровых осциллографов фирмы RIGOL представлены на рис. 5.40. Приборы выпускаются с частотами вертикального отклонения от 25 до 200 МГц и коэффициентами отклонения от 2 мВ/дел до 25 В/дел. Развертка от 2 нс/дел до 50 с/дел. Входной импеданс 1 МОм/13 пФ в моделях с частотами до 100 МГц, у более высокочастотных осциллографах 50 Ом. У последних эквивалентная частота дискретизации доходит до 50 ГГц.

5.4.7. Цифровые осциллографы серии WaveJet фирмы LeGroy

Серию «бюджетных» цифровых осциллографов WaveJetTM недавно выпустила и компания LeGroy. В серию входят 8 моделей приборов от WJ 312 до WJ354. Младшая модель WJ 312 это двухканальный 100-МГц осциллограф, а старшая WJ354 — четырехканальный 500-МГц осциллограф. Выпускаются приборы с полосой частот исследуемых сигналов 100, 200, 350 и 500 МГц — все в двух- и четырехканальных вариантах. Приборы имеют по каждому каналу входное сопротивление 1 МОм (для 350- и 500-МГц моделей и 50 Ом), чувствительность по вертикали от 2 мВ/дел до 10 В/дел (и до 1 В/дел при входе 50 Ом). Разрядность АЦП 8, погрешность коэффициентов отклонения по вертикали 2%. Стандартный объем памяти у всех моделей 512 Кбайт, частота дискретизации в режиме реального времени 1 или 2 ГГц.

Коэффициенты развертки от 0,5 нс/дел у 500-МГц моделей и 5 нс/дел у 100-МГц моделей до 50 с/дел (у всех моделей). Погрешность коэффициентов развертки $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. У приборов предусмотрена синхронизация как обычная, так и телевизионная и с запуском по событию, есть возможность просмотра памяти по кадрам (до 1000 кадров). Предусмотрено проведение до 26 автоматических измерений с выводом одновременно до 4 измерений по каждому каналу с цветом, соответствующим цвету линии соответствующей осциллограммы. Возможны обычные математические операции с сигналами: сложение, вычитание, БПФ. Дисплей осциллографов цветной ЖКИ TFT VGA с размером 19 дюймов по диагонали.

5.5. Особенности осциллографов класса Hi-End

5.5.1. Сравнение осциллографов класса Hi-End различных фирм

А теперь рассмотрим осциллографы совсем иного класса — Hi-End (название возникло по аналогии с акустической аппаратурой высочайшего класса и безумно дорогой). К ним относятся цифровые и стробоскопические осциллографы с полосой частот исследуемых сигналов выше 1 ГГц, имеющие особые и нередко уникальные средства для улучшенного анализа сигналов и выполнения множества измерений. Появившиеся недавно осциллографы с полосой частот выше 10 ГГц чрезмерно дороги и объем их продаж в России исчисляется буквально единицами.

Практически почти все осциллографы класса Hi-End выпускаются тремя фирмами — Tektronix, LeGroy и Agilent Technologies. Сравнение их характеристик приведено на рис. 5.41. Практически все приборы этого класса используют предельно высокую частоту выборок в режиме реального времени (до 20 Гвыб./с), что снижает вероятность паразитного проявления стробоскопического эффекта. Заметим, что это вполне реальная, а не эквивалентная частота выборок.




Производитель	Модель	Полоса пропускания, ГГц	Макс. частота дискретизации, ГГц (1 кан/2 кан/4кан)	Кол-во каналов
 Tektronix	TDS 7704B	7	20/10/5	4
	TDS 6604	6	20/20/10	4
	TDS 6404	4	20/20/10	4
	TDS 7404B	4	20/10/5	4
	CSA 7404B	4	20/10/5	4+1 оптич.
	TDS 7254B	2,5	20/10/5	4
	TDS 7154B	1,5	20/10/5	4
	CSA 7154B	1,5	20/10/5	4+1 оптич.
	WaveMaster-8620A	6	20/20/20	4
	SDA-8620A	6	20/20/20	4
 LeCroy	WaveMaster-8600A	6	20/20/10	4
	SDA-8600A	6	20/20/10	4
	WaveMaster-8500A	5	20/20/10	4
	SDA-8500A	5	20/20/10	4
	WaveMaster-8300A	3	20/20/10	4
	SDA-8300A	3	20/20/10	4
	WavePro7300	3	20/20/10	4
	Infinium 54855A	6	20/20/20	4
	Infinium 54854A	4	20/20/20	4
	Infinium 54853A	2,5	20/20/20	4
 Agilent Technologies <small>Introducing the Hi-End Edge</small>				

Рис. 5.41. Сравнительные характеристики цифровых осциллографов класса Hi-End

Осциллографы класса Hi-End имеют множество технических новинок, наиболее важные из которых рассмотрены ниже. Некоторые из них (например, пиковый детектор и режим наложения осциллограмм — персистенция) стали использоваться и в дешевых осциллографах. Пожалуй, высокая частота выборок это единственный параметр, который не удастся получить в «бюджетных» осциллографах с их упрощенной элементной базой. Она требует и АЦП со сверхвысокой частотой работы.

5.5.2. Режимы выборок и пик-детектор

Обнаружение коротких выбросов на осциллограммах — одна из важных задач осциллографии. Она актуальна и в случае фиксации шумов в составе наблюдаемого сигнала. Если короткие выбросы редки, то их обнаружение существенно усложняется. Здесь значительным преимуществом обладают аналоговые осциллографы, у которых обрабатывается значительная часть сигнального потока — за исключением той части, которая приходится на время обратного хода развертки и на невидимую часть осциллограммы. В автоколебательном режиме работы на экран дисплея выводится до 95—99% информации. Однако рассмотреть промелькнувший короткий пик сигнала на экране обычного осциллографа в большинстве случаев невозможно. В аналоговых запоминающих осциллографах эта проблема решается с помощью трубок с большим временем послесвечения и дорогих запоминающих трубок.

В цифровых осциллографах на экран часто выводится ничтожная часть уже обработанного АЦП сигнала. При этом возможен пропуск не только коротких пиков, но и целых кадров изображения. Были предложены различные хитроумные способы обойти этот принципиальный недостаток. Ввиду трудностей их технической реализации они применяются только в дорогих Hi-End осциллографах. Исключения составляют два приема — имитация наложения осциллограмм (персистенция) и применение пик-детектора. Режим персистенции возможен благодаря хранению осциллограмм в буфере — памяти цифрового осциллографа. А пиковый детектор обычно реализуется аналоговой схемой запоминания пиковых (положительного и отрицательного) значений сигнала.

Рис. 5.42 иллюстрирует основные режимы выборки отсчетов сигнала в современных цифровых осциллографах.

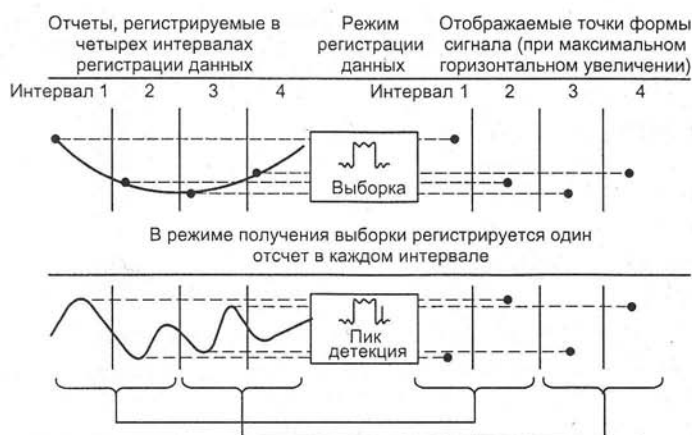


Рис. 5.42. Иллюстрация режимов выборки данных (сверху обычная, снизу с пик-детекцией)

5.5.3. Получение глазковых диаграмм

Скоростные осциллографы широко используются при разработке, исследовании и техническом обслуживании телекоммуникационного оборудования. Информация на осциллограф в этом случае поступает в виде перепадов и неидеальных прямоугольных импульсов, имеющих характерную нестабильность — дрожание или *джиттер*. При этом возникает необходимость фиксировать одновременно параметры таких сигналов.

В осциллографах класса Hi-End обычно предусмотрены специальные средства для подобных измерений. Наиболее распространенное из таких средств — *глазковая диаграмма*. Принцип ее построения иллюстрируется рис. 5.43. Как нетрудно заметить, из сигнального потока выделяются перепады или отдельные импульсы и их осциллограммы накладываются друг на друга с применением режима персистенции.

На рис. 5.44 показана типичная глазковая диаграмма на экране осциллографа CSA7000, предназначенного для исследования и анализа телекоммуникационных систем. На ней хорошо видна усредненная форма перепадов сигнала, их амплитуда и характерный разброс (джиттер).

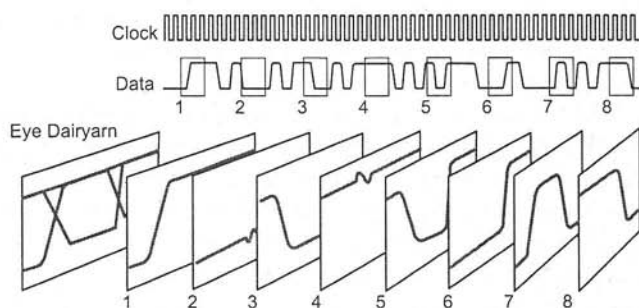


Рис. 5.43. Иллюстрация к построению глазковой диаграммы

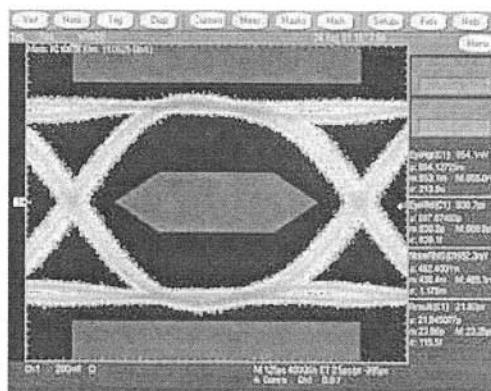


Рис. 5.44. Глазковая диаграмма на экране осциллографа CSA7000

5.5.4. Осциллографы фирмы Tektronix с Цифровым Люминофором

До сих пор инженеры и ученые были вынуждены мириться с принципиально разными возможностями аналоговых и цифровых осциллографов, отмеченными выше. И им приходилось иметь в арсенале своих средств измерений как те, так и другие приборы. Объединение лучших черт цифровой и аналоговой технологий в одном приборе привело к созданию новой архитектуры осциллографов. Компанией Tektronix вначале была реализована технология InstaVu™, увеличивающая скорость вывода сигнала на дисплей до 400000 осциллограмм в секунду. Последняя техническая реализация, придающая экранам цифровых осциллографов динамику ЭЛТ АО, получила название *Digital Phosphor Oscilloscopes (DPO)* — *Осциллографы с Цифровым Люминофором*.

DPO — предлагает все традиционные преимущества ЦО — от памяти до изощренной синхронизации, а дает расширенные средства отображения сигнала дисплеем с градацией по яркости в режиме реального времени (цифровая эмуляция химического процесса свечения ЭЛТ), тем самым обеспечивая трехмерную информацию о сигнале: амплитуду, время и интенсивность (распределение амплитуды во времени). Это превращает цифровой осциллограф в универсальный инструмент для исследования формы сигналов.

Новая технология осциллографов с цифровым люминофором (DPO) обладает следующими преимуществами:

- Сверхвысокой скоростью сбора и вывода данных на дисплей.
- Возможностью обеспечения на цветном дисплее трехмерной информации о сигнале (амплитуда, время, интенсивность).
- Возможностью исследования сложных сигналов без искажений.
- Современными методами анализа данных посредством трехмерного изображения сигнала.

Для этого в DPO сигнал сначала оцифровывается, как в типовом цифровом осциллографе, затем данные преобразуются и размещаются в трехмерной базе данных, структура которой соответствует экранному растру. Оттуда информация периодически отсылается в систему дисплея, которая обслуживается собственным процессором. Следует отметить, что системный процессор DPO не загружен задачами управления дисплеем, процессор предназначен для автоматического измере-

ния и анализа — это отличительная черта DPO от типового ЦО. Такая параллельная обработка необходима для DPO, чтобы поддерживать высокую скорость сбора и отображения трехмерной информации о сигнале.

Сердце DPO — Процессор Представления Сигнала (Waveform Imaging Processor). Процессор DPXTM (технология КМОП, 0,65 мкм, 1,3 миллиона транзисторов) преобразует оцифрованный сигнал в дисплейный кадр в виде растровой структуры. Эти кадры накапливаются в динамической трехмерной базе данных, называемой «Цифровой Фосфор» (Digital Phosphor), и представляющей собой массив данных с размером 500×200. Каждому элементу массива соответствует пиксель на дисплее. При этом в массиве создается карта интенсивности сигнала: сигнал проходит многократно через одну точку, и факт многократного прохождения отражается на карте. Результатом всех преобразований является след сигнала, яркость которого изменяется пропорционально интенсивности появления сигнала в каждой точке — по типу «градации серого», как происходит на ЭЛТ аналогового осциллографа.

Архитектура DPO позволяет записывать более 200000 дисплейных кадров в секунду, что в 1000 раз быстрее, чем у типового цифрового осциллографа. Пересылка кадра из «Цифрового Фосфора» на дисплей происходит 30 раз в секунду. При этом процесс работы АЦП не прерывается, в результате чего «образ» реагирует на изменение сигнала в реальном времени, а избыток данных точно отображает мельчайшие изменения сигнала.

Время работы АЦП типового аналогового осциллографа занимает не более 1% от общего времени работы, остальная часть времени затрачивается на обработку сигнала для отображения на дисплее, при этом все изменения сигнала за этот период игнорируются. Для отображения нестационарных изменений в ЦО иногда используется метод «накопления», но отображение происходит не в реальном времени, а после обработки. В результате часть информации о сигнале неизбежно теряется.

Таким образом, для исследования сигналов в реальном времени необходим осциллограф с цифровым люминофором. DPO имеет высокую скорость сбора и вывода информации, следовательно, он не пропустит короткий, нестационарный сигнал, а градация по яркости позволяет рассмотреть все нюансы на осциллограмме.

Поскольку DPO хранит данные о форме сигнала в динамической трехмерной базе данных, то из нее легко может быть получена статистическая информация об этом сигнале. Построение гистограмм является встроенной функцией осциллографа. Гистограмма может быть построена как для реального, так и для запомненного во внутренней памяти сигнала. Для расчета гистограммы используется количественная информация относительного распределения сигнала, которая хранится в динамической трехмерной базе («цифровом фосфоре») DPO.

Ведущее издание в индустрии измерительного оборудования, журнал «Test and Measurement World», еще в 2000 году присудил осциллографам серии TDS 3000 DPO компании TEKTRONIX, первую премию «Best in Test», как самым популярным (реализовано более 10000 штук) моделям года. К сожалению, в России эти приборы мало известны из-за своей высокой цены. В дальнейшем мы вернемся к описанию возможностей осциллографов с Цифровым люминофором и приведем примеры их применения в измерительной практике.

Корпорация TEKTRONIX в настоящее время разработала и выпустила на рынок две новые серии осциллографов класса DPO. Отметим их характеристики.

Серия DPO-4000

Новейшая серия осциллографов Tektronix DPO-4000 представлена четырьмя приборами:

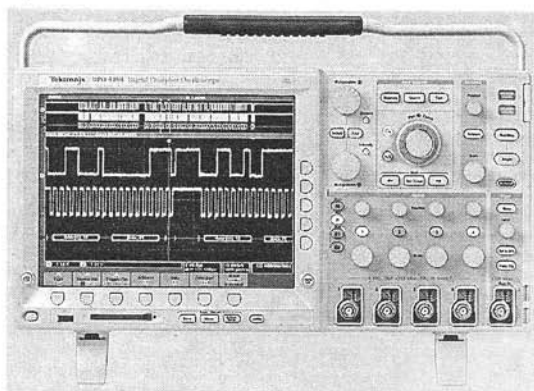


Рис. 5.45. Внешний вид осциллографов серии DPO-4000

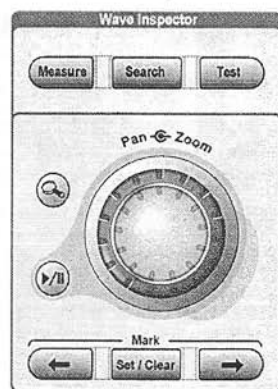


Рис. 5.46. WaveInspector цифровых осциллографов DPO-4000

DPO-4032: 2 канала, 350 МГц, дискретизация 2,5 ГГц

DPO-4034: 4 канала, 350 МГц, дискретизация 2,5 ГГц

DPO-4054: 2 канала, 500 МГц, дискретизация 2,5 ГГц

DPO-4032: 2 канала, 1 ГГц, дискретизация 5 ГГц

Приборы этой серии имеют большой (26 см по диагонали) цветной ЖКИ-дисплей формата XGA — см. рис. 5.45. Предусмотрено 25 автоматических измерений, курсорные измерения, математический редактор, порт USB на передней панели для подключения USB-модулей XGA-порт для подключения внешнего дисплея и ряд других средств. Габариты осциллографов 229×439×137 мм, вес 5 кг.

Длина записи достигает 10 млн. точек на канал. Специальный узел WaveInspector (рис. 5.46) позволяет по кадрам просматривать большие записи. При этом скорость просмотра автоматически увеличивается или уменьшается в зависимости от угла поворота ручки. Более того, предусмотрена возможность поиска вполне определенных событий или осциллограмм, удовлетворяющих заданным требованиям (например, определенной длительности фронта). Это резко облегчает анализ самых сложных осциллограмм — пример виден на рис. 5.45.

Технические характеристики этих приборов умеренной стоимости представлены на рис. 5.47.

Серия DPO-7000

Еще одна новейшая серия цифровых осциллографов с «цифровым фосфором» DPO-7000 представлена следующими приборами (рис. 5.48):

DPO-7054: 4 канала, 500 МГц, дискретизация 10/20 ГГц

DPO-4054: 4 канала, 1 ГГц, дискретизация 20/40 ГГц

DPO-4032: 4 канала, 2,5 ГГц, дискретизация 40 ГГц

Пожалуй, это самые мощные из цифровых осциллографов, работающих в реальном времени с рекордными частотами дискретизации. Приборы оснащены большим сенсорным цветным ЖКИ-дисплеем (с размером по диагонали 30 см). Чувствительность по вертикали от 1 мВ/дел до 10 В/дел, коэффициенты развертки от 25/50/100 пс/дел до 1000 с/дел. Специальная Pinpoint синхронизация обеспечивает до 1400 режимов, приборы обеспечивают 53 вида автоматических измерений, включая статистические и построение гистограмм. Длина записи стандартная 40 Мбайт и опционально расширенная до 200 Мбайт. Есть обширные возможно-

ПАРАМЕТР	DPO4032	DPO4034	DPO4054	DPO4104
Система вертикального отклонения				
Входные каналы	2	4	4	4
Полоса пропускания аналогового сигнала (~3дБ) 5 мВ/дел...1 В/дел	350 МГц	350 МГц	500 МГц	1 ГГц
Расчетное время нарастания 5 мВ/дел (типичное)	1 нс	1 нс	700 пс	350 пс
Аппаратные пределы полосы пропускания	20...250 МГц			
Тип входа	открытый, закрытый, заземленный вход			
Входной импеданс	1 МОм ±1%, 50 Ом ±1%			
Чувствительность по входу 1 МОм	1 мВ/дел...10 В/дел			
Чувствительность по входу 50 Ом	1 мВ/дел...1 В/дел			
Разрешение по вертикали	8 бит			
Максимальное входное напряжение 1 МОм	250 Вэфф. с пиковым значением ≤±400 В			
Максимальное входное напряжение 50 Ом	5 Вэфф. с пиковым значением ≤±20 В			
Погрешность коэффициента усиления по постоянному напряжению	±1,5% при установке смещения 0 В			
Диапазон смещения	1 мВ/дел...50 мВ/дел, ±1 В 50,5 мВ/дел...99,5 мВ/дел ±0,5 В 100 мВ/дел...500 мВ/дел ±10 В 505 мВ/дел...995 мВ/дел ±5 В 1 В/дел...5 В/дел ±100 В 5,05 В/дел...10 В/дел ±50 В			
Изоляция между каналами (между любыми двумя каналами с одинаковыми настройками по вертикали)	≥100:1 при ≥100 МГц и ≥30:1 при >100 МГц вплоть до номинальной полосы пропускания			
Система горизонтального отклонения				
Максимальная частота выборки на каждом канале	2,5 Гвыб/с	2,5 Гвыб/с	2,5 Гвыб/с	5 Гвыб/с
Максимальная длина записи на каждом канале	10 млн точек			
Максимальная продолжительность захвата сигналов при максимальной частоте выборки на каждом канале	4 мс	4 мс	4 мс	2 мс
Диапазон установок развертки (с/дел)	1 нс...1000 с			
Диапазон времени задержки развертки	-10 делений -50 с			
Фазовый сдвиг между каналами	±100 нс			
Долговременная стабильность частоты выборки и погрешность времени задержки	±5×10 ⁻⁶ на любом интервале ≥1 мс			
Погрешность измерения промежутков времени	±(1/частоты выборки + 5×10 ⁻⁶ × отсчет + 0,4 нс)			

Рис. 5.47. Основные технические характеристики осциллографов DPO-4000



Рис. 5.48. Внешний вид осциллографов серии DPO-7000

сти по подключению к компьютеру и к другой периферии: HDD, CDRW, GPIB, USB, LAN, RS-232 и др.

Глава 6. Портативные цифровые осциллографы

Данная глава посвящена новому поколению портативных (миниатюрных и сверхминиатюрных) цифровых осциллографов. Они появились всего несколько лет тому назад и быстро завоевали популярность. Некоторые из этих приборов встроены даже в мультиметры. Впервые в нашей литературе дается детальный обзор нашего рынка портативных осциллографов.

6.1. Тенденция микроминиатюризации цифровых осциллографов

Основные узлы современных цифровых осциллографов (АЦП, ЦАП, память, фильтры и т. д.) выполняются в виде интегральных, чаще всего монолитных, микросхем. Это, наряду с применением плоских и даже тонких ЖКИ дисплеев, открывает обширные возможности в миниатюризации электронных цифровых осциллографов. Ныне такие осциллографы выпускаются в виде миниатюрных приборов — вплоть до шупов с миниатюрным экраном и мультиметров.

Разумеется, технические характеристики миниатюрных приборов достаточно скромны, поскольку в такие приборы невозможно встроить сверхширокополосные усилители и скоростные устройства выборки. Кроме того, такие приборы ориентированы на рынок массовых сервисных устройств и должны иметь предельно простую конструкцию. Только в этом случае они будут не слишком дорогими и смогут использоваться в ремонтных мастерских и в радиолюбительской практике. Постоянное совершенствование их и рост функциональных возможностей делает перспективным применение портативных осциллографов в промышленности, науке и образовании. Часто эти приборы в состоянии заменить куда более дорогие и громоздкие стационарные осциллографы.

6.2. Миниатюрные осциллографы объединения АКТАКОМ

6.2.1. Портативные осциллографы серии АСК

Достаточно широкую номенклатуру портативных осциллографов выпускает объединение АКТАКОМ. Под его маркой выпускаются осциллографы ряда зарубежных фирм, имеющие уровень параметров соответствующий мировому уровню разработки и производства осциллографов.

АСК-4201

Портативный цифровой осциллограф в виде мультиметра с ручкой (рис. 6.1). Основные характеристики: 2 канала с гальванической развязкой, полоса пропускания 20 МГц, ЖКИ 58×38 мм с разрешением 128×64 точки, чувствительность 0,1 В/дел...5 В/дел, коэффициенты развертки 0,5 мкс/дел...0,2 с/дел, максимальное входное напряжение 40 В, время установления 17,5 нс, входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 60 пФ. Режимы разверток: автоколебательный, жду-



Рис. 6.1. Портативный цифровой измеритель — мультиметр АСК-4201



Рис. 6.2. Сменный модуль осциллографа АСК-4201



Рис. 6.3. Минискос (осциллограф-щуп) АСК-4011

ший, однократный, X-Y, предварительная запись осциллограмм. Источники синхронизации: CH1, CH2, внешний; память 8192 байт/канал. Дополнительные функции: курсорные измерения, интерфейс RS-232, программное обеспечение (ПО). Питание: сетевой адаптер, батареи с напряжением 9 В (6×1,5 В). Габариты 200×90×55, масса 0,75 кг (со сменным модулем осциллографа).

Прибор позволяет выполнять измерения в полевых и цеховых условиях. Малые габариты и вес позволяют носить его в кейсе или дипломате. Открытая модульная конструкция позволяет наращивать возможности прибора. Например, модуль осциллографа (рис. 6.2) имеет два независимых канала, что позволяет проводить различные специальные измерения, например канал 2 может быть использован для записи и представления части осциллограммы канала 1. Прибор можно использовать как цифровой частотомер и мультиметр.

6.2.2. Осциллограф-щуп АСК-4011

Цифровой портативный осциллограф-щуп (минискос) АСК-4011 один из самых миниатюрных осциллографов. Он имеет следующие характеристики: 2 канала, полоса пропускания 5 МГц, ЖКИ 35×12 (2м), коэффициенты развертки 0,05 мкс/дел...2 мс/дел, максимальное входное напряжение 80 В. Режимы разверток: автоколебательный, однократный. Источники синхронизации: внутренний, внешний. Дополнительные функции: вольтметр, интерфейс RS-232, программное обеспечение. Питание через сетевой адаптер. Габариты 165×33×20, масса 86 г. Внешний вид минискоса АСК-4011 показан на рис. 6.3.

Этот сверхминиатюрный прибор позволяет наблюдать форму сигнала в заданной точке проверяемого устройства и отображать осциллограмму процесса и уровень потенциала в точке. Для измерения просто достаточно коснуться нужной точки острием щупа (разумеется, надо позаботиться и о подключении к земле устройства). Небольшой экран (с разрешением 16×64 точки) сбоку прибора позволяет просматривать нужные данные.

6.3. Портативные осциллографы фирмы Fluke

6.3.1. Цифровые осциллографы — скопметры

Еще недавно квалифицированный настройщик электронного оборудования был вынужден иметь целый арсенал измерительных приборов — тестер или мультиметр, электронный осциллограф, частотомер, измеритель емкости и индуктивности, анализатор спектров и т. д. и т. п.

Новую концепцию инструментальных средств и приборов для отладки электронных устройств предложила фирма Fluke (США). Помимо выпуска стандартных приборов (например, мультиметров разного класса) фирма создала новый тип приборов — *скопметры*. Из самого названия этих приборов ясно, что они предназначены для измерения скопом всего, что только можно измерить: напряжения, тока, частоты, длительности импульсов и их времени нарастания, наблюдения и запоминания формы электрических и радиотехнических сигналов и т. д.

6.3.2. Скопметры Fluke 105B/99B/96B/92B

Сейчас выпускаются скопметры типа 123 и серии В для промышленных применений. Их сравнительные характеристики, представлены ниже [15].

Сравнительная характеристика скопметров фирмы Fluke

	Fluke 123 Industrial Scopemeter	ScopeMeter серии В
Сходства	Собраны полностью на ИС. Питание от батарей. Цифровой осциллограф с памятью, измеритель истинного эффективного значения и мультиметр в одном компактном корпусе	
	Прочная, не боящаяся падений конструкция, выдерживающая эксплуатацию в жестких условиях производства	
	Электробезопасность измерений систем промышленного электропитания по категории III — 600 В эфф	
	Яркий флуоресцентный дисплей с холодным катодом и фоновой подсветкой, хорошо видный в темноте и на свету	
	Оптоэлектронный компьютерный интерфейс RS-232 с изоляцией на 600 В.	
	Полная укомплектованность аксессуарами и готовность к работе	
	Гарантия 3 года	

Различия	Осциллограф и мультиметр с полосой 20 МГц Измерение истинного эффективного значения 5000 отсчетов/0,5% точность	Осциллограф с полосой 60 или 100 МГц Мультиметр с полосой 5 МГц Измерение истинного эффективного значения 3000 отсчетов/0,5% точность
	Поддержка технологии работы Connect-and-View («без рук») для устойчивого к тряске, надежного и воспроизводимого отображения сигнала. Даже для сигналов сложной формы, как в приводах двигателей или видеосигналов	Широкие возможности схемы запуска Синхронизация полным видеосигналом в системах NTSC, PAL, SECAM и ТВ высокого разрешения со встроенным селектором строк и кадров Синхронизация развертки по времени, внешняя или серийной импульсов для захвата практически любого сигнала
	Двухканальный мультиметр. Режим отображения для каждого канала — полноэкранный осциллограф или дисплей мультиметра.	Измерения по курсору, наблюдение формы сигнала. Математические функции для углубленного анализа сигнала
	Двухканальная функция TrendPlot™	ScopeRecord™, память объемом 30 к для записи большой длительности и опорной частоты для фиксации моментов времени

Технические данные скопметра 123

Осциллограф	
Полоса пропускания	20 МГц
Максимальная частота квантования	1,25 ГГц
Число каналов	2
Время нарастания характеристики	< 17,5 нс
Скорость развертки (время/дел.)	20 нс — 60 с
Длина записи (в байтах)	512
Память экранов/сигналов/установок	2/—/10
Задержка запуска развертки (в дел.)	От -10 до +10
Цифровой мультиметр с автоматическим определением пределов измерения и измерением истинного эффективного значения	
Число каналов мультиметра	2
Разрядность дисплея (отсчетов) (основная погрешность на переменном токе 0,5%)	5000
Запись TrendPlot™ с отметками даты и времени	2 канала
Общие технические данные	
Работа от никель-кадмиевой батареи с зарядным устройством	5 ч
Автоматическая настройка	26 измерений
Размеры (высота × ширина × глубина)	23 × 11,5 × 5 см
Вес	1,1 кг

Приборы могут работать в течении времени до 4 часов от встроенных и перезаряжаемых Ni Mg аккумуляторов, которые можно зарядить также за время около 4 часов. Они осуществляют мониторинг и подстройку под любые сигналы с представлением их на экране в наиболее удобном для измерений виде. Возможен захват сигналов с длительностью до 50 нс и долговременная (до 30 часов) запись сигналов с последующим детальным их просмотром — в том числе с растяжением в 100 раз. Возможно сохранение двух записей с длиной до 27500 точек, и возврата до 100 последних экранных изображений. С подключением к ПК возможно хранение и распечатка осциллограмм с помощью компьютера и их математическая обработка.

Скопметры поставляются с сетевым адаптером/зарядным устройством PM8907, комплектом экранированных щупов STL120, зажимами «крокодил» AC120, клипсами HC120, экранированными байонетными разъемами BB120, руководством по эксплуатации и аккумуляторной батареей BP120. Опционально поставляются многие другие полезные аксессуары (футляры для переноски, чехлы, пробники и зажимы, запасные аккумуляторные батареи и т. д.). Пользуется популярностью комплект ЗИП SCC120 содержащий: жесткий футляр для переноски, кабель интерфейса RS232 с оптической изоляцией, экранированный коаксиальный переходник и программное обеспечение FlukeView ScopeMeter для Windows. Стоимость такого прибора с ЗИП около 1800 долларов США.

6.3.3. Скопметры Fluke серии 120

Fluke Industrial Scopemeter® 123 (рис. 6.4) — мечта для каждого радиолюбителя и идеальный выбор для обслуживающего персонала по поиску неисправностей в промышленном оборудовании, аппаратуре управления и в системах электропитания. Прибор представляет собой надежный двухканальный осциллограф и измеритель с возможностью «безбумажной» записи. Новый, запатентованный метод работы «без рук» (hands off operation) Connect-and-View™ («подключайся и смотри») экономит время, затрачиваемое на поиск неисправностей, и помогает минимизировать время простоя производственных систем.

Наряду с обычными измерениями в электронных схемах скопметр 123 предназначен для проверки и поиска неисправностей в приводах двигателей постоянного и переменного тока, датчиках и исполнительных механизмах, линиях электропитания, трансформаторах и преобразователях, линейных и импульсных схемах управления. Работа по технологии Connect-and-View(tm) обеспечивает надежное отображение сигнала на дисплее без необходимости нажимать на кнопки — даже для самых сложных сигналов, включая приводы двигателей и видеосигналы.

Прибор имеет интуитивную легкость использования с уникальной возможностью выполнить «все» измерения за один раз. Используется один и тот же щуп для осциллографических наблюде-



Рис. 6.4. Скопметр фирмы Fluke 123

ний, измерений на мультиметре, измерений сопротивления и емкости и проверки целостности электрических цепей. И все это сочетается в миниатюрном ручной приборе (рис. 5.30) весом всего в 1,1 кг, что обеспечивает легкость переноски. Небольшие размеры позволяют положить прибор в карман большинства комбинезонов. Жесткая ударопрочная конструкция корпуса с чехлом-футляром обеспечивает длительный срок эксплуатации и надежной работы в производственных условиях.

Благодаря объединению трех наиболее популярных измерительных инструментов — осциллографа, мультиметра и самописца прибор позволяет обнаруживать неисправности от длящихся наносекунды процессов до процессов длительностью в месяцы. Двухканальный цифровой осциллограф с полосой пропускания 20 МГц и двухканальный цифровой мультиметр позволяют измерять за раз множество параметров. Цифровой мультиметр истинного эффективного значения с разрядностью дисплея в 5000 отсчетов при точности 0,5% обеспечивает 26 типов измерений, включая напряжение постоянного тока, эффективное напряжение переменного тока, частоту в Гц, скважность, длительность импульсов, фазовый сдвиг двух сигналов, ток, температуру, Crest Factor, дБВ, дБм, сопротивление, целостность цепей, характеристики диодов, емкость.

Функция TrendPlot™ отслеживает сбои за счет непрерывной записи показаний в течении времени от минут до нескольких суток. Записываются максимальные и минимальные показания с отметками даты и времени. Двухканальность обеспечивает поиск по критериям «причина и результат».

Большой и яркий флуоресцентный дисплей с фоновой подсветкой и холодным катодом обладает отличным контрастом и прекрасно виден как в темном углу, так и при ярком дневном свете (рис. 6.5). Батарейное питание с индикатором позволяет пользоваться прибором в любом месте. Время работы от батарей — до 5 часов. Обеспечивается быстрая перезарядка аккумуляторов.

Возможная поставка с принтером и интерфейсом к ПК, а также программное обеспечение для Windows, упрощают задачи документирования. Подключение скопметра 123 к компьютеру создает уникальный компьютеризированный контрольно-измерительный комплекс. Показания скопметра можно теперь просматри-

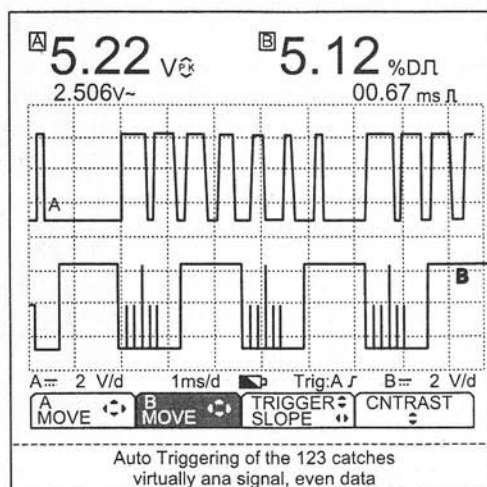


Рис. 6.5. Дисплей скопметра Fluke 123

вать на большом экране дисплея ПК, фиксировать их в устройствах памяти компьютера, распечатывать любым принтером и выполнять любую математическую и статистическую обработку данных.

Портативный цифровой запоминающий осциллограф серии 120 имеет 2 канала с предельными частотами 20 или 40 МГц/канал, до 25 млн. выборок/с на канал (одиночный сигнал), вертикальная развертка от 5 мВ/дел до 500 В/дел, 26 автоизмерений, встроенный мультиметр и регистратор, память 500 точек на канал, ч/б ЖКИ — 102 мм, аккумулятор, вес 1.2 кг, 232×115×50 мм

Отличия приборов:

- FLK-123: 2 канала 20 МГц/канал (20 нс /дел — 1 мин /дел.), память на 10 экранов
- FLK-123S: 2 канала 20 МГц/канал (20 нс /дел — 1 мин /дел.), память на 10 экранов; расширенная комплектация — набор SCC120: кабель для ПК, ПО, чемоданчик
- FLK-124: 2 канала 40 МГц/канал (10 нс /дел — 1 мин /дел.) память на 20 экранов, курсорные измерения
- FLK-124S: 2 канала 40 МГц/канал (10 нс /дел — 1 мин /дел.), память на 20 экранов, курсорные измерения; расширенная комплектация — набор SCC120: кабель для ПК, ПО, чемоданчик

6.3.4. Осциллографы и скопметры Fluke серии В

Приборы серии В это более широкополосные осциллографы. Так, скопметр 99В содержит осциллограф с полосой в 100 МГц, частотой отсчетов в 5 млрд. в одну секунду и 30 кбайт памяти. Этот прибор можно взять куда угодно: легкий, не боящийся ударов, водонепроницаемый, защищенный от попадания пыли и грязи. ScoreMeter весит всего 4 фунта (1,8 кг). Его размеры: 275×140×65 мм. С аккумуляторной батареей, рассчитанной на 4 часа работы, можно проводить измерения в любом месте. Высокая верность отображения сигнала обеспечиваются полосой в 100 МГц, двухканальным сигнальным трактом и непрерывной частотой отсчетов в $5 \cdot 10^9$ 1/с.

Яркий, высококонтрастный жидкокристаллический дисплей, способный соперничать с настольными осциллографами, обеспечивает легкую читаемость при работе в любом месте. Внешний запуск позволяет легко решить сложные проблемы синхронизации. Возможен запуск по фронту, от видеосигнала, ждущий или по счетчику импульсов. Задержка запуска меняется от -20 делений (опережение) до 640 делений шкалы развертки.

Функция прогнозирования (TrendPlot®) с отметкой даты и времени запоминает любое из 28 измерений на срок до 40 дней. Она помогает указать тенденцию (мин., макс., средн.) и точно отметить момент достижения.

Память скопметра имеет объем 30 Кбайт. Экранная запись позволяет сохранить до 125 экранных изображений. работает в режиме однократной или непрерывной развертки, схватывая только начальные события или полный машинный цикл. Идеальное средство для контроля запуска машин, полного рабочего цикла, источников питания и систем бесперебойного питания.

Дополнительная память способна хранить до 40 пользовательских установок, 20 осциллограмм и 10 экранных изображений для мгновенного вызова, сравнения или печати.

Разнообразные средства измерения с помощью курсора включают измерения среднего напряжения, эффективного значения переменного напряжения, частоты, времени нарастания и спада, размаха, временного промежутка между курсорами, временной отметки курсора (времени суток или времени от начала), разность напряжений между минимальным и пиковым, фазовый сдвиг, мгновенное значение напряжения под курсором. Возможна оцифровка шкалы в амперах.

Запуск от видеосигнала с выбираемым номером строки. Выбор из систем NTSC, PAL, PAL/M, SECAM или прогрессивной развертки с выбором номера строки до 32000.

В приведенных ниже таблицах приведены параметры скопметров серии В фирмы Fluke.

Функции осциллографа				
Тип прибора	Fluke 105B	Fluke 99B	Fluke 96B	Fluke 92B
Полоса пропускания	100 МГц	100 МГц	60 МГц	60 МГц
Макс. частота повторения отсчетов	5 Гвыб/с	5 Гвыб/с	2,5 Гвыб/с	2,5 Гвыб/с
Количество каналов	2+внеш. зап.	2+внеш.зап.	2+внеш. зап.	2+внеш. зап.
Время нарастания переходной характеристики	< 3,5 нс 5нс – 60 с	< 3,5 нс 5нс – 60 с	< 5,7 нс 5нс – 60 с	< 5,7 нс 5нс – 60 с
Развертка Время/дел	1мВ – 100В	1мВ – 100В	5мВ – 100В	5мВ – 100В
Масштаб по вертикали В/дел	512	512	512	512
Длина записи (байт)	10/20/40	10/20/40	5/10/20	-/-/-
Экран/Осциллограмма/Память установок	+	+	+	+
Непрерывная самонастройка	+	+	+	+
Фиксирование пиков длительностью в 40 нс				
Запуск от видеосигнала NTSC, PAL, SECAM и TVBЧ (с выбором строк и полей)	+	+	+	+
Опережение/задержка запуска (в делениях)	-20 / +640	-20 / +640	-20 / +640	-20 / +640
Режим огибающей (мин/макс) и сглаживания осциллограммы	+	+	+	+
Измерение тока со спец. зажимами (дополн.)	+	+	+	+
ScopeRecord™ – Память осциллограмм 30k	+	+	+	-
Измерения с курсором	+	+	+	-
Мат. операции над осциллограммами (умножение, интегрирование, +, -, фильтрация)	+	+	-	-

Функции мультиметра с автовыбором диапазона и измерением истинного эффективного значения				
Тип прибора	Fluke 105B	Fluke 99B	Fluke 96B	Fluke 92B
Шкала дисплея (основная погрешность 0,5%)	3000 отсч.	3000 отсч.	3000 отсч.	3000 отсч.
Дополните. возможности (измерение темп-ры, тока, скважности, длит. импульсов, дБ, частоты, тока, дБм, об/мин. и др.)	+	+	+	+
Проверка диодов и звуковая сигнализация отсутствия обрывов	+	+	+	+
Функция TrendPlot (мин/макс) с отметкой даты и времени	+	+	+	+
Функции цифрового мультиметра над осциллограммой	+	+	+	+
Общие характеристики				
Тип прибора	Fluke 105B	Fluke 99B	Fluke 96B	Fluke 92B
Высококонтрастный полутонной черно-белый ЖК дисплей с фоновой подсветкой	+	+	+	+
Передача осциллограммы и содержимого экрана в ПК, дистанционное управление	+	+	+	+
Передача содержимого экрана в ПК	+	+	+	+
Зарядное устройство и NiCd батарея на 4 часа работы	+	+	+	+
Принтерный интерфейс с оптронной развязкой и (дополн.) интерфейсный кабель к ПК (для 105B)	+	+	+	+
Справочная информация по вызову	+	+	+	+
Защита IEC-1010-1, EN61010-1 кат. III и UL на 600 В эфф.	40	40	40	28
Автоматическая установка измерений	+	+	+	+
Генератор/Выход проверки компонентов	+	+	+	-
Программное обеспечение для ПК и кабель PM 9080	+	+	+	-
Жесткий корпус для переноски	+	+	-	-

Скопметры серии 9ХВ имеют ряд новинок: развертку произвольных строк телевизионных сигналов множества форматов, работа в качестве запоминающего осциллографа (могут фиксироваться сигналы за месяцы наблюдений), хранение многих экранов в памяти, математическая обработка сигналов и др. Как и скопметры серии 123 они могут подключаться к компьютерам и на их основе возможно создание компьютерных измерительных комплексов. К сожалению цена наиболее продвинутых моделей этой серии достигает 5000 долларов США.

6.3.5. Скопметры серии 190

Для сложных применений Fluke предлагает самые мощные скопметры 190 серии со спецификациями, которые встречаются только у высококачественных настольных осциллографов. С диапазоном частот до 200 МГц и частотой выборки реального времени до 2,5 Гв/с на входе и объемом памяти регистрации событий в 27500 точек на входе. Приборы идеально подходят для специалистов, которым нужны серьезные осциллографы, совмещающие функции ряда измерительных приборов и имеющие батарейное питание.

Все приборы имеют изолированные входы с допустимым напряжением изоляции до 1000 В. Вместе с прилагаемыми щупами они позволяют измерять и исследовать сигналы с напряжением от милливольт до тысяч вольт. Частота выборки приборов до 2.75 Гвыб./с, временное разрешение до 0.4 нс.

Отличия приборов:

- Fluke-192B: 2 изолированных канала по 60 МГц — 500 MS/c (10 нс /дел — 2 мин /дел), ч/б ЖК-экран
- Fluke-192B/S: Fluke 192B + интерфейсный набор SCC190: кабель, ПО, чемоданчик
- Fluke-196B: 2 изолированных канала по 100 МГц — 1 GS/c (5 нс /дел — 2 мин /дел), ч/б ЖК-экран
- Fluke-196B/S: Fluke 196B + интерфейсный набор SCC190: кабель, ПО, чемоданчик
- Fluke-199B : 2 изол. канала по 200 МГц — 2.5 GS/c (5 нс /дел — 2 мин /дел), ч/б ЖК-экран
- Fluke-199B/S: Fluke 199B + интерфейсный набор SCC190: кабель, ПО, чемоданчик
- Fluke-196C: 2 изол. канала по 100 МГц — 1 GS/c (5 нс /дел — 2 мин /дел), цвет. ЖК-экран
- Fluke-196C/S: Fluke 196C + интерфейсный набор SCC190: кабель, ПО, чемоданчик
- Fluke-199C: 2 изол. канала по 200 МГц — 2.5 GS/c (5 нс /дел — 2 мин /дел), цвет. ЖК-экран
- Fluke-199C/S: Fluke 199C + интерфейсный набор SCC190: кабель, ПО, чемоданчик
- PAC91

Дополнительные аксессуары:

- Адаптер для подключения принтера к ScopeMeter PM9080/001
- Оптический RS-232 интерфейсный кабель для подключения ScopeMeter к ПК SW90W/033EFG
- ПО для FLK-123-190.

Сводная таблица параметров и внешний вид новых серий скопметров компании Fluke представлена на рис. 6.6.








СЕРИЯ	СЕРИЯ 190C SCOPEMETER (ЦВЕТНОЙ ДИСПЛЕЙ)		СЕРИЯ 190B SCOPEMETER			СЕРИЯ FLUKE 120	
МОДЕЛЬ	FLUKE 199C	FLUKE 196C	FLUKE 199B	FLUKE 196B	FLUKE 192B	FLUKE 124	FLUKE 123
							
Полоса	Подробнее	Подробнее	Подробнее	Подробнее	Подробнее	Подробнее	Подробнее
Макс. частота дискретизации в режиме реального времени	200 МГц	100 МГц	200 МГц	100 МГц	60 МГц	40 МГц	20 МГц
Макс. длина записи (на прибор)	2,5 ГГц	1,0 ГГц	2,5 ГГц	1,0 ГГц	0,5 ГГц	25 МГц	25МГц
Число входов	1200 точек					512 точек (min/max пар)	
Входная чувствительность	2 осциллографических и 1 DMM (изолир.)					2 осциллогр. или DMM	
Независимые изолированные плавающие входы	от 2 мВ/дел. до 100 В/дел.					от 5 мВ/дел. до 500 В/дел.	
Дисплей и режимы отображения	+						
Дисплей	Цветной		Монохромный			Монохромный	
Инерция (Персистенция)	Цифровая с регулируемым временем		Вкл./Выкл.			—	
Режим обнуляющей	—		+			—	
Сравнение осциллограмм	—		+			—	
Тестирование годен/негоден	+		—			—	
Синхронизация	+						
Connect-and-View™	—		+			+	
По фронту, одиночный, произвольный	+		—			+	
Видео	+		—			+	
Видеостроки	+		—			+	
По ширине импульса	+		—			—	
Внешняя	+		—			с опцией ITP 120	
Дополнительные функции	+						
Курсоры	—		+			+	
Zoom	—		+			—	
5-х входовой TrendPlot™	—		+			—	
Режим ScoreRecord™	—		+			—	
Автоматический захват и воспроизведение последних 100 экранов	+		—			—	
Математика с осциллограммами	+		—			—	
Сохранение настроек и экранов	10		—			20	
True RMS-Мультиметр	5000 отсчетов		Напряжение, ток, сопротивление, прозвонка, проверка диодов, температура			10	
Безопасность, питание и гарантия							
Безопасность (EN61010-1)	1000 V CAT II / 600 V CAT III		—			600 V CAT III	
Батареи	4 часов Ni-MH		—			7 часов NiMH / 4 часов NiCd	
Интерфейс ПК/принтер	—		Оптически изолированный кабель RS-232 типа RM9080 (опция)			—	
Гарантия	3 года на прибор и 1 год на стандартные аксессуары		—			—	
Габаритные размеры	250x169x64 мм		—			232x115x50 мм	
Вес	2 кг		—			1,2 кг	

Рис. 6.6. Сводная таблица параметров новых серий скопметров фирмы Fluke

Осциллографы Fluke 199C и 196C имеют цветной жидкокристаллический экран, что позволяет легко различать отдельные осциллограммы по их цвету и наблюдать их при максимальном размере. Другие скопметры имеют черно-белый экран и для четкого разделения осциллограмм их осциллограммы приходится нередко смещать по вертикали. При этом полное разделение осциллограмм возможно при уменьшении их размеров. Приборы имеют режим инерции (послесвечения или персистенции). Осциллографы с цветным экраном имеют регулируемый режим послесвечения, а приборы с монохромным экраном только включение или выключение этого режима.

Во всех приборах возможна работа как с обычными осциллографическими входами, так и со входом с гальванической развязкой, что важно, например, при измерениях разности напряжений между двумя незаземленными точками. Приборы удовлетворяют существующим требованиям к безопасности при работе с приборами без заземления. В сочетании с автономной работой, малыми габаритами и массой это способствует их применению в полевых и промышленных условиях.

Приборы Fluke 199C и 196C имеют хотя и не рекордные, но достаточно высокие частоты каналов вертикального отклонения (верхняя граничная частота от 60 до 200 МГц), что позволяет использовать их при наладке и исследовании умеренно высокочастотных электронных устройств. Тут они могут конкурировать с массовыми моделями осциллографов Tektronix. Что касается более низкочастотных приборов Fluke 123/124 с граничными частотами 40 и 20 МГц, то они рассчитаны на применение в качестве сервисных осциллографов с расширенными возможностями.

Портативные осциллографы Fluke отличаются своими дополнительными возможностями. За исключением приборов Fluke 123/124 все другие осциллографы имеют функции изменения размера осциллограмм (Zoom), режим записи осциллограмм (ScopeRecord), автоматический захват и воспроизведение 100 последних осциллограмм, математическую обработку осциллограмм и функции сохранения настроек. Все приборы (кроме Fluke 123) имеют режимы курсорных измерений. Для подключения принтера к осциллографам используется оптический кабель с интерфейсом RS-232. В обязательный комплект он не входит и поставляется опционально.

Удобству работы с приборами способствует встроенный True RMS-мультиметр, обеспечивающий цифровое отображение параметров исследуемых сигналов на экране осциллографов. Благодаря этому осциллографы Fluke одновременно выполняют функции мультиметра, обеспечивая типовые измерения напряжения, тока и сопротивления, а также «прозвонку» диодов и измерение температуры. Возможно запоминание до 5000 отсчетов измеряемых встроенным мультиметром параметров.

Для портативных осциллографов одним из важнейших параметров является время непрерывной автономной работы от аккумуляторных батарей. Это время составляет 4 часа, за исключением Fluke 124, у которого оно достигает 7 часов. Естественно, все приборы могут питаться и от стандартной сети переменного тока. Стоит однако помнить, что в США используется сеть переменного тока с напряжением 110 В и частотой 60 Гц. На приборы дается трехгодичная гарантия, а на аксессуары к ним одногодичная гарантия.

6.4. Мультиметры-осциллографы фирм BEETECH и WENS

6.4.1. Мультиметры-осциллографы фирмы BEETECH

Портативные цифровые приборы — мультиметры получили поистине массовое распространение. Обычно они применяются для измерения постоянных и переменных напряжений и токов, резистивности, емкости и индуктивности (иногда еще температуры, параметров диодов и транзисторов и т. д.). Эти малогабаритные и дешевые приборы почти вытеснили из сферы сервиса дорогие и громоздкие цифровые вольтметры, омметры, частотомеры и др. приборы. Единственно, что не хватало этим приборам — наличия осциллографа.

Рынок мультиметров с встроенным осциллографом был быстро заполнен рядом фирм. Одной из них стала BEETECH, выпустившая серию их трех *графических мультиметров-осциллографов*, показанную на рис. 6.7.

Все приборы являются полноценными мультиметрами, дополнительно выполняющими функции простого осциллографа. Технические характеристики графических мультиметров-осциллографов представлены на рис. 6.8.

Из приборов фирмы BEETECH особый интерес вызывает старшие модели 700 и 700S — рис. 6.7 справа. Они содержат цифровой осциллограф с полосой частот от 0 до 5 МГц и частотой выборок 25 Мв/с. Разрешение дисплея 160×160 точек обеспечивает, если и не выдающееся, то достаточно высокое качество представления осциллограмм — конечно далекое от того, которое характерно для настольных моделей цифровых осциллографов. В осциллографах старших моделей предусмотрены простейшие курсорные измерения и даже захват импульсных сигналов.



Рис. 6.7. Графические мультиметры-осциллографы фирмы BEETECH

Параметры	33N	70	700	700S
Осциллограф	200 кГц	100 кГц	5 МГц	5 МГц
Полоса пропускания	1-10 ⁶ выб./сек.	1-10 ⁶ выб./сек.	25-10 ⁶ выб./сек.	25-10 ⁶ выб./сек.
Временная развертка	128 x 64	128 x 64	160 x 160	160 x 160
Дисплей	128 x 64	128 x 64	160 x 160	160 x 160
Подсветка дисплея	-	-	+	+
Кол-во каналов	Один			
Используемые щупы	Для мультиметра			
Режимы настройки	Автоматический / Ручной			
Развертка	20 с/дел. 17 мВ (В)/дел. 6 мА (А)/дел.	18 с/дел. 9 мВ (В)/дел. 2 мА (А)/дел.	23 с/дел. 14 мВ (В)/дел.	23 с/дел. 14 мВ (В)/дел.
Триггер	+	-	+	+
Курсор	+	-	+	+
Захват импульсных сигналов	+	+	+	+
Мультиметр	Дисплей 3 1/2 разряда (max. 4000) + аналог. шкала	+	+	+
Выбор пределов измерений	Автоматический			
Измерения True RMS	+	+	+	+
ACV	до 700 В			
DCV	до 1000 В			
ACI	до 20 А			
DCI	до 20 А			
Ω	400 Ом - 40 МОм			
C	4 нФ - 4 мФ	4 нФ - 40 мФ	4 нФ - 400 мФ	4 нФ - 400 мФ
Выход сигнала	20 кГц макс., TTL уровни	20 кГц макс., TTL уровни	78 кГц макс.	Функция генератор
Тестирование логики	+	+	+	Логический анализатор
Измерение частоты	100 кГц макс.			
Запись значений	min/max	+	min/max/avg	Частотомер
Режим относительных измерений	+	+	+	+
Режим измерения с заданными допустимыми отклонениями	+	+	+	+
Измерение периода	+	+	+	+
Измерение рабочего цикла	+	+	+	+
Режим поиска, энергопотребления	+	+	+	+
Частотомер	-	-	-	Каналы А, В Диапоз. 5 МГц - 1.3 ГГц Дисплей 8 цифр
Функциональный генератор	-	-	-	Выс. сигнал: синус, треугол., прямоугол. 8 диапазонов: от 40 Гц до 5 МГц Аналог. шкала скважности (25-75%) и амплитуды (2-10 В) Дисплей 3 цифры
Логический анализатор	TTL, CMOS, 0, 5 В	-	Один канал	Один канал
Автомобильный анализатор	-	-	+	-
Возможность измерений с дополнительным адаптером	Температура, влажность, давление, высокие токи			
ПК подключение, RS232 интерфейс	+	+	+	+
Режим HELP	-	+	+	+
Режим SET UP	-	+	+	+
Прямое подключение к паянтру	-	-	+	+
Питание	Адаптер или набор батарей			
Размер	192 x 92 x 55 мм	210 x 107 x 55 мм	210 x 107 x 55 мм	210 x 107 x 55 мм
Вес	450 г	800 г	800 г	800 г
Стандарт и безопасности	CAT III (1000 V DC)			
	CE, UL	CE, UL	CE	CE

Рис. 6.8. Технические характеристики графических мультиметров-осциллографов фирмы BEETECH

Отличительная особенность модели 700S — встроенный функциональный генератор. Он позволяет получать синусоидальные, прямоугольные и треугольные импульсы. Диапазон частот сигналов от 40 Гц до 5 МГц разбит на 6 диапазонов. Выходное напряжение функционального генератора от 2 до 10 В (амплитудное значение), возможно изменение скважности импульсов. Наряду с встроенным цифровым частотомером это превращает 700S в миниатюрную измерительную лабораторию.

6.4.2. Мультиметры-осциллографы WENS 820

В настоящее время портативные осциллографы фирмы BEETECH выпускаются под маркой WENS. Новая серия портативных осциллографов WENS 820 (рис. 6.9) это двухканальные приборы с полосой частот каналов Y до 20/40/60 МГц, оснащенные дисплеем с разрешением 320×240 пикселей и имеющий типовые для цифровых запоминающих осциллографов минимальные возможности. Частота дискретизации сигналов 200 Мвыб/с, длина записи 128 Кбайт на каждый канал.

Приборы дают достаточно высокое качество представления осциллограмм и имеют встроенный мультиметр, измеряющий напряжения постоянного (от 0,4 до 1000 В) и переменного (от 4 до 600 В) тока, сопротивление (от 400 Ом до 30 МОм) и частоту (от 0,5 Гц до 40 МГц.). Возможна запись максимального, минимального и среднего значений, а также периода сигнала и длительности рабочего цикла.

С дополнительным адаптером возможно измерение температуры и влажности. Однако измерение токов, емкости и индуктивности не предусмотрено. Нет также возможности тестирования логики. Размеры приборов 220×107×95, вес 1 кг. Предусмотрено подключение приборов к компьютеру через порты USB и RS-232.

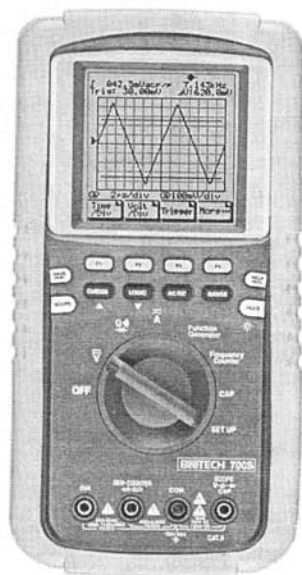


Рис. 6.9. Портативный мультиметр-осциллограф WENS 820

6.5. Портативные осциллографы фирмы Velleman

6.5.1. Портативный осциллограф HPS5

Портативные цифровые осциллографы выпускает фирма Velleman. Данные о продукции фирмы Velleman можно найти на ее Интернет-сайте www.velleman.be.

Вид одного из ее осциллографов HPS5 показан на рис. 6.10. Это не мультиметр, а миниатюрный цифровой осциллограф с полосой пропускания 1 МГц и частотой дискретизации 5 Мв/с. Диапазон разверток прибора от 2 мкс/дел до 20 с/дел. Такие параметры прибора удовлетворяют разве что начинающего радиолюбителя или мастера по обслуживанию аудио- и телевизионной аппаратуры. Поэтому фирма Velleman называет такие приборы «персональными осциллографами».

Технические характеристики этого осциллографа представлены на рис. 6.11. Несмотря на простоту (если не сказать примитивность) этого прибора, он обеспечивает некоторые виды измерений, присущие солидным цифровым осциллографам.



Рис. 6.10.
Портативный
осциллограф HPS5

Дискретизация:	5 МГц
Полоса пропускания усилителя:	1 МГц (-3дБ при установке 1 В/дел.)
Входной импеданс:	1 МОм/20 пФ (стандартный щуп осциллографа)
Вертикальное разрешение:	8 бит (6 бит на ЖКИ)
Жидкокристаллический дисплей:	64×128 точек
Измерение затухания в дБ (0 дБ=0,775 В):	-73 дБ +40 дБ (до 60 В с пробником ×10), точность ±0,5 дБ
Измерение эфф. значения переменного тока:	0,1 мВ - 80 В (до 400 В с пробником ×10), точность 2,5%
Скорость развертки:	от 20 с до 2 мкс/дел.
Диапазон чувствительности на входе:	12 делений от 5 мВ/дел до 20 В/дел. (до 200 В/дел с пробником ×10)
Напряжение питания:	9 В/300 мА. постоянного тока (нерегулируемое)
Батареи:	тип AA или аккумулятор NiCd/NiMH 750 мА·ч (5шт.)
Время автономной работы:	20 часов
Размеры:	105×220×35 мм
Вес:	395 гр. без батарей

- автоматическая установка напряжения дел. и время/дел.
- Режимы запуска: автоматический, обычный, ждущий, фронт/спад
- Показания среднеквадратичного значения и дБ
- Значения: Vdc, Vpp, Vrms, dBm (масштаб ×1 и ×10)
- Режим подачи визуальной информации: обычный, маркеры, сетка, визир
- Показатель маркера: dt, 1/dt, dV
- Связь по постоянному/переменному току
- Режим автоматического выключения и непрерывной работы
- Индикатор разряда батареи
- Включает цепь подзарядки (при использовании аккумуляторов)

Рис. 6.11. Технические характеристики портативного
осциллографа HPS5 фирмы Velleman

фам: курсорные измерения, индикация результатов измерений в цифровой форме на экране дисплея, измерение целого ряда параметров напряжения и мощности, автоматическая установка режимов измерения и т. д. Экран осциллографа жидкокристаллический и имеет разрешение 64×128 точек. Это действительно миниатюрный прибор — его вес менее 400 г (правда, без батарей) а размеры 105×220×35 мм позволяют не только носить его в дипломате, но и засунуть в карман среднего размера.

6.5.2. Портативный персональный осциллограф HPS10

Портативный персональный осциллограф Velleman HPS10 это усовершенствованный вариант описанной выше модели. На рис. 6.12 он представлен в пластиковой упаковке. В таком виде прибор поступает в продажу. Кстати, приборы этой фирмы можно приобрести в ряде российских магазинов, например в «Чип и Дип».

Полоса частот наблюдаемых сигналов у этого осциллографа расширена до 2 МГц, а частота квантования составляет 10 МГц. Прибор имеет довольно высокую чувствительность — от 5 мВ до 20 В на 12 делений, диапазон разверток от 200 нс до 1 часа на 32 деления. Имеется автоматическая установка масштаба по напряжению и по времени. Есть маркерные функции для измерения ряда амплитудных параметров сигнала, временных и частотных параметров. Для хранения отсчетов сигнала имеются две области памяти. Питание прибор получает от сети через адап-

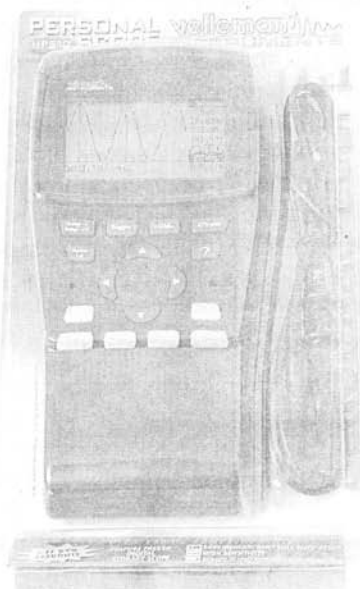


Рис. 6.12. Персональный
осциллограф HPS10 фирмы
Velleman

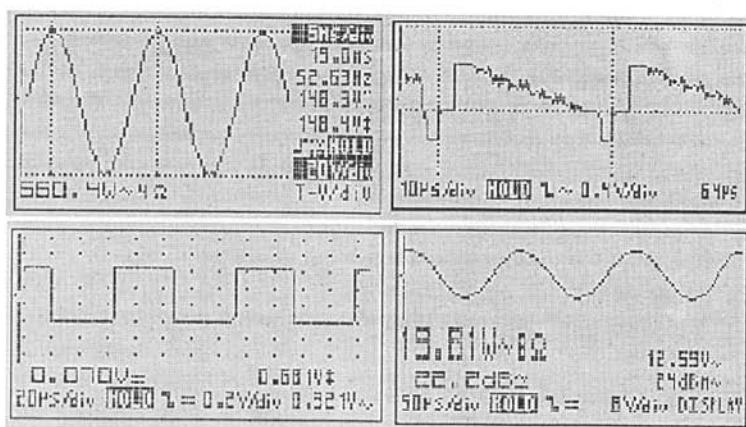


Рис. 6.13. Изображения на экране осциллографа HPS10 в различных режимах вывода

тер PS905 или щелочных либо NiCd аккумуляторных батарей. Время работы от батарей до 20 часов.

Дисплей осциллографа HPS10 жидкокристаллический с разрешением 128×64 точки. Вид реальных осциллограмм и другой отображаемой информации показан на рис. 6.13. Довольно грубо можно рассмотреть даже телевизионный сигнал.

6.5.3. Портативный осциллограф HPS40

Еще один представитель осциллографов этого класса HPS40 показан на рис. 6.14. На этот раз он представлен в переносном чемоданчике — кейсе. Этот прибор рекламируется как ручной персональный осциллограф.

Полоса пропускания прибора расширена до 5 МГц при чувствительности 5 мВ/дел и даже до 12 МГц при чувствительности от 50 мВ/дел до 20 В/дел, а частота дискретизации до 40 МГц (12 МГц для единичных импульсов). Входной импеданс прибора 1 МОм/20 пФ, используется стандартный щуп осциллографа. Разрядность квантования 8 бит. Скорость развертки от 50 нс/дел до 1 ч/дел (всего экран имеет 32 дел). Экран осциллографа (рис. 6.15) жидкокристаллический и имеет разрешение 112×192 точек. Вес прибор — его вес менее 450 г (без батарей) а размеры 105×220×35 мм. Питание от сетевого адаптера или батарей (9 В, 300 мА). Время непрерывной работы от батарей 20 часов.

6.5.4. Панельный осциллограф VPS10

Новое конструктивное исполнение осциллографов — панельные осциллографы реализовано в приборе VPS10 фирмы Velleman (рис. 6.16). Прибор имеет высококонтрастный ЖКИ-дисплей и по техническим характеристикам соответствует HPS10. Размеры прибора 165×90×35 мм.

6.5.5. Малогабаритный цифровой осциллограф APS 320

Самой серьезной разработкой в области миниатюрных осциллографов фирмы Velleman является цифровой двухканальный осциллограф APS 320 (рис. 6.17). Прибор имеет полосу частот пропускания каждого канала от 0 до 30 МГц со скоростью выборки 230 Мв/с для каждого канала. Чувствительность 30 мкВ, коэффи-



Рис. 6.14. Портативный осциллограф HPS40 фирмы Velleman в кейсе



Рис. 6.15. Внешний вид портативного осциллографа HPS40

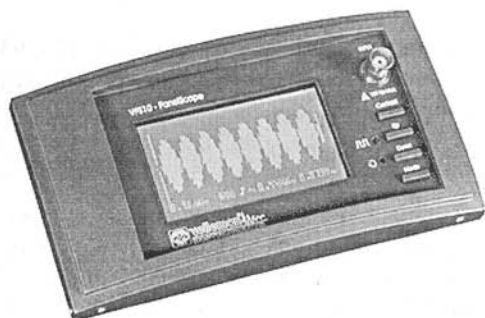


Рис. 6.16. Панельный цифровой осциллограф VPS19 фирмы Velleman



Рис. 6.17. Портативный цифровой осциллограф APS 320 фирмы Velleman

циенты отклонения канала Y от 1 мВ/дел до 20 В/дел, входной импеданс 1 Мом/20 пФ, разрядность выборок 8 бит, развертка от 25 нс/дел до 1 ч/дел. Дисплей с белым фотом имеет разрешение 192×128 точек.

Таким образом, по своим параметрам прибор превосходит типовые параметры аналоговых сервисных осциллографов, но имеет целый ряд дополнительных функций, присущих цифровым осциллографам: запоминание осциллограмм до 170 часов, стыковку с компьютером по порту RS-232 (опционально и по USB), ряд цифровых измерений амплитудных и частотно-временных параметров, курсорные измерения, измерения мощности стереоскопический режим представления звуковых сигналов. Размеры прибора 230×150×50 мм, масса с батареями 850 г.

6.6. Портативный осциллограф-мультиметр DMM-740

Фирма SUMM выпускает портативный осциллограф-мультиметр DMM-740 внешний вид которого показан на рис. 6.18. Это одноканальный цифровой осциллограф с предельной частотой 1 МГц и частотой стробирования 25 Мв/с. Это до-



Рис. 6.18. Портативный осциллограф-мультиметр DMM-740

статочно высокая для полосы в 1 МГц частота стробирования обеспечивает малый уровень шума квантования в канале Y. Это позволяет эффективно отлавливать шумы, наводки и помехи в аппаратуре. Цифровой мультиметр позволяет, как обычно, измерять постоянные и переменные напряжения и токи, измерять резистивность (сопротивление) и емкость, проверять диоды и тестировать логические схемы.

Прибор имеет интерфейс RS-232 и может подключаться к компьютеру или принтеру. Может работать от сети и от батарей. Комплектуется программным обеспечением, щупами, адаптером сетевого питания, кабелем для подключения к компьютеру, батарейками и инструкцией по эксплуатации.

6.7. Портативные осциллографы/мультиметры фирмы METEX

6.7.1. Одноканальный осциллограф/мультиметр MS-1280

Фирма METEX выпускает ряд портативных осциллографов/мультиметров — MS-1280, MS-2000, MS-2640 и DG Scope. Осциллограф/мультиметр MS-1280 имеет изящный корпус, его внешний вид показан на рис. 6.19.

Основные характеристики мультиметра:

- Измеряемое постоянное напряжение: 400 мВ, 4, 40, 400 и 1000 В (0.5%).
- Измеряемое переменное напряжение: 4, 40, 400 и 750 В (2.5%).
- Измеряемый постоянный ток: 0.4, 4, 40, 400 мА (1%).
- Измеряемый переменный ток: 0.4, 4, 40, 400 мА (1.5%).
- Измеряемое сопротивление: 0.4, 4, 40, 400 кОм, 4 и 40 МОм (0.5%).
- Измеряемая емкость: 4, 40, 400 нФ, 4, 40, 400 мкФ (3%).
- Измеряемая частота: 4, 40, 400 кГц, 4, 40, 400 МГц (0.1 %).
- Дополнительные возможности: тестирование диодов и логики, прозвон цепей со звуковой индикацией, измерение относительных значений, измере-



Рис. 6.19. Одноканальный осциллограф/мультиметр MS-1280

ние мощности в децибелах, измерение и сохранение максимальных и минимальных значений результатов измерений.

Осциллограф имеет полосу частот до 5 МГц при числе выборок 25 Мвыб/с, пределы по вертикали 0.5, 5 и 50 В, по горизонтали от 0.8 мкс/дел до 26.2 мс/дел. Дисплей имеет 3 3/4 разряда (максимальное число 4000). Предусмотрен автоматический и ручной выбор диапазонов. Данные могут передаваться на компьютер через порт RS-232 для последующей обработки. Адрес разработчика в Интернете: <http://www.imetex.com>

6.7.2. Осциллограф/мультиметр MS-2000

Цифровой запоминающий осциллограф MS-2000 (рис. 6.20) помимо 2 МГц осциллографа содержит цифровой мультиметр и частотомер.

Осциллограф прибора имеет полосу частот до 2 МГц при неравномерности -3 дБ, входы DC и AC, входной импеданс 10 МОм/110 пФ, коэффициенты отклонения от 0.1 до 100 В/дел, время нарастания 110 нс, скорость развертки от 2 мкс/дел до 2 с/дел, запуск ручной и автоматический, возможны курсорные измерения напряжения и времени.



Рис. 6.20. Цифровой запоминающий осциллограф/мультиметр MS-2000

Цифровой мультиметр служит для измерения постоянных и переменных токов и напряжений, сопротивления и емкости, а также для тестирования диодов и логики. Основные характеристики мультиметра:

- Измеряемое постоянное напряжение: 400 мВ, 4, 40, 400 и 600 В (0.3%).
- Измеряемое переменное напряжение: 400 мВ, 4, 40, 400 и 600 В (3%).
- Измеряемый постоянный ток: 0.4, 4, 40, 400 мА (1.5%).
- Измеряемый переменный ток: 0.4, 4, 40, 400 мА (3%).
- Измеряемое сопротивление: 0.4, 4, 40, 400 кОм, 4 и 40 МОм (0.5%).
- Измеряемая емкость: 4, 40, 400 нФ, 4, 40, 400 мкФ.
- Измеряемая частота: 5 Гц — 10 МГц (индикация 5 цифр, вход DC 10 МОм/110 пФ).
- Дополнительные возможности: тестирование диодов и логики, прозвон цепей со звуковой индикацией, измерение относительных значений, измерение мощности в децибелах, измерение и сохранение максимальных и минимальных значений результатов измерений.

Дисплей имеет 3 3/4 разряда (максимальное число 3999), автоматический и ручной выбор диапазонов. Данные могут передаваться на компьютер через порт RS-232 для последующей обработки. Стандартная комплектация: прибор, адаптер, аккумулятор, щупы, кабель для подключения к компьютеру + программное обеспечение, чехол, инструкция. Может поставляться с логическим анализатором на 8 каналов. Программное обеспечение работает в среде MS-DOS и WINDOWS.

6.7.3. Осциллограф-мультиметр DG SCOPE

Более современная модель комбинированного прибора DG SCOPE (рис. 6.21) имеет аналоговый мультиметр и частотомер повышенной точности с 5 разрядами индикации. Есть также осциллограф и логический анализатор на 8 каналов. Двухканальный цифровой запоминающий осциллограф имеет полосу частот до 20 МГц.

Пределы измерения мультиметра DG SCOPE:

- Постоянное напряжение (400 мВ, 4 / 40/ 400/ 1000 В).

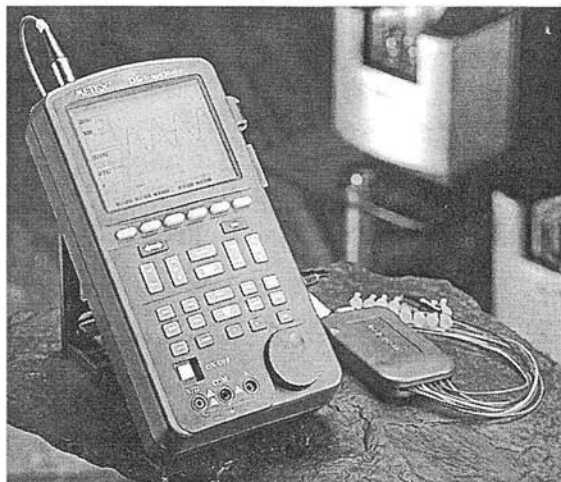


Рис. 6.21. Внешний вид комбинированного прибора DG SCOPE

- Переменное напряжение (400 мВ, 4/ 40/400/750 В).
- Постоянный ток (400 мкА, 4/40/400 мА 20А).
- Переменный ток (400 мкА, 4,40, 400 мА, 20 А).
- Резистивность (400 Ом, 4 кОм, 40 кОм, 400 кОм, МОм, 40 МОм).
- Проверка диодов: (2 В).
- Автоматические измерения:dBm, Auto/Data/Min./ Max. Hold, Relative off-set.

Параметры осциллографа:

- Частотный диапазон 0 — 20MHz.
- Чувствительность по вертикали: 5 мВ/дел - 2 В/дел.
- Длительность развертки: 50 нс/дел - 2 с/дел.
- Виды измерений: CH1, CH2, Dual, ADD, SUB, X-Y.
- Запуск: Auto, Normal.
- Курсорные измерения: напряжения Voltage, времени Time, частоты Frequency.
- Автоматическая установка пределов, запись осциллограмм, интерфейс RS-232C, печать.
- Разрешение дисплея: 320×24 точек (CCFL).

6.8. Портативные осциллографы корпорации Tektronix

6.8.1. Серия осциллографов Tektronix THS700

В целом можно отметить, что портативные цифровые осциллографы по своим характеристикам заметно уступают полноценным универсальным и даже сервисным осциллографам. Но они стали полезным дополнением к мультиметрам и имеют большие перспективы применения в службах сервиса и в радиолюбительской практике.

Приятным исключением из этого «правила» стали портативные осциллографы корпорации Tektronix. Она выпускает целый ряд таких приборов с батарейным питанием, что позволяет использовать их в походных условиях или в случаях работы по вызову в местах, где доступ к промышленной сети переменного тока ограничен или когда подключение осциллографа к сети нежелательно по тем или иным соображениям.

Серия осциллографов Tektronix THS700 это ручные приборы с возможностью питания от батарей. Выпускаются следующие типы осциллографов: THS730A/THS720A/THS720P. Внешний вид прибора THS730A представлен на рис. 6.22, а THS720A на рис. 6.23.

Основные характеристики этих приборов следующие:

- Полоса частот: до 200 и 100 МГц.
- Скорость выборки: 1 Гв/с и 500 Мв/с на канал.
- Число каналов: два канала с цифровыми фильтрами для интерполяции.
- Автоматические измерения: 21 параметр.
- Порт для подключения к ПК: RS-232.
- Питание: от NiCd батарей или сетевого адаптера.
- Время автономной работы: 2 часа.



Рис. 6.22. Внешний вид портативного осциллографа THS370A



Рис. 6.23. Внешний вид портативного осциллографа THS320A

Только для THS720P: расширенные средства запуска, измерение до 31 гармоник сигналов с частотой от 30 до 450 Гц; измерение мощности, статистика, пробник: для высоких напряжений до 1 кВ

6.8.2. Серия осциллографов Tektronix TPS2012/2014/2024

Серия цифровых запоминающих осциллографов TPS2012/2014/2024 выполнена в традиционном для Tektronix оформлении, показанном на рис. 6.24. Приборы выполнены в строгих прямоугольных «тонких» корпусах.

Основные характеристики этих приборов:

- Полоса частот: 100 МГц и 200 МГц.
- Скорость выборки: 2 Гв/с.
- Число каналов: 2 или 4 изолированных канала и 1 канал запуска.



Рис. 6.24. Внешний вид портативных осциллографов TPS2012/2014/2024

- Автоматические измерения: 11 параметров.
- Порт для подключения к ПК: RS-232.
- Запись осциллограмм: на флэш-память.
- Дополнительные функции: быстрое преобразование Фурье (FFT).
- Питание: от NiCd батарей (2 комплекта) или сетевого адаптера.
- Время непрерывной работы от батарей: до 4/8 часов.
- Только для TDS720P: измерение до 31 гармоник сигналов с частотой от 30 до 450 Гц.
- Пробник: для высоких напряжений до 1 кВ.

6.8.3. Портативные осциллографы Tektronix TPS2012/2014/2024 с Цифровым люминофором

Новейшая серия портативных осциллографов с Цифровым Люминофором TDS3000B (рис. 6.25) объединяет достоинства аналоговых и цифровых осциллографов и открывает уникальные возможности в исследовании сложных сигналов в реальном масштабе времени с запоминанием и математической обработкой осциллограмм.



Рис. 6.25. Внешний вид осциллографов серии TDS3000B

Эта серия содержит ряд приборов, технические характеристики которых представлены в таблице рис. 6.26 (получена с сайта корпорации Tektronix http://www.tek.com/site/ps/0,,3G-12482-SPECS_EN,00.html).

Приборы этой серии имеют 2 или 4 канала с полосой частот от 100 до 600 МГц. Полный VGA ЖКИ дисплей дает прекрасное качество отображаемой информации в цвете. В качестве примера представления информации на рис. 6.27 представлена осциллограмма тестирования телекоммуникационной системы. Она позволяет наглядно судить о богатстве возможностей представления информации на экране осциллографов этой серии.

На другом рисунке (рис. 6.28) представлена осциллограмма телевизионного сигнала, снятая с помощью осциллографа серии TDS3000B. На сайте корпорации Tektronix можно найти множество примеров осциллографирования сложных процессов в современном телекоммуникационном и связном оборудовании. Там же можно познакомиться со спецификой применения осциллографов с Цифровым Люминофором.

	TDS3012B	TDS3014B	TDS3024B	TDS3032B	TDS3034B	TDS3044B	TDS3052B	TDS3054B	TDS3064B
Bandwidth	100 MHz	100 MHz	200 MHz	300 MHz	300 MHz	400 MHz	500 MHz	500 MHz	600 MHz
Channels	2	4	4	2	4	4	2	4	4
Sample rate on each channel	1.25 GS/s	1.25 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s	5 GS/s	5 GS/s	5 GS/s	5 GS/s
Maximum record length	10 K points on all models								
Vertical resolution	9 Bits on all models								
Vertical sensitivity (/div)	1 mV $\sqrt{\text{B}}$ 10 V on all models								
Vertical accuracy	B \pm 2% on all models								
Max input voltage (1 MO Ω)	150 V _{RMS} CAT I on all models (300 V CAT II with standard 10X probe)								
Position range	B \pm 5 div on all models								
BW limit	20 MHz	20 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz
Input coupling	AC, DC, GND on all models								
Input impedance selections	1 MO Ω in parallel with 13 pF or 50 Ω on all models								
Time base Range	4 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	4 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	2 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	2 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	2 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	1 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	1 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	1 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div	1 ns $\sqrt{\text{B}}$ 10 s/div
Time base Accuracy	20 ppm on all models								
Display (VGA)	Color active matrix LCD on all models								

Рис. 6.26. Технические характеристики осциллографов серии TDS3000B

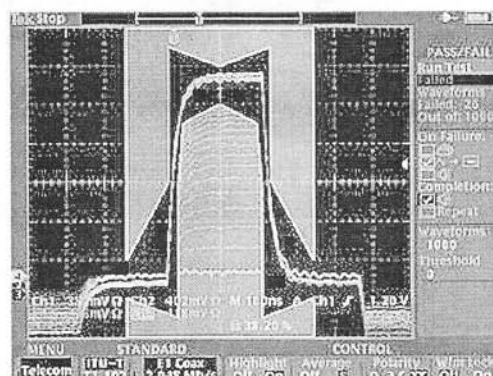


Рис. 6.27. Осциллограмма тестирования коммуникационной системы с помощью осциллографа серии TDS3000B

Частота дискретизации в приборах этой серии достигает до 5 Гв/с, экран обновляется со скоростью до 3600 фреймов/с. Приборы могут автоматически измерять 25 параметров сигналов и осуществлять быстрое преобразование Фурье. Имеют обширные возможности для подключения к компьютеру: встроенный Ethernet порт, порты GPIB, и RS232, разъем VGA. В комплект приборов входит обширное программное обеспечение. Единственное, что всегда омрачает впечатление от замечательных приборов корпорации Tektronix — это их высокая цена. Но, как у нас принято говорить, за удовольствие надо платить!

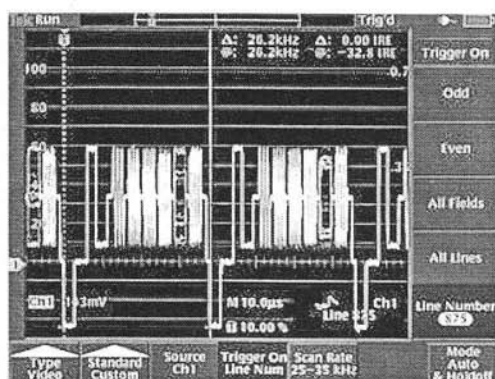


Рис. 6.28. Осциллограмма телевизионного сигнала на экране осциллографа серии TDS3000B

6.9. Цифровые осциллографы — ноутбуки фирмы Hitachi

Японская фирма Hitachi также выпускает цифровые осциллографы. Некоторые из них оригинальны, поскольку выполнены в виде миниатюрного ноутбука: суб-ноутбука или обычного ноутбука.

VC-5410

2 канала, 20 МГц, осциллограф-ноутбук, 15 МС/с, автоустановка времени развертки и аттенюатора, память 2 Кслова/канал, чувствительность 1 мВ/дел — 5 В/дел, скорость развертки 20 нс/дел — 50 с/дел, 5 режимов синхронизации, курсорные измерения, память на 10 установок, измерение параметров импульса, RS-232, полное ДУ, выход на принтер, цветной дисплей.

VC-5430

2 канала, 50 МГц, осциллограф-ноутбук, 30 МС/с, автоустановка времени развертки и аттенюатора, память 2 Кслова/канал, чувствительность 1 мВ/дел — 5 В/дел, скорость развертки 5 нс/дел — 50 с/дел, 5 режимов синхронизации, курсорные измерения, память на 10 установок, измерение параметров импульса, RS-232, полное ДУ, выход на принтер, цветной дисплей.

VC-5470

2 канала, 150 МГц, осциллограф-ноутбук, 100 МС/с, пиковый детектор 10 нс, автоустановка времени развертки и аттенюатора, память 8 Кслов/канал, чувствительность 1 мВ/дел — 5 В/дел, скорость развертки 2 нс/дел — 50 с/дел, 6 режимов синхронизации, режим огибающей 2-2048, память сигналов 8 Кслов/ 25 сигн., курсорные измерения, память на 10 установок, измерение параметров импульса, RS-232, полное ДУ, выход на принтер, цветной дисплей.

VC-5810-E-K

4 канала, 150 МГц, осциллограф-ноутбук, 100 МС/с, память 64 Кб/канал (возможность расширения до 2 Мб/канал), чувствительность 1 мВ/дел — 5 В/дел, скорость развертки 2 нс/дел — 50 с/дел, 7 режимов синхронизации, курсорные измерения, измерение параметров импульса, пиковый детектор 10 нс, GO-NOGO, ав-

тосинхронизация, FFT, FDD 5.5", GPIB, Centronics, PCMCIA & VGA, RS-232, полное ДУ, выход на принтер, цветной дисплей (диагональ 26.4 см).

VC-5810-E-M

4 канала, 150 МГц, осциллограф-ноутбук, 100 МС/с, память 2 Мб/канал, чувствительность 1 мВ/дел — 5 В/дел, скорость развертки 2 нс/дел — 50 с/дел, 7 режимов синхронизации, курсорные измерения, измерение параметров импульса, пиковый детектор 10 нс, GO-NOGO, автосинхронизация, FFT, FDD 5.5", GPIB, Centronics, PCMCIA & VGA, RS-232, полное ДУ, цветной дисплей (диагональ 26.4 см).

VC-5850

2 канала, 300 МГц, осциллограф-ноутбук, 500 МС/с, память 64 Кб/канал (возможность расширения до 2 Мб/канал), чувствительность 1 мВ/дел — 5 В/дел, измерение параметров импульса, курсорные измерения, RS-232, Centronics, VGA.

Внешний вид и параметры таких осциллографов приведены в таблице рис. 6.29. Для сравнения там приведены данные и цифровых осциллографов серии VC65XX обычной конструкции.




СЕРИЯ VC-5400: VC-5430, VC-5470	СЕРИЯ VC-5800: VC5810, VC-5850	СЕРИЯ VC-6500: VC-6523, VC-6525, VC-6545
		
Цифровой 2-канальный осциллограф в виде суб-ноутбука с цветным ЖК-дисплеем	Профессиональный цифровой осциллограф в виде ноутбука с большим цветным ЖК-дисплеем и ультрабыстрой разверткой	2-х канальный аналогово-цифровой осциллограф серии VC-6500 сочетает преимущества аналогового и цифрового осциллографа в одном приборе. Предназначены для широкого круга применений
<ul style="list-style-type: none"> • 4" цветной ЖК-дисплей • Полоса пропускания: 50 МГц (VC-5430), 150 МГц (VC-5470) • Макс. частота дискретизации на канал: 30 Мс/с (VC-5430), 100 Мс/с (VC-5470) • Память на канал: 2К (VC-5430), 6К (VC-5470) • Автозащита • Память на 100 осциллограмм (VC-5430) или 25 осциллограмм (VC-5470) • Память на 10 настроек • Двойная развертка • Режим задержки глитчей • Пред/После запись • Курсорные и автоматические измерения • Сравнение GO-NOGO • Математические функции • В комплекте: аккумулятор на 2 часа работы • Интерфейсы к ПК/принтеру: RS-232C и Centronics • 3 года гарантии 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 канала (VC-5850) или 4 канала (VC-5810) • 10.4" Цветной ЖК-дисплей • Полоса пропускания: 150 МГц (VC-5810), 300 МГц (VC-5850) • Макс. частота дискретизации на канал: 100 Мс/с (VC-5810) или 500 Мс/с (VC-5850) • Память на канал от 64К до 2Мб • Память на 10 осциллограмм • Память на 10 настроек • Автозащита • Двойная развертка • Режим задержки глитчей до 10 нс • Пред/После запись • Расширенная синхронизация (TV-строки, биринка, задержка, пролог, событие, набору логических состояний, ширине импульса) • Курсорные и автоматические измерения • Сравнение GO-NOGO • Hagen. Функции вкл/выкл. GPIB • Функция разделения памяти • Встроенный лиспш на экране • Интерфейсы к ПК/принтеру: RS-232C, GPIB, Centronics и PCMCIA • VGA выход • 3 года гарантии 	<ul style="list-style-type: none"> • ЭПТ с диагональю 6" • Полоса пропускания: 20 МГц (VC-6523), 50 МГц (VC-6525), 100 МГц (VC-6545) • Макс. частота дискретизации: 20 Мс/с (VC-6523, VC-6525), 40 Мс/с (VC-6545) • Память на канал: 2К (VC-6523, VC-6525), 4К (VC-6545) • Память на 2 осциллограмм • До 50 с/дел развертка в режиме прокрутки • Двойная автоматическая развертка (VC-6525, VC-6545) • Пред/После запись • Стандартная синхронизация (Single, Auto, Norm, TV-N & TV-V) • Курсорные измерения напряжения, времени и частоты • Встроенный 4-разрядный частотомер (VC-6525, VC-6545) • Интерфейс RS-232C для подключения к ПК или плоттеру (HP GL) • 2 года гарантии

Рис. 6.29. Внешний вид и характеристики цифровых осциллографов фирмы Hitachi

Осциллографы серии VC-5400 примечательны питанием от аккумуляторной батареи, что позволяет применять их в походных условиях и на производстве. Осциллографы серии VC-5800 имеют большой экран, большую память и самые современные возможности (в частности синхронизацию от телевизионных сигналов). Есть курсорные вычисления, память на 10 настроек, поиск глитчей (сбоев) с длительностью до 10 нс, математические функции, справка на экране и т. д.

Глава 7. Виртуальные РС-осциллографы и лаборатории

В этой главе описаны новейшие средства измерений — виртуальные РС-осциллографы и лаборатории, в которых отображение результатов измерений, переключение режимов работы, установка пределов измерений и обработка результатов возложены на персональные компьютеры (ПК). Это резко упрощает конструкцию таких приборов, позволяет привлекать для повышения эффективности обработки результатов вычислений и их запоминания такие необычайно мощные средства, как персональные компьютеры с их мощными и высокоскоростными микропроцессорами. Описано состояние рынка этих средств и приведены многочисленные примеры их применения.

7.1. Виртуальные РС-осциллографы

7.1.1. Назначение виртуальных осциллографов и их типы

В последние годы наряду с обычными аналоговыми осциллографами часто используются *цифровые* и *запоминающие осциллографы*, которые допускают подключение к персональному компьютеру (ПК). Это резко расширяет возможности таких приборов, позволяя использовать очень мощные и легко доступные математические средства обработки сигналов. Однако известные приборы этого типа, например фирм Agilent, Tektronix или Fluke, очень дороги и недоступны подавляющему большинству отечественных специалистов. Кроме того, существуют определенные проблемы при их подключении к ПК с помощью довольно дорогих и редких в продаже дополнительных аксессуаров.

В связи с этим представляют интерес *виртуальные осциллографы*, выполненные в виде приставок к ПК (поэтому их называют также *РС-осциллографы*). Название этих приборов условное, т. к. их «виртуальность» проявляется лишь в том, что передняя панель осциллографа создается как виртуальная на экране дисплея ПК соответствующими программными средствами. Управление осциллографом осуществляется с помощью графического манипулятора — мыши (или точпада в ноутбуках). Однако отображают эти приборы вполне реальные сигналы на экране дисплея ПК и главное — позволяют обрабатывать сигналы с помощью компьютера.

В сущности, подобные аппараты являются цифровыми осциллографическими приставками к настольному или мобильному ПК, позволяющими исследовать вполне реальные сигналы и строить высококачественные осциллограммы с высоким разрешением, разными цветами линий и с отсутствием геометрических искажений. Их можно обрабатывать на компьютере, наблюдать на экране дисплея и печатать принтером. С помощью компьютера реализуются и функции запоминания осциллограмм и обмена ими — в том числе через Интернет и с помощью электронной почты.

Принцип действия таких осциллографов заключается в стробировании входного сигнала, путем выделения из него коротких вырезок-отсчетов. Они оцифровываются с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя приставки или платы и коды отсчетов передаются в ПК через тот или иной порт.

зи с внешними устройствами. Применение цифровых и стробоскопических осциллографических приставок для ПК дает следующие преимущества:

- резко упрощается конструкция прибора, поскольку становятся ненужными электронно-лучевая трубка, органы управления осциллографом, мощный и высоковольтный источник питания и др.;
- уменьшается стоимость приборов;
- реализуется естественная стыковка с ПК (настольным или ноутбуком), что обеспечивает легкость цифровой обработки данных, например с помощью систем компьютерной математики;
- появляется возможность легко реализовать цифровые методы обработки сигналов, например построение спектра методом быстрого преобразования Фурье или регистрации сигналов на протяжении длительного промежутка времени с записью сигнала в память ПК.

Есть у приставок определенные недостатки: соединение с ПК многожильным кабелем, питание от отдельного сетевого адаптера, необходимость в применении специального программного обеспечения и др. Приставки обычно уступают куда более дорогим осциллографам по предельным частотно-временным параметрам и скорости обмена данными между измерительной схемой приборов и экраном. Но есть приставки, мало уступающие осциллографам, как по параметрам, так и по стоимости.

7.1.2. Виртуальные осциллографы в виде плат расширения ПК

Миниатюризация узлов цифровых осциллографов развивается так быстро, что уже с десятков лет тому назад появились первые цифровые осциллографы, выполненные в виде карт расширения персональных компьютеров. Такие карты размещаются в корпусе компьютера и содержат разъемы для подключения исследуемых устройств, размещаемые на задней стороне карты.

Такое конструктивное решение имеет ряд достоинств:

- происходит дальнейшее упрощение конструкции средств осциллографирования;
- отпадает необходимость в корпусе приставки и источнике ее электропитания;
- становится возможным подключение приставки прямо к скоростной системной шине ПК;
- сокращается число кабелей;

В тоже время можно отметить и недостатки такого решения:

- габариты плат расширения малы, особенно по толщине, что затрудняет применение высококачественных и широкополосных узлов;
- платы занимают слот, а чаще даже два слота, расширения;
- подключение плат к источникам электропитания ПК может вызвать их перегрузку;
- платы нуждаются в специальном экранировании;
- удлиняются сигнальные кабели;
- платы расширения у портативных ПК — ноутбуков не применяются.

Нередко фирмы, выпускающие такие платы, выпускают и приставки-осциллографы в отдельном корпусе. Часто они стоят заметно дешевле, чем аналогич-

ный по параметрам цифровой или стробоскопический осциллограф. Однако рассчитывать на большую экономию от применения таких плат не приходится — сверхширокополосные платы-осциллографы стоят достаточно дорого.

7.2. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman

7.2.1. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman

Одним из известных разработчиков таких, достаточно дешевых приборов, является голландская фирма Velleman Instruments, приборы которой (виртуальные осциллографы PCS500, PCS100 и K8031) сейчас можно приобрести в магазинах Chip-Dip. Их продают также многие фирмы, торгующие радиоизмерительным оборудованием. Ниже представлены основные характеристики осциллографических приставок фирмы Velleman и требования к системе, необходимые для применения приставок [40—42].

Параметр	PCS500	PCS100/K8031
Число каналов:	2	1
Входной импеданс:	1 МОм/30пФ	1 МОм/30пФ
Разрядность	8 бит	8 бит
Чувствительность	5 мВ -15 В/деление	10 мВ — 3 В/деление
Максимальное $U_{\text{вх}}$:	100 В	100 В
Диапазон частот:	0 — 50 МГц	0 — 12 МГц
Неравномерность АЧХ:	± 3 дБ	± 3 дБ
Погрешность отсчета:	2,5%	2,5%
Временная развертка:	20 нсек-100 мсек/дел	0,1 мкс-100 мсек/дел
Частота стробирования:	1,25 кГц 50 МГц	0,8 кГц — 32 МГц
максимальная	1 ГГц	-
Длина записи	4096/канал	4079
Напряжение питания:	9—10 В/1А	9—10 В/0,5 А
Размеры:	230×165×45 мм	230×165×45 мм
Вес:	490 г	400 г
Режимы входов:	AC, DC, Ground (в K8031 нет)	
Интерполяция:	линейная или сглаженная	
Маркеры:	для напряжения и частоты	

Осциллограф имеет оптическую (гальваническую) развязку от компьютера, что устраняет возможность повреждения приборов при измерениях. У поставляемых к осциллографу кабелей разъемы заизолированы. Как достоинство осциллографа-приставки стоит отметить максимальный предел коэффициента отклонению по вертикали в 15 В/дел, что позволяет исследовать без внешних делителей сигналы довольно высокого уровня.

Требования к ПК следующие:

- операционная система Windows 95, 98, 2000, NT или XP;
- SVGA видеокарта (минимальное разрешение 800×600);
- принтерный порт LPT1, LPT2 или LPT3;
- арифметический сопроцессор для работы анализатора спектра.

Таким образом, приставка PCS500 (рис. 7.1) обеспечивает создание виртуального двухканального осциллографа с частотами вертикального отклонения до



Рис. 7.1. Внешний вид приставки PCS500 спереди

50 МГц. Это самые скоростные из моделей осциллографов фирмы Velleman с обычными (не USB) интерфейсами. Спереди приставки расположены лишь разъемы входов (одного или двух) и вход внешних импульсов запуска. Кроме того, имеется светодиодный индикатор включения.

Виртуальный осциллограф фирмы Velleman имеет следующие преимущества:

- внешний триггер с запуском по нарастанию и спаду сигнала;
- улучшенная входная чувствительность;
- пониженный уровень шумов в канале вертикального отклонения;
- улучшенная временная развертка осциллографа;
- возможность отображения суммы и разности сигналов на входах и инвертированного сигнала;
- возможность отображения периодических сигналов с частотой стробирования до 1 ГГц;
- расширенный до 25 МГц частотный диапазон анализатора спектров.

Внешний вид приставки PCS500 сзади представлен на рис. 7.2. Сзади приставка имеет разъем параллельного принтерного порта LPT и разъем для подключения внешнего адаптера питания от сети переменного тока с выходным напряжением 9 В. Имеется также клемма для заземления прибора.



Рис. 7.2. Внешний вид приставки PCS500 сзади

Приставка PCS100 является основной для построения одноканального стробоскопического осциллографа с полосой до 32 МГц. А приставка K8031 выполнена в виде радиоконструктора «Сделай сам» (рис. 7.3) и позволяет радиолюбителям сэкономить немного средств при покупке набора деталей для сборки прибора. Приборы имеют гальваническую развязку от компьютера. Вид корпуса приставки K8031 показан на рис. 7.4.

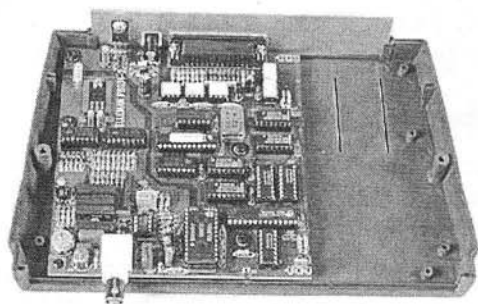


Рис. 7.3. Осциллограф-приставка K8031 в виде конструктора для самостоятельной сборки

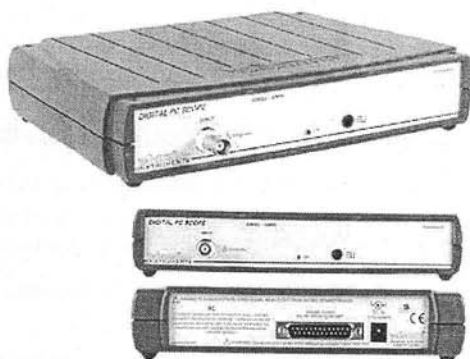


Рис. 7.4. Вид корпуса приставки K8031

7.2.2. Анализатор спектра виртуального осциллографа фирмы Velleman

Осциллографические приставки позволяют также строить спектры сигналов, используя для этого быстрое преобразование Фурье (БПФ) с достаточно большим числом отсчетов (несколько выше 4000). Фурье-анализатор приборов обеспечивает следующие характеристики:

Фурье-анализатор	PCS500	PCS100/ K8031
Частотный диапазон:	0—1,2 кГц до 25 МГц	0—0,4 кГц до 16 МГц
Разрешение БПФ:	2048 строк	2048 строк
Входные каналы:	канал 1 или канал 2	канал 1
Дополнительные функции:	функция масштабирования	
Маркеры:	для напряжения и частоты	

В режиме Фурье-анализатора возможен выбор различных видов частотных окон: прямоугольное, Бартлетта, Хэмминга, Хэннинга и Блэкмана. Возможна работа с регистрацией максимумов пиков и с усреднением. Таким образом, ряд математических операций над сигналами приставка-осциллограф выполняет самостоятельно, что делает ее применение более привлекательным.

7.2.3. Самописец на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman

Приборы могут использоваться в качестве самописца — регистратора, имеющего следующие характеристики:

Самописец	PCS500 и PCS100/ K8031
Временной масштаб:	20 мсек/дел. — 2000 сек/дел.
Макимальное время записи:	9,4 ч/экран
Диапазон выборки:	1 выборка/20 сек — 100 выборок/сек
Запись данных:	автоматическая в течении до 1 года и более
Дополнительные функции:	функция масштабирования
Маркеры:	для времени и напряжения

Применение прибора в качестве самописца незаменимо при выявлении случайно появляющихся неисправностей, когда пользователь не может непрерывно наблюдать за исследуемым устройством или системой.

7.2.4 Работа с РС-осциллографом фирмы Velleman

Приставки (РС-осциллографы) по существу заменяют три прибора: осциллограф, спектроанализатор и электронный регистратор. Для входов вертикального отклонения предусмотрены следующие возможности:

- AC — отсев постоянной составляющей сигнала и работа с сигналами переменного тока;
- DC — непосредственное подключение (с передачей постоянной составляющей сигнала);
- Ground — заземление входа.

Чувствительность входов и режимы их работы изменяются программным путем. Возможно применение щупа — делителя с отношением 1/10. К приставкам опционально могут прилагаться один-два таких делителя с миниатюрными зажимами — крокодилами. Но обычно поставляются соединительные экранированные провода без делителя. Следует учитывать, что они имеют довольно большую дополнительную емкость, достигающую до 50—100 пФ.

В режиме осциллографа (рис. 7.5) частота дискретизации входного сигнала задается режимом работы осциллографа. Основным режим — реального времени. При нем частота дискретизации задается достаточно большой автоматически, при этом для соединения точек осциллограмм используется линейная интерполяция или интерполяция со сглаживанием. Возможен также режим однократного запуска. Управление осциллографом осуществляется группами виртуальных кнопок — двух каналов вертикального отклонения под окном осциллограммы и группы кно-

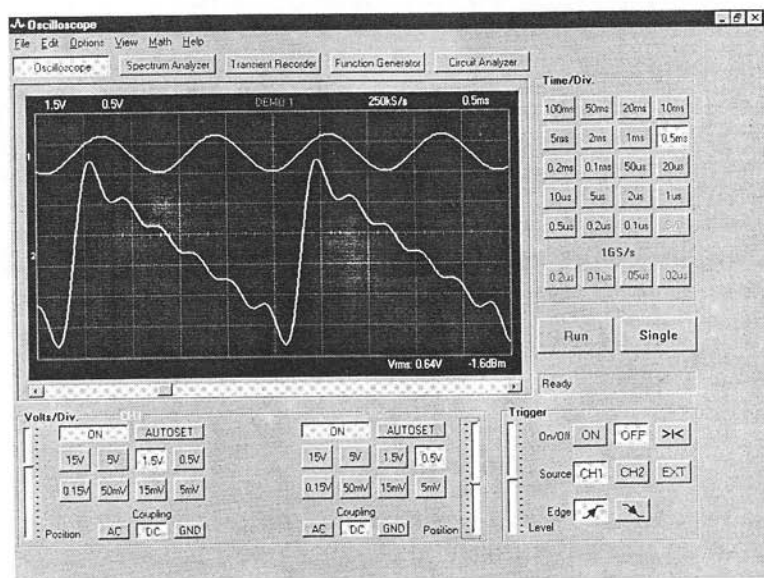


Рис. 7.5. Окно виртуального осциллографа PCS500

пок горизонтальной развертки справа. Такое управление основано на метафоре работы с обычным современным осциллографом и вполне интуитивно понятно.

У приставки PCS500 предусмотрен еще один режим для просмотра осциллограмм периодических сигналов. При этом дискретизация задается генератором случайных чисел, что создает эквивалентную частоту дискретизации до 1 ГГц. Обработка осциллограмм при этом занимает несколько секунд, но позволяет наблюдать осциллограммы сигналов с частотами до нескольких десятков МГц. Более высокочастотные сигналы наблюдать бессмысленно, поскольку верхняя граничная частота усилителей вертикального отклонения ограничена значением 50 МГц, да и триггер синхронизации на таких частотах работает неустойчиво.

Осциллограф-приставка PCS100/K8031 имеет один канал и его окно несколько упрощено — рис. 7.6. В частности имеются органы управления только одним каналом. На рис. 7.6 показана возможность вывода курсоров и проведения курсорных измерений двойной амплитуды и периода синусоидального сигнала. Для этого используются пара курсоров в виде горизонтальных пунктирных линий и пара курсоров в виде вертикальных пунктирных линий. Они перемещаются с помощью мыши.

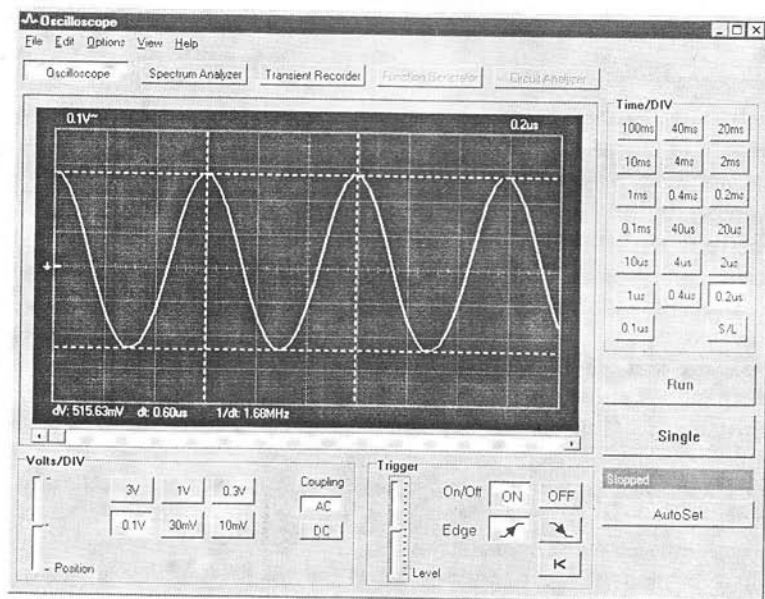


Рис. 7.6. Окно виртуальных осциллографов PCS100/K8031 в режиме осциллографа с курсорными измерениями

Сверху окна виртуального осциллографа (рис. 7.5) расположено обычное Windows меню и под ним кнопки видов работы приставки. На рис. 7.7 показан вид окна в режиме Фурье-анализа сигнала на нижнем входе. Показано также открытое меню View, позволяющее устанавливать или удалять различные сообщения — метки на «экране» осциллографа или Фурье-анализатора.

Любую осциллограмму (спектрограмму), которая видна на виртуальном экране, можно записать в виде файла — графического с расширением .bmp и текстового с расширением .txt. Текстовый файл записывается в формате ASCII, причем каждая точка представлена своим номером (от 0 до 4095) и значением (от 0 до

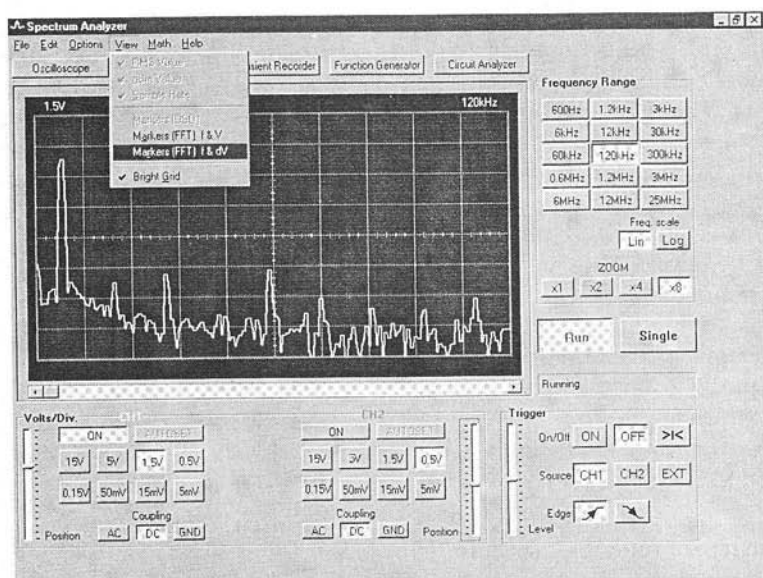


Рис. 7.7. Окно виртуального Фурье-анализатора приставки PCS500

255, нуль соответствует числу 128). Это позволяет использовать полученные данные для обработки программами, написанными на практически любом языке программирования — даже на популярном Бейсике.

Предусмотрен вывод на экран цифровых данных в масштабах по вертикали (напряжение или дБ) и горизонтали (время). Можно также нанести надпись и вывести курсоры для проведения курсорных измерений. Все это позволяет создавать наглядные отчеты по измерениям.

Следует, однако, отметить, что полноценной альтернативой современному аналоговому осциллографу цифровые и стробоскопические осциллографические приставки все же не являются. Им присущи характерные искажения вида сигналов при дискретизации. Например, при наблюдении синусоидальных сигналов на медленных развертках их форма резко искажается и напоминает перемодуляцию. Это связано с характерными биениями, возникающими при смещении частот сигнала с частотой генератора стробирующих импульсов. Обычный осциллограф таким эффектом не обладает и дает неискаженное представление синусоиды даже на длительных развертках — правда обычно в виде широкой полосы, ширина которой задается двойной амплитудой сигнала.

По указанной причине практически невозможно наблюдать амплитудно-модулированные высокочастотные сигналы, хотя на обычном осциллографе они наблюдаются легко. Естественно, что у приставок нет специальной синхронизации для телевизионных сигналов — например, выделения строк кадров, которая часто есть у обычных осциллографов. Тем не менее, получение достаточно качественных осциллограмм телевизионных кадров или строк вполне возможно.

7.3. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman

7.3.1. Функциональные измерительные генераторы

Для исследований, ремонта и налаживания электронной аппаратуры помимо осциллографов необходимы еще и измерительные генераторы. Наиболее распространенными являются генераторы синусоидальных колебаний и генераторы импульсов прямоугольной формы. Связано это с тем, что именно эти простые сигналы используются для снятия амплитудно-частотных, фазо-частотных и переходных характеристик различных устройств (прежде всего усилителей) и тестирования различных радиоэлектронных систем.

Особое место занимают *функциональные генераторы*, создающие, как минимум, три сигнала различной формы — синусоидальный, треугольный и меандровый. Чем шире диапазон частот и амплитуд таких генераторов и чем выше стабильность их частоты, тем они дороже. Наряду с аналоговыми функциональными генераторами на основе интеграторов, выпускаются и дорогостоящие цифровые функциональные генераторы, синтезирующие сигналы цифровыми методами.

7.3.2. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman

В последнее время резко возрос интерес к виртуальным измерительным генераторам, выполненным в виде приставок к ПК. «Виртуальность» таких генераторов, как и осциллографов, проявляется в том, что передняя панель приборов создается на экране дисплея ПК соответствующими программными средствами. Однако сигналы таких генераторов вполне реальные и их можно использовать для проведения обычных измерений и наладки электронной аппаратуры.

Управление приборами осуществляется с помощью графического манипулятора, например, мыши. Ниже мы рассмотрим виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman Instruments PCG10 [41], которые, как и виртуальные осциллографы PCS500 и PCS100 можно приобрести в наших магазинах. Выпускается и набор для их сборки K8016.

Приставка — виртуальный цифровой функциональный генератор поставляется в двух вариантах: конструктора (K8016) и готового изделия (PCG10) — рис. 7.8. Уникальная особенность генератора — его совместимость с PC осциллографами Velleman PCS64i и PCS500 для создания измерительного комплекса с расширенными возможностями отображения данных на дисплее. Малая (0,01 Гц) нижняя частота генератора позволяет успешно использовать его в практике сверхнизкочастотных измерений. Кроме того, эта дешевая приставка является полноценным цифровым синтезатором сигналов, причем не только стандартных (синус, треугольные и прямоугольные импульсы), но и произвольной формы! Форма создаваемых приставкой сигналов задается программным путем.

Приставка — функциональный генератор имеет следующие особенности построения:

- кварцевая стабилизация частоты;
- оптическая изоляция от ПК;
- основные формы сигналов: синусоидальная, прямоугольная (меандр) и треугольная симметричная;
- дополнительный выход для синхронизации сигнала TTL уровня;

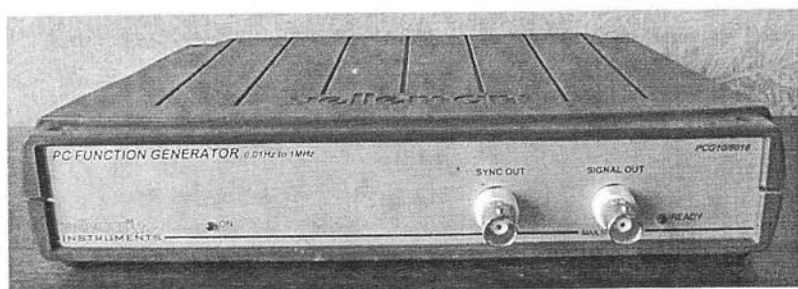


Рис. 7.8. Приставка — функциональный генератор PCG10 (вид спереди)

- библиотека форм дополнительных сигналов;
- возможность создания индивидуальных форм сигналов.

Основные параметры генератора следующие:

- Диапазон частот: 0.01 Гц — 1 МГц
- Источник питания: адаптер 12 В/800 мА (PS1208)
- Разрешение по частоте: 0,01%
- Вертикальное разрешение: 8 бит (0.4 % от полной шкалы)
- Диапазон амплитуды: 100 мВ — 10 В при нагрузке 600 Ом
- Отклонение от нуля: от 5В до +5В max (0.4 % от полной шкалы)
- Максимальная частота дискретизации: 32 МГц
- Коэффициент гармоник синусоиды: менее 0,08%
- Выходной импеданс: 50 Ом
- Размеры: 235×165×47 мм

Внешний вид приставки сзади показан на рис. 7.9. Особенностью приставки является возможность ее работы совместно с виртуальными осциллографами фирмы Velleman. Для этого приставка оснащена двумя разъемами принтерного порта LPT — одним она подключается к порту компьютера, а другим к приставке виртуального осциллографа. В результате создается комплекс для проведения самых различных измерений и исследований с возможностью обработки результатов на ПК. Кроме того, сзади приставки имеется разъем для подключения внешнего адаптера питания от сети переменного тока с выходным напряжением 9 В постоянного тока.

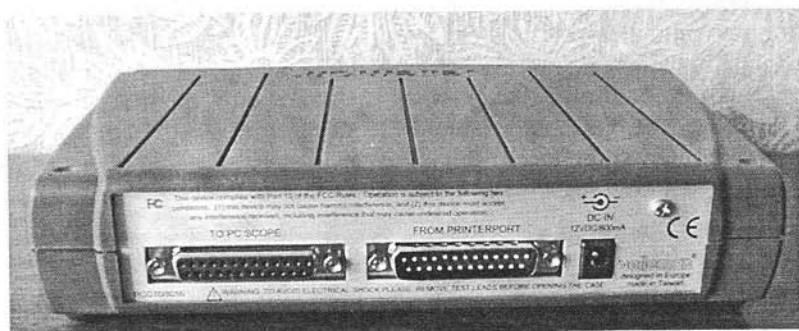


Рис. 7.9. Приставка — функциональный генератор PCG10 (вид сзади)

7.3.3. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы Velleman

Функциональный генератор включается с помощью программы PC-Lab 2000, окно которой показано на рис. 7.10. В разделе Function Generator надо установить темный кружок у выбранного типа генератора.

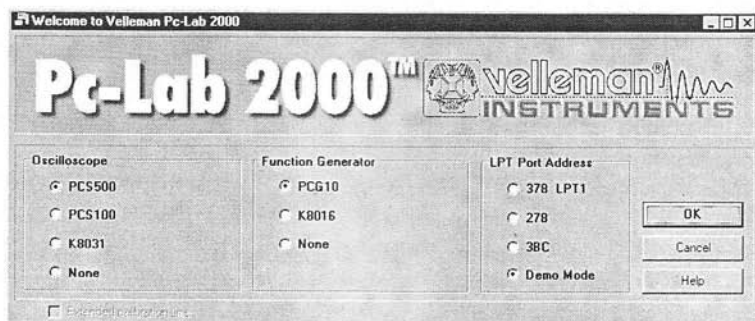


Рис. 7.10. Окно программы PC-Lab 2000

Для запуска генератора достаточно активизировать мышью кнопку Function Genetator. При этом появится окно управления генератором, показанное на рис. 7.11 справа. В нем есть окошко для наблюдения осциллограммы генерируемого сигнала, кнопки (снизу) установки частоты и формы импульсов, а также органы плавной регулировки частоты, амплитуды и смещения импульсов.

Программное обеспечение прибора позволяет устанавливать форму импульсов загрузкой соответствующего библиотечного файла. Для этого надо активизировать кнопку MORE FUNC. Появится еще одно окно генератора (оно также видно на рис. 7.11). В нем помимо кнопок второго ряда форм генерируемых сигналов име-

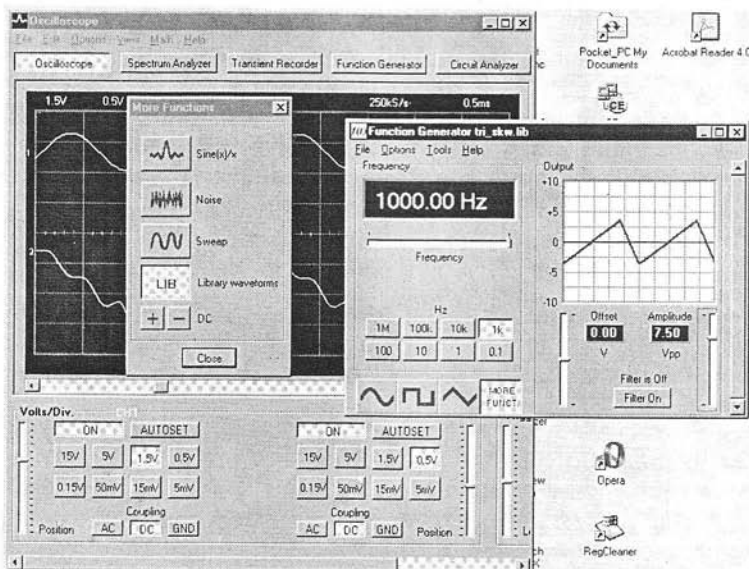


Рис. 7.11. Работа с генератором PCG10 с помощью программы PC-Lab 2000

ется кнопка Library Waveforms (Библиотека форм сигналов), которая открывает стандартное Windows-окно загрузки библиотечных файлов. Среди них достаточно выбрать подходящий и форма импульсов будет изменена.

Форму импульсов может задать сам пользователь. Для этого достаточно исполнить команду Wave Editor в позиции Tools меню окна функционального генератора. Откроется окно редактора формы импульсов, показанное на рис. 7.12.

В этом окне можно задать до последовательность, продолжительностью 32 Кбайт, определяющую форму генерируемого импульса. Каждый байт задает значение от 0 до 255, причем значение 128 соответствует центральной позиции экрана формы импульсов. Повторяющиеся значения байтов можно указывать в скобках, например 150(5) означает, что значение 150 повторяется пять раз подряд. На экране форм строится осциллограмма двух периодов импульсов.

Благодаря возможности работы совместно с персональным компьютером и виртуальными осциллографами функциональный генератор PCG10 может использоваться для создания достаточно дешевой и простой компьютеризированной лаборатории.

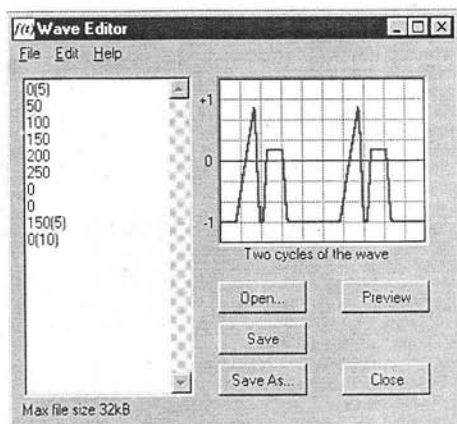


Рис. 7.12. Окно редактора формы импульсов

7.4 Компьютеризированная лаборатория PC-Lab 2000

7.4.1. Создание компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000

Как уже отмечалось ранее, фирма Velleman Instruments выпускает виртуальные осциллографы PCS500, PCS100 и K8031 и виртуальные функциональные генераторы PCG10 и K8016. Эти приборы выполнены в одинаковых по конструкции корпусах и, вместе с прилагаемым программным обеспечением на CD-ROM, могут использоваться для создания компьютеризированной лаборатории на базе обычного настольного или мобильного компьютера. Вместе с обычным персональным компьютером образуется миниатюрная многофункциональная лаборатория, позволяющая исследовать и отлаживать различные электронные схемы, устройства и системы. На рис. 7.13 представлена такая действующая лаборатория на основе мобильного компьютера — ноутбука Satellite 1800-314 корпорации Toshiba [42].

Компьютер (настольный или мобильный — ноутбук), используемый совместно с описанными приборами, должен работать с операционной системой Windows 95, 98, 2000/NT/XP, иметь SVGA-видеокарту (с разрешением 800×600) и арифметический сопроцессор для спектроанализатора. Подключение устройств осуществляется через принтерный порт LPT1, LPT2 или LPT3. Сборка лаборатории и подключение ее к компьютеру занимают не более двух минут. Все сводится к подключению кабелей к разъемам, расположенным сзади корпусов осциллографической приставки и приставки — генератора. Сигнальные коаксиальные кабели подключаются со стороны передних панелей к коаксиальным разъемам —

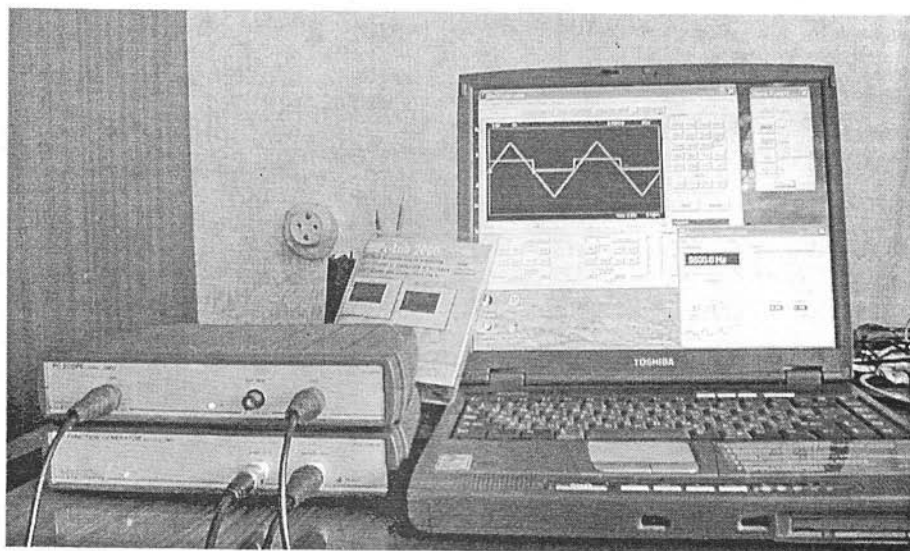


Рис. 7.13. Внешний вид компьютерной измерительной системы на базе виртуальных приборов и мобильного компьютера — ноутбука Satellite 1800-314 корпорации Toshiba

они видны на рис. 7.13. Следует отметить, что приставки имеют оптическую изоляцию от цепей компьютера, что надежно защищает последний (но не сами приставки) от повреждений.

Необходимо также установить программное обеспечение — программу PC-LAB 2000 с прилагаемого CD-ROM (он виден на рис. 7.13). Установка этой программы ничем не отличается от установки любого Windows приложения. Однако надо учитывать, что для ПК с операционной системой Windows NT или Windows 2000 нужно дополнительно установить драйвер локального Администратора, который также имеется на CD-ROM (возможна его установка после установки самой программы).

После установки программы PC-LAB 2000 создается папка с ее ярлыком и рядом вспомогательных файлов ее справки, содержащей описание программы и работы с основными компонентами лаборатории и с ней в целом. К сожалению русскоязычной справки нет. Хотя, надо сказать, что работа с лабораторией достаточно опытного пользователя вполне ясна и понятна.

Интересно отметить, что программу PC-LAB 2000 можно бесплатно скачать с Интернет-сайтов корпорации Velleman Instruments и нашей сети магазинов электронных компонентов Chip-Dip. Это позволяет познакомиться с возможностями лаборатории с помощью демонстрационного режима demo. Его можно задать в окне начального запуска программы, показанном на рис. 7.10. Это окно позволяет также выбрать тип осциллографа, тип генератора и адрес принтерного порта LPT, через который компоненты лаборатории подключаются к ПК.

7.4.2. Специальные возможности лаборатории PC-Lab 2000

Поскольку работа с осциллографом и функциональным генератором уже была описана в предшествующих разделах этой главы, остановимся на некоторых других возможностях лаборатории. Кнопка Transient Recorder позволяет использовать лабораторию в качестве электронного записывающего устройства — рекордера переходных процессов (рис. 7.14). От осциллографического режима работы режим

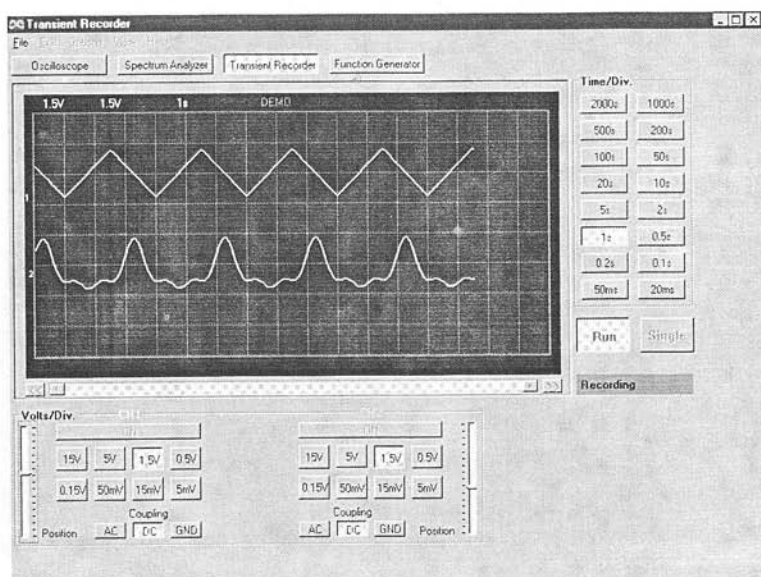


Рис. 7.14. Работа лаборатории в режиме электронного записывающего устройства

рекордера отличается длительностью разверток и возможностью записи в файл очень длительных процессов — вплоть до года. Далеко не каждый даже запоминающий осциллограф позволяет вести такие записи.

Еще один доступный режим — построитель частотных характеристик электронных цепей Circuit Analyzer. Он открывает окно Bode Plotter — рис. 7.15 в котором можно задать вид графика, чувствительность, начальную и конечную частоту

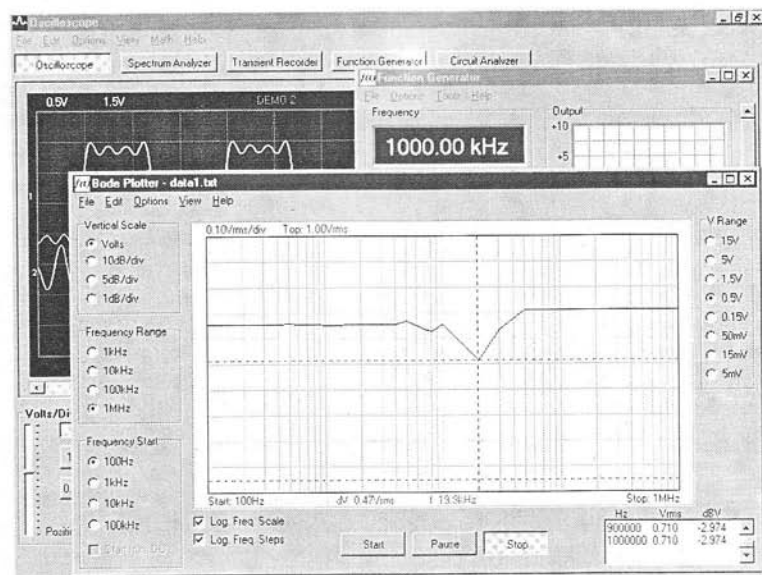


Рис. 7.15. Работа лаборатории в режиме построения АЧХ

сви́пирования. В этом режиме функциональный генератор работает как сви́п-генератор (генератор качающейся частоты), что позволяет строить АЧХ электронных цепей и схем. К сожалению, верхняя частота сви́пирования не может превышать 1 МГц, так что этот режим годится для исследования не очень высокочастотных схем и устройств. Как в режиме построения АЧХ, так и просмотра осциллограмм возможны курсорные измерения с помощью перемещаемых мышью курсоров, а также вывод масштабных параметров.

Как видно из приведенных примеров, возможности лаборатории PC-LAB 2000 достаточно обширны и практически неограниченно расширяются возможностью компьютерной обработки данных и результатов экспериментов. Любую осциллограмму, спектрограмму, запись переходных процессов или АЧХ можно сохранить в файлах данных. Для этого интерфейс лаборатории предусматривает окно загрузки файла данных с кнопкой просмотра, выводящей окно предварительного просмотра — рис. 7.16.

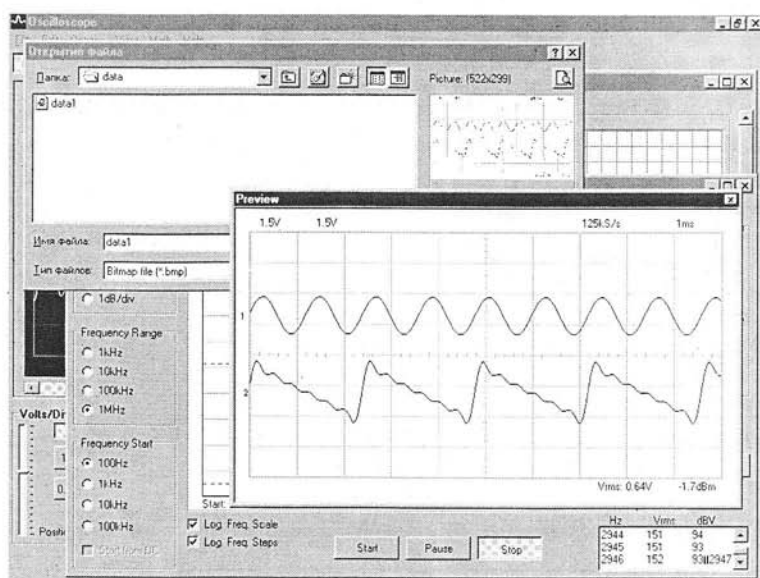


Рис. 7.16. Работа лаборатории с файлом данных

Лаборатория формирует два вида файла данных — текстового формата и графического формата. Текстовый файл имеет формат ASCII и может просматриваться и редактироваться любым текстовым редактором, например популярным Word (при формате файла .txt). Файл содержит вполне очевидные данные: шаг по времени, масштаб по вертикали, номера точек N и данные в восьмиразрядном формате (от 0 до 255) для каналов осциллографа. Такие данные легко переносятся в любую обрабатывающую их программу — начиная от простенькой программы на Бейсике и кончая программами обработки данных на основе систем компьютерной математики Mathcad, Maple, Mathematica или MATLAB. Это открывает широчайшие возможности математической и компьютерной обработки данных и результатов исследований и экспериментов.

Графический файл имеет расширение .bmp и представляет собой высококачественный рисунок — рис. 7.17. Такие рисунки можно использовать для подготовки отчетов по результатам исследований или экспериментов. Их можно, напри-

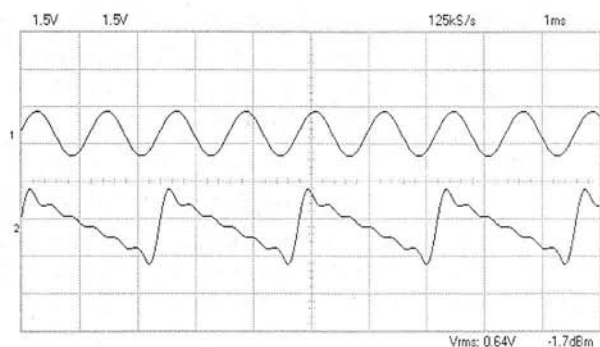


Рис. 7.17. Рисунок — осциллограммы с двух каналов осциллографа

мер, включать в текстовые материалы, подготовленные в среде текстового редактора класса Microsoft Word.

7.5. Новые возможности виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 v. 1.38

7.5.1. Развитие лаборатории PC-Lab 2000

С 2001 по 2005г.г. виртуальная лаборатория PC-LAB 2000 корпорации Villeman Instruments прошла ряд модернизаций. Хотя ее название PC-LAB 2000 не изменилось, возможности лаборатории были существенно улучшены и обновлены. Установка обновленной PC-LAB 2000 v. 1.38 ничем не отличается от установки любого Windows приложения. Стоит, однако, напомнить, что для ПК с операционной системой Windows NT или Windows 2000 нужно дополнительно установить драйвер локального Администратора, который также имеется на CD-ROM (возможна его установка после установки самой программы).

7.5.2. Установка обновленной лаборатории PC-Lab 2000

Окно начального запуска программы представлено на рис. 7.18. Это окно позволяет также выбрать тип осциллографа, тип генератора и адрес принтерного порта LPT, через который компоненты лаборатории подключаются к ПК. Возмо-

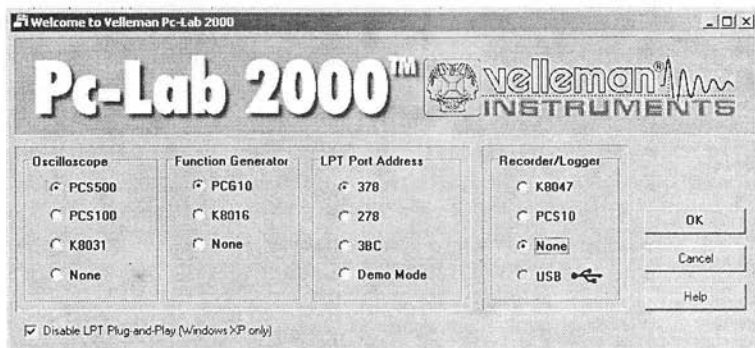


Рис. 7.18. Начальное окно запуска лаборатории PC-LAB 2000

жен демонстрационный режим Demo, позволяющий познакомиться с основными возможностями PC-LAB 2000 без подключения к компьютеру аппаратных средств лаборатории.

Поскольку работа с осциллографом и функциональным генератором уже была описана выше, остановимся только на новых возможностях лаборатории. Прежде всего, отметим возможность включения в лабораторию новых устройств K8047 и PCS10, обеспечивающих повышенные возможности работы с сигналами. Подключение новых устройств и устройств с USB-портом задано в новом разделе окна установки — Recorder/Logger. Если эти устройства не используются, надо установить опцию None.

7.5.3. Новый режим запоминания (персистенции) осциллограмм PERSIST

В новой версии программы PC-LAB 2000 v. 1.38 по сравнению с версией 1.14, представленной еще 2001 г., существенно расширены функции виртуального осциллографа. Его окно представлено на рис. 7.19. В нем выведено также окошко с сообщением о версии программы. Для вывода этого окошка достаточно исполнить команду About... в позиции Help меню.

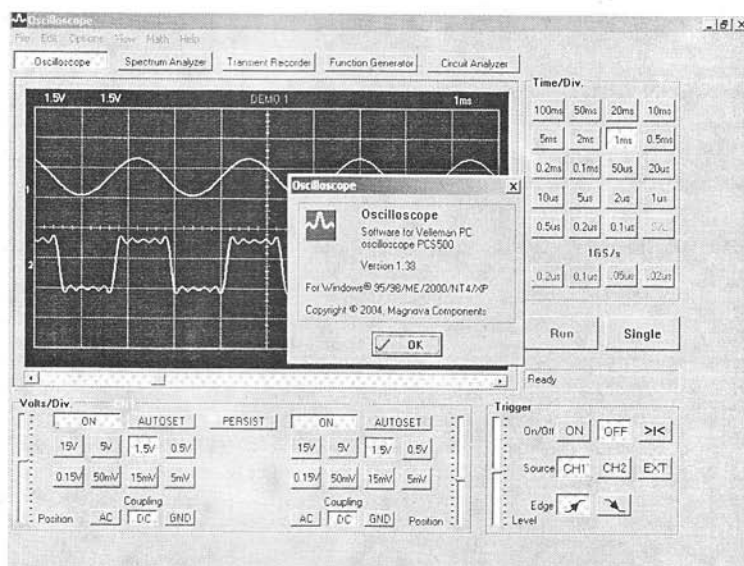


Рис. 7.19. Окно обновленного виртуального осциллографа PCS500

Из рис. 7.19 нетрудно заметить, что в окне осциллографа между панелями каналов CH1 и CH2 появилась новая кнопка PERSIST. Она вводит новый режим работы осциллографа с запоминанием ранее сделанных осциллограмм. Нормально эта кнопка отжата, и осциллограф работает в обычном режиме с обновлением осциллограмм при каждом пуске. Вид осциллограмм для этого случая представлен на рис. 7.20.

При «нажатии» (активируется мышью) кнопки PERSIST осциллограф переходит в режим запоминания осциллограмм. Рис. 7.20 показывает пример работы в этом режиме — выполнено пять однократных пусков и все пять осциллограмм представлены на «экране» осциллографа. Подобное запоминание очень полезно

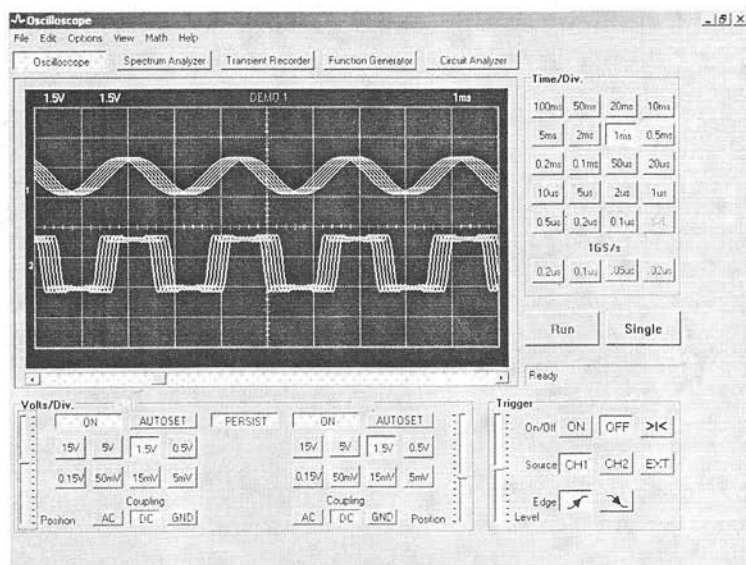


Рис. 7.20. Пример работы виртуального осциллографа в режиме запоминания осциллограмм (PERSIST)

для оценки влияния шумов и джиттера, а также в случае, когда в процессе исследования устройств происходит авария. В обычном режиме осциллографа это ведет к утере предшествующих осциллограмм, а в режиме запоминания их можно рассмотреть и установить причины аварии.

7.5.4. Отключение режима соединения точек графиков

В позиции View меню осциллографа (рис. 7.21) введен ряд новых опций, существенно повышающих возможности осциллографа. Прежде всего, отметим опцию Dot Join (Объединение Точек). По умолчанию она включена, что означает представление осциллограмм сплошными линиями — используется интерполяция между точками и сами точки (выборки при стробировании) не видны. Отключение этой опции ведет к точечному представлению осциллограмм, при чем каждая точка соответствует выборке сигнала.

В ряде случаев точечное представление оказывается весьма полезным, например, для оценке времен быстрых изменений сигналов и крутизны этих изменений. Это хорошо видно при просмотре на рис. 7.21 сигнала в виде полуволны меандра с отрицательной полярностью (на фронтах хорошо заметны точки и их число не трудно подсчитать).

7.5.5. Автоматизация измерений параметров осциллограмм

Наиболее серьезное дополнение в программу PC-LAB 2000 введено в версии v. 1.34 и сохранено в последующих версиях, вплоть до последней v 2.01, появившейся в начале 2005 г. Это цифровая обработка осциллограмм обоих каналов, позволяющая автоматически вычислять 21 амплитудный и временной параметр. Для этого в позиции View меню введена опция Waveform Parameters ... (Параметры Сигнала). Ее активизация приводит к появлению специального окна с параметрами, показанного на рис. 7.22 в правой части окна осциллографа.

ко вычислить тот или иной параметр, вместо его значения индицируется знак «??», а при невозможности вычисления — знак «???». Последнее возможно, если осциллограмма не содержит достаточной информации для вычисления параметра, например на ней отображена только часть периода или слишком много периодов.

Чтобы работать с окном параметров, нужно четко представлять, как определен тот или иной параметр. На рис. 7.23 показано определение основных амплитудных параметров импульсов в том виде, как они выдаются в окне Waveform Parameters.

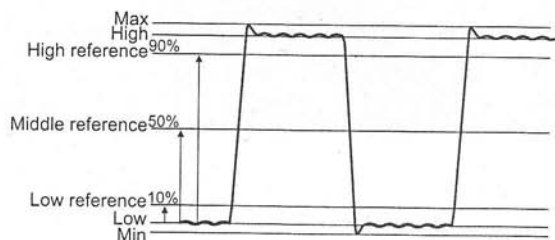


Рис. 7.23. К определению амплитудных параметров импульсного сигнала

Ниже представлено определение основных амплитудных параметров:

- DC Mean — арифметическое среднее значение;
- Max — максимальное значение с учетом короткого выброса;
- Min — минимальное значение с учетом короткого выброса;
- High — статистическое максимальное значение без учета короткого выброса;
- Low — статистическое минимальное значение без учета короткого выброса;
- Peak-to-Peak — двойное пиковое значение;
- Amplitude — амплитуда сигнала (разность между High и Low);
- AC RMS — правильное RMS значение AC компоненты сигнала, преобразованное в вольты;
- AC dBV — измеренный сигнал (только AC), преобразованный в dBV (0 дБ = 1 В);
- AC dBm — измеренный сигнал (только AC), преобразованный в dBm (0 дБ = 0,775 В);
- AC + DC RMS — правильное RMS значение AC + DC волны, вычисленное и преобразованное в вольты;
- AC + DC dBV — измеренный сигнал (только AC), преобразованный в dBV (0 дБ = 1 В);
- AC + DC dBm — измеренный сигнал (только AC), преобразованный в dBm (0 дБ = 0,775 В).

Определения основных временных параметров представлены на рис. 7.24. Для отсчета временных параметров используются три уровня отсчетов, относительно амплитуды сигнала: High reference — 90% уровень, Middle reference — 50% уровень и Low reference — 10% уровень.

Ниже представлены определения временных и частотных параметров реального импульсного сигнала:

- Duty Cycle — отношение длительности положительной полуволны сигнала к его периоду, выраженное в процентах;
- Positive Width — длительность положительной полуволны сигнала;

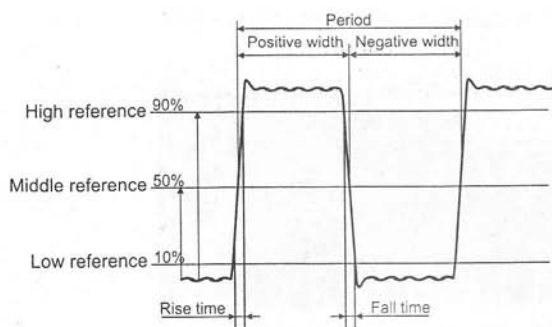


Рис. 7.24. К определению основных временных параметров импульсного сигнала

- Negative Width — длительность отрицательной полуволны сигнала;
- Rise Time — время нарастания сигнала, измеренное на уровнях 10% и 90% от амплитуды сигнала;
- Fall Time — время спада сигнала, измеренное на уровнях 90% и 10% от амплитуды сигнала;
- Period — период повторения сигнала, измеренный на уровне 50% от амплитуды сигнала;
- Frequency — частота повторения сигнала (обратная периоду величина);
- Phase — фазовый сдвиг между сигналами в каналах CH1 и CH2, выраженный в градусах deg ($1 \text{ deg} = 1/360$ от периода сигнала, условно принятого за 1, частоты сигналов в обоих каналах должны быть одинаковыми).

Следует отметить, что приведенные определения параметров приняты в большинстве западных цифровых осциллографов, допускающих автоматическое измерение параметров сигналов.

7.5.6. Режим запоминания спектрограмм

В режиме спектрального анализа (кнопка Spectrum Analyzer) также имеется возможность запоминания спектрограмм при нажатой кнопке PERSIST. На рис. 7.25 показано окно осциллографа в режиме спектрального анализа после 10 пусков кнопкой Single. Обычно сильно изломанная снизу спектрограмма теперь представлена широкой шумовой дорожкой из которой более отчетливо видны всплески на частотах гармоник сигнала. На рис. 7.25 показана работа анализатора спектра в режиме маркерных вычислений.

В меню опций добавлена новая опция Vector Average для усреднения данных в векторе. Такое усреднение может существенно повысить разрешающую способность анализатора спектра. Более подробно работа с анализатором спектра описана в последней главе.

7.5.7. Другие возможности обновленной PC-Lab 2000

Активизация кнопки Transient Recorder позволяет использовать лабораторию в качестве электронного записывающего устройства — *рекордера* переходных процессов (рис. 7.26). От осциллографического режим рекордера отличается длительностью разверток и возможностью записи в файл очень длительных процессов — вплоть до года. Как видно из рис. 7.26, в этом режиме возможны курсорные измерения.

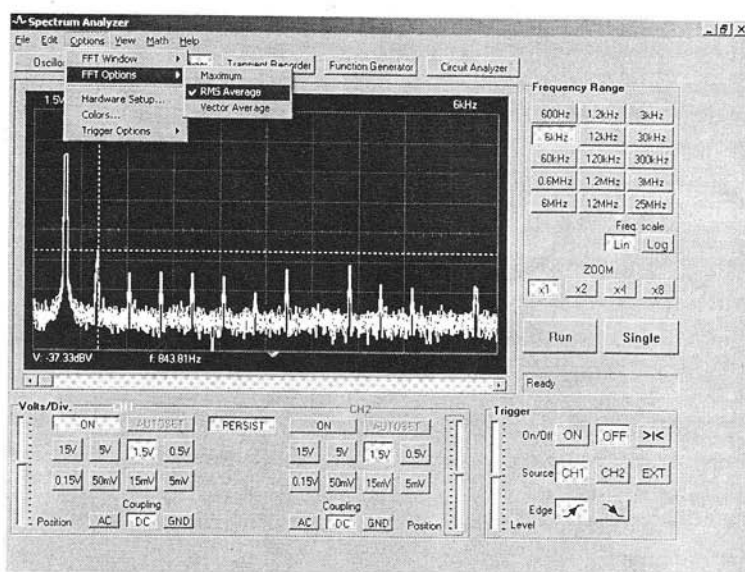


Рис. 7.25. Работа анализатора спектра в режиме запоминания спектрограмм

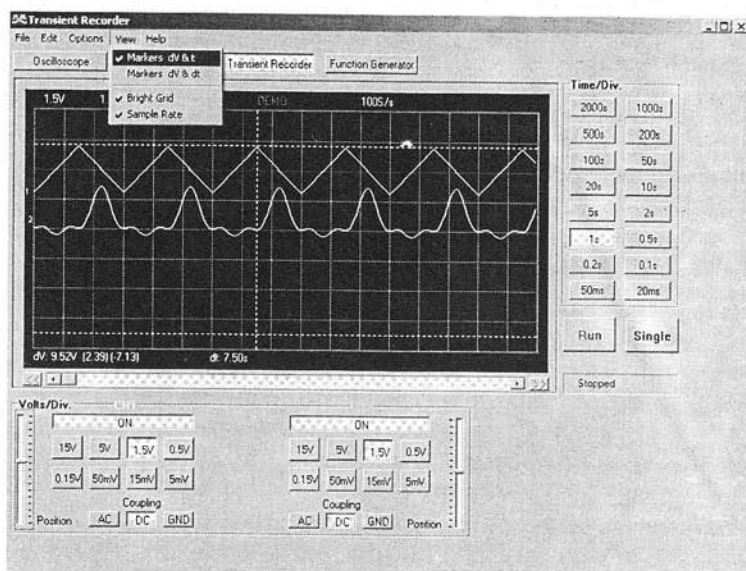


Рис. 7.26. Работа лаборатории в режиме электронного записывающего устройства с курсорными измерениями

Для последнего из режимов работы — построении частотных характеристик электронных цепей достаточно активизировать кнопку Circuit Analyzer. В этом случае выводится окно Bode Plotter (рис. 7.27) в котором можно задать вид графика, чувствительность, начальную и конечную частоту свипирования. В этом режиме функциональный генератор работает как свип-генератор (генератор качающейся частоты), что позволяет строить АЧХ электронных цепей и схем в диапазоне частот до 1 МГц. Как в режиме построения АЧХ, так и просмотра осциллограмм

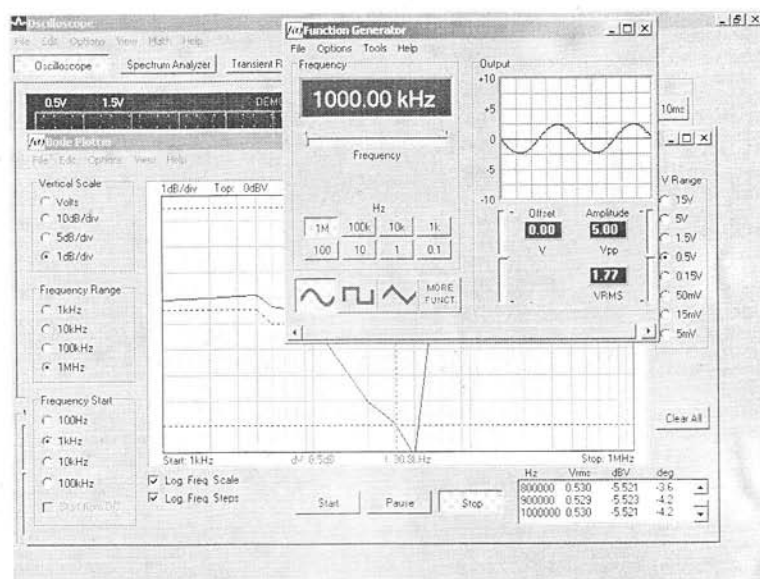


Рис. 7.27. Работа лаборатории в режиме построения АЧХ и ФЧХ

возможны курсорные измерения с помощью перемещаемых мышью курсоров, а также вывод ряда масштабных параметров. В новой версии PC-Lab 2000 v. 1.34 возможно построение и фазо-частотной характеристики (ФЧХ), если задать ее новой опцией Phase Plot в позиции меню View.

Как видно из приведенных примеров, в новых реализациях виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 осуществлены многие возможности компьютерной обработки данных и результатов экспериментов уже на уровне прилагаемого программного обеспечения. По этим возможностям обновленная лаборатория не уступает гораздо более дорогим цифровым осциллографам многих известных фирм, что открывает широкие возможности ее применения в сервисных службах, научных исследованиях и в лабораториях вузов и университетов. Более подробно работа виртуальной лабораторией PC-Lab 2000 описана в главе 6.

В настоящее время компьютеризованные лаборатории отнюдь не ограничены описанными изделиями фирмы Velleman Instruments. Подобные лаборатории могут строиться на изделиях фирмы АСК, осциллографах ОСЗС-01 и генераторах ГСПФ-052 (поставщик ЗАО «Руднев-Шиляев»), аппаратуре (увы, довольно дорогой) фирм Fluke и Tektronix и др.

7.5.8. Виртуальный самописец PCS10 (K8047)

В состав обновленной лаборатории PC-Lab 2000 может включаться 4-канальный самописец PCS10 для регистрации медленных и длительных процессов (поставляется и в виде конструктора K1847). Внешний вид самописца PCS10 показан на рис. 7.28. Невысокая стоимость самописца и возможность записи длительных процессов делает его привлекательным для исследования и отладки медленно действующих устройств и систем.

Самописец является миниатюрной USB-приставкой к персональному компьютеру, подключаемой через порт универсальной последовательной шины USB, которая является непременным атрибутом современного ПК. Питание самописца

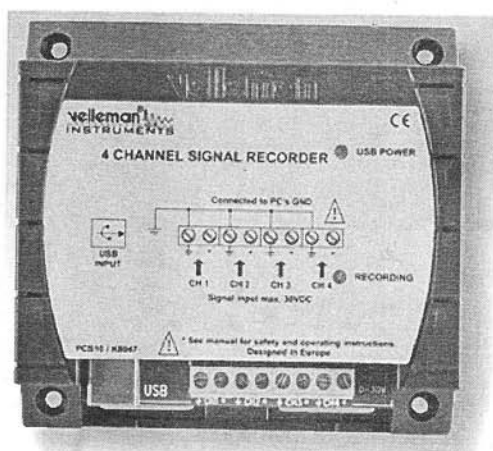


Рис. 7.28. Внешний вид самописца PCS10 фирмы Velleman

получает от этого порта. Использование самописца надо указать при установке системы — см. окно установки рис. 7.18 и раздел в нем Recorder/Logger.

Самописец имеет два варианта окна, вид которых задается в позиции View меню. На рис. 7.29 показано окно осциллографической регистрации процессов. В нем можно наблюдать построение 4-х осциллограмм. Внизу окна имеются кнопки задания масштаба и опции включения любого из 4-х каналов. Справа имеются кнопки задания масштаба времени по горизонтальной оси, а также кнопки Run/Stop пуска/остановки и Single одиночного пуска. Управление самописцем предельно простое и в особом описании не нуждается.

Во втором варианте окна (рис. 7.30) самописец предстает в виде 4-х виртуальных цифровых вольтметров. Наряду с измерениями мгновенных значений постоянных напряжений для каждой выборки каналов можно задать фиксацию минимальных и максимальных показаний каждого из вольтметров.

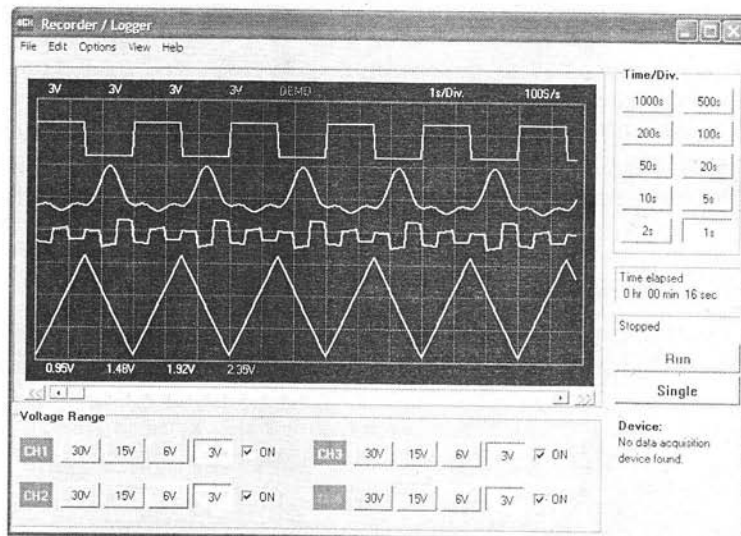


Рис. 7.29. Окно самописца в режиме осциллографической регистрации

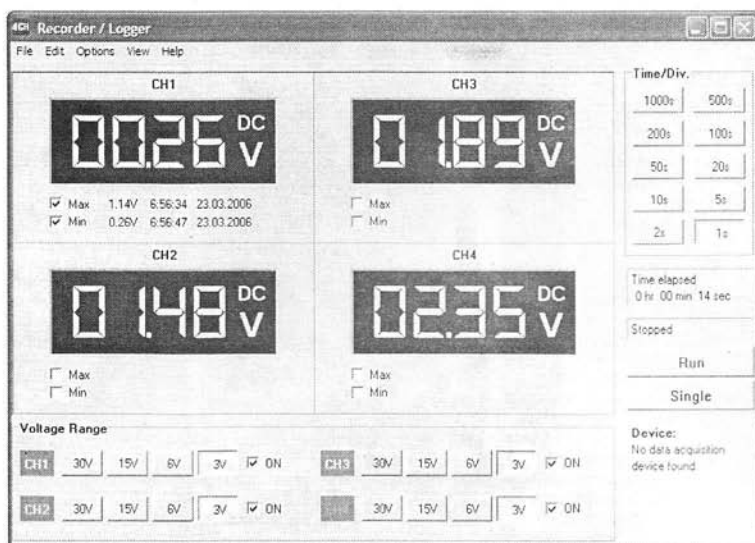


Рис. 7.30. Окно самописца в режиме цифровых измерений

Этот самописец может найти самое широкое применение в исследовании и отладке сложных электромеханических устройств и систем, продолжительность переходных процессов в которых измеряется десятками секунд и более длительным временем. При этом самописец с успехом заменяет низкочастотные запоминающие осциллографы. К сожалению, минимальный шаг в отсчетах в 1 с слишком велик для многих современных электромеханических систем, но в случае их исследования можно использовать виртуальные осциллографы лаборатории PC-Lab 2000. Кроме того недостатком прибора является измерение только однополярных сигналов.

7.5.9. Виртуальный USB-осциллограф PCSU1000

Вслед за виртуальным самописцем PCS10 фирма Velleman выпустила виртуальный USB-осциллограф PCSU1000, который относится к новому поколению таких приборов. Это миниатюрный прибор (рис. 7.31) не требующий внешнего источника питания. Он занимает совсем мало места на рабочем столе и предоставляет пользователю возможности вполне современного цифрового осциллографа начального уровня.

По своим возможностям и параметрам новый виртуальный осциллограф аналогичен осциллографу-приставке PCS500. Однако полоса частот обоих каналов расширена до 60 МГц. Кроме того введена возможность учета коэффициента деления осциллографического пробника, которого в PCS500 нет.

7.5.10. Виртуальная лаборатория PC-Lab 2000SE

Последней версией виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 стала версия PC-Lab 2000 v. 2.0, появившаяся в конце 2005 г. Однако, уже в начале 2006 г. она была заменена версией PC-Lab 2000SE v. 2.01. В этой версии было устранено обнаруженное различие в задержке сигнала двух каналов осциллографа. Окно запуска этой версии (рис. 7.32) показывает, что программа обеспечивает работу любых

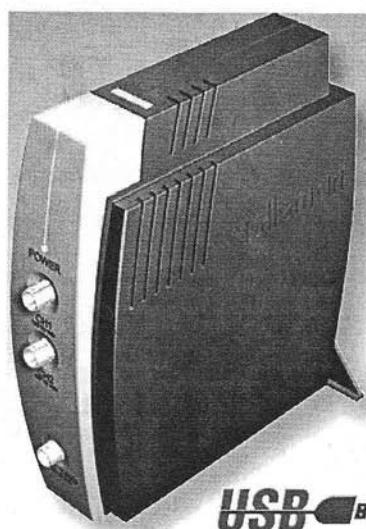


Рис. 7.31. USB-осциллограф PCSU1000

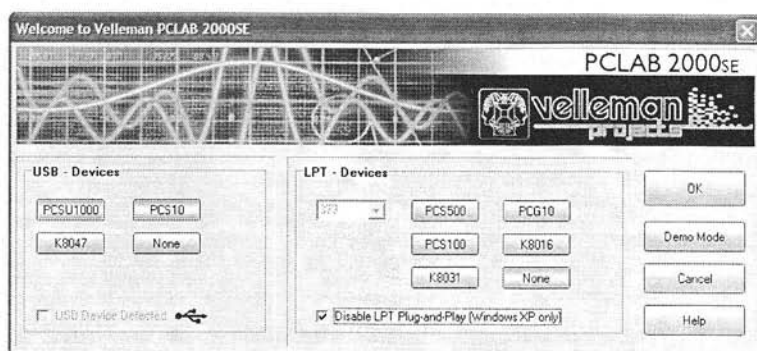


Рис. 7.32. Окно запуска PC-Lab 2000SE

виртуальных устройств (в том числе с USB-портами). Для этого достаточно указать эти устройства в окне рис. 7.32.

Для USB-осциллографа интерфейс программы PC-Lab 2000SE существенно переработан. Размеры окна осциллограмм заметно увеличены, приятно отметить практически незаметный шум квантования и высокую четкость линий осциллограмм — рис. 7.33. Кнопки управления сделаны меньшими по размеру и слегка объемными. Единственная новая кнопка Big Screen расположена между областями каналов и служит для представления окна осциллограмм в максимально возможном размере.

При активизации указанной кнопки окно рис. 7.33 распадется на два окна. Одно из окон по существу является пультом управления осциллографом — рис. 7.34. Оно содержит только группы кнопок, которые по назначению аналогичны показанным на рис. 7.33.

Другое окно — это окно осциллограмм. Оно показано на рис. 7.35. Внутри этого окна показано окно задания текстовых комментариев. Их применение делает осциллограммы более наглядными.

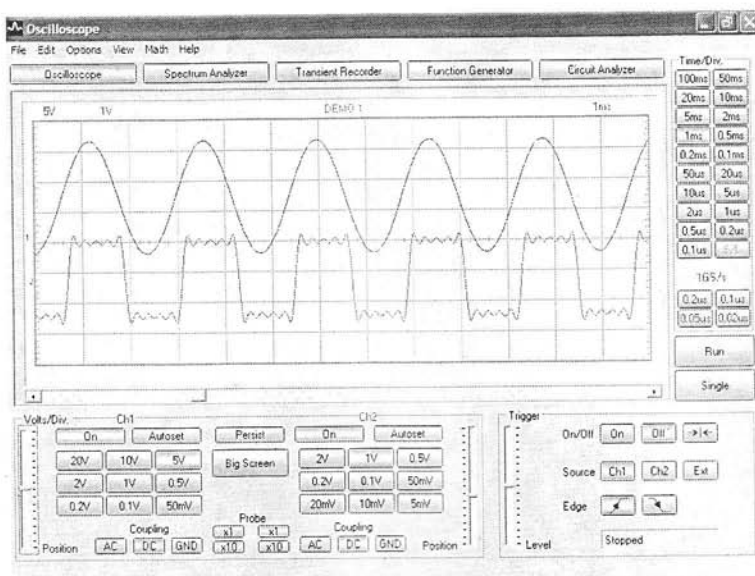


Рис. 7.33. Окно виртуального USB-осциллографа PCSU1000

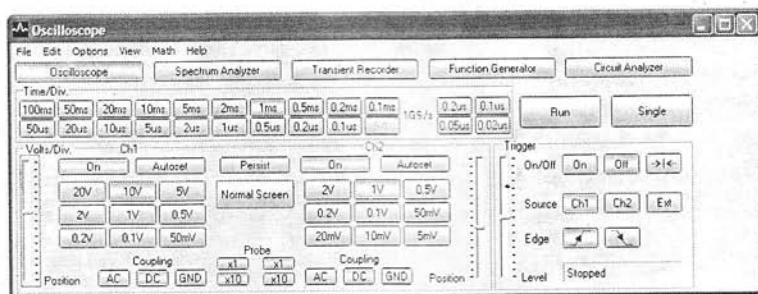


Рис. 7.34. Окно панели управления USB-осциллографа PCSU1000

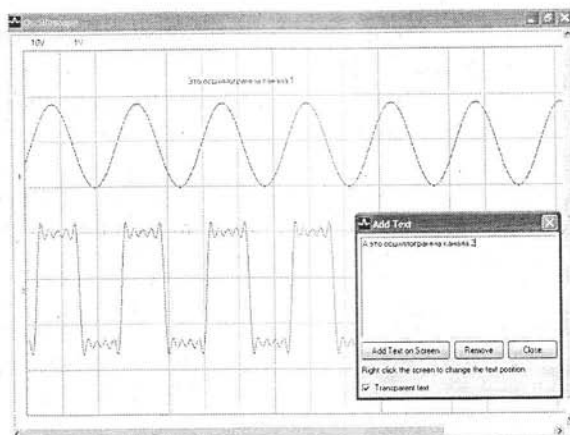


Рис. 7.35. Окно осциллограмм USB-осциллографа PCSU1000 и окно ввода текстовых комментариев

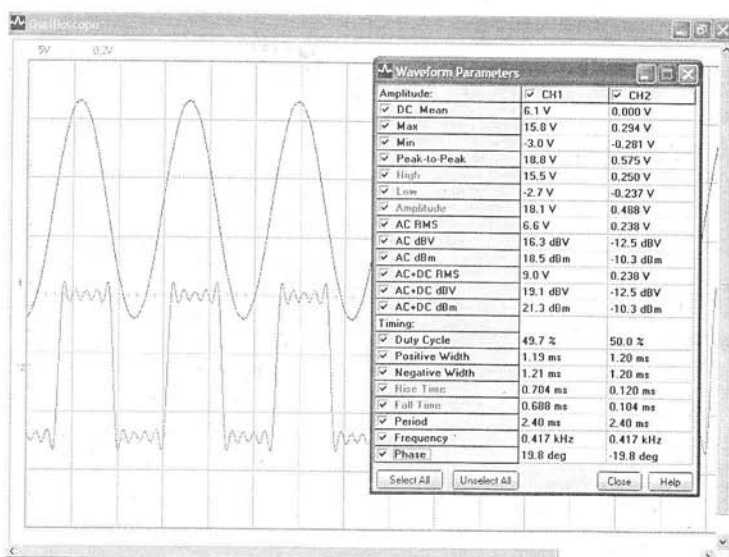


Рис. 7.36. Окно осциллограмм USB-осциллографа PCSU1000 и окно вывода результатов автоматических вычислений

Возможен также вывод окна результатов автоматических вычислений. Оно показано на рис. 7.36 внутри окна осциллограмм.

Окно анализатора спектра в новой реализации виртуальной лаборатории PC-Lab 2000SE показано на рис. 7.37. На нем приведена также открытая позиция Options меню, в которой видны установки окон различного типа.

Прочие возможности новой реализации виртуальной лаборатории PC-Lab 2000SE аналогичны приведенным для предшествующих реализаций. Так что на них можно не останавливаться.

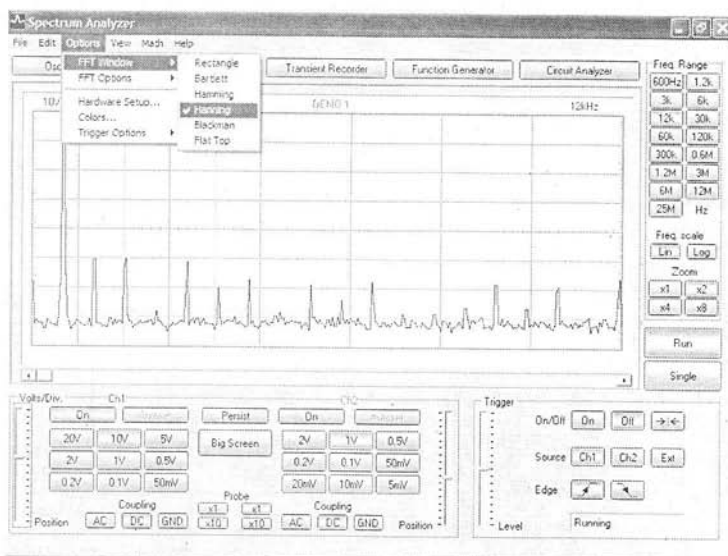


Рис. 7.37. Окно анализатора спектра USB-осциллографа PCSU1000

7.6. Осциллографические модули и платы фирмы BORDO

7.6.1. Цифровой осциллограф BORDO-421 с USB-интерфейсом

Компания BORDO, продукция которой представлена на сайте ЗАО «Компания Сигнал» (www.signal.ru), выпускает ряд осциллографических модулей и плат для персональных компьютеров. Ниже мы рассмотрим некоторые из них.

Двухканальный цифровой осциллограф BORDO-421 (рис. 7.38) выполнен в пластмассовом корпусе с внешним блоком питания и имеет интерфейс USB 2.0. С переходом на скоростной интерфейс USB реализуется новая концепция приставок, выполняющих функции цифровых осциллографов. Высокая скорость передачи данных в таком порте (до 40 Мбит/с) позволяет создавать приставки с высокой скоростью обмена данными между платой-осциллографом и компьютером. Это способствует не только повышению скорости работы с приставками, но и реализации новых алгоритмов обработки осциллограмм.



Рис. 7.38. Двухканальный цифровой осциллограф BORDO-421

Прибор BORDO-421 предназначен для исследования однократных и периодических электрических сигналов, обеспечивает автоматические, маркерные измерения и математическую обработку сигналов, имеет дополнительно выход ЦАП. Основные технические характеристики BORDO-421:

- Число входных измерительных каналов: 2
- Ширина пропускания входного тракта: 150 МГц
- Вертикальное разрешение: 10 бит
- Открытый/закрытый вход: 1 МОм, работа со стандартными осциллографическими делителями
- Аппаратное смещение уровня входного сигнала: на плюс-минус входной диапазон
- 7 калиброванных коэффициентов отклонения по вертикали с шагом 1-2-5: без делителя — 10 мВ/дел ... 1 В/дел, с делителем 1:10 — 100 мВ/дел ... 10 В/дел
- Макс. частота дискретизации: для однократных сигналов — 100 Мв/с, для повторяющихся сигналов — 20 Гв/с
- Коэффициенты развертки: от 5 нс/дел до 50 мс/дел
- Максимальные временные диапазоны: от 1280 мкс до 64 с
- Максимальная длина памяти на канал: 64 Квыб

- Источники синхронизации: — внутренний канал1/ канал 2/внешний
- Режимы запуска развертки: ждущий/автоматический/ однократный/стоп
- Вход внешней синхронизации: 1 МОм
- Диапазон частот синхронизации: от 10 Гц до 110 МГц
- Регистрация предыстории
- Задержка запуска регистрации после срабатывания синхронизации
- Выход ЦАП: частота дискретизации максимальная 100 кГц , диапазон выходного сигнала ± 10 В
- Интерфейс: — USB 2.0, USB 1.1.
- Питание: 220 В / 50 Гц
- Потребление: 7 Вт
- Размеры: 155×195×45 мм
- Масса: 0,4 кг
- Программное обеспечение: на основе Windows 9x/2K/XP
- Автоматический поиск синхронизации

Дополнительные функции:

- Частотомер
- Спектроанализатор
- Автоматические и маркерные измерения 22 параметров сигналов
- Дополнительная математическая обработка: сглаживание, усреднение
- Возможность использования запомненного сигнала в качестве постоянного фона
- Экспорт в формат ASCII (пригоден для дальнейшей мат. обработки в MS Excel и др. пакетах)

Состав программного обеспечения:

- Программа цифрового осциллографа Oscilloscope 1.1.2
- Драйвер для Windows 9x//2k/XP
- Документация и библиотека дополнительных функций по драйверу для использования осциллографа в качестве встраиваемого устройства
- Примеры использования драйвера для MS Visual C++

Приставка BORDO-421 является одной из лучших среди такого рода устройств. При умеренной цене она втрое превосходит приставку фирмы Velleman по ширине полосы пропускания. Ее возможности вполне соответствуют возможностям 150 МГц цифровых осциллографов.

7.6.2. Цифровые осциллографы — плата В-121 и приставка В-323

Цифровой осциллограф-плата В-121(В-323) предназначен для исследования однократных и периодических электрических сигналов, проведения автоматических, маркерных измерений и математической обработки сигналов. Дополнительно осциллограф обеспечивает работу в режимах анализатора спектра и частотомера. Внешний вид платы показан на рис. 7.39.

Варианты исполнения:

- измерительный модуль комплекса УНИПРО, модель В-121;
 - в отдельном блоке с встроенным источником питания, модель В-323.
- Основные технические характеристики платы В-121 и осциллографа В323:

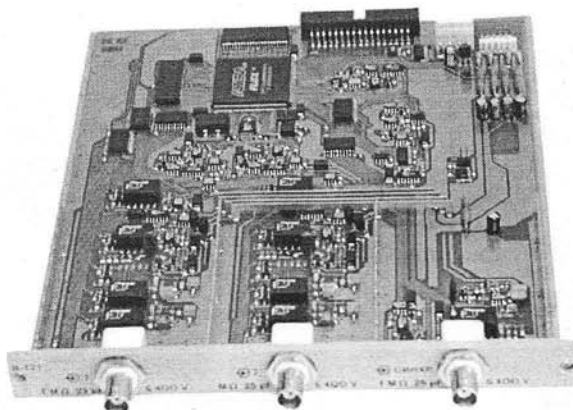


Рис. 7.39. Внешний вид осциллографа-платы В-121

- Число входных измерительных каналов: 2
- Полоса пропускания входного тракта: от 0 до 200 МГц
- Открытый/закрытый вход: 1 МОм, работа со стандартным выносным делителем
- Аппаратное смещение уровня входного сигнала в широких пределах
- Вертикальное разрешение: 8 бит
- Основная погрешность: $\pm 1\%$, с выносным делителем $1:10 \pm 2\%$
- Чувствительность: 11 калиброванных коэффициентов отклонения по вертикали с шагом 1-2-5: без делителя от 2 мВ/дел до 5 В/дел, с делителем 1:10 от 20 мВ/дел до 50 В/дел
- Максимальная частота дискретизации: для однократных сигналов 200 (100, 2 канала одновременно) Мвыб/с, для повторяющихся сигналов 10 Гв/с
- Коэффициенты развертки: от 10 нс/дел до 10 с/дел
- Диапазон развертки по горизонтали: от 650 мкс до. 6500 с
- Максимальная длина памяти: 64 Квыб/канал
- Источники синхронизация: внутренний канал 1 /канал 2 /внешний /сеть
- Режимы развертки: ждущий/автоматический/однократный/стоп
- Тип входа: открытый./закрытый./открытый с ФНЧ/ закрытый с.ФВЧ /закрытый.ФНЧ
- Параметры входа внешней синхронизации : 1 МОм; делители 1:1/1:10
- Диапазон частот синхронизации: 10 Гц ... 110 МГц
- Регистрация предыстории и задержка запуска регистрации
- ТВ-синхронизация (PAL, SECAM, NTSC)
- Синхронизация по параметрам сигнала

Прочие возможности:

- Принтерный порт, протоколы ECP/EPP
- Последовательный порт RS-232
- Универсальная шина USB
- Питание: 220 В / 50 Гц
- Потребление: 12 Вт



Рис. 7.40. Внешний вид осциллографа-приставки В-323

- Размеры: измерительного модуля В-123 — 190×240×20 мм, комплекса УНИПРО — 295×265×110 мм, приставки В-323 — 200×300×60 мм
- Масса: измерительного модуля В-123 — 0,33 кг, осциллографа В-121 в сборе — 2,6 кг, осциллографа В-323 в сборе — 1,6 кг

Конструктивно модель осциллографа В-121 состоит из корпуса УНИПРО с блоком питания и интерфейсом В-102/В-112 и модуля осциллографа. Модель осциллографа В-323 состоит из пластмассового корпуса с блоком питания и интерфейсом В-112 и модуля осциллографа, показанного на рис. 7.40.

Основные программно-функциональные характеристики:

- Программное обеспечение для Windows 95/98/NT/2k/XP
- Калибровка метрологических параметров
- Автоматический поиск сигналов
- Дополнительные функции:
 - Спектроанализатор
 - Цифровой вольтметр
 - Частотомер
- Автоматические и маркерные измерения 22 параметров сигналов
- Временное/спектральное представление сигнала в реальном времени
- Дополнительная математическая обработка: сглаживание, усреднение, произвольные математические операции над сигналом
- До 4-х реальных/обработанных сигналов на экране одновременно, возможность использования запомненного сигнала в качестве постоянного фона
- Режим самописца параметров
- Экспорт в формат ASCII (пригоден для дальнейшей мат. обработки в MS Excel и др. пакетах)
- Состав программного обеспечения:
 - Программа цифрового осциллографа BoxDO версия 2.0
 - Драйвер BoxDO для Windows 95/98/NT/2k/XP
 - Документация и библиотека дополнительных функций по драйверу BoxDO для использования В-123 в качестве встраиваемого устройства
 - Примеры использования драйвера для MS Visual C++, Delphi 7.0

Осциллографическая приставка В-323 отличается высокими техническими характеристиками (полоса частот от 0 до 200 МГц) при умеренной цене чуть менее 1000 \$.

7.6.3. Двухканальные цифровые осциллографы — платы PCI

Подключение осциллографов — приставок через параллельный порт PRN, последовательный порт RS-232 и даже через порт шины USB не обеспечивает предельно высокую скорость обмена между платой и компьютером. Это препятствует эффективной реализации некоторых методов обработки информации и замедляет общение пользователя с виртуальным осциллографом. Выходом из такого положения является разработка плат расширения ПК, устанавливаемых в разъемы расширения современных персональных компьютеров класса IBM PC/AT с системной шиной PCI. Фирма BORDO выпускает ряд таких плат одноканальных (рис. 7.41) и двухканальных цифровых осциллографов серии B-2XX.

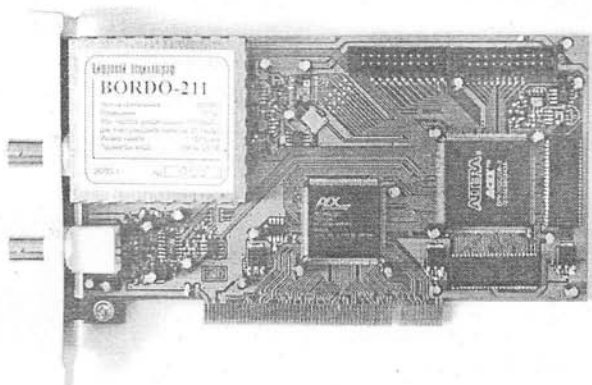


Рис. 7.41. PCI плата одноканального 120 МГц осциллографа B-211

Более современный двухканальный 150 МГц цифровой осциллограф B-220/221 выполнен также в виде платы расширения компьютера для стандартной шины PCI (рис. 7.42). Он предназначен для исследования однократных и периодических электрических сигналов, обеспечивает автоматические, маркерные измерения и математическую обработку сигналов. Дополнительно осциллограф обеспечивает работу в режимах анализатора спектра и частотомера. Программное обеспечение поддерживает совместную работу нескольких (до 6) плат B-221, при этом на экране формируется 12-ти каналный осциллограф.

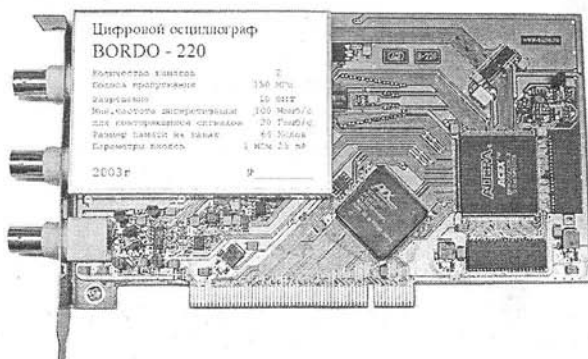


Рис. 7.42. Цифровой осциллограф — PCI плата BORDO 221

Основные технические характеристики платы В-220/221:

- Число входных измерительных каналов: 2
- Ширина пропускания входного тракта: 150 МГц
- Вертикальное разрешение: 10 бит (многие платы имеют разрешение всего в 8 бит)
- Открытый/закрытый вход: 1 МОм, работа со стандартным выносным делителем
- Аппаратное смещение уровня входного сигнала на плюс-минус входной диапазон
- 7 калиброванных коэффициентов отклонения по вертикали с шагом 1-2-5; без делителя — 10 мВ/дел...1 В/дел; с делителем 1:10 — 100 мВ/дел...10 В/дел
- Максимальная частота дискретизации: для однократных сигналов — 100 Мвыб/с, для повторяющихся сигналов — 20 Гв/с
- Коэффициенты развертки — 5 нс/дел ... 50 мс/дел, соответствующие максимальные временные диапазоны — 1280 мкс ... 64 с
- Максимальная длина памяти на канал: 64 Квыб
- Источники синхронизации: внутренний/внешний
- Режимы работы развертки: ждущий/автоматический/однократный/стоп
- Тип входа синхронизации: открытый/закрытый.
- Вход внешней синхронизации: 1 МОм
- Диапазон частот синхронизации: от 10 Гц до 110 МГц
- Регистрация предыстории
- Задержка запуска регистрации после срабатывания синхронизации

Прочие данные:

- Интерфейс: PCI, 33 МГц, 32 разр.
- Потребление: 7 Вт
- Размеры : 200×105×20 мм
- Масса: 0,13 кг

Основные программно-функциональные характеристики В-221:

- Программное обеспечение для Windows 98/NT/2K/XP
- Автоматический поиск сигналов
- Дополнительные функции:
 - Спектроанализатор
 - Частотомер
- Автоматические и маркерные измерения 22 параметров сигналов
- Временное/спектральное представление сигнала в реальном времени
- Дополнительная математическая обработка: сглаживание, усреднение, произвольные математические операции над сигналом
- Возможность использования запомненного сигнала в качестве постоянного фона
- Режим самописца параметров
- Экспорт в формат ASCII (пригоден для дальнейшей математической обработки в MS Excel и др. пакетах)
- Состав программного обеспечения В-221
- Программа цифрового осциллографа BorDO 1.0

- Драйвер BorDO для Windows 98/NT/2k/XP
- Документация и библиотека дополнительных функций по драйверу BorDO для использования осциллографа в качестве встраиваемого устройства
- Примеры использования драйвера для MS Visual C++, Delphi 7.0

7.6.4. Интерфейс пользователя осциллографов фирмы BORDO

Виртуальные осциллографы фирмы BORDO имеют превосходный графический интерфейс, реализованный в операционных системах Windows, в частности в самой современной и массовой системе Windows XP. О степени совершенства интерфейса можно судить по рис. 7.43, на котором показано окно интерфейса виртуальных осциллографов фирмы BORDO. Оно содержит достаточно наглядные органы управления (списки, кнопки и т. д.) очень похожие на органы управления обычных цифровых осциллографов. В результате особых трудностей с усвоением осциллографов не возникает.

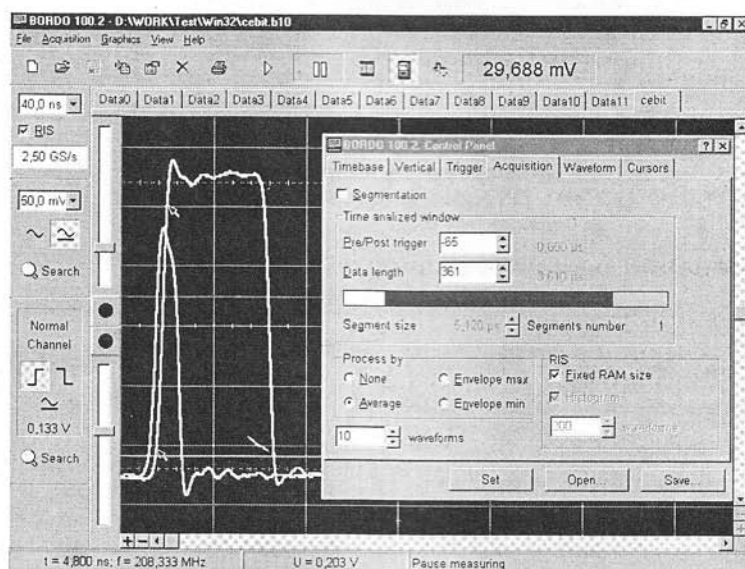


Рис. 7.43. Окно графического интерфейса виртуальных осциллографов фирмы BORDO

Рис. 7.43 демонстрирует высокое качество осциллограмм (они цветные) и удобство самого графического интерфейса, позволяющего пользователю работать с ним интуитивно. Множество настроек осциллографа сведено в окно контрольной панели, также показанное на рис. 7.43. С деталями работы с осциллографами фирмы BORDO можно познакомиться по прилагаемой достаточно подробной документации.

7.7. Платы-осциллографы других фирм

7.7.1. Ультраскоростные платы M8-500, M8-500Y и M8-1000

PCI -платы — осциллографы M8-500 (рис. 7.44) M8-500Y и M8-1000 служат для ультравысококачественного сбора данных аналоговой и цифровой информации,

регистрация быстротекущих процессов и широкополосного сигнала. Данные об этой плате и других устройствах этого раздела имеются на сайте ЗАО «Компания Сигнал» (www.signal.ru). Эти платы рассчитаны на установку внутрь обычного компьютера в качестве плат расширения. Расположенные сзади плат разъемы при этом выводятся на заднюю сторону системного блока компьютера и превращают его во вполне современный и высококачественный цифровой запоминающий осциллограф.

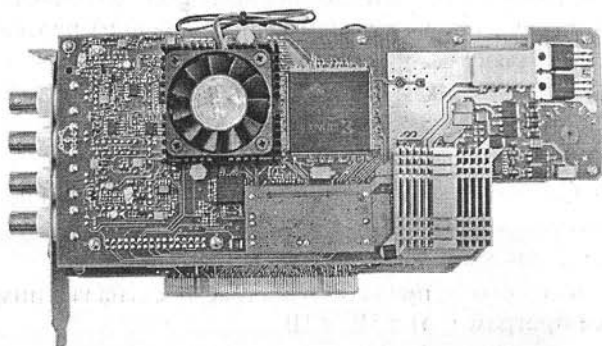


Рис. 7.44. Ультраскоростная PCI-плата M8-500

Отличительные особенности плат:

- 2-мультиплексных аналоговых входа;
- входное сопротивление (импеданс) 1 МОм, 17 пФ и 50 ± 1 Ом;
- защита по входу ± 150 В;
- время преобразования 2 нс;
- максимальная частота дискретизации 500 МГц;
- шина интерфейса PCI: Bus-Master;
- реальный динамический диапазон 53 дБ;
- шина интерфейса PCI: Bus-master.

Выполняемые функции и области применения:

- осциллограф цифровой запоминающий;
- регистратор быстротекущих процессов;
- панорамный мониторинг широкополосного сигнала;
- исследования в науке, технике и промышленности.
- неразрушающий контроль;
- лазерный фазовый доплеровский анемометр;
- диагностика светового импульсного излучения;
- ядерные исследования.

Технические характеристики:

- Число аналоговых входов: 2 мультиплексных
- Входное сопротивление (импеданс): 1 МОм/17 пФ (вход 0), 50 Ом (вход 1)
- Полоса пропускания (на уровне -3 дБ): 100 МГц (канал 0), 180 МГц (канал 1)
- Диапазоны входного сигнала (устанавливаются программно): ± 5 В; $\pm 2,5$ В; ± 1 В; $\pm 0,5$ В; (канал 0)

- $\pm 2,5\text{В}$; $\pm 1\text{В}$; $\pm 0,5\text{В}$; $\pm 0,2\text{В}$; (канал 1)
- Защита по напряжению входных каналов (при включенном питании): $\pm 150\text{В}$ (канал 0), $\pm 15\text{В}$ (канал 1)
- Объем буфера памяти максимальный: 2048 Кбайт
- Организация буфера памяти: покадровый сбор данных с переменным числом кадров
- Программное чтение результата преобразования в Slave режиме по установлению бита готовности или по прерыванию, передача по каналу DMA Bus-Master. Разбросанная по памяти (Scatter-Gatter) передача DMA.
- Разрешение АЦП: бит
- Время преобразования АЦП: 2 нс
- Максимальная частота дискретизации: 500 МГц
- Запуск АЦП: от внутреннего кварцевого генератора
- Данные сигнала АЦП: частота сигнала не более 500 МГц, длительность импульса не менее 1 нс, амплитуда от 0,3 до 1В.
- Источник синхронизации: внутренний/Внешний
- Диапазоны входного напряжения внешнего сигнала синхронизации (устанавливаются программно) $\pm 5\text{В}$, $\pm 1\text{В}$
- Тип синхронизации: по фронту или по спаду
- Число уровней квантования: 256

Общие данные:

- Шина интерфейса ПК PCI
- Потребляемая мощность +5В; 1,7А / +12В, 1,5А
- Габариты 122×220×29 мм
- Масса 350 г

Выпускается также плата M8-1000 с частотой дискретизации 1000 МГц. Следует отметить, что ультравысокочастотные платы очень «дорогое удовольствие» — стоимость плат M8-500 и M8-500У составляет соответственно 63 000 и 120 000 руб. А стоимость платы M8-1000 составляет 143 000 руб.

7.7.2. Приставка-осциллограф DSO-2100

Малоприметная приставка-осциллограф DSO-2100 фирмы Protek (рис. 7.45) вместе с ПК выполняет функции 30 МГц цифрового осциллографа с памятью. Изображения сигналов — как на обычном осциллографе. ПО под Windows. 95/98. Подключение через параллельный порт ПК. Два независимых канала, сигналов с разрешением 100 Мв/с каждый. Прикладное ПО позволяет автоматически устанавливать режимы обработки сигналов. DSO-2100 можно использовать как анализатор спектра.

Характеристики устройства:

- Число каналов: 2
- Полоса пропускания: 30 МГц
- Разрешение АЦП: 8 бит
- Пределы входных напряжений: от 50 мВ до 5 В с шагом 1, 2, 5
- Точность: 3% (Gain), 0,01% (Time)
- Пределы горизонтальной развертки: 5 нс/дел-320с/дел
- Входы: DC/AC/GND, максимальное входное напряжение 100 В

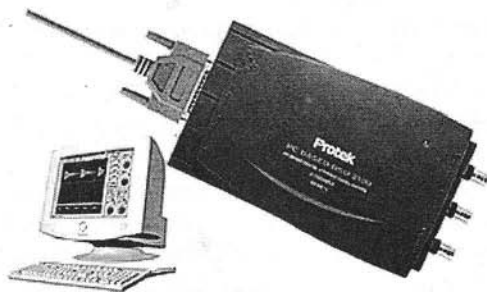


Рис. 7.45. Приставка-осциллограф DSO-2100

- Входной импеданс: 1 Мом/25пФ
- Память: 32 К/канал
- Пределы вертикальной развертки: 50 мВ/дел-5 В/дел, точность 3%
- Экран: 8×10 дел (DSO)
- Порт подключения: параллельный

Остальные возможности типичные для таких устройств.

7.7.3. Осциллографическая приставка SDS200

Неплохими характеристиками обладает еще одна осциллографическая приставка SDS200, которую можно найти на российском рынке (рис. 7.46). В режиме реального времени она обеспечивает частоту стробирования 100 Мв/с на один канал или 50 Мвыб/с на два канала. Эквивалентная максимальная частота стробирования 5 Гв/с.

Основные характеристики приставки SDS200:

- Число каналов: 2
- Ширина полосы пропускания: 200 МГц (на уровне-3dB), для одиночного слота 20 МГц
- Разрешение АЦП: 9 бит/канал
- Входные напряжения: от 10 мВ/дел до 10 В/дел (8 диапазонов)



Рис. 7.46. Внешний вид приставки SDS200

- Входное сопротивление: 1 МОм
- Погрешность измерения: $\pm 3\%$
- Длительность развертки: от 2 нс/дел до 10 с/дел
- Временное разрешение: 200 пс
- Емкость буфера памяти: 10К отсчетов
- Интерфейс: USB
- Размеры: 5.1×7.4×1.5 дюйма

Остальные возможности типичны для устройств такого рода. Эта приставка имеет неплохое программное обеспечение, обеспечивающее удобный графический интерфейс пользователя. На рис. 7.47 показано окно виртуального осциллографа, созданного на основе этой приставки. Интерфейс рассчитан на интуитивное применение пользователем, знакомым с применением осциллографов. Есть возможность вывода курсоров и проведения курсорных измерений.

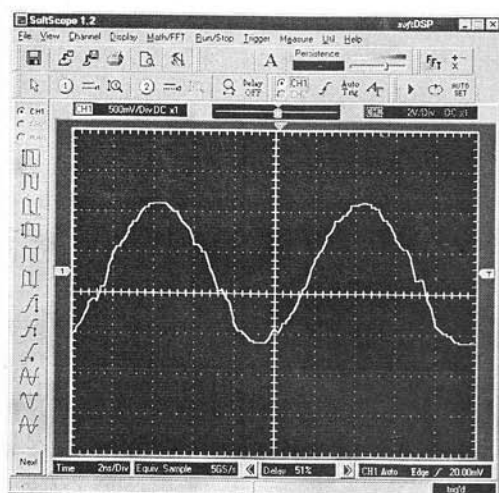


Рис. 7.47. Окно виртуального осциллографа приставки SDS200

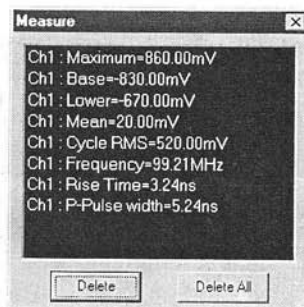


Рис. 7.48. Окно с данными автоматических измерений

Возможно автоматическое вычисление ряда параметров сигнала. Данные таких измерений выводятся в специальное окно, показанное на рис. 7.48. Выбор измеряемых параметров выполняется в окне виртуального осциллографа (в левой его части) с помощью меню с изображениями импульсов и определениями их параметров.

Приставка, как обычно, может выполнять функции анализатора спектра. На рис. 7.49 показано окно виртуального анализатора спектра. В нем показан спектр слегка искаженного шумами синусоидального сигнала с частотой 100 МГц. Пик на частоте 100 МГц выделяется довольно отчетливо, важно отметить малый уровень шумов спектрограммы. Для построения спектра могут использоваться четыре типа частотных окон: прямоугольное, Хэннинга, Хэмминга и Блэкмана. Возможны: выбор канала для анализа спектра (CH1 или CH2), задание длины последовательности отсчетов, линейной или логарифмической шкалы.

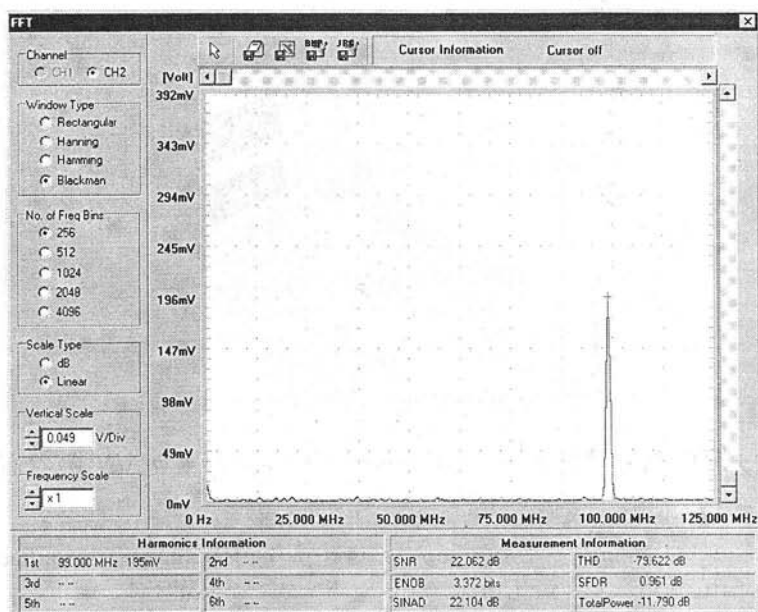


Рис. 7.49. Окно виртуального анализатора спектра приставки SDS200

7.8. Виртуальная USB-лаборатория АКТАКОМ

7.8.1. Управляемые источники питания АТН-1535/1539

АКТАКОМ предлагает несколько приставок к персональным компьютерам (как настольным, так и ноутбукам), образующих довольно мощную виртуальную лабораторию. Во всех приборах используется подключение к ПК через скоростной последовательный порт USB, хотя сохранена возможность подключения и через параллельный порт. Ниже мы кратко рассмотрим характеристики USB-лаборатории АКТАКОМ, взятые из каталога изделий этого объединения (www.aktakom.ru) и данных о продукции объединения, размещенных на сайте компании «Эликс» (www.eliks.ru).

Управляемые источники питания АТН-1535/1539 выполнены в виде приставок к персональному компьютеру и обеспечивают программируемые с его помощью выходное напряжение 0—30 В и ток 0—5 А (для АТН-1535). Они имеют линейный стабилизатор напряжения, порт USB-1.1, 3-разрядные индикаторы напряжения и тока, погрешность установки напряжения и тока 2% +2 младших разряда индикатора. Размеры приставок 124×160×326 мм, масса 5,1 кг. Предусмотрена запись всех установок в виде файла и их осуществление после загрузки соответствующего файла.

7.8.2. Функциональные генераторы АНР-3121/3122

Функциональные генераторы АНР-3121/3122 (рис. 7.50) предназначены для генерации сигналов стандартной формы (синусоида, меандр, треугольный сигнал и др.) и произвольных форм с заданием и программированием их параметров с помощью персонального компьютера.

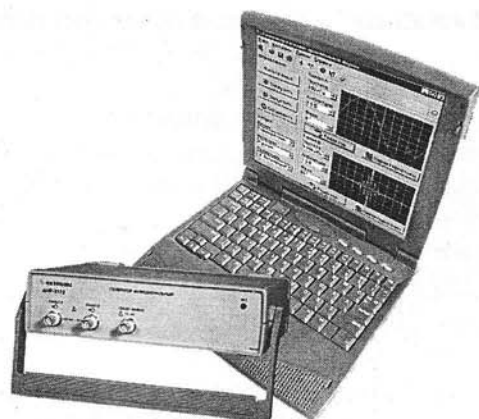


Рис. 7.50. Приставка — функциональный генератор АНР-3121/3122

Приставка имеет следующие возможности:

- генерация сигналов разной формы, программируемых с помощью ПК;
- встроенный редактор сигналов произвольной формы;
- встроенный калькулятор формул;
- режим «Лазерное шоу» для генерации произвольных фигур Лиссажу;
- внутренний и внешний запуск;
- управление синхронизацией, частотой и фазовым сдвигом;
- запись в файлы и чтение из них данных и форм сигналов;
- подключение ПК через последовательный порт RS-232 и параллельный порт;
- программное обеспечение под операционные системы.

Windows 98/ME/NT 4/2000/XP (на прилагаемом компакт-диске).

Генератор обеспечивает следующие возможности:

- генерация стандартных сигналов (синусоида, меандр, треугольные импульсы, пилообразные импульсы и «вспышка») одним каналом;
- диапазон частот от 0,02 Гц до 10 МГц;
- максимальный размах напряжения $\pm 2,5$ В (АНР-3121) и ± 10 В (АНР-3122);
- сопротивление нагрузки от 50 Ом и выше;
- фильтр низких частот с граничной частотой 15 МГц;
- максимальная частота формирования выходного сигнала 80 МГц;
- длина памяти 128 кбайт на канал.

7.8.3. Генератор измерительных телевизионных сигналов АНР-3125/3126

Генератор измерительных телевизионных сигналов АНР-3125 служит для генерации в двух каналах типовых телевизионных сигналов, которые используются для испытания телевизоров и иного телевизионного оборудования. Технические характеристики приставки АНР-3125 следующие:

- 2 канала с 12-разрядными ЦАП;

- генерация измерительных и испытательных телевизионных сигналов по ГОСТ 18471-83;
- возможность редактирования сигнала;
- возможность сохранения сигналов в файлах;
- максимальная амплитуда сигнала от пика до пика 1,5 В;
- встроенный отключаемый фильтр НЧ с граничной частотой 15 МГц;
- длина памяти 128 кбайт на канал;
- интерфейсы связи с ПК USB 1.1 и LPT (EPP);
- питание от сети 220 В;
- габаритные размеры 210×70×260 мм;
- масса 1,3 кг.

Приставка АНР-3126 формирует телевизионные сигналы в отечественном стандарте SECAM. Обеспечивается формирование 25 видов телевизионных сигналов в соответствии с ГОСТ 4845-92.

7.8.4. Цифровые запоминающие осциллографы АСК-3106/3107/3116/3117

АТАКОМ предлагает на рынке и обширную серию приставок — цифровых запоминающих осциллографов АСК-3106/3107/3116/3117. Внешний вид двухканальной приставки АСК-3106 представлен на рис. 7.51.

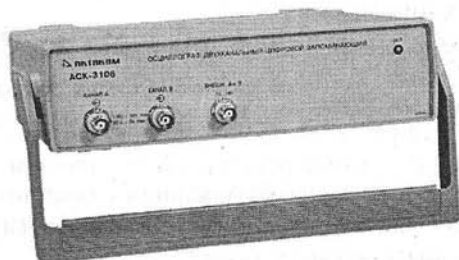


Рис. 7.51. Внешний вид двухканальной 100 МГц приставки АСК3106

Основные технические характеристики этих приставок:

- Дискретизация до 100 МГц в режиме реального времени
- 2 или 4 независимых канала с полосой до 100 МГц на канал
- Большая, определяемая пользователем длина записи — до 132 кБ на канал
- Произвольно настраиваемый режим предзаписи/послезаписи
- Высокая чувствительность (от 2 мВ/дел)
- Высокоомный (1 МОм) и низкоомный (50 Ом) вход, программно коммутируемые входы
- Интерфейс — LPT-порт (режим EPP) или USB 1.1
- Режим (безбумажного) самописца, аварийная сигнализация
- Кнопка автоматической настройки развертки/синхронизации
- Автоматические измерения, в т. ч. определение фазового сдвига
- Статистические измерения и построение гистограмм
- Спектроанализатор (БПФ)
- Цифровое послесвечение

- Цифровая фильтрация
- Программная эмуляция входного сигнала
- Русскоязычный или англоязычный (по выбору пользователя) интуитивно-понятный интерфейс с изменяемым оформлением
- Сохранение данных и конфигурации прибора
- Трансляция данных в MS Excel с сохранением масштабов по осям осциллограммы

Цифровые запоминающие осциллографы — приставки к компьютеру АСК-31xx предназначены для широкого диапазона осциллографических измерений, встречающихся в электронике, разработке и научно-исследовательских лабораториях и используется совместно с персональным компьютером, снабженным параллельным портом LPT или USB — портом.

Виртуальные осциллографы АСК-31xx позволяют пользователю наблюдать форму сигнала, используя два (АСК-3106, АСК-3116) или 4 (АСК-3107, АСК-3117 — рис. 7.52) независимых канала с разрешением 8 бит и чувствительностью от 2 мВ/дел до 10 В/дел в полосе частот от 0 до 100 МГц с аппаратным буфером на 131071 выборки для каждого канала. Входное сопротивление выбирается программно — 1 МОм или 50 Ом.

Приборы имеют стандартную систему синхронизации, работающую в режимах «ждущий», «одиночный» и «авто» с регулируемым уровнем запуска. Дополнительно запуск может осуществляться по входу внешней синхронизации (порог срабатывания TTL-уровня). Горизонтальная развертка варьируется в широких пределах и соответствует 3-м основным режимам осциллографа:

- осциллограф в режиме реального времени (диапазоны развертки — от 500 нс/дел до 50 мс/дел; частота дискретизации — до 100 МГц);
- стробоскопический осциллограф (диапазоны от 25 нс/дел до 200 нс/дел; эквивалентная частота дискретизации — до 2 ГГц);
- самописец (безбумажный, диапазоны развертки — от 500 мкс/дел до 50 ч/дел, частота дискретизации — до 50 кГц — зависит от используемого ПК).

Программным обеспечением поддерживаются щупы 1:1, 1:10 и 1:100. Режим открытого и закрытого входа (DC или AC) может быть выбран независимо для каждого канала. В режиме AC подавляются частоты ниже 1 Гц. Любой из входов может быть заземлен без отсоединения щупов от измеряемой системы. Измерение может синхронизироваться по каналам А, В или по сигналу на внешнем входе синхронизации. Порог синхронизации может быть установлен независимо для каждого канала в диапазоне целого экрана осциллографа. Порог внешнего входа синхронизации — TTL совместимый (1,2 В). Прибор имеет стандартную систему синхронизации, работающую в режимах «ждущий», «одиночный» и «автоматический».

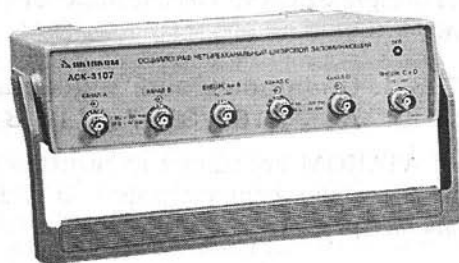


Рис. 7.52. Приставка — виртуальные 4-канальные осциллографы АСК-3107/3117

Для связи с компьютером в АСК-3105 используется расширенный параллельный порт (EPP). АСК-3106, АСК-3107, АСК-3116, АСК-3117, помимо LPT снабжены USB 1.1 портом.

АСК-3116, АСК-3117 имеют гальваническую развязку по USB, а также имеют выносной блок питания на 6,5 В, который существенно расширяет возможности применения этих приборов в полевых условиях, придавая необходимую гибкость и мобильность в решении конкретных задач.

Программное обеспечение (ПО) дает возможность полного управления прибором, а также предоставляет ряд сервисных возможностей (экспорт/импорт данных, математическая обработка сигналов, расширенные измерения, цифровая фильтрация, аварийная сигнализация в режиме самописца и т. д.)

Каждый канал АСК-31xx имеет собственный АЦП. Это означает, что АСК-31xx является «истинным двух/четырёхканальным осциллографом», где отсутствуют побочные эффекты, свойственные приборам с мультиплексированием каналов.

АСК-310x имеет понятный и удобный интерфейс, который может настраиваться пользователем. Например, пользователь может выбрать внешний вид и цветовое оформление панелей прибора, цветовую схему для осциллограмм, язык панелей (русский или английский), включить и записать свой вариант звукового сопровождения событий и др. К услугам пользователя — всплывающие подсказки, «прилипающие» панели (прилипшие панели располагаются вплотную друг к другу и перемещаются совместно, как одно окно).

Каждый режим работы осциллографа выполнен в виде отдельного окна, которое пользователь может располагать в удобном для себя участке экрана монитора. Главное окно осциллографа — масштабируемое и может работать в полноэкранном режиме. В этом окне можно изменить масштаб, установить масштаб по области графика, ограниченной курсорами. Для того, чтобы пользователь мог иметь общее представление о характере информации полного буфера и выбрать нужную часть для подробного отображения, служит дополнительный обзорный отключаемый график в нижней части панели, индицирующий всегда полный буфер собранных данных.

7.8.5. Комбинированный прибор АСК-4106

Комбинированный прибор АСК-4106 (рис. 7.53) сочетает возможности двухканального запоминающего цифрового осциллографа и двухканального цифрового генератора сигналов произвольной формы. Прибор работает совместно с компьютером по интерфейсам USB 1.1 или LPT в режиме EPP. По существу прибор является вполне законченной виртуальной лабораторией с довольно высокими техническими характеристиками и обширными функциональными возможностями.

Прибор состоит из двух функциональных модулей: модуля двухканального цифрового запоминающего осциллографа и модуля генератора сигналов произвольной формы.

Модуль двухканального цифрового запоминающего осциллографа предназначен для изучения сигналов от внешних устройств, их отображения на мониторе компьютера, измерения параметров сигналов и математической обработки с помощью программного обеспечения. Модуль генератора предназначен для выдачи сигналов произвольной формы, включая стандартные, а также задаваемые пользователем с помощью математических выражений или графически. Модули могут

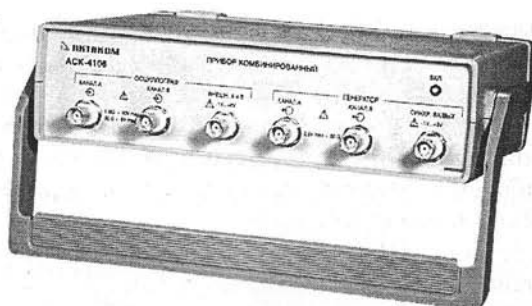


Рис. 7.53. Внешний вид приставки — комбинированного прибора АСК-4106

работать как независимо друг от друга, так и совместно под управлением соответствующего программного обеспечения.

Прибор применяется для наладки, ремонта, лабораторных исследований и испытаний устройств и систем, используемых в радиоэлектронике, связи, автоматике, вычислительной и измерительной технике, приборостроении. Рассмотрим технические характеристики прибора.

Технические характеристики осциллографического модуля:

- Количество каналов с независимым АЦП: 2 (все каналы идентичны)
- Максимальная эквивалентная частота выборок в стробоскопическом режиме: 10 ГГц
- Максимальная частота дискретизации: 100 МГц
- Максимальное число выборок на канал- 131072
- Число разрядов АЦП: 8
- Режимы каналов: А, В, А и В
- Выбор режима работы осциллографа: одно-, двухканальный
- Число отображаемых точек на экране: 100...131072
- Курсорные измерения: по уровню и длительности сигналов
- Тип интерфейса ПЭВМ: LPT, USB 1.1
- Тип входных разъемов: BNC (CP-50)
- Ширина линии графика: 1 пиксель
- Диапазон частот входных сигналов по уровню -3 дБ на пределах 20 мВ/дел. ... 1 В/дел. не менее 100 МГц и на пределах 2 В/дел ... 10 В/дел не менее 70 МГц
- Входной импеданс: 1 МОм $\pm 5\%$, 20 пФ ± 5 пФ; 50 Ом $\pm 2\%$
- Входное сопротивление: 1 МОм и 50 Ом
- Пределы допускаемой основной относительной погрешности коэффициентов отклонения: $\pm 2,5\%$
- Дополнительные значения коэффициента отклонения: 2 мВ/дел., 5 мВ/дел., 10 мВ/дел.
- Разрешение: 8 бит (256 точек на шкалу)
- Коэффициент развязки между каналами: не менее -40 дБ во всем частотном диапазоне

В стробоскопическом режиме при коэффициентах развертки менее 1 мкс/дел. возможна нестабильность амплитуды отображаемого сигнала до $\pm 2\%$, а также искажение формы сигнала или его отсутствие на краях собираемого буфера данных

в пределах 10 нс. Максимальное входное напряжение не более двукратного превышения полной шкалы для каждого предела, но не более 100 В пикового значения при сопротивлении входа 1 МОм и не более 5 В пикового значения при сопротивлении входа 50 Ом.

Параметры синхронизации:

- Источник синхронизации: каналы А, В, внешний вход
- Выбор фронта синхронизирующего сигнала: передний или задний фронт
- Максимальная частота: не меньше верхней границы полосы пропускания
- Внутренняя синхронизация: минимальный размах синусоидального сигнала не более 1 клетки масштабной сетки в диапазоне частот до 40 МГц
- Параметры сигнала для запуска внешних устройств (разъем «СИНХРОНИЗАЦИЯ ВХОД/ВЫХОД»): перепад от 0 В до 3 В в момент запуска синхронизации. В конце регистрации перепад от 3 В до 0 В на нагрузке не менее 1 кОм
- Внешняя синхронизация: минимальный период повторения синхронизирующего импульса 20 нс, минимальная длительность синхронизирующего импульса 10 нс, TTL-уровень напряжения
- Предельные значения напряжения на входе синхронизации: от -1 В до +6 В
- Импеданс входа синхронизации: не менее 50 кОм/ 20 пФ.

Параметры развертки:

- Диапазон значений коэффициента развертки (при установке 1000 выборок на экран): 10 нс/дел. ... 0,1 с/дел.
- Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности коэффициентов развертки: $\pm(0,001 \cdot T + 10 - 9 \text{ с})$, где T — длительность развертки, $T = K_{\text{разв}} \cdot 10 \text{ дел.}$, $K_{\text{разв}}$ — коэффициент развертки.
- Дополнительные значения коэффициента развертки в режиме самописца: от 1 мс/дел. до 100 ч/дел.
- Дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры в пределах рабочей области температур: не более предела основной погрешности на каждые 10 °С изменения температуры.

Параметры калибратора:

- Выходной сигнал: прямоугольный, со скважностью 2
- Частота выходного сигнала: 1 кГц
- Выходное напряжение: 3 В от пика до пика
- Выходное сопротивление: $(150 \pm 50) \text{ Ом}$
- Выходной разъем: BNC, совмещен со входом внешней синхронизации.

Параметры функционального генератора:

- Количество выходных каналов: 2
- Диапазон частот выходного сигнала: от 0,1 Гц до 10 МГц
- Частота сигнала, воспроизводимая генератором, определяется его тактовой частотой и длиной сигнала по формуле: $f = fT/N$, где: f — частота сигнала; fT — тактовая частота генератора, может быть установлена в одно из 16 значений: максимальное — 80 МГц, каждое последующее — в 2 раза меньше — 40 МГц, 20 МГц, 10 МГц и т. д. до 2,441 кГц; N — длина сигнала: любое четное целое число выборок в диапазоне от 8 до 131000.

- Основная относительная погрешность воспроизведения частоты: не превышает $\pm 0,05\%$
- Дополнительная погрешность воспроизведения частоты, вызванная изменением температуры в пределах рабочей области температур: не превышает $0,05\%$ на каждые 10°C изменения температуры
- Максимальный размах выходного напряжения: на нагрузке 1 МОм $\pm 2,5\text{ В}$, на нагрузке 50 Ом $\pm 1,25\text{ В}$
- Шаг дискретной установки выходного напряжения: на нагрузке 1 МОм не более $1,5\text{ мВ}$, на нагрузке 50 Ом не более $1,0\text{ мВ}$
- Неравномерность уровня выходного синусоидального напряжения в диапазоне частот относительно уровня на частоте 1 кГц : не превышает $\pm 1\text{ дБ}$.
- Длительность фронта и среза (каждого в отдельности) прямоугольного сигнала: не превышает 20 нс .

Режимы синхронизации:

- Выбор режимов синхронизации: перезапуск, однократный (ручной) или непрерывный источник внешний или внутренний
- Полярность: по восходящему или по спадающему фронту
- Входной сигнал внешней синхронизации: прямоугольный импульс с ТТЛ-уровнями, длительностью фронта не менее 10 нс
- Выходной сигнал синхронизации — прямоугольный импульс, ТТЛ-уровень на нагрузке 1 КОм , длительность импульса в нс $2/fT$, где fT выражена в МГц , длительность фронта не более 20 нс
- Выбор формы для обоих каналов: независимый
- Максимальное число точек на канал: 131000
- Частота среза отключаемого фильтра нижних частот: $15\text{ МГц} \pm 20\%$
- Максимальная тактовая частота: 80 МГц .

Прочие характеристики:

- Интерфейс связи с ПК: USB 1.1 или LPT в режиме EPP.
- Питание: $220\text{ В} \pm 10\%$, 50 Гц
- Потребляемая мощность: не более 20 Вт
- Время непрерывной работы: не менее 8 ч
- Время установления рабочего режима: не более 15 мин
- Срок службы прибора: не менее 6 лет
- Рабочие условия эксплуатации: температура $+5\dots+40^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха не более 80% при 25°C , атмосферное давление от 630 до 800 мм рт. ст.
- Условия хранения: температура $-30\dots+50^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $30\dots80\%$
- Габаритные размеры (ширина \times высота \times глубина) $260\times 70\times 210\text{ мм}$
- Масса: не более $2,0\text{ кг}$

Возможности USB-лаборатории объединения АКТАКОМ будут описаны в последней главе этой книги.

7.9. Виртуальный характериограф АСС-4211

7.9.1. Приставка АСС-4211 и ее параметры

Как уже отмечалось, иногда возникает необходимость снятия вольтамперных характеристик различных полупроводниковых приборов — диодов, кремниевых стабилитронов, полевых и биполярных транзисторов и т. д. Простейшие характериографы на базе аналоговых осциллографов не удовлетворяют пользователей, которые нуждаются в детальном исследовании этих приборов. Для этой цели выпускается приставка к ПК АСС-4211 — рис. 7.54. Она рассчитана на снятие семейств ВАХ маломощных полупроводниковых приборов.

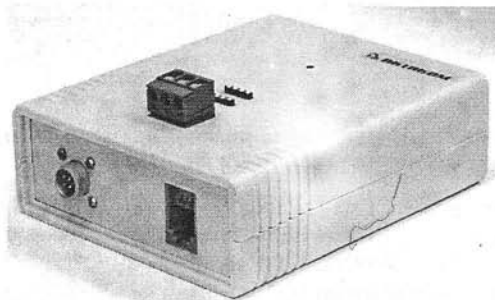


Рис. 7.54. Внешний вид приставки АСС-4211 для снятия ВАХ маломощных полупроводниковых приборов

Приставка выполнена в небольшом корпусе (размер $120 \times 50 \times 100$) и имеет массу 150 г. Сверху корпуса расположены колодки для подключения испытуемого прибора. Прибор имеет также разъем для подключения термодатчика и позволяет измерять температуру в диапазоне от: 50 до 120 °С с погрешностью 0,5 °С. Сетевой адаптер приставки имеет габариты $65 \times 70 \times 115$ мм и массу 600 г. Блок имеет гальваническую развязку от сети, что обеспечивает безопасность работы с приставкой.

Прибор позволяет снимать ВАХ транзисторов при максимальном напряжении на коллекторе (или стоке) до 50 В и максимальном токе коллектора (или стока) 0,1 А. Диапазон задания входного напряжения от 0 до 10 В, тока базы биполярных транзисторов до 1,25 мА.

7.9.2. Работа с приставкой АСС-4211

Приставка подключается к компьютеру через последовательный интерфейс RS-232. Питание она получает от блока сетевого адаптера. На компьютере должно быть установлено программное обеспечение, создающее виртуальную панель управления, показанную на рис. 7.55.

Приставка позволяет снимать ВАХ двухполюсных приборов (диодов, стабилитронов и др.) и семейства ВАХ трехполюсных приборов (биполярных и полевых транзисторов). Имеется возможность проведения допускового контроля путем сравнения ВАХ проверяемого прибора с образцовой ВАХ. Возможность обработки результатов вычислений на компьютере расширяет возможности приставки. Есть возможность выполнения курсорных измерений. Проведение измерений в импульсном режиме обеспечивает уменьшение саморазогрева приборов, который часто имеет место при измерениях на постоянном токе. Интересной является возможность вывода на экран семейства ВАХ испытуемого прибора и теоретических ВАХ.

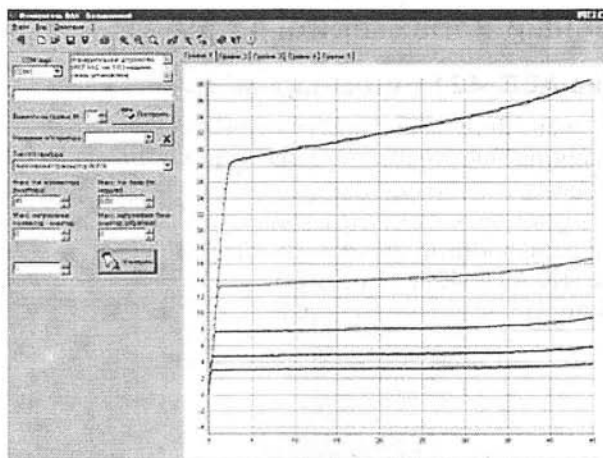


Рис. 7.55. Окно характериографа для снятия ВАХ маломощных полупроводниковых приборов

К сожалению, приставка ACC-4211 имеет ряд недостатков:

- нельзя снимать ВАХ приборов с N и S-образными ВАХ, таких как туннельные диоды, однопереходные транзисторы, тиристоры, лавинные транзисторы и др.;
- нельзя снимать ВАХ мощных приборов;
- диапазон рабочих напряжений не позволяет снимать характеристики высоковольтных (даже маломощных) приборов.

Тем не менее, приставка частично закрывает брешь, связанную с отсутствием на российском рынке характериографов, позволяющих снимать семейства ВАХ современных полупроводниковых приборов.

7.10. Скоростные платы компании GaGe

7.10.1. Обзор продукции компании GaGe

Канадская компания GaGe Applied Technologies, Inc., — всемирно известный лидер в производстве измерительной техники на базе ПК, в том числе удовлетворяющей жестким промышленным и военным стандартам. Продукцию GaGe используют многие лидеры мировой индустрии: Lockheed, NASA, Sony, Honeywell, IBM, Seagate, General Motors, Siemens и др. Платы АЦП и виртуальных осциллографов фирмы GaGe отличаются высокими скоростями работы, большой пропускной способностью, высоким разрешением, низким уровнем шума, большим объемом быстрой буферной памяти и др., что позволяет относить их к продукции уровня High-End. Естественно их стоимость велика. В России продукты GaGe на рынок поставляет компания «Эликс».

GaGe выпускает более 20 различных плат формата PCI и CompactPCI, в том числе высокоскоростные платы сбора данных АЦП и цифровых осциллографов с разрядностью от 8 до 16 бит, платы генераторов аналоговых (ЦАП) и цифровых сигналов, генераторов сигналов произвольной формы, плат цифрового ввода/вывода. Они поддерживаются мощными программными продуктами от GaGe, а также на-

борами для разработки собственных программных продуктов (Software Development Kits) на базе популярных платформ (C/C++, LabView, MATLAB). Выборка продукции компании GaGe представлена ниже.

Платы виртуальных инструментов GAGE и их программное обеспечение	
CompuGen 1100 — 512K	ISA-плата 1 канального 12-битового генератора аналоговых сигналов произвольной формы. 80 млн. выборок в сек, память 512кБ (опция до 16МБ), полоса — до 10МГц, выход до 20В, вых. фильтры.
CompuGen 3250-256K	ISA — плата цифрового вывода на 32 бита (8плат — до 256), память 256КБ (опция до 8МБ). Выходной уровень -0-5 В (TTL/КМОП), тактовая частота до 50 МГц
CompuScope 12100 — 1M	2-канальная PCI-плата 12-битового АЦП, полоса до 50 МГц/100 МС/с, входн. напряж. 100мВ-5В, память 1МБ (опция — до 1 ГБ), режим мультizaписи.
CompuScope 1250 — 1M	2-канальная PCI-плата 12-битового АЦП, полоса до 25 МГц /50 МС/с, входн. напряж. 100мВ-5В, память 1МБ (опция — до 1 ГБ), режим мультizaписи.
CompuScope 14100 — 1M	2-канальная PCI-плата 14-битового АЦП, полоса до 50 МГц /100 МС/с, входн. напряж. 100мВ-5В, память 1МБ (опция — до 1 ГБ), режим мультizaписи.
CompuScope 14200 — 32M	2-канальная PCI-плата 14-битового АЦП, полоса до 100 МГц /частота дискретизации до 200 МГц, входн. напряж. 100мВ-5В, память 32 МБ (опция 128 МБ, и 1 ГБ), режим мультizaписи.
CompuScope 1450 — 1M	2-канальная PCI-плата 14-битового АЦП, полоса до 25 МГц /50 МС/с, входн. напряж. 100мВ-5В, память 1МБ (опция — до 1 ГБ), режим мультizaписи.
CompuScope 1602 — 1M	2-канальная PCI-плата 16-битового АЦП, полоса до 4 МГц /2,5 МС/с, входн. напряж. 500мВ-10В, память 1МБ (опция — до 1 ГБ), диф. входы, режим мультizaписи.
CompuScope 1610 — 1M	2-канальная PCI-плата 16-битового АЦП, полоса до 4 МГц /10 МС/с, входн. напряж. 500мВ-10В, память 1МБ (опция — до 1 ГБ), диф. входы.
CompuScope 3200 — 2M	PCI — плата цифрового (ЭСЛ или TTL/КМОП) ввода на 32 входа (опция — на 64), 100МГц, память 2МБ (опция до 2 ГБ), режим мультizaписи.
CompuScope 8500 — 2M	2-канальная PCI-плата 8 битового АЦП, полоса до 250 МГц (50 Ом вх.) или 100 МГц (1МОм вх.) /500 МС/с, входн. напряж. 200мВ-4В, память 2МБ (опция — до 2 ГБ), режим мультizaписи.
CompuScope 82G-2M	2-канальная PCI-плата 8 битового АЦП, 500 МГц/2 ГС/с, входн. напряж. 100мВ-10В, память 2МБ (опция — до 8 МБ)
GageScope Стандарт	ПО «Многоканальный виртуальный осциллограф» для плат АЦП-GAGE. Стандартная версия.

На рис. 7.56 и рис. 7.57 представлены детальные характеристики ряда плат компании GaGe. Они дают достаточно полное представление об этой продукции. Эти и другие данные (в том числе стоимость плат) доступны на сайте компании «Эдикс» (www.eliks.ru).

GaGe	CS85G	CS82G	CS8500	CS12100
Размер карты	1 Полноразмерный PCI slot	1 Полноразмерный PCI slot	1 Полноразмерный PCI slot	1 Полноразмерный PCI slot
Входные каналы	2	2	1	2
Число входных каналов на карту	2	2	1	2
Макс. # карт в одном ПК (Master/Slave)	не доступно	8	8	8
Макс. # каналов на систему (Master/Slave)	не доступно	16	8	16
Макс. скорость выборки на канал	5 GS/s	2 GS/s	300 MS/s	100 MS/s
Макс. скорость выборки на двух каналах	5 GS/s	1 GS/s	не применяется	30 MS/s
Внешняя тактовая частота	не доступно	Опция	Опция	Опция
Вертикальное разрешение	8 Бит	8 Бит	8 Бит	12 Бит
Одновременное сэмплирование	Да	Да	Да	Да
Полоса пропускания	500 МГц	300 МГц	230 МГц @ 50 Ом 100 МГц @ 1 МОм	50 МГц
Диапазон напряжений (1 В означает ± 1 В)	10 нВ, 50 нВ, 100 нВ, 200 нВ, 500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В, 10 В, 20 В	100 нВ, 200 нВ, 500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В, 10 В	100 нВ, 200 нВ, 500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В	100 нВ, 200 нВ, 500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В
Входной импеданс	1 МОм/25 пФ или 50 Ом	1 МОм/25 пФ или 50 Ом	1 МОм/25 пФ или 50 Ом	1 МОм/25 пФ или 50 Ом
Входы	AC или DC	1 МОм: AC или DC 50 Ом: DC только	1 МОм: AC или DC 50 Ом: DC только	1 МОм: AC или DC 50 Ом: DC только
Защита входа	Двухная	Двухная	Двухная	Двухная
Отношение сигнал/шум	28 дБ	45 дБ, 0.95 МГц вход	40.5 дБ, 1.68 МГц вход	50 дБ, 1 МГц вход
Эффективное число бит (ENOB)	9.02	7.13, 0.95 МГц вход	7.01, 10 МГц вход	9.67, 1 МГц вход
Входные коннекторы	BNC	BNC	SMA для 50 Ом вход BNC для 1 МОм вход	BNC
Автокалибровка	Нет	Нет	Нет	Да
Хранение данных	10К на канал	2М, 4М, 8М	2М, 8М, 16М, 32М, 64М, 128М, 1Г, 1Г	1М, 4М, 8М, 64М, 128М, 1Г
Глубина памяти	Кратность 100	Кратность 128	Кратность 128	Кратность 128
Предзапись	Да	Да	Да	Да
Мультизапись (Стековая память)	не доступно	не доступно	Стандартно	Стандартно
Система синхронизации	Аналоговое	Аналоговое	Аналоговое	Аналоговое
Тип запуска	Встроенный ЦАП положительный или отрицательный	Встроенный ЦАП положительный или отрицательный	Встроенный ЦАП положительный или отрицательный	2 независимых встроенных ЦАП положительный или отрицательный
Уровень запуска	А, В, EXT, Программно	А, В, EXT, Программно	А, В, EXT, Программно	А, В, EXT, Программно
Программное обеспечение	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для C/C++	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для MATLAB	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для LabVIEW	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для DOS	не доступно	Доступно	Доступно	Доступно

Рис. 7.56. Основные характеристики плат компании GaGe (начало)

GaGe	CS1250	CS14100	CS1450	CS1602
Размер карты	1 Полноразмерный PCI slot	1 Полноразмерный PCI slot	1 Полноразмерный PCI slot	1 Полноразмерный PCI slot
Входные каналы	2	2	2	2 дифференциальных 80 дБ CMRR @ 50 Гц
Число входных каналов на карту	2	2	2	16
Макс. # карт в одном ПК (Master/Slave)	8	8	8	32 не применяется
Макс. # каналов на систему (Master/Slave)	16	16	16	2.5 MS/s
Макс. скорость выборки на канал	50 MS/s	100 MS/s	50 MS/s	Опция 10 MS/s
Макс. скорость выборки на двух каналах	25 MS/s	50 MS/s	25 MS/s	Опция 10 MS/s
Внешняя тактовая частота	Опция	Стандартно	Стандартно	Опция
Вертикальное разрешение	12 Бит	14 Бит	14 Бит	16 Бит
Одновременное сэмплирование	Да	Да	Да	Да
Полоса пропускания	25 МГц	50 МГц	25 МГц	4 МГц
Диапазон напряжений (1 В означает ± 1 В)	100 нВ, 200 нВ, 500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В	100 нВ, 200 нВ, 500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В	100 нВ, 200 нВ, 500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В	500 нВ, 1 В, 2 В, 5 В, 10 В
Входной импеданс	1 МОм/25 пФ или 50 Ом	1 МОм/40 пФ или 50 Ом	1 МОм/40 пФ или 50 Ом	1 МОм/35 пФ или 50 Ом
Входы	1 МОм: AC или DC 50 Ом: DC только	AC или DC	AC или DC	AC или DC
Защита входа	Двухная	Двухная	Двухная	Двухная
Отношение сигнал/шум	60 дБ, 1 МГц вход	63 дБ, 1 МГц вход	63 дБ, 1 МГц вход	75 дБ, 95 кГц вход
Эффективное число бит (ENOB)	9.67, 1 МГц вход	9.67, 1 МГц вход	9.67, 1 МГц вход	12.16, 55 кГц вход
Входные коннекторы	BNC	BNC	BNC	2 BNC на вход
Автокалибровка	Да	Да	Да	Да
Хранение данных	1М, 4М, 8М, 64М, 128М, 512М, 1Г	1М, 8М, 128М, 512М, 1Г	1М, 8М, 128М, 512М, 1Г	1М, 4М, 8М, 64М, 128М, 512М, 1Г
Глубина памяти	Кратность 128	Кратность 128	Кратность 128	Кратность 128
Предзапись	Да	Да	Да	Да
Мультизапись (Стековая память)	Стандартно	Стандартно	Стандартно	Стандартно
Система синхронизации	Аналоговое	Аналоговое	Аналоговое	Аналоговое
Тип запуска	2 независимых ЦАП положительный или отрицательный	2 независимых встроенных ЦАП положительный или отрицательный	2 независимых встроенных ЦАП положительный или отрицательный	1 независимый встроенный ЦАП положительный или отрицательный
Уровень запуска	А, В, EXT, Программно	А, В, EXT, Программно	А, В, EXT, Программно	А, В, EXT, Программно
Программное обеспечение	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для C/C++	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для MATLAB	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для LabVIEW	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Software Development Kit для DOS	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно

Рис. 7.57. Основные характеристики плат компании GaGe (конец)

7.10.2. Программное обеспечение виртуальных осциллографов GaGe

Все приборы семейства CompuScore могут работать под управлением специализированного программного обеспечения GageScore, которое дает возможность пользователю контролировать все параметры плат АЦП, а также просматривать и анализировать захваченные устройством данные, используя мощь персонального компьютера и программных пакетов Windows. Динамическое отображение сигнала происходит со скоростью обновления до 30 Гц. Имеется возможность отображения до 60 каналов, многооконный режим, регулируемая персистенция.

Помимо стандартного пакета пользователю доступны мощные дополнительные модули, позволяющие более детально обрабатывать и анализировать данные измерений:

- модуль БПФ (быстрое преобразование Фурье) для исследования спектров сигналов (до 1 млн. точек);
- математический модуль, реализующий функции дифференцирования, интегрирования, автокорреляции и пр.;
- модуль автоматических измерений, позволяющий отображать десятки различных параметров входного сигнала: амплитуда, частота, время нарастания/спада, ширина импульса и т. д.;
- модуль усреднения дает возможность избавить сигнал от случайного шума.

Окно программы виртуального осциллографа GageScore показано на рис. 7.58. Здесь представлены три осциллограммы (синусоидального, прямоугольного и треугольного импульсов) и спектрограмма сигнала одного из каналов. Установки программы достаточно очевидны и при обзорном описании программы в особой детализации не нуждаются. Следует отметить очень низкий и практически незаметный на осциллограммах шум квантования.

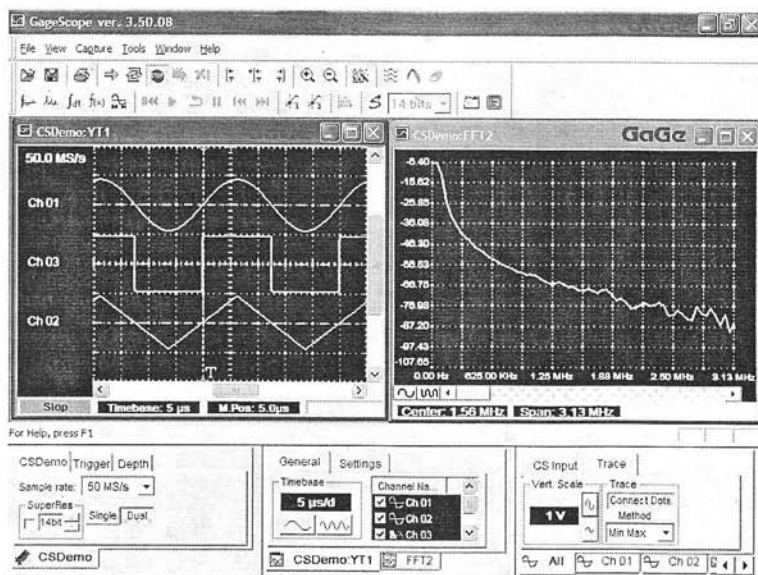


Рис. 7.58. Окно виртуального осциллографа GageScore с осциллограммами и спектрограммой

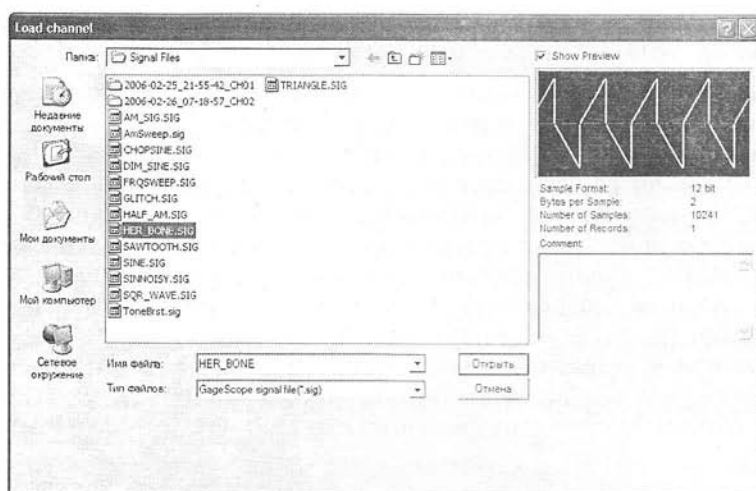


Рис. 7.59. Окно считывания и просмотра данных файлов

Программа предусматривает запись полученных осциллограмм в файл данных с комментариями, а также считывание данных из файла для просмотра осциллограмм в окне виртуального осциллографа. На рис. 7.59 представлено окно считывания данных из файла. Здесь интересно отметить возможность предварительного просмотра осциллограммы, которая хранится в выделенном файле, и просмотра комментария (если он есть).

Интерфейс GageScore предусматривает специальное информационное окно, в котором отображаются результаты автоматических измерений. Это окно показано на рис. 7.60 в основном окне слева. Справа над окном осциллограмм показано окно начальной установки видов автоматических вычислений. В нем можно наме-

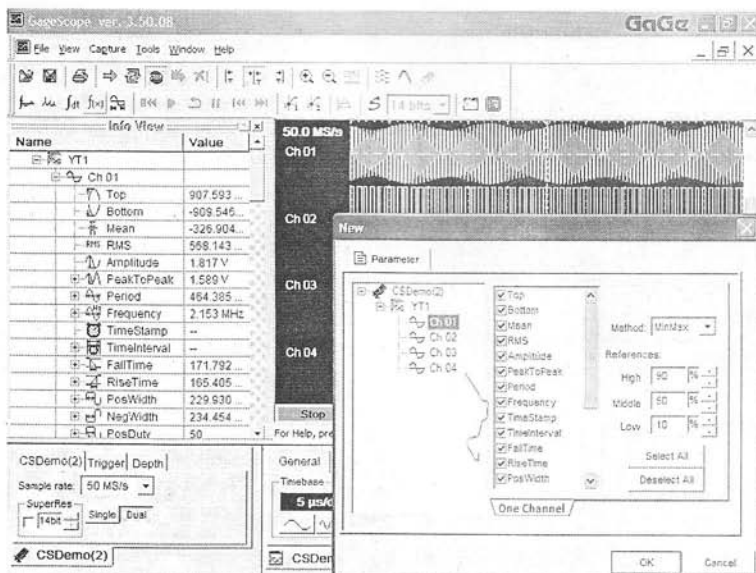


Рис. 7.60. Вывод результатов автоматических вычислений

тить канал, сигнал в котором подлежит измерениям и галочками задать нужные виды измерений. Всего можно измерять до 21 параметра сигнала в каждом канале (напоминаем, что их до 60). Уместно отметить удобную форму представления больших массивов измерений — в виде дерева каналов и видов измерений, а также самих, относящихся к ним, результатов измерений.

Возможен экспорт результатов измерений в известные пакеты анализа данных и в системы компьютерной математики [2, 3], в том числе в мощную матричную систему MATLAB, обладающую весьма обширными средствами обработки сигналов и уникальным набором пакетов расширения [45—47]. Среди них пакеты по обработке сигналов и изображений, а также пакет по вейвлетам [48]. Реализованный в GageScore режим улучшенного разрешения на базе технологии многократного квантования и встроенного модуля обработки сигнала позволяет повысить эффективное разрешение до 24 бит, что открывает новые возможности в многоплановом и точном анализе сложных сигналов.

Глава 8. Осциллографические измерения

Даже имея современный осциллограф нельзя эффективно его применять без знакомства с осциллографическими измерениями. Основы таких измерений и описаны в этой главе. Это описание дано для измерений, выполняемых как с аналоговыми, так и с цифровыми осциллографами. Затронут достаточно широкий круг осциллографических измерений. Описание неизменно сопровождается реальными примерами и полученными реальными осциллограммами. В сравнении с [1] существенно расширено описание техники работы с цифровыми осциллографами.

8.1. Подготовка аналогового осциллографа к работе

8.1.1. Включение аналогового осциллографа и подготовка его к работе

Современный аналоговый осциллограф достаточно сложный прибор, по крайней мере, для начинающего пользователя. Поэтому стоит сказать несколько слов о его включении и подготовке к работе. Ниже примеры такой подготовки даны для сервисного осциллографа ОСУ20 — одного из самых дешевых и массовых. И широко у нас распространенного.

При профессиональном применении осциллографов часто приходится фотографировать осциллограммы. В этом случае используются специальные конусные трубы (тубусы), изнутри черные, устанавливаемые на экран ЭЛТ с помощью специальных (обычно винтовых) креплений, и имеющие крепление (тоже обычно винтовое) для фотоаппарата. Для измерений используется масштабная сетка с подсветом. Но, у дешевого сервисного осциллографа ОСУ20 такой трубы нет, как нет и подсветки масштабной сетки. У него применена ЭПТ с масштабной сеткой, нанесенной прямо на экран ЭЛТ. Поэтому фотографировать осциллограммы приходится при освещении экрана обычным светом, поскольку иначе черные линии подсветки не будут видны. В связи с этим качество приведенных ниже реальных осциллограмм получается не очень высоким, но зато читатель видит все «как есть».

В настоящее время для фотографирования осциллограмм удобно использовать цифровые фотоаппараты. Полученные электронные фотографии можно обрабатывать с помощью обычных графических редакторов, меняя их цвет, яркость и контрастность и даже инвертируя изображение осциллограмм, превращать их из белых на темном фоне в черные на светлом фоне.

Прежде чем включить аналоговый осциллограф, надо проделать следующие действия:

- выбрать место для прибора и установить его;
- отрегулировать наклон ручки и прибора;
- проверить подключение (обычно сзади) кабеля питания и установки напряжения сети;
- заземлить прибор, подключив провод земли к специальной клемме;
- вставить в розетку сети вилку провода питания осциллографа.

После этого прибор можно включить, нажав кнопку включений Power или Сеть, Вкл. и т. д. (названия могут несколько отличаться у разных моделей осциллографов). После этого надо выждать с минуту — должна появиться одна горизон-

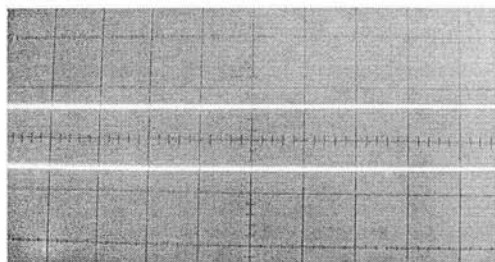


Рис. 8.1. Линии развертки на экране осциллографа при отсутствии сигналов на входах

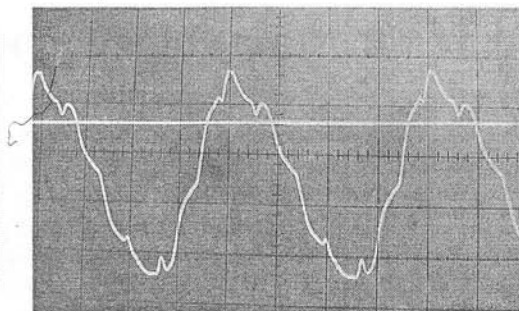


Рис. 8.2. Искривленная синусоида при пробе рукой

тальная линия на экране одноканального осциллографа или две на экране двухканального осциллографа. Если линий не видно, проверьте установку развертки на автоколебательный режим работы и увеличьте до предела яркость лучей, повернув ручку регулировки яркости по часовой стрелке до упора. Обычно это приводит к появлению линий развертки на экране — рис. 8.1. Если их по-прежнему нет, поищите линии с помощью ручек смещения луча по вертикали и горизонтали. Линии от луча (лучей) должны быть при среднем положении этих ручек. Проверьте их работу, установите нормальную яркость луча и сфокусируйте луч с помощью ручки фокусировки.

Обычно, если к входам осциллографа ничего не подключено, то на экране будет наблюдаться чистый луч (или два луча в двухканальном осциллографе), который может быть засорен наводками и шумами. Если это видно, установите переключатель входов в положение GRN (Ground или Земля) — наводки должны исчезнуть. Опытные пользователи быстро проверяют осциллограф, коснувшись входов рукой — это ведет к появлению сильной наводки с частотой сети переменного тока (у нас 50 Гц). Изменяя длительность развертки можно наблюдать обычно искаженную синусоиду с частотой сети — рис. 8.2. Это говорит о работе усилителя вертикального отклонения и развертки осциллографа.

8.1.2. Подключение осциллографа к источнику сигнала

Для наблюдения какого либо источника сигнала нужно, прежде всего, правильно подключить его ко входу осциллографа [43] или к нескольким входам, если используется многоканальный осциллограф для просмотра нескольких сигналов. Входы современных осциллографов представлены радиочастотными разъемами [54]. Для подключения входа к источнику сигнала чаще всего используется *осциллографический пробник* в виде малоемкостного кабеля, имеющего разъем для подключения ко входу осциллографа, кабель и головку с иглой или крючком. Иногда вместо такой головки используется пара коротких проводов, оснащенных зажимами — «крокодилами». Некоторые пробники оснащены делителем напряжения или даже активной головкой, обеспечивающей повышенное *входное сопротивление* и уменьшенную *входную емкость*.

Такое подключение обеспечивает большое входное сопротивление (обычно от 0,5 до 2 МОм) и умеренную входную емкость (десятки пФ). К сожалению, чем длиннее кабель пробника, тем выше входная емкость осциллографа. Она может достигать 100 пФ и более, тогда как емкость входа осциллографа без кабеля составляет 15—30 пФ. Подобный способ подключения осциллографа к источнику

сигнала практикуется при испытании устройств на ТТЛ или МОП микросхемах, исследовании электротехнических устройств и т. д. Всегда надо помнить, что один из зажимов пробника (земля) должен быть подключен к земле испытуемого устройства, а другой к той точке, откуда снимается сигнал.

У широкополосных осциллографов обычно применяется низкоомный вход сопротивлением 50, 75 или 100 Ом (обычно 50 Ом). В этом случае осциллограф подключается к источнику сигнала, имеющему аналогичный выход, с помощью отрезка коаксиального кабеля с ВЧ разъемами на концах. При этом важно обеспечить точное *согласование* волнового сопротивления кабеля с входным сопротивлением осциллографа и выходным сопротивлением генератора. Нужно, чтобы согласующие резисторы были одинаковыми, например 50 Ом. В случае разных волновых сопротивлений применяются коаксиальные переходники. В режиме согласования отсутствуют *отражения* сигнала и форма импульсов практически не искажается. При отсутствии согласования наблюдаются отражения от мест рассогласования и форма импульсов может сильно искажаться. Много тонкостей работы с высокочастотными и широкополосными согласованными цепями и узлами можно найти в справочнике [54].

8.1.3. Выбор режимов работы усилителей канала Y

Каждый вход канала Y осциллографа имеет переключатель режимов работы, входной аттенуатор, регулятор чувствительности и регулятор положения линии канала. Переключатель режимов работы обычно имеет три позиции:

- AC — подача только переменной составляющей сигнала;
- DC — подача сигнала с постоянной составляющей;
- GROUND — заземление входа.

В положении AC обычно исследуются сигналы небольшого уровня с отфильтрованной постоянной составляющей. Это могут быть, например, сигналы с выхода усилительных каскадов. Для отсева постоянной составляющей используются разделительные RC-цепи. Следует помнить, что в этом случае АЧХ осциллографа содержит спад на низких частотах и характеризуется низшей частотой среза $f_{\text{сн}}$, равной 5—20 Гц. Она тем ниже, чем больше постоянная времени разделительной RC-цепи.

В положении DC разделительная цепь отключена и осциллограф реагирует на постоянную составляющую сигнала соответствующим смещением линии канала. Это можно использовать для измерения постоянной составляющей сигнала по отклонению линии от положения, которое она занимает при отсутствии сигнала. Для установки линии в отсутствие сигнала у многих осциллографов есть положение переключателя режимов входа GROUND. Если его нет, то надо просто заземлить вход.

Следует отметить, что большинство осциллографов могут измерять и индцировать сигналы только с одним заземленным выходом — второй именуют «горячим». Ником образом нельзя подключать осциллограф к двум произвольным точкам испытуемой схемы, если одна из них не земля. Лишь очень дорогие осциллографы с гальванической развязкой входов допускают подобное подключение. Кроме того есть двухканальные осциллографы, у которых входы можно включать по дифференциальной схеме и получать отображение сигналов (CH1 — CH2). Однако «холодные» входы должны подключаться к земле испытуемого устройства.

Двухканальные осциллографы помимо переключателей режимов входа имеют переключатель режимов работы каналов — MODE. Он имеет следующие позиции:

- CH1 — просмотр сигнала канала 1
- CH2 — просмотр сигнала канала 2
- DUAL — просмотр обоих сигналов (с двумя линиями)
- ADD — просмотр суммарного сигнала от обоих каналов

Первые два режима в особых комментариях не нуждаются. Осциллограф применяется как одноканальный для просмотра сигнала с канала CH1 или CH2. В режиме DUAL можно просматривать сигналы одновременно с двух каналов. Для этого трубка осциллографа должна иметь два луча или осциллограф оснащается коммутатором, позволяющим просматривать два сигнала даже при одном луче трубки. Каждый луч можно перемещать по вертикали с помощью ручек вертикального смещения, обычно обозначенных .

В режиме ADD просматривается сигнал в виде суммы каналов — CH1 + CH2. Для того, чтобы просмотреть разность сигналов в канале CH2 обычно имеется переключатель фазы сигнала. Он позволяет инвертировать сигнал канала. Иногда такой переключатель имеется в обоих каналах.

В каждом канале современного осциллографа имеются калиброванные аттенюаторы, позволяющие менять чувствительность осциллографа по вертикальному отклонению. Обычно чувствительность задается в мВ/дел или В/дел по правилу 1, 2, 5, например 1 мВ/дел, 2 мВ/дел, 5 мВ/дел, 10 мВ/дел, 20 мВ/дел и т. д. Обычно с таким переключателем совмещена ручка плавного изменения (уменьшения) чувствительности. Иногда эта ручка делается отделенной от переключателя.

8.1.4. Калибровка чувствительности

Убедившись в работоспособности осциллографа можно приступить к его *калибровке*. Она заключается в установке с заданной (по возможности минимальной) погрешностью коэффициентов отклонения вертикального тракта. У современного осциллографа простейший калибратор имеется в его составе. Он создает прямоугольные симметричные импульсы (меандр) с заданной амплитудой и заданным периодом. Это позволяет осуществить изначальную калибровку осциллографа по напряжению и по времени. Выход калибратора выводится на специальный разъем или на небольшую «петлю» с надписью PROBE, на которую можно повесить крючок входного кабеля (в старых осциллографах для калибровки надо было соединить кабелем вход осциллографа с выходом калибратора).

Для калибровки следует вращением ручек изменения чувствительности и смещения луча по вертикали добиться точного соответствия размера изображения значению двойной амплитуды калибратора. Например, двойная амплитуда сигнала (меандра) калибратора сервисного осциллографа ОСУ20 равна 0,25 В с погрешностью $\pm 5\%$. Частота сигнала 1 кГц. Если установить чувствительность осциллографа 0,1 В/дел (деление большое), то расстояние между вершинами полуволн меандра должно быть 2,5 большого деления шкалы ЭЛТ. Вид сигнала калибратора показан на рис. 8.3. Калиброванные коэффициенты отклонения указаны для крайнего положения ручки плавного их изменения при ее вращении по часовой стрелке до упора.

Калибровки осциллографа по времени обычно не требуется, поскольку при установке ручки плавной регулировки длительности развертки в крайнее положение (тоже до упора) длительность развертки устанавливается равной той длитель-

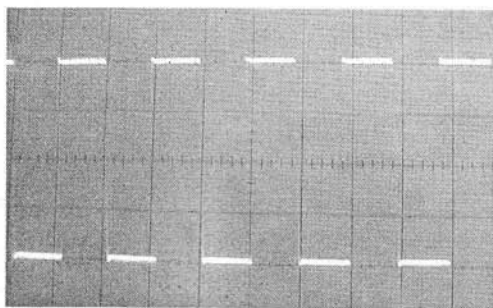


Рис. 8.3. Сигнал калибратора (меандр)

ности, которая указана позициями переключателя длительности развертки. Тем не менее, стоит убедиться в этом, измерив длительность периода меандра. Позже мы обсудим подробно работу с разверткой.

8.1.5. Учет влияния входной цепи осциллографа

Полное сопротивление $Z_{вх}$ при входе на постоянном токе у аналоговых осциллографов носит комплексный характер, поскольку его компонентами является активное сопротивление $R_{вх}$ и емкость $C_{вх}$. Типичные значения $R_{вх}=0,5 - 2$ Мом, $C_{вх}=15 - 30$ пФ. Например, у осциллографа ОСУ20 $R_{вх}=1$ Мом, а $C_{вх}=25$ пФ.

Если источником входного сигнала является ток $i(t)$, то постоянная времени входной цепи будет равна $R_{вх} C_{вх}$ и имеет довольно большую величину, например, у осциллографа ОСУ20 она равна 25 мкс. Поэтому не приходится рассчитывать на возможность наблюдения импульсов тока с малыми временами нарастания и спада. Для этого надо применять осциллографы с $R_{вх}=50 - 100$ Ом, что и характерно для сверхскоростных осциллографов. Как правило, значение согласуется со стандартным волновым сопротивлением коаксиальных кабелей, по которым можно передавать сигналы без заметных искажений на расстояния до нескольких метров, иногда и десятков метров.

Вообще говоря, токи измеряются осциллографом с применением шунта по падению напряжения на нем. Например, если мы хотим, чтобы токи до 1 мА соответствовали входному напряжению осциллографа до 0,1 В, то надо параллельно входу включить резистор — шунт $R_{ш}$ с номиналом 100 Ом. Естественно, что при этом постоянная времени входной цепи резко упадет — примерно до $R_{ш}C_{вх}$. Так что проблема большой постоянной времени исчезнет.

При наблюдении импульсов напряжения $u(t)$ надо учитывать внутреннее сопротивление реальных источников напряжения $R_{и}$. Даже на постоянном напряжении это ведет к уменьшению напряжения на входе со значения $U_{и}$ источника до входного напряжения

$$U_{вх} = U_{и} \frac{R_{вх}}{R_{и} + R_{вх}}.$$

Если $R_{и}=R_{вх}$, то ослабление входного сигнала составит 2 раза. Но, если $R_{и}$ составляет 1 кОм, то при $R_{вх}=1$ МОм это ослабление составит всего примерно 0,1 %, а коэффициент передачи входной цепи будет 0,999. Таким образом, всегда желательно работать при $R_{и} \ll R_{вх}$.

В этом случае значительно уменьшается и постоянная времени входной цепи, равная

$$\tau_{BX} = C_{BX} \frac{R_H R_{BX}}{R_H + R_{BX}} \approx C_{BX} R_H.$$

Приближенное выражение справедливо при $R_H \ll R_{BX}$. Например, при $R_H = 1$ кОм и $C_{BX} = 25$ пФ она составит 25 нс, против 25 мкс при регистрации токов без шунта.

Для оценки влияния входной цепи на вид импульсов сделаем следующий эксперимент. От генератора прямоугольных импульсов (например, ГЗ-111) подадим на вход осциллографа прямоугольные импульсы — меандр с частотой 100 кГц. Отрегулируем развертку так, чтобы на экране появилось несколько периодов импульсов — рис. 8.4. Из рисунка видно, что форма импульсов весьма близка к прямоугольной, так что быстрые перепады почти не видны.

Теперь подадим те же импульсы, но через резистор $R = 51$ кОм, имитирующий увеличение выходного сопротивления генератора. Картинка на экране осциллографа меняется разительно: от прямоугольности импульсов не осталось и следа (рис. 8.5). Теперь импульсы имеют вид отрезков экспонент заряда и разряда входной емкости осциллографа, при этом амплитуда импульсов заметно упала. Подобные искажения уже явно недопустимы и связаны с увеличением постоянной времени входной цепи сверх разумных значений. Этот пример наглядно иллюстрирует влияние даже небольшой емкости входа.

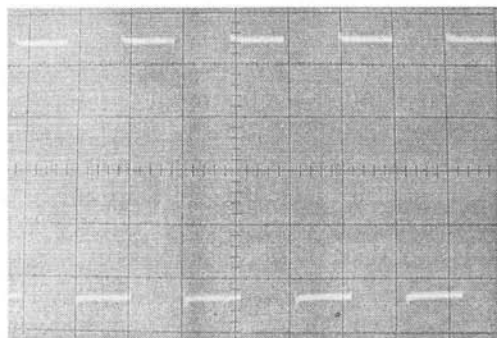


Рис. 8.4. Прямоугольные импульсы с частотой 100 кГц на экране осциллографа

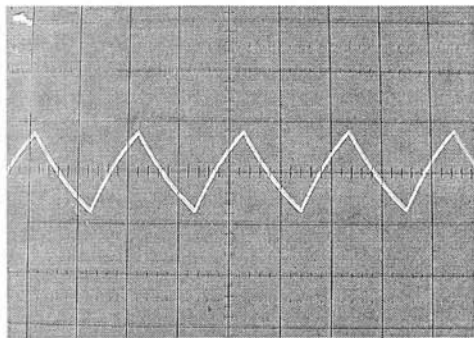


Рис. 8.5. Искажения прямоугольного импульса после увеличения выходного сопротивления генератора на 51 кОм

Иногда бывает полезно оценить частотные искажения, вносимые входной цепью осциллографа. Граничная частота входной цепи, оцениваемая как обычно на уровне спада АЧХ на -3 дБ, оценивается как $f_{ВВХ} = 0,35/\tau_{ВХ}$. Например, для нашего примера получим $f_{ВВХ} = 14$ МГц. Даже для 10—20 МГц осциллографов влияние входной цепи оказывается весьма значительным и означает не только ухудшение точности измерений, но и существенное искажение формы импульсных сигналов.

8.1.6. Применение компенсированных делителей напряжения

Итак, выполненный выше анализ показывает, что у аналогового осциллографа желательно иметь как можно большее входное сопротивление и как можно меньшую входную емкость. Однако, в реальных условиях мы имеем эти параметры «от бога», т. е. присущие данному осциллографу. Поэтому приходится идти на различные ухищрения ради улучшения параметров входной цепи. Можно, к примеру, применить истоковые или эмиттерные повторители на СВЧ полевых и

биполярных транзисторах или широкополосных операционных усилителях (см. раздел 8.10).

Если осциллограф обладает высокой чувствительностью по напряжению, что справедливо для большинства современных осциллографов, то можно улучшить параметры входной цепи применяя компенсированные делители напряжения. Они выполняют и еще одну важную функцию: увеличивают предельно-допустимый уровень напряжения, подаваемый на вход осциллографа. Без делителей этот уровень обычно не превышает 50 В, а с делителем 1:10 увеличивается до 400—500 В.

Порою даже применение стандартного делителя позволяет уменьшить искажения формы наблюдаемых импульсов. Возьмем, к примеру, стандартный делитель от осциллографа ОСУ20 и, установив его переключатель в положение 1:10, подадим на вход осциллографа испытательный прямоугольный сигнал с частотой 100 КГц. Увеличив чувствительность осциллографа в 10 раз, получим на экране форму импульсов, показанную на рис. 8.6.

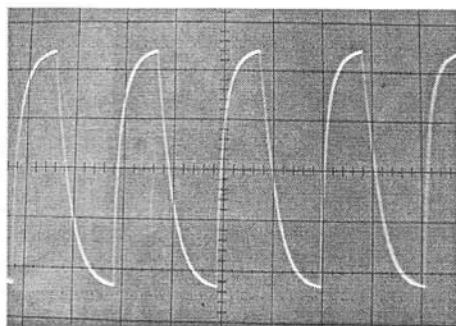


Рис. 8.6. Искажения прямоугольного импульса после увеличения выходного сопротивления генератора на 51 кОм, но при подаче сигнала через делитель 1:10

Мы видим, что искажения формы импульсов довольно заметно уменьшились, хотя и явно наблюдаются и на этот раз. Но амплитуда импульсов уже почти достигает исходной величины. Это свидетельствует о том, что входная емкость осциллографа при применении делителя заметно уменьшилась. Разберемся в чем тут дело.

Компенсированные делители строятся по схеме, приведенной на рис. 8.7. Собственно делитель напряжения строится на резисторах R_1 и R_2 , причем R_2 может быть просто входным сопротивлением осциллографа. Параметры делителя на постоянном токе вычисляются по формулам:

$$R_{BX} = R_1 + R_2 \text{ и } K_d = R_2 / (R_1 + R_2).$$

Например, если $R_2 = 1$ МОм и $R_1 = 9$ МОм, то имеет $R_{BX} = 10$ МОм и $K_d = 1/10$. Таким образом, входное сопротивление увеличено в 10 раз, но в 10 раз падает и уровень напряжения, поступающего на вход осциллографа.

Конденсаторы C_1 и C_2 служат для коррекции АЧХ и переходной характеристики делителя. Цепь $R_1 C_1$ вызывает подъем АЧХ на высоких частотах, а цепь $C_2 R_2$ дает завал на высоких частотах. При определенном выборе постоянных времени этих цепей возможна компенсация искажений, откуда и название — компенсированные делители. В самом деле, для коэффициента передачи делителя можно записать:

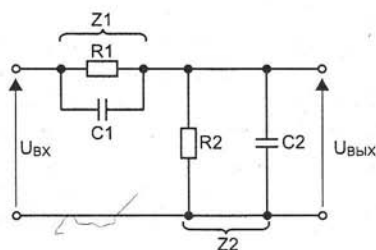


Рис. 8.7. Схема компенсированного делителя осциллографа

$$K_d = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega\tau_2}}{\frac{R_1}{1 + j\omega\tau_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega\tau_2}}.$$

Если $\tau_1 = \tau_2$, то значение K_d определяется как:

$$K_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Таким образом, при равенстве постоянных времени цепей $R_1 C_1$ и $C_2 R_2$ коэффициент передачи делителя перестает зависеть от частоты. Практически, для достижения условия компенсации емкость C_1 нужно подстраивать, например с помощью подстроечного конденсатора переменной емкости. Для делителя 1:10 резистор R_1 должен быть равен $9R_2$. Это означает, что емкость C_1 должна быть в 9 раз меньше входной емкости C_2 . Входная емкость делителя определяется последовательным соединением C_1 и C_2 :

$$C_{ВХ ДЕЛ} = C_1 \frac{C_2}{C_1 + C_2} \approx C_1.$$

Приближенное значение справедливо при $K_d \gg 1$ и $C_1 \ll C_2$. При $K_d = 10$ входная емкость делителя почти в 10 раз меньше входной емкости осциллографа. Следует помнить, что в C_2 входит не только истинная входная емкость осциллографа, но и емкость монтажа и кабеля. Поэтому на самом деле уменьшение входной емкости делителя по сравнению с входной емкостью осциллографа будет не столь заметным. Тем не менее, именно это и объясняет заметное уменьшение искажений импульсов при работе с делителем. Отсюда вывод: если чувствительность по входу Y позволяет наблюдать сигнал с делителем, то всегда применяйте его. Это заодно является и средством защиты входов от больших напряжений.

Увеличение активной составляющей входного сопротивления делителя не всегда полезно, поскольку ведет к изменению нагрузки на испытуемое устройство и получению разных результатов при отсутствии делителя и при его применении. Поэтому делители часто проектируются так, что бы входное сопротивление осциллографа оставалось неизменным как при работе без делителя, так и при работе с ним. В этом случае делитель не увеличивает входное сопротивление осциллографа, но все же уменьшает входную емкость.

8.1.7. Установка точной компенсации делителя

Конструкция стандартного щупа с делителем 1:10 современного осциллографа представлена на рис. 8.8. Для подключения делителя к нужному месту испытывае-



Рис. 8.8

мой схемы используется миниатюрный крючок, обнажаемый при помощи отжима. На корпусе делителя имеется миниатюрный переключатель — движок, который отключает делитель в положении 1:1 или включает его в положении 1:10. В конце провода у разъема подключения ко входу осциллографа имеется подстроечный конденсатор переменной емкости — *триммер*. Им и устанавливается компенсация (с помощью маленькой отвертки).

Правильная установка триммера позволяет наблюдать прямоугольные импульсы калибратора практически без искажений — рис. 8.4. Допустимы очень небольшие выбросы на фронтах, но вершины импульсов должны быть строго горизонтальными.

Если емкость C_1 меньше заданной из условия компенсации, то будет иметь место недокомпенсация искажений делителя. При этом осциллограммы меандра имеют характерные подъемы вершины — рис. 8.9. В этом случае преобладает интегрирование сигнала.

Напротив, если емкость C_1 выше, чем нужно для компенсации, будут наблюдаться осциллограммы, показанные на рис. 8.10. При этом наблюдаются заметные выбросы на фронтах импульсов и спад их вершины. В данном случае преобладает дифференцирование импульсного сигнала. Кстати, к такого рода искажениям низкочастотных импульсов ведет и применение разделительной RC -цепи на входе осциллографа, применяемой для отсева постоянной составляющей сигналов.

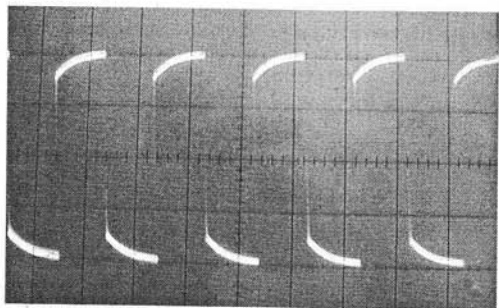


Рис. 8.9. Осциллограммы меандра при недокомпенсации искажений делителя

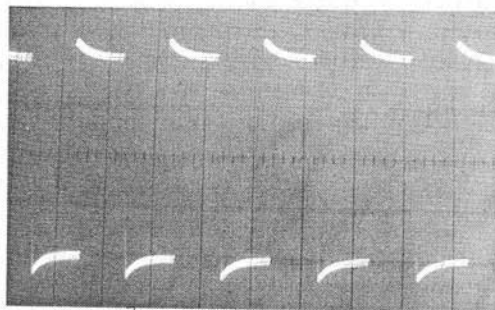


Рис. 8.10. Осциллограммы меандра при перекомпенсации делителя

Еще раз уместно напомнить, что на практике нужна точная компенсация делителей и форма меандра должна быть почти идеальной — как на рис. 8.4. При неточной компенсации возможны заметные искажения формы импульсов, причем не только меандра. Для подстройки компенсации обычно пользуются сигналом калибратора, выдающего симметричные прямоугольные импульсы — меандр.

8.1.8. Лабораторные испытания аналоговых осциллографов

Если осциллограф используется в научной работе или при точных измерениях, то его временные и частотные параметры должны быть достаточно точно измерены и, по возможности, откалиброваны. К сожалению, это требует применения специальных приборов и методик и зачастую возможно только в специализированных измерительных лабораториях.

В России до сих пор действует ГОСТ 8.311-78 «ГСИ. Осциллографы электронно-лучевые. Методы и средства поверки», который был разработан более четверти века тому назад и ныне безнадежно устарел. Тем не менее, проверка осуществляется по нему. Как уже отмечалось, проверка коэффициентов чувствительности для современных цифровых осциллографов рекомендуется на постоянном токе, но возможна и с помощью калибраторов, вырабатывающих меандр на частоте 1 кГц. Имеющиеся в России старые калибраторы ПХ типа И1-11, И1-14, И1-15 и И1-12 полноценной проверки современных широкополосных аналоговых и цифровых осциллографов не обеспечивают.

Для измерения времен нарастания и установления переходных характеристик современных осциллографов нужны специальные генераторы испытательных импульсов со временем нарастания в доли нс. Один из таких приборов HZ60-3 с названием Scope Tester (осциллографический тестер) выпускается фирмой HAMEG. Его внешний вид показан на рис. 8.11.

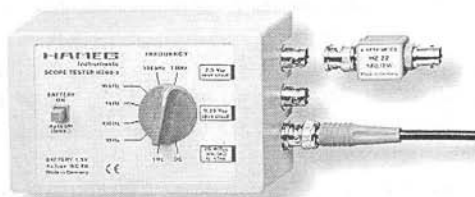


Рис. 8.11. Осциллографический тестер HZ60-3

Этот очень простой прибор с батарейным питанием имеет следующие технические характеристики:

- 7 высокостабильных кварцеванных частот для калибровки разверток: 1-10-100 Гц, 1-10-100 КГц и 1 МГц
- Калиброванные постоянные напряжения
- Выход импульсов с временем нарастания менее 1 нс
- 3 уровня напряжений: 25 мВ на нагрузке 50 Ом, 0,25 В и 2,5 В
- Работа от батарей — 4×1,5 В (элементы AA)
- Три высокоэкономичные интегральные микросхемы
- Размеры: 125×80×42 мм

Для проверки переходной характеристики осциллографа достаточно подать на него импульсный сигнал от тестера и установками синхронизации и развертки добиться наблюдения фронта импульса. — рис. 8.12. Время нарастания переходной характеристики определяется как время, отсчитанное на уровнях роста напряжения от 0,1 до 0,9 от амплитуды импульса, видимого на экране.

Даже с помощью специального прибора измерение временных параметров широкополосных аналоговых осциллографов связано с большими проблемами. Та-

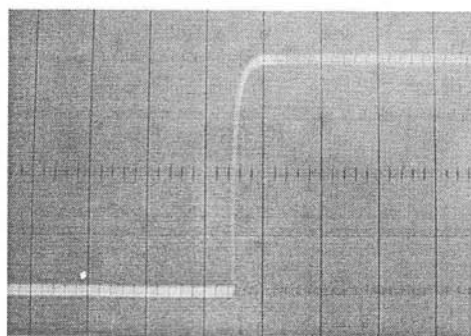


Рис. 8.12. Наблюдение фронта импульса от тестера

кие измерения приходится выполнять на самых коротких развертках, но даже в этом случае развернуть фронт импульса на значительную часть экран удается далеко не всегда. Кроме того, надо обеспечить время нарастания испытательного импульса $t_{\text{ФН}} \ll t_{\text{ФО}}$, где $t_{\text{ФО}}$ — время нарастания осциллографа. Поскольку $t_{\text{ФО}} = 0,35f_{\text{в}}$, то уже для 350 МГц осциллографа имеем $t_{\text{ФО}} = 1$ нс, т. е. для испытания такого осциллографа нужны испытательные импульсы с временем нарастания заметно меньше 1 нс. Если по осциллограмме определить $t_{\text{ОСЦ}}$, то время нарастания осциллографа можно оценить как:

$$t_{\text{ФО}} = \sqrt{t_{\text{ОСЦ}}^2 - t_{\text{ФН}}^2}.$$

Например, если $t_{\text{ОСЦ}} = 2$ нс, а $t_{\text{ФН}} = 1$ нс, то $t_{\text{ФО}} = 1,73$ нс.

Измерение АЧХ каналов вертикального (иногда и горизонтального) отклонения осциллографов выполняются подачей на вход синусоидального сигнала с рядом частот и постоянной амплитудой. При этом вычисляется амплитуда этого сигнала по осциллограмме и строится график АЧХ. Верхняя частота среза осциллографа определяется как частота синусоидального сигнала, на которой его измеренная амплитуда падает до уровня 0,7 (−3 дБ) от уровня синусоиды на низкой частоте — обычно 1 кГц. Обычно АЧХ осциллографа соответствует АЧХ НЧ-фильтра Гаусса. Как известно, такая АЧХ дает переходную характеристику без выброса. Но, из-за наличия в усилителе Y корректирующих цепей и паразитных индуктивностей у пластин трубки, нередко АЧХ отклоняется от гауссовской, что ведет к появлению выброса и даже его колебательному характеру.

Схема для снятия АЧХ осциллографов представлена на рис. 8.13. Сигнал от генератора синусоидальных колебаний подается на вход тройника. С одного его выхода сигнал подается на вход осциллографа, с другого на контрольный ВЧ-вольтметр. С его помощью контролируется постоянство амплитуды синусоидального напряжения, подаваемого на осциллограф. Желательно, чтобы при измерениях размер осциллограммы по вертикали составлял 60—80 % от полного размера экрана по вертикали. Обязательно согласование измерительного тракта по волновому сопротивлению кабелей (обычно 50 Ом).

Для проведения измерений можно использовать различные генераторы. Например, простой и малогабаритный генератор GRG-450В фирмы Good Will (рис. 8.14) генерирует синусоидальные напряжения от 0,1 до 150 МГц, что позволяет проверять многие сервисные осциллографы, кроме широкополосных. Однако выходное напряжение этого генератора не калибровано и сильно меняется при изменении частоты. Поэтому его контроль ВЧ вольтметром обязателен.

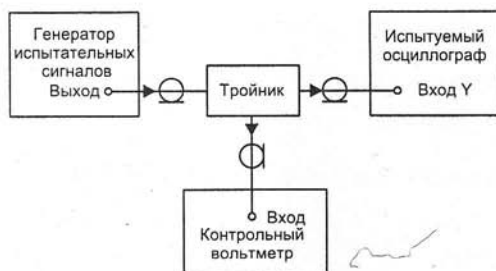


Рис. 8.13. Измерительная схема для снятия АЧХ осциллографа



Рис. 8.14. Генератор синусоидальных сигналов GRG-450B фирмы Good Will

Вообще стоит отметить, что дешевые ВЧ-генераторы, вроде GRG-450B фирмы Good Will, часто дают искаженную форму синусоидального сигнала. Искажения видны даже на глаз. В этом случае замер уровня сигнала даже ВЧ-вольтметром будет давать неточные показания и испытания окажутся довольно грубыми. Генераторы стандартных сигналов с хорошей формой выходного сигнала достаточно дорогие устройства и проверка осциллографов с их помощью осуществляется в специализированных поверочных лабораториях.

8.2. Работа с разверткой и синхронизация

8.2.1. Изменение режимов развертки

Осциллограммы на экране осциллографа получаются как результат развертки сигналов во времени. Для этого служит генератор пилообразных импульсов, называемый генератором развертки осциллографа — иногда просто разверткой. Он может работать в различных режимах работы, переключаемых с помощью переключателя режимов работы развертки MODE (не путать с MODE в тракте вертикального отклонения). Например, в осциллографе ОСУ20 этот переключатель имеет следующие позиции:

- AUTO — автоколебательный режим, при котором луч (лучи) есть на экране даже в отсутствии сигнала синхронизации;
- NORM — ждущий режим, когда развертка срабатывает от однократного или повторяющегося импульса синхронизации;
- TV-V — запуск развертки телевизионным сигналом кадров;
- TC-H — запуск развертки телевизионным сигналом строк.

В автоколебательный режим развертка переводится для начального поиска сигнала или при исследовании периодически повторяющихся сигналов. В этом случае даже при отсутствии сигналов на экране виден один луч или два луча в двухканальном осциллографе — рис. 8.1. У некоторых осциллографов нет позиции AUTO, а переход в автоколебательный режим возможен с помощью ручки чувствительности развертки к запуску (TRIG LEVEL — уровень запуска триггера развертки). Эта ручка позволяет изменять стартовую точку запуска. На рис. 8.15 это показано на примере синусоидального сигнала, фаза которого меняется при изменении уровня запуска развертки.

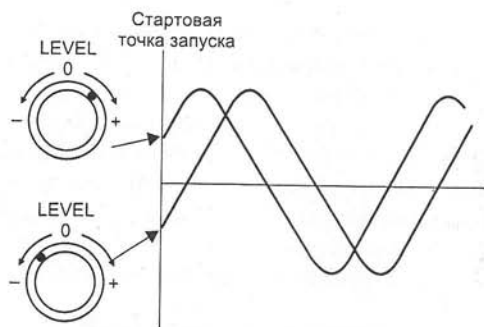


Рис. 8.15. Изменение уровня запуска развертки при синусоидальном сигнале

8.2.2. Запуск нарастающим или спадающим изменением сигнала

Действие ручки TRIG LEVEL при просмотре прямоугольных импульсов показано на рис. 8.16. Здесь особенно важно отметить роль полярности запуска — ее изменение позволяет производить запуск развертки нарастающей или спадающей частями импульса (его передним или задним фронтом). Для переключения этого служит кнопка SLOPE, имеющая позиции (+) и (-) для запуска нарастающим и спадающим изменениями сигнала запуска.



Рис. 8.16. Влияние полярности запуска развертки при просмотре прямоугольных импульсов

8.2.3. Установка длительности и растяжка развертки

Для установки длительности развертки служит переключатель, содержащий ряд позиций. Для каждой позиции указывается длительность развертки, например 1 мкс/дел, 2 мкс/дел, 5 мкс/дел и т. д. (по правилу 1, 2, 5). Число позиций зависит от типа осциллографа. Например, у осциллографа ОСУ20 это позиции от 0,2 мкс/дел до 2 с/дел.

Некоторые осциллографы, например ОСУ20, имеют дополнительно переключатель растяжки развертки в 10 раз, переключатель CALL-VAR установки калиброванных и плавно изменяемых длительностей развертки и ручку плавного изменения длительности развертки VARIABLE (работает в положении переключателя VAR).

Следует отметить, что при использовании растяжки развертки ее длина увеличивается в 10 раз, но на экране видна только примерно 1/10 часть сигнала. С помощью ручки перемещения луча по горизонтали \leftrightarrow можно перемещать область

просмотра по всему лучу, т. е. в простейшем виде осуществлять функцию «лупы времени». Этот полезный прием иллюстрирует рис. 8.12, на котором представлено выделение переднего фронта наблюдаемого импульса.

У современных аналогово-цифровых и цифровых осциллографов возможна запись сигналов в память большого размера. Видимое изображение составляет лишь малую часть развертки сигнала во времени, соответствующую так называемому *окну просмотра*. Перемещение окна просмотра по записи сигнала осуществляется специальной (нередко многооборотной) ручкой, но у большинства дешевых осциллографов ее функции объединены с функциями ручки смещения луча по горизонтали.

8.2.4. Наблюдение телевизионных сигналов

Некоторые осциллографы, специально предназначенные для просмотра телевизионных сигналов и исследования телевизионных устройств, имеют специальные схемы развертки, позволяющие выделять из телевизионного сигнала (рис. 8.17) любой кадр и любую строку.

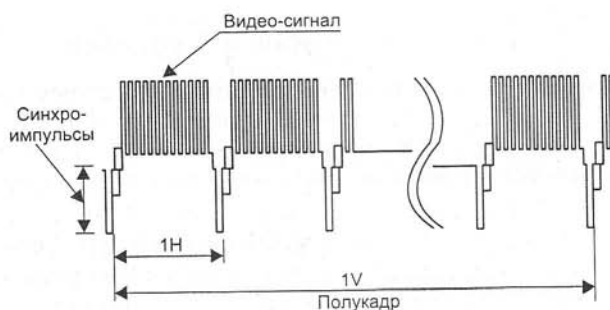


Рис. 8.17. Упрощенный вид телевизионного сигнала

Однако в осциллографах широкого применения возможности развертки в этой части более скромные. Они позволяют запускать развертку кадровыми или строчными импульсами синхронизации. Для этого переключатель режимов запуска развертки MODE имеет позиции TV-V и TV-H. Обычно запуск развертки телевизионным сигналом выполняется при отрицательной полярности TRIG LEVEL.

В положении TV-V выделяются кадровые синхрои импульсы и можно просматривать кадры видеосигнала. Для наблюдения одного кадра надо установить переключатель скорости развертки в положение 2 мс/дел, а для наблюдения двух кадров в положение 5 мс/дел.

В положении TV-H выделяются строчные синхрои импульсы и можно просматривать видеосигнал строк. В этом случае коэффициент развертки надо установить равным 10 мкс/дел. Удобный масштаб изображения можно установить ручкой VARIABLE развертки.

8.2.5. Выбор источника запуска и синхронизации развертки

Для выбора источника запуска и синхронизации развертки у осциллографов имеется специальный переключатель — TRIGGER SOURCE у осциллографа ОСУ20. Последний имеет следующие позиции:

- VERT (DUAL ALT) — в одноканальном режиме синхронизация от канала 2, в двухканальном поочередно с канала 1 и канала 2;

- CH1 — синхронизация от канала 1;
- EXT — синхронизация от внешнего источника (вход EXT TRIG IN);
- LINE — синхронизация от сети.

В двух первых положениях переключателя, синхронизация осуществляется исследуемыми сигналами. Однако при изменении параметров сигналов приходится подстраивать синхронизацию. Кроме того, у простых осциллографов линия задержки в каналах вертикального отклонения часто отсутствует, поэтому наблюдать передний фронт импульсных сигналов полностью не удается — часть фронта обрезаается из-за задержки запуска развертки. В таких условиях удобно пользоваться внешней синхронизацией. Наконец при исследовании электротехнических устройств полезна синхронизация от сети переменного тока — позиция переключателя LINE.

8.3. Измерение параметров сигналов

8.3.1. Измерение амплитуды и уровней сигнала

Измерение параметров сигнала одно из самых известных применений осциллографа. Наличие калиброванных коэффициентов для чувствительности по оси Y позволяет легко проводить амплитудные измерения. На рис. 8.18 дан пример измерения двойного размаха синусоидального напряжения. Осциллограмма дана с инверсией цвета — она выглядит как черная линия. Нетрудно заметить, что двойной размах осциллограммы составляет 4 больших деления. Если чувствительность осциллографа равна 1 В/дел, то это значит, что двойной размах синусоидального напряжения равен 4 В. Следовательно амплитуда синусоидального напряжения равна 2 В, а его эффективное значение $2 \cdot 0,707 = 1,414$ В.

Для амплитудных измерений импульсных сигналов (рис. 8.19) надо наметить нулевую линию (REFERENCE LINE) и отсчитывать уровни сигнала относительно нее. Эта линия не обязательно должна совпадать с центральной линией масштабной сетки. Например, за нулевую линию отсчета на рис. 8.19 взята первая линия. Высота импульса в этом случае составляет 5 делений. Умножив это значение на коэффициент отклонения луча по оси Y можно вычислить амплитуду импульса. Аналогично можно оценить уровни полков импульса, представленного на рис. 8.19.

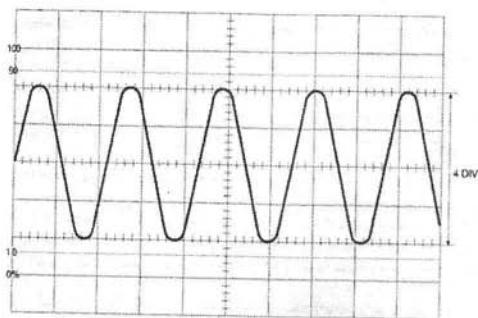


Рис. 8.18. Измерение двойного размаха синусоидального напряжения

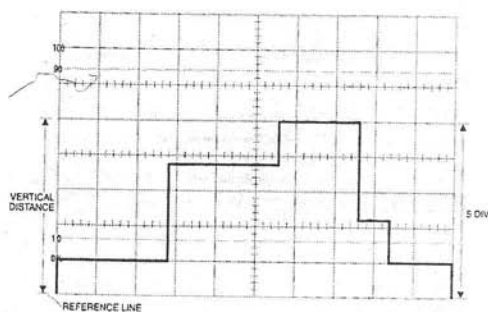


Рис. 8.19. Измерение параметров сложного импульса

8.3.2. Измерение временных интервалов

Столь же просто измеряются временные параметры. Для этого служит масштабная сетка с делениями по горизонтальной оси. По ней отсчитывается расстояние, характеризующее измеряемый процесс, и оно умножается на коэффициент временной развертки. Например, для одной из синусоид на рис. 8.20 период колебаний определяется как 7,2 деления. Если коэффициент развертки установлен 10 мкс/дел, то имеем $T=72$ мкс и $f=1/T=13,89$ кГц.

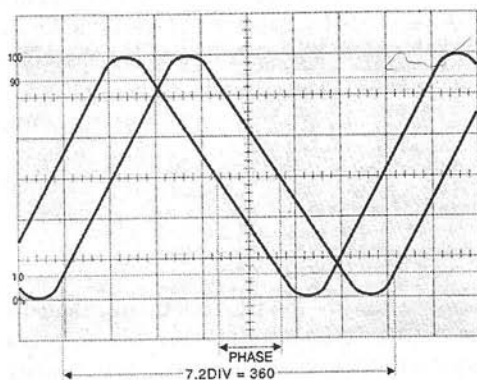


Рис. 8.20. Измерение периода синусоидального сигнала и фазы

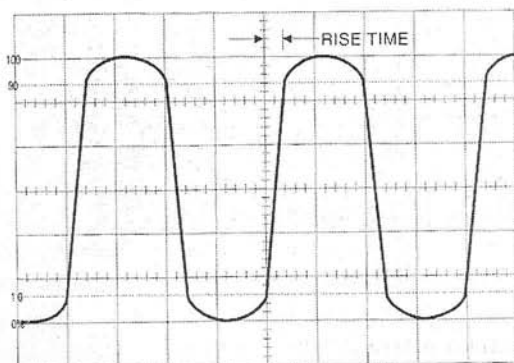


Рис. 8.21. Определение времени нарастания сигнала с выхода ограничителя

На масштабной сетке некоторых осциллографов имеются линии, принимаемые за 0, 10, 90 и 100% от уровня сигнала, располагаемого между линиями 0 и 100%. В этом случае линии 10 и 90% используются для отсчета моментов времени, разность которых задает время нарастания и спада импульсов. На рис. 8.21 показан пример вычисления времени нарастания RISE TIME сигнала с выхода ограничителя синусоидального напряжения. Время нарастания оценивается как время, за которое сигнал нарастает от 10% уровня от полного размаха до 90% уровня. Время спада можно оценить как время спада напряжения от уровня 90% от полного размаха до 10% от полного размаха.

Аналогичным образом оцениваются времена нарастания и спада импульсных сигналов. Для этого плавной установкой чувствительности добиваются размаха напряжения, при котором нижний и верхний уровни соответствуют линиям 0% и

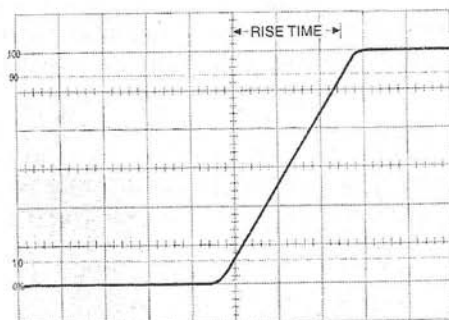


Рис. 8.22. Пример измерения времени нарастания импульсного перепада

100%, затем осциллограмму смещают по горизонтали так, чтобы было удобно измерить времена на уровнях 10% и 90%. Пример измерения времени нарастания импульсного перепада таким методом представлен на рис. 8.22.

8.3.3. Измерение сдвига фаз синусоидальных сигналов

Для измерения фазы синусоидального сигнала необходима точка отсчета его начала. Поскольку она, как правило, не известна, то принято говорить об измерении сдвига фаз между двумя одинаковыми по частоте синусоидальными сигналами — рис. 18.20. Если один сигнал сдвинут относительно другого на период T , то это означает сдвиг фаз на угол 2π радиан или на 360° . На рис. 8.20 период колебаний занимает 7,2 дел.

Для определения сдвига фаз двух сигналов надо подать их на входы каналов CH1 и CH2 осциллографа и добиться равенства их амплитуд и положений по вертикали. На рис. 8.20 разность фаз определена длиной отрезка PHASE. Поделив ее на 7,2 деления и умножив результат на 360° получим искомый фазовый сдвиг в градусах, а умножив на 2, получим фазовый сдвиг в радианах.

Измерение сдвига фазы вполне понятно для двух синусоидальных сигналов. Однако, если один из сигналов не синусоидальный, то можно говорить об этом только в том случае, если оба сигнала имеют точно одинаковые частоты. В этом случае помимо чисто геометрического метода измерения фазы (по временному сдвигу сигналов) могут использоваться и другие, более изощренные методы. Мы их рассмотрим позже.

8.4. Измерения в режиме X-Y

8.4.1. Измерение фазового сдвига с помощью фигур Лиссажу

Некоторые осциллографы имеют режим X-Y, т. е. позволяют строить параметрические кривые, полученные подачей двух сигналов на входы каналов X и Y. Их обычно называют *фигурами Лиссажу*. В осциллографе ОСУ20 режим X-Y устанавливается поворотом ручки установки коэффициентов развертки по часовой стрелке в последнее положение. При этом канал CH1 становится каналом X, а канал CH2 каналом Y. Выполним несколько экспериментов по использованию режима XY.

Вначале подадим от генератора звуковой частоты (например, ГЗ-111) сигнал с частотой 20 Гц на оба канала с открытым входом (режим DC). Нетрудно сообразить, что в результате получится прямая линия, расположенная под углом 45° , если чувствительность по обоим каналам была установлена одинаковой — рис. 8.23. Этот случай иллюстрирует измерение сдвига фаз для случая, когда он близок к нулю (на рис. 8.23 видно, что прямая все же чуть расслаивается в эллипс).

Теперь переведем усилитель CH1 (Y) в режим закрытого входа. Это означает, что входной сигнал теперь подается через разделительную RC-цепь. Такая цепь на низкой частоте в 20 Гц вносит заметный фазовый сдвиг. В результате прямая линия на экране осциллографа превращается в эллипс (рис. 8.24) — это фигура Лиссажу для случая подачи на входы осциллографа двух сигналов с одинаковой частотой, но разной фазой.

Для более точного измерения фазового сдвига (до нескольких градусов) надо определить параметры фигуры Лиссажу A и B, показанные на рис. 8.25. Тогда фазовый сдвиг определяется как $\varphi = \sin^{-1}(A/B)$. Строго говоря, этот результат отно-

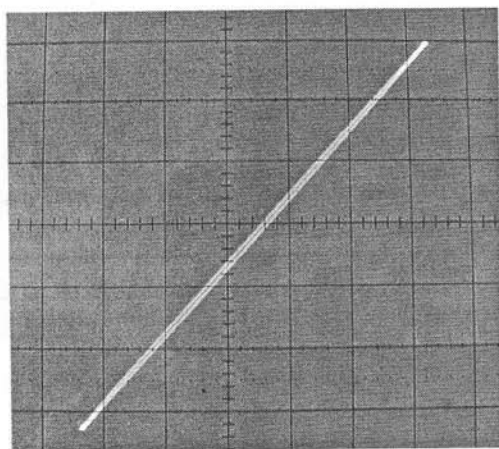


Рис. 8.23. Фигура Лиссажу при подаче на входы X и Y одинакового синусоидального сигнала с частотой 20 Гц

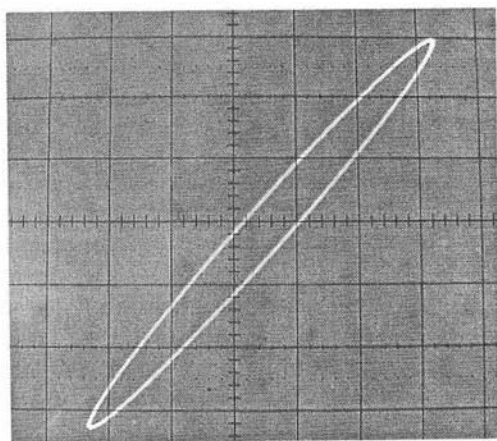


Рис. 8.24. Фигура Лиссажу при подаче на входы X и Y одинакового синусоидального сигнала с частотой 20 Гц с разной фазой

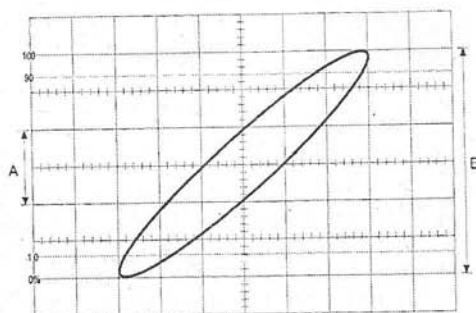


Рис. 8.25. К измерению фазового сдвига двух синусоидальных сигналов

сится только к первому квадранту, так что каждому значению фазового сдвига соответствуют еще 3 значения.

На рис. 8.26 показан вид фигур Лиссажу для нескольких значений фазового сдвига. Эти фигуры позволяют судить о точности описанного метода измерения разности фаз. Разумеется, в наше время кажется куда проще измерить фазы с помощью специального прибора — фазометра. Однако это куда более редкий прибор, чем осциллограф, который всегда под рукой. Впрочем, измерение фазы ныне есть даже у некоторых мультиметров.

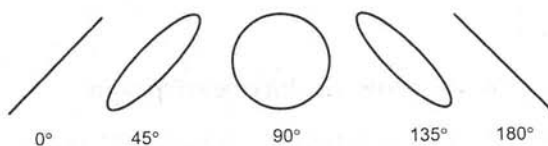


Рис. 8.26. Фигуры Лиссажу для двух синусоидальных сигналов с одинаковой частотой и разной фазой

8.4.2. Сравнение частот с помощью фигур Лиссажу

Фигуры Лиссажу можно использовать и для сравнения частот двух сигналов. В наше время частоту сигнала довольно просто и точно можно измерить с помощью цифрового частотомера или даже мультиметра. Однако если их нет, то несложно измерить частоту сигнала путем сравнения ее с частотой опорного генератора. Несмотря на примитивность этого метода он находит широкое применение для сравнения частот различных генераторов (даже кварцевых) с частотами высокостабильных сигналов эталонов частоты. Такие сигналы передаются, в частности, по радио.

Прежде чем продолжить эту тему, проведем простой эксперимент: измерим частоту наводки сети переменного тока путем ее сравнения с частотой звукового генератора ГЗ-111. Для этого на вход X подадим сигнал с генератора, а на вход Y сигнал наводки. Для этого просто коснемся этого входа рукой. Регулируя частоту генератора можно добиться очень медленного вращения фигуры на экране осциллографа (рис. 8.27) или даже ее остановки.

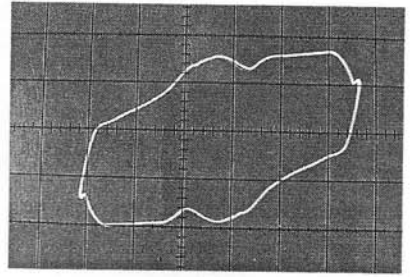


Рис. 8.27. Пример сравнения близких частот

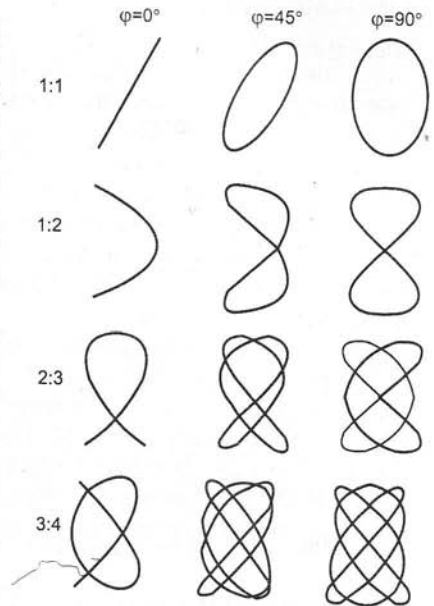


Рис. 8.28. Фигуры Лиссажу при сравнении кратных частот

Если фигура неподвижна и имеет вид эллипса (возможно искаженного), то это означает точное равенство частот сигналов. Если фигура делает 1 оборот в секунду, то это означает расхождение частот на 1 Гц, а если за 100 секунд, то расхождение составит 0,01 Гц. Таким образом, данный метод позволяет с высокой точностью оценивать малые расхождения частот. Именно поэтому он рекомендуется для сравнения частот высокостабильных по частоте сигналов.

Если вращающаяся фигура напоминает цифру 8 или знак ∞ , то частоты сигналов различаются в два раза. На рис. 8.28 показаны фигуры Лиссажу для кратных частот сигналов, определяемых соотношением:

$$\frac{f_X}{f_Y} = \frac{m}{n},$$

где m и n — целые числа.

8.4.3. Осциллограф в роли характериографа

Осциллограф вместе с генератором синусоидального напряжения нетрудно превратить в *характериограф* — прибор для снятия вольтамперных характеристик различных нелинейных приборов, например, варисторов, диодов, кремниевых

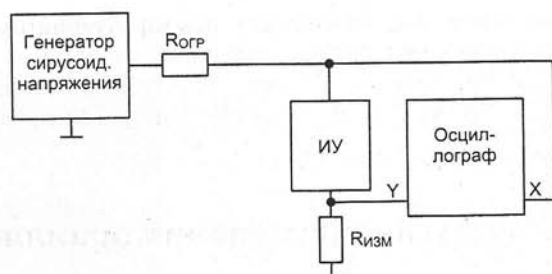


Рис. 8.29. Схема характериографа для снятия вольтамперных характеристик двухполюсников

стабилитронов и т. д. Простейшая схема характериографа на базе осциллографа ОСУ20 и звукового генератора ГЗ-111 представлена на рис. 8.29.

Ограничивающий резистор $R_{огр}=16$ кОм задает через испытуемое устройство ИУ ток, амплитуда которого ограничена. Этот ток контролируется осциллографом по падению напряжения на измерительном резисторе $R_{изм}=100$ Ом. Для этого напряжение с этого резистора подается на вход усилителя канала Y. Напряжение с ИУ подается на вход X осциллографа.

Если в качестве испытуемого прибора ИУ применить маломощный кремниевой диод, то на экране осциллографа будет построена его вольтамперная характеристика (ВАХ), показанная на рис. 8.30. Она содержит участок резкого роста тока в прямом направлении и пологий участок с очень малым током в обратном направлении включения. Эта характеристика вполне соответствует теоретической для кремниевого диода.

Если использовать вместо диода кремниевый стабилитрон КС156А, то помимо роста прямого тока при малом напряжении на диоде (примерно 0,8 В) будет наблюдаться и рост тока в обратном направлении, связанный с электрическим пробоем такого диода — рис. 8.31. Нетрудно заметить, что пробой в обратном направлении у этого диода выражен менее резко, чем отпирание диода в прямом направлении. ВАХ кремниевого стабилитрона, как и ВАХ диода, имеют вид, хорошо соответствующий виду теоретических расчетных ВАХ этих приборов.

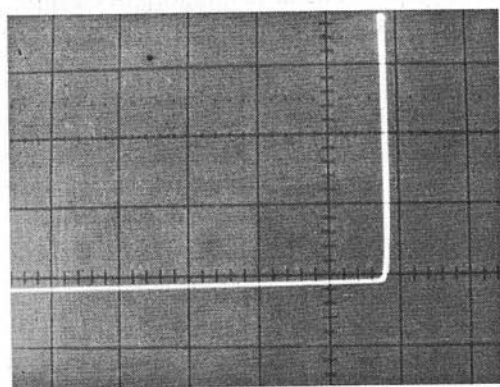


Рис. 8.30. Вольтамперная характеристика маломощного кремниевого диода

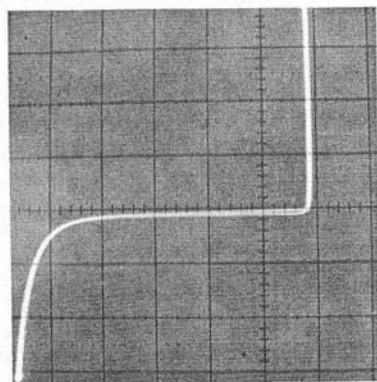


Рис. 8.31. Вольтамперная характеристика кремниевого стабилитрона

С помощью характериографа можно снимать характеристики и других приборов, например резисторов, варисторов, туннельных диодов и т. д. На основе этого принципа строятся специальные характериографы, позволяющие снимать не только одну кривую, но и семейства ВАХ таких приборов, как биполярные и полевые транзисторы.

8.5. Некоторые другие применения осциллографа

8.5.1. Наблюдение амплитудно-модулированных сигналов

Амплитудно-модулированные колебания это обычно синусоидальные колебания, амплитуда которых меняется в соответствии с законом модулирующего сигнала. Они находят широкое применение в радиотехнике [44]. Достаточно отметить, что радиовещание с амплитудной модуляцией до сих пор ведется на длинных, средних и коротких волнах. Многие генераторы высокочастотных сигналов имеют возможности генерации амплитудно-модулированных синусоидальных колебаний, что необходимо для испытания различных устройств, например радиоприемников с амплитудной модуляцией. В тоже время у простых и дешевых генераторов, например GRG-450B фирмы Good Will (рис. 8.14), не предусмотрена возможность измерения коэффициента амплитудной модуляции. В таких случаях помочь может аналоговый осциллограф.

Для наблюдения амплитудно-модулированных колебаний удобно использовать двухканальный осциллограф, например ОСУ20. Подключите выход модулирующего сигнала генератора GRG-450B ко входу канала CH1, а выход ВЧ сигнала генератора ко входу CH2 осциллографа. Установите ручку регулировки коэффициента модуляции в нулевое положение. Затем задайте частоту генератора равной 1 МГц и установите ручку регулировки амплитуды ВЧ сигнала в среднее положение. Получающиеся при этом осциллограммы показаны на рис. 8.32. Верхний луч показывает отсутствие модулирующего сигнала, а нижний наличие ВЧ-сигнала. При этом он выглядит как широкая полоса, поскольку длительность развертки выбрана намного большей, чем период ВЧ-сигнала.

Теперь поверните ручку регулировки коэффициента модуляции и установите ее в среднее положение. Ручкой регулировки уровня запуска развертки добейтесь устойчивого изображения на экране осциллографа. Теперь осциллограммы примут вид, показанные на рис. 8.33. Сверху видна осциллограмма модулирующего

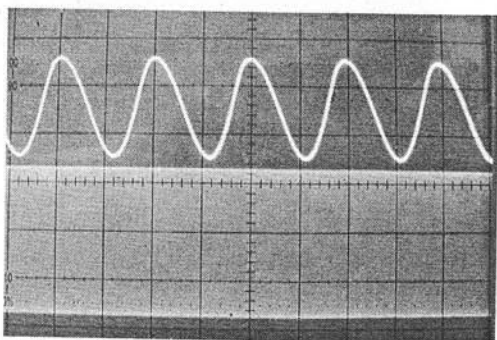


Рис. 8.32. Подготовка к наблюдению амплитудно-модулированного сигнала

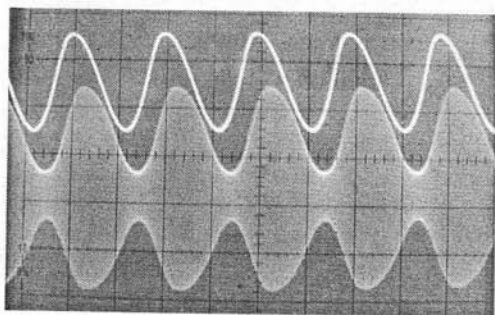


Рис. 8.33. Наблюдение модулирующего и модулированного сигналов

сигнала, а снизу промодулированного ВЧ-сигнала. Для получения устойчивых осциллограмм целесообразно развертку осциллографа осуществлять только модулирующим сигналом и в режиме синхронизации от внешнего источника. Только тогда пики и впадины модулирующего и ВЧ сигналов будут точно совпадать.

Если амплитуда модулирующего напряжения превышает уровень 100% модуляции, то наступает явление перемодуляции. Такой случай наблюдается, если ручку регулятора коэффициента модуляции генератора GRG-450B установить в крайнее положение при ее вращении по часовой стрелке. Случай перемодуляции иллюстрирует рис. 8.34. В этом случае при близких к нулю уровнях модулированного ВЧ сигнала наблюдаются характерные «полочки», а огибающая ВЧ сигнала становится иной, чем модулирующий сигнал.

Можно ли наблюдать одновременно модулирующий сигнал и ВЧ-напряжение в форме переменного напряжения, а не сплошной полосы? Обычно это трудно сделать из-за слишком большой разности частот модуляции и ВЧ-сигнала — в нашем примере это 1 кГц и 1 МГц (отличие в 1000 раз). Однако, понизив частоту ВЧ сигнала до 100 кГц можно наблюдать оба сигнала одновременно — рис. 8.35.

Наконец, уменьшив длительность развертки, можно отчетливо наблюдать ВЧ-сигнал и только часть периода модулирующего сигнала. Такой случай показан на рис. 8.36. Обратите внимание на то, что форма ВЧ-сигнала генератора

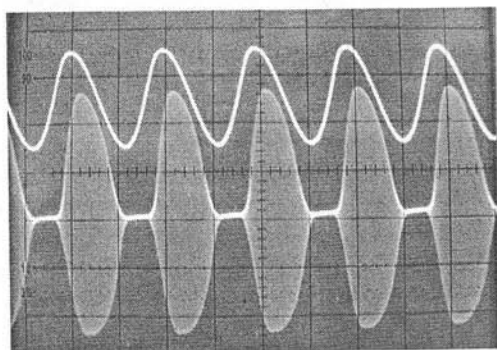


Рис. 8.34. Иллюстрация перемодуляции

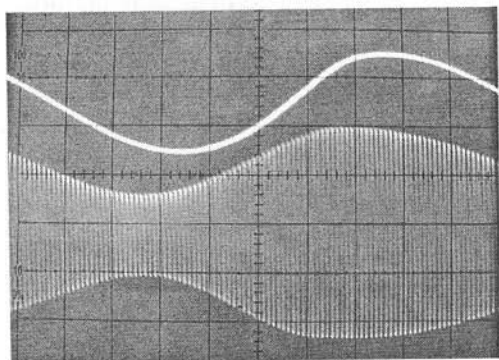


Рис. 8.35. Одновременное наблюдение полного периода модулирующего сигнала и 100 периодов модулированного сигнала

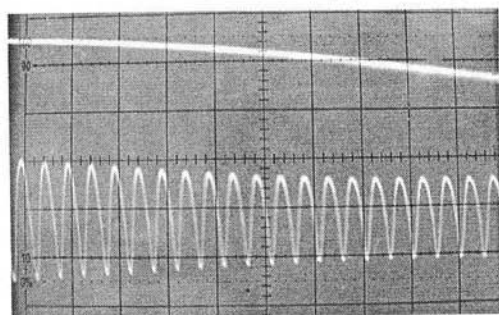


Рис. 8.36. Модулирующий и модулированный сигналы при малой длительности развертки

GRG-450B заметно отличается от синусоидальной, что является недостатком этого простого генератора. И выявляется он осциллографом!

8.5.2. Вычисление коэффициента модуляции

Количественно глубина модуляции характеризуется коэффициентом модуляции K_m . Им называют отношение максимального отклонения амплитуды модулированного напряжения от его среднего уровня. Для его определения по осциллограмме нижнего луча (рис. 6.33) удобно измерить двойную амплитуду модулированного сигнала в точке минимума и в точке максимума. Например, в нашем случае они составят 1 и 4,2 деления. Средняя амплитуда ВЧ колебаний будет их полусуммой, т. е. $(1+4,2)/2=2,6$ дел. Изменение амплитуды будет полуразностью $(4,2-1) \cdot 2=1,6$ дел. Тогда коэффициент модуляции вычисляется как $1,6/2,6 = 0,62$. Следовательно, в процентах коэффициент модуляции равен 62%.

Приведенные примеры показывают, что аналоговый осциллограф обеспечивает полноценный контроль явления модуляции. Правда при условии, что частота несущей модулированного сигнала находится в пределах полосы пропускания канала Y осциллографа.

8.5.3. Применение калибратора для исследования переходных процессов в RC-цепях

Поскольку калибратор осциллографа ОСУ20 генерирует прямоугольные импульсы (меандр) его можно использовать для исследования переходных процессов в RC-цепях. Две такие цепи (дифференцирующая и интегрирующая) представлены на рис. 8.37.

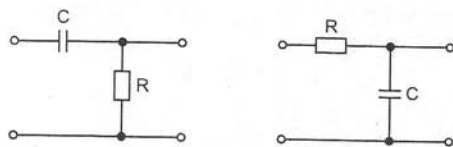


Рис. 8.37. Дифференцирующая (слева) и интегрирующая (справа) RC-цепи

Поскольку выход калибратора выполнен в виде маленькой металлической петли, то для подключения входа исследуемых цепей к калибратору надо использовать провод с маленьким «крокодилом», которым надо закусить петлю калибратора. На рис. 8.38 показаны осциллограммы калибратора (верхний луч) и выхода дифференцирующей цепи, имеющей $R=51$ кОм и $C=1000$ пФ. Сигнал на выходе цепи представляет собой разнополярные перепады напряжения с экспоненциальным спадом. Постоянная времени спада равна $RC=51$ мкс. Переходные процессы заканчиваются за время порядка $3RC$. Меняя R или C можно наблюдать изменение переходных процессов.

На рис. 8.39 показаны осциллограммы напряжений на входе и выходе интегрирующей цепи с указанными выше значениями R и C . Выходное напряжение представляет собой сильно искаженные зарядом и разрядом C через R прямоугольные импульсы. Здесь также переходные процессы заканчиваются за время около $3RC$, а времена нарастания и спада импульсов на выходе цепи составляют $2,3RC$. Проверьте по осциллограмме, так ли это.

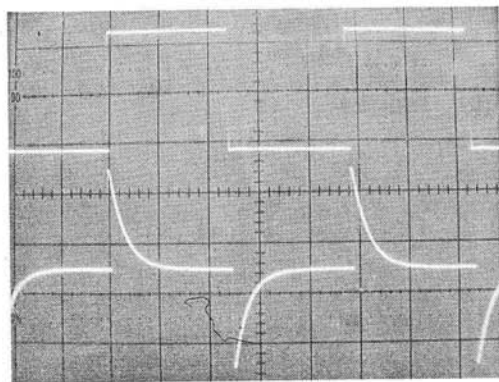


Рис. 8.38. Осциллограммы: калибратора (верхний луч) и выхода дифференцирующей RC-цепи (нижний луч). Масштаб осциллограмм 0,2 В/дел, 0,2 мс/дел

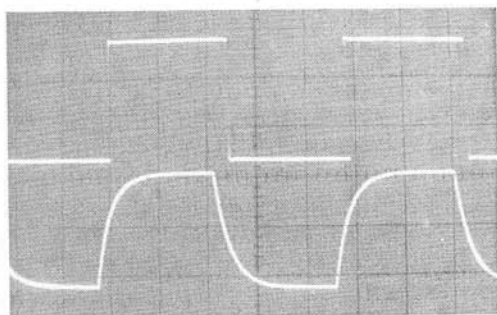


Рис. 8.39. Осциллограммы: калибратора (верхний луч) и выхода интегрирующей RC-цепи (нижний луч). Масштаб осциллограмм 0,2 В/дел, 0,2 мс/дел

8.5.4. Наблюдение переходных процессов в LRC-цепях

Переходные процессы в RC-цепях носят аperiodический характер. В радиотехнических устройствах часто применяются LRC-цепи — рис. 8.40. В них обмен энергией между катушкой индуктивностью L и конденсатором C может носить колебательный характер, что может приводить к характерным колебательным процессам [44]. В частотной области такой цепи характерно возникновение явления резонанса — возрастания напряжения на выходе на некоторой частоте, примерно равной

$$f_p = 1/2\pi\sqrt{LC}.$$

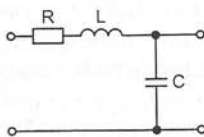


Рис. 8.40. LRC-цепь (резонансный контур)

Подключив выход калибратора ко входу цепи (рис. 8.40), а выход цепи ко входу канала CH2 (на вход CH1 подается сигнал калибратора), можно наблюдать переходные процессы в LRC-цепи. На рис. 8.41 показаны осциллограммы напряжений на входе и выходе цепи, у которой в качестве индуктивности L была взята обмотка выходного трансформатора от транзисторного радиоприемника, а $C=10$ нФ. Роль резистора R выполняло омическое сопротивление обмотки. Быстрое затухание колебательной компоненты переходного процесса говорит о наличии в контуре значительного затухания.

Кстати, потери в контуре рис. 8.40 резко возрастают, если катушка индуктивности (например, дроссель или трансформатор) содержит короткозамкнутые витки. На этом основан один из способов их обнаружения. Зарисуйте или сфотографируйте осциллограммы переходных процессов LRC-цепи с исправным трансформатором или дросселем. Затем сравните их с осциллограммами трансформатора или дросселя, в качестве которого вы сомневаетесь. Если пере-

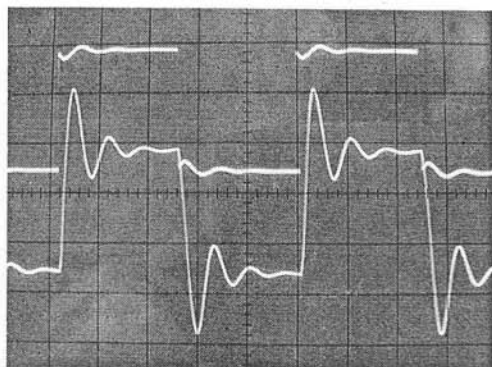


Рис. 8.41. Переходные процессы в LRC-цепи

ходной процесс явно затухает сильнее, то это значит, что в них могут оказаться короткозамкнутые витки.

Приведенные выше примеры могут составить основу лабораторной работы по изучению RC , LRC и других электрических цепей с использованием только осциллографа (и, разумеется, самих исследуемых цепей). Некоторые осциллографы содержат встроенный генератор функциональных колебаний, генерирующий синусоидальные, треугольные и прямоугольные колебания не одной частоты и амплитуды, как у калибратора, а в широком диапазоне их изменения. Это открывает возможности выполнения полноценных исследований самых различных устройств, например описанных выше простых цепей, линий задержки, фильтров и т. д.

8.5.5. Курсорные измерения

Большинство современных осциллографов высокого класса имеют так называемые *курсорные измерения*. Необходимость их введения была обусловлена сложностью обычных осциллографических измерений и их низкой точностью. Например, если надо с помощью осциллографа поддерживать неизменной амплитуду синусоидального сигнала, то придется многократно менять уровень сигнала и положение синусоиды на экране для того, чтобы она вписалась в нужные уровни. Низкая точность осциллографических измерений обусловлена рядом факторов: параллаксом из-за удаления масштабной сетки от слоя ЭЛТ с люминофором, кривизны экрана, низкой точности оценки положения осциллограмм относительно масштабной сетки (на глазок) и т. д. В связи с этим погрешность и обычных осциллографических измерений очень редко бывает меньше 5%.

Курсорные измерения выполняются с помощью специальных прямых линий — курсоров, которые создаются на экране ЭЛТ осциллографа. С помощью ручек управления курсорами эти линии могут плавно перемещаться по экрану — рис. 8.42. Обычно создаются две пары курсоров — горизонтальные для измерения напряжений (уровней) сигнала и вертикальные для измерения временных интервалов. Курсорные измерения обычно проводятся при неподвижной осциллограмме, причем каждый курсор перемещается единственной ручкой управления. Таким образом, вместо манипуляций двумя-тремя ручками приходится работать одной, что гораздо удобнее.

Наиболее удобно курсорные измерения реализованы в аналого-цифровых и цифровых осциллографах, у которых данные о положении каждого курсора в виде

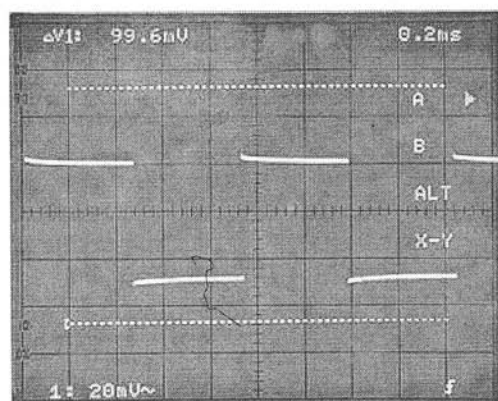


Рис. 8.42. Экран осциллографа с горизонтальными курсорами

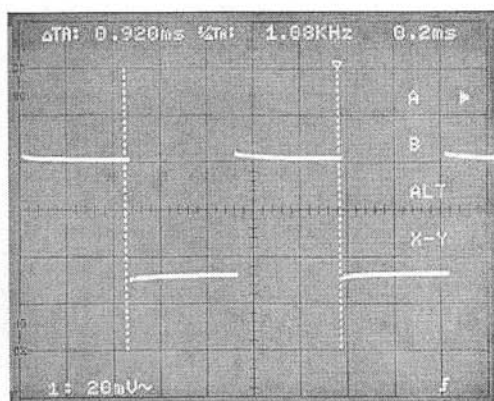


Рис. 8.43. Пример курсорного измерения периода колебаний

чисел указываются на экране дисплея, чаще всего у одной из его сторон — рис. 8.42. При этом они автоматически пересчитываются в уровни напряжений или длительности разверток. Нередко могут автоматически вычисляться максимальные отклонения (амплитуды), разности значений уровня или времени и иные параметры сигналов. Кроме того, заметно повышается точность фиксации курсором того или иного уровня отсчета напряжений или времен.

На рис. 8.43 дан пример курсорных измерений периода прямоугольных импульсов. Один из вертикальных курсоров установлен на задний фронт импульсов одного из периодов, а второй на задний фронт следующего периода. Таким образом, на осциллограмме выделен один из периодов. На экране отображено время (разность времен двух курсоров) и вычисленная частота, как величина, обратная периоду колебаний.

В тоже время ожидать чудес от курсорных измерений в части повышения их точности не стоит. Такие факторы, как нелинейность усилителей или развертки и неточность их калибровки, остаются. Да и точность совмещения курсоров с нужными точками осциллограммы тоже остается не очень высокой. Тем не менее, курсорные измерения позволяют уменьшить погрешность вычислений с 4—10% у обычных осциллографов до 2—4%. В дальнейшем мы продолжим описание техники курсорных измерений на примерах применения компьютеризированных лабораторий (см. главу 6), где эти измерения доведены до совершенства.

8.6. Особенности измерений цифровыми осциллографами

8.6.1. Измерение постоянных напряжений и калибровка

С первого взгляда осциллограммы даже от самых сложных и дорогих цифровых осциллографов выглядят так же, как и осциллограммы простеньких аналоговых осциллографов. Однако принципы функционирования у этих приборов заметно отличаются и надо знать не только о достоинствах, но и недостатках цифровых осциллографов.

Несомненным достоинством цифровых осциллографов является высокая степень автоматизации измерений. Как правило, такие осциллографы дают правильный и вполне однозначный результат вычисления большинства параметров исследуемого сигнала. Однако это справедливо для не слишком сложных сигналов и при наличии запасов по полосе частот канала вертикального отклонения. Высокая точность вычислений также большое достоинство цифровых осциллографов.

Спецификой цифровых осциллографов является применение аналого-цифрового преобразователя. Проще всего он измеряет постоянные напряжения. Поэтому для калибровки вертикального канала цифровых осциллографов обычно используются постоянные напряжения, а не импульсные типа меандра (у нас в России рекомендуется калибровать осциллографы по меандру с частотой 1 кГц).

Для калибровки зарубежных цифровых осциллографов созданы специальные калибраторы. Наряду с образцовым меандром они позволяют калибровать осциллографы и по напряжению постоянного тока. Например, калибратор Fluke-9500B вырабатывает высокоточное напряжение 1 В. Его действие видно по смещению луча и показаниям цифрового вольтметра, встроенного в цифровые осциллографы и представленного на экране. Если, к примеру эти показания дают 1,005 В, то значит погрешность вычислений составит 0,5%. Типовая нормированная погрешность цифровых осциллографов составляет 2–3%.

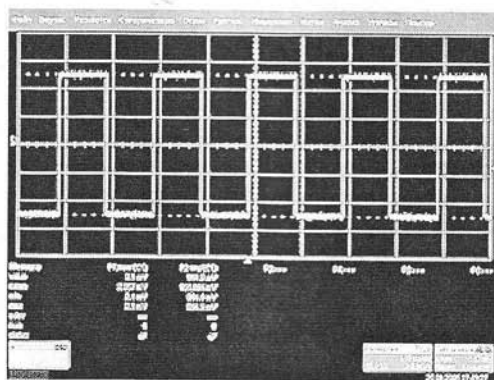


Рис. 8.44. Калибровка цифрового осциллографа LeCroy Wave Surfer 432 по меандру

На рис. 8.44 показана калибровка чувствительности осциллографа LeCroy Wave Surfer 432 по образцовому импульсному сигналу — меандру. Для калибровки надо добиться совпадения вершущек меандра с верхней и нижней пунктирными линиями шкалы. Вообще говоря, экран современных цифровых осциллографов перенасыщен информацией — на нем имеется меню операций, значения различных цифровых установок и результатов вычислений. Поэтому для полноценного использования этой информации надо внимательно изучить инструкцию по конкретному прибору и правильно использовать возможности прибора в части предоставления информации.

8.6.2. Измерение частотных и временных параметров цифровых осциллографов

Измерение частотных параметров канала Y у цифровых осциллографов имеет свою специфику. Прежде всего, надо отметить, что широкополосность этих при-

боров усложняет снятие АЧХ и ФЧХ канала У. Кроме того, из-за дискретного представления сигналов их отображение на краях полосы пропускания может оказаться затруднительным. В связи с этим предпочтительны испытания во временной области.

Напомним, что параметры осциллографов во временной области характеризуются параметрами его переходной характеристики. Обычно используются следующие параметры:

- Время нарастания (спада) — время в течении которого импульс изменяет свое значение от уровня 0,1 до уровня 0,9 (или при спаде от уровня 0,9 до 0,1), время измеряется в секундах или долях секунды.
- Выброс на вершине (спаде) — отношение значения превышения амплитуды при установившемся импульсе к амплитуде импульса, измеряется в процентах.
- Время установления — время в течении которого колебательные процессы на вершине импульса не станут меньше 1% амплитуды импульса.

Однако спецификой цифровых осциллографов являются очень малые значения этих времен, нередко находящиеся в субнаносекундном и даже пикосекундном диапазоне. При этом практически невозможно обеспечить идеальный перепад напряжения при измерении этих параметров. Более того, такие измерения часто приводят к слишком большому значению выброса переходной характеристики и возрастанию времени установления. Поэтому при испытаниях цифровых осциллографов нужно оговаривать и выдерживать условия измерения.

Приведем данные испытания цифрового осциллографа — рис. 8.45. Здесь сняты осциллограммы реакции цифрового осциллографа LeCroy WR-6030 на перепад напряжения с длительностью 500, 150 и 50 пс. При таких измерениях особенно важно придерживаться правил измерений в высокочастотной и субнаносекундной технике: применение высококачественных кабелей по возможности малой длины, согласование их как на входе, так и на выходе, использование качественных согласующих элементов и нагрузок и т. д.

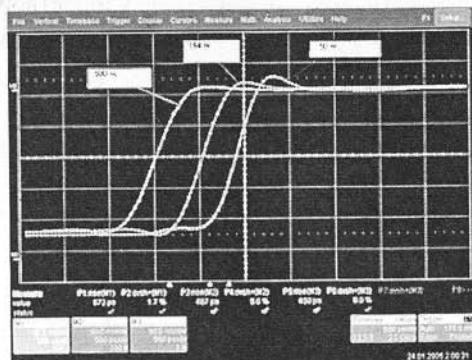


Рис. 8.45. Осциллограммы реакции цифрового осциллографа LeCroy WR-6030 на перепады напряжения разной длительности

Результаты испытаний представлены ниже

$t_{\text{фи}}$	$t_{\text{н}}$	Выброс
500 пс	572 пс	1,7%.
150 пс	467 пс	5,0%.
50 пс	450 пс	9,0%

Из них отчетливо видно, что при чрезмерном уменьшении длительности перепада имеем очень небольшое уменьшение времени нарастания переходной характеристики, но резкое увеличение ее выброса.

Цифровые осциллографы, в отличие от аналоговых, практически не нуждаются в калибровке генераторов развертки. Они у них цифровые. Ступенчато нарастающие напряжения развертки формируются счетчиками опорной частоты, стабилизированной кварцем. Кварцевые генераторы обеспечивают стабильность около 10^{-5} даже без термостатирования. Однако погрешность при снятии осциллограмм может быть заметно выше, оставаясь, как правило, не больше 0,01%. При этом надо следить за правилами измерения временных параметров сигналов, например за размером изображения на экране. Некоторые осциллографы, например LeCroy Wave Runner, способны измерять временные и частотные параметры сигналов с погрешностью до 10^{-8} .

8.6.3. Выбор вида интерполяции

При наблюдении почти синусоидальных высокочастотных сигналов аналоговые осциллографы имеют явные преимущества перед цифровыми приборами. У них форма синусоидального сигнала не ухудшается с ростом его частоты. Более того, она обычно улучшается, так как высокочастотные гармоники слабо искаженного сигнала отсекаются, если частота его близка к верхней границе полосы пропускания.

Совсем иначе обстоит дело с цифровыми осциллографами. Как уже отмечалось, у них сигнал представляется конечным числом дискретных значений — выборок. У высокочастотных сигналов число выборок может стать меньше примерно 10. В промежутках между выборками мы не вправе даже рассуждать о возможном характере сигнала. Он может быть постоянным, меняющемся по тому или иному закону, содержащим короткие выбросы и т. д.

Осциллограф может представлять осциллограмму в виде точек и это будет единственный научно обоснованный способ представления сигналов в виде выборок. Однако вид такой осциллограммы будет не удовлетворительным, да и яркость осциллограммы окажется низкой. Поэтому в цифровых осциллографах принято использовать метод интерполяции сигнала в промежутках между точками отсчетов. Простейшая интерполяция обычно бывает линейной, в более сложном случае

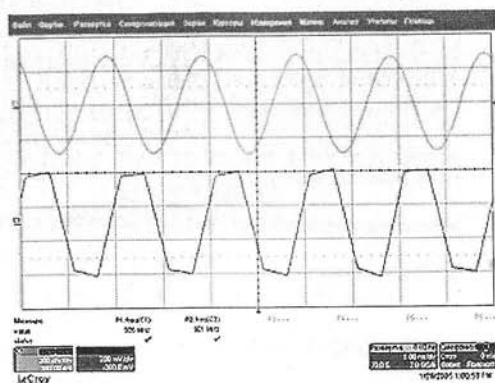


Рис. 8.46. Осциллограммы сигнала 500 МГц, полученные осциллографом LeCroy WS-452 при интерполяции функцией $\sin(x)/x$ (сверху) и при линейной интерполяции (снизу)

используется интерполяция функцией $\sin(x)/x$. На рис. 8.46 показаны осциллограммы цифрового осциллографа LeCroy — WS-452, с полосой пропускания 500 МГц и частотой дискретизации 2 Гвыб/с. На оба входа прибора подан синусоидальный сигнал с частотой 500 МГц.

Представленный на рис. 8.46 результат говорит лишь об одном: при осциллографировании синусоидального сигнала интерполяция функцией $\sin(x)/x$ дает явное преимущество, так как функция синуса интерполируется функцией синуса. Можно сделать вывод, что такая интерполяция будет иметь преимущество и для представления гладких осциллограмм. Но не более того! Осциллограммы разрывных или линейно-изменяющихся сигналов будут лучше представляться линейной интерполяцией. Тем более, что скорость вывода изображений на экран при ней явно выше.

8.6.4. Использование накопления (аналогового послесвечения)

Мощным средством обработки сигналов в цифровых осциллографах является режим накопления осциллограмм с их усреднением. У некоторых осциллографов он именуется режимом *аналогового послесвечения*, поскольку подобный эффект наблюдался у запоминающих аналоговых осциллографов с длительным послесвечением экрана трубки. Рисунок 8.47 показывает применение этого эффекта для просмотра осциллограмм синусоидального сигнала с частотой 500 МГц с помощью цифрового осциллографа LeCroy WS-452

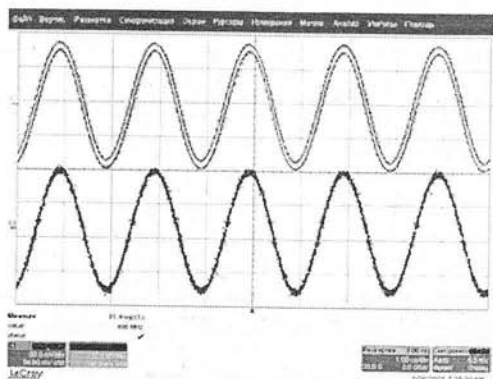


Рис. 8.47. Осциллограммы сигнала 500 МГц, полученные осциллографом LeCroy WS-452 при интерполяции функцией $\sin(x)$ и при линейной интерполяции в случае применения режима аналогового послесвечения

Нетрудно заметить, что при обоих видах интерполяции получена правильная синусоидальная форма сигнала. Осциллограммы при этом получаются «жирными», причем ширина полосок практически одинакова при обоих видах интерполяции. Можно сказать, что в этом случае результаты практически идентичны при обоих видах интерполяции.

8.6.5. Работа с памятью цифрового осциллографа

Специфическим параметром цифрового осциллографа является длина его памяти. Аналоговый осциллограф практически мгновенно реагирует на изменения исследуемого сигнала и это его достоинство. Впрочем, скорее всего пользователь

не слишком оценит его по той простой причине, что он просто не успеет заметить быстро промелькнувшее событие или сфотографировать его осциллограмму.

Цифровой осциллограф обеспечивает обновление изображения на экране после заполнения памяти. Нередко это заметно даже на глаз. Однако, использование памяти дает огромное преимущество: можно записать большой кусок исследуемого процесса в память и затем спокойно, не торопясь (и даже попивая кофе) просмотреть любой его кусок, вызывая его из памяти — рис. 8.48. Это делается с помощью окна просмотра, в котором размещается часть хранящейся в памяти осциллограммы. Это напоминает (чисто визуально) наблюдение части изображения при сильно растянутой развертке или при использовании задержанной развертки в аналоговых осциллографах.

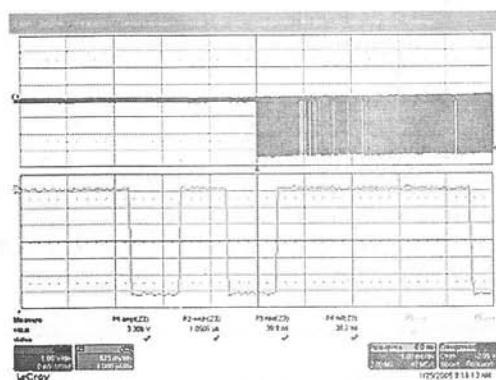


Рис. 8.48. Просмотр части изображения (нижняя осциллограмма) из общего изображения (верхняя осциллограмма), хранящегося в памяти (развертка 5 мс, растянутый фрагмент 1 мкс)

С длиной памяти связаны реальные частоты дискретизации сигналов. Нередко максимальная частота дискретизации (например, 20 или даже 25 ГГц) оказывается в режиме реального времени просто недостижимой из-за переполнения памяти. Но она может оказаться полезной в режиме усреднения. Память цифровых осциллографов быстро растет: если у Tektronix TDS-3032 она достигает 10 кбайт на каждый канал, то у LeCroy WaveSurfer-432 она составляет 2 Мбайта (правда на все каналы). Современные цифровые запоминающие осциллографы, например LeCroy Wave Master-8620 A, имеют длину внутренней памяти 96 Мбайт.

8.6.6. Цифровой осциллограф в роли анализатора спектра

Поскольку данные осциллограмм цифровых осциллографов хранятся в виде отсчетов исследуемых сигналов в памяти, то нетрудно организовать вычисление спектров сигналов по алгоритму быстрого преобразования Фурье — чаще всего дискретного (см. главу 1).

Следует сразу отметить, цифровые анализаторы спектра, построенные по этому принципу, имеют мало общего со специальными анализаторами спектра, выполненными в виде отдельных приборов. Последние представляют собой перестраиваемые радиоприемники с очень узкой полосой частот. Таким образом, они сканируют и строят реальные спектры сигналов, тогда как анализаторы спектра цифровых осциллографов строят всего лишь расчетную спектральную характеристику сигналов, представленных в дискретной форме, программным путем.

Впрочем, стоит отметить, что теоретически и практически преобразования Фурье, лежащие в основе частотного представления сложных сигналов, проработаны настолько глубоко и достоверно, что сомневаться в различии этих двух подходов не стоит. Признаком этого стал массовый выпуск цифровых программных анализаторов спектров. А также то, что такие анализаторы стали составной частью большинства цифровых осциллографов.

На рис. 8.49 приведен пример спектра амплитудно-модулированного сигнала с несущей частотой 100 МГц, частотой модулирующего колебания 1 кГц и глубиной модуляции 50 %. На спектрограмме отчетливо выделяется пик, соответствующий несущей частоте, и два боковых пика, отстоящих от него всего на 1 кГц.

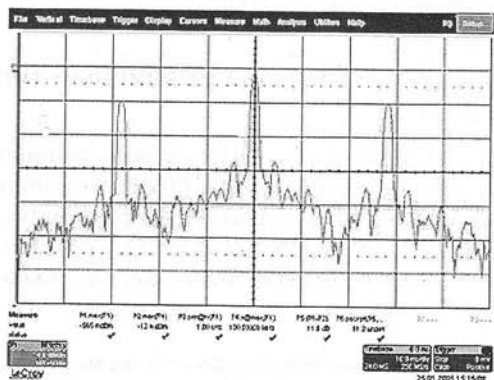


Рис. 8.49. Пример построения спектрограммы АМ-сигнала с помощью цифрового осциллографа LeCroy Wave Pro-7100

Естественно, что для построения такой спектрограммы требуется большой объем памяти. Данная спектрограмма получена на осциллографе LeCroy Wave Pro-7100 при длине памяти 24М, причем в режиме автоматических измерений достоверно измерены все параметры АМ сигнала. Очевидно, что при малой длине памяти спектр сигнала будет сильно искажен, вплоть до потери боковых частот спектра.

8.7. Специальные вопросы осциллографирования

8.7.1. О дискуссии «Good Will против Tektronix»

В последнее время в Интернете развернулась дискуссия о том, какие из цифровых осциллографов лучше: фирмы Good Will или Tektronix. Участниками дискуссии стали специалисты российских компаний ЗАО «Прист» и Master Tool. В этом приняла участие и редакция известного журнала «EDN», включившая в арену споров еще и осциллографы фирмы LeCroy.

Это малопродуктивная дискуссия, поскольку осциллографы этих фирм реализуют разные концепции осциллографирования и их прямое сравнение не вполне корректно и не объективно. Так, цифровые осциллографы корпорации Tektronix созданы для получения осциллограмм в реальном масштабе времени при максимально возможной частоте дискретизации. В большинстве случаев, если не выходить за рекомендуемые пределы технических возможностей этих приборов, такой подход позволяет получить качественные осциллограммы даже однократных и

редко повторяющихся процессов. И это серьезное достоинство осциллографов этой фирмы, которое трудно отрицать перечислением иных достоинств приборов других фирм («как не крутись», а все же второстепенных). Ибо главное предназначение осциллографов заключается в правильном отображении произвольных (в том числе однократных и редко повторяющихся) процессов.

Вместо того, что бы продолжить эту дискуссию, мы просто рассмотрим возможности нового поколения цифровых осциллографов фирмы Good Will. У этих приборов основной акцент сделан на предотвращение потери информации при осциллографировании за счет эффективного применения памяти большой емкости. Некоторые из обсуждаемых возможностей более чем актуальны и для осциллографов другого типа и других фирм. Для иллюстраций воспользуемся материалами статей [30, 31], которые есть в Интернете на сайтах фирм «Прист» и Master Tool.

8.7.2. Как регистрируют процессы различные типы осциллографов

Вначале еще раз и более подробно рассмотрим специфику осциллографирования процессов, у которых надо засечь временную нестабильность. Допустим, мы исследуем систему, нормально вырабатывающую прямоугольный импульс. Аналоговый осциллограф запускается передним фронтом каждого импульса и все они будут видны на экране. Внимательный пользователь, скорее всего, засечет момент, когда появится дефектный импульс — рис. 8.50.



Рис. 8.50. Осциллографирование импульсов аналоговым осциллографом

«Благополучие» аналогового осциллографирования базируется на том, что аналоговые осциллографы имеют малые задержки в выводе информации на экран ЭЛТ. Впрочем, время нечувствительности есть и тут — это время выхода луча за пределы экрана и обратного хода развертки. Но хуже другое: скорее всего пользователь просто не заметит, что один из импульсов (если они достаточно короткие) оказался дефектным: он быстро промелькнет на экране. Тут явно виден главный недостаток аналогового осциллографа — отсутствие памяти. Он устраняется применением аналоговых запоминающих трубок, но осциллографы с ними дороги и очень редки. В связи с появлением цифровых запоминающих осциллографов их выпуск сошел на нет.

А теперь рассмотрим процесс осциллографирования цифровым осциллографом — рис. 8.51. Главный недостаток большинства таких осциллографов — сли-



Рис. 8.51. Осциллографирование импульсов цифровым осциллографом с памятью на один импульс

ком длительное время преобразования сигнала и вывода осциллограмм. В результате осциллограф захватывает небольшой кусок процесса (в нашем случае первый импульс) и пропускает большую его часть.

Это принципиальный недостаток цифровых осциллографов. В той или иной мере он присущ всем осциллографам этого класса. А потому полное исчезновение аналоговых осциллографов пока не грозит, хотя их выпуск сокращается.

8.7.3. О роли памяти в цифровых осциллографах

Первые достаточно дешевые цифровые осциллографы имели небольшую память: на одну-две осциллограммы. В этом случае риск потерять дефектную часть сигнала был довольно большим. Это иллюстрирует рис. 8.52.

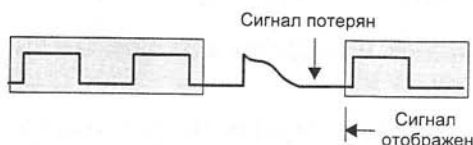


Рис. 8.52. Осциллографирование импульсов цифровым осциллографом с малой памятью

Очевидно, что цифровые осциллографы с большой памятью позволяют схватить сразу большой кусок сигнала, в который может попасть и его дефектная часть. Это иллюстрирует рис. 8.53. На нем показан случай, когда память цифрового осциллографа настолько велика, что в нее помещается весь интересующий нас процесс.



Рис. 8.53. Осциллографирование импульсов цифровым осциллографом с большой памятью

То, что для повышения информативности осциллографирования желательна большая память прекрасно знают разработчики всех цифровых осциллографов. Однако еще с десяток лет тому назад память была дорогой и даже корпорация Tektronix сэкономила на ней в своих младших моделях цифровых осциллографов. Корпорация Good Will воспользовалась этим обстоятельством и из двух зол (низкая частота дискретизации и малый объем памяти) выбрала первую: остановилась на низкой частоте дискретизации. Зато память уже у первых образцов ее цифровых осциллографов была сделана достаточно большой: длина записи на каждый канал 125 Кбайт. Хотя в «бюджетных» осциллографах она может быть и меньшей. Уместно отметить, что у некоторых новейших осциллографов она достигает уже десятков Мбайт и имеет явную тенденцию к росту.

8.7.4. Применение окна для просмотра части содержимого памяти

Даже при большой памяти объем информации, отображаемый из нее, ограничен. Поэтому цифровые осциллографы позволяют просматривать ее по частям с помощью временного окна, которое как бы перемещается по области просмотра.

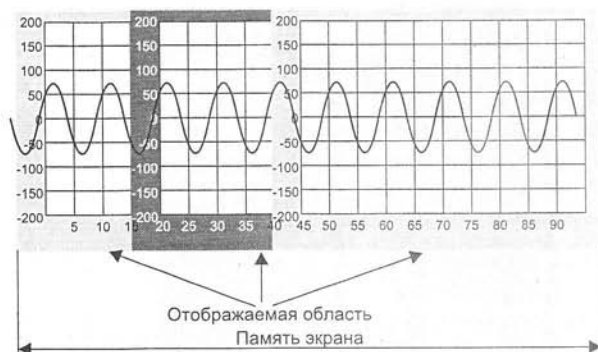


Рис. 8.54. Принцип просмотра содержимого длинной памяти с помощью временного окна

Это иллюстрирует рис. 8.54, на котором показан просмотр длинной синусоиды. Разумеется, этот способ применим для любого вида просматриваемых процессов.

Как такой просмотр осуществляется на практике, демонстрирует рис. 8.55. Здесь осциллограмма довольно сложного процесса, содержащего пачки импульсов, представлена на экране цифрового осциллографа GDS-820 фирмы Good Will. На ней рассмотреть сами импульсы невозможно.

Однако, включив режим просмотра длинной памяти и используя ручку смещения луча по горизонтали, можно просмотреть всю осциллограмму при достаточно короткой развертки или выделить для просмотра небольшой фрагмент осциллограммы, сохраненной в памяти. Этот случай показан на рис. 8.56.

Уменьшив еще размеры окна просмотра, можно детально просмотреть форму одного импульса. Пример этого дан на рис. 8.57.

Каждый цифровой осциллограф имеет специфические особенности в использовании памяти. Она может быть отнесена на один или несколько каналов. Общепринято иметь размер памяти, вдвое превышающий объем, нужный для одного кадра экрана. Так, у осциллографов фирмы Good Will это значит, что осциллограмма соответствует 20 делениям шкалы, хотя экран имеет только 10 делений. Однако, убрав меню с правой части экрана, можно получить два дополнительных деления.

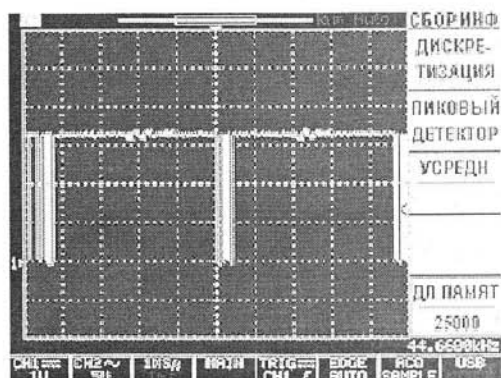


Рис. 8.55. Просмотр сложного сигнала на цифровом осциллографе GDS-820 фирмы Good Will

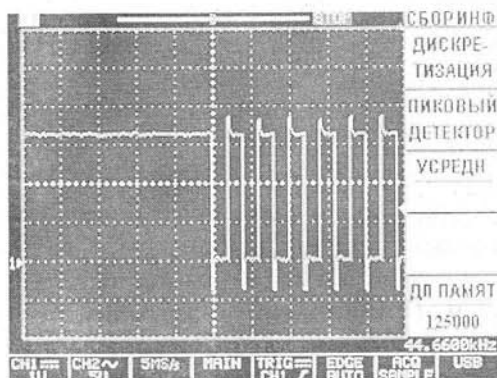


Рис. 8.56. Просмотр фрагмента сложного сигнала на цифровом осциллографе GDS-820 фирмы Good Will

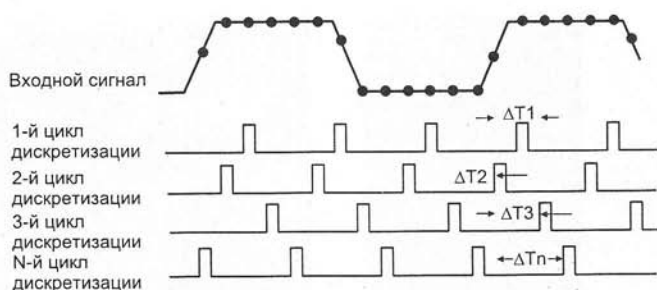


Рис. 8.59. Дискретизация за N циклов развертки со случайным сдвигом моментов стробирования

скретизации выбираются хаотически и повторные попадания в ранее выбранные точки исключаются — рис. 8.59.

За количество N периодов развертки на периодическом сигнале не остается точек не подвергшихся дискретизации, включая мелкие детали (рис. 8.60). Достоинством такого способа является возможность использовать «длинную» память и большая достоверность воспроизведения периодических сигналов.

Недостатком — возможность исследования однократных сигналов только с частотой до 7,5 МГц (необходимо, как минимум, 20 точек для отображения сигнала, при частоте входного сигнала 150 МГц).

На рис. 8.61 показано отображение осциллографом фирмы Good Will сигнала частотой 30 МГц на однократной развертке. Отчетливо видны существенные искажения сигнала, вызванные недостаточным числом отсчетов сигнала и линейной интерполяцией. Заметим, что осциллографы Tektronix в этом случае дадут неискаженную осциллограмму.

При уменьшении частоты сигнала до 5 МГц, что меньше граничного значения в 7,5 МГц, ситуация существенно улучшается. Это видно из рис. 8.62. Тут уже на период синусоиды приходится 20 точек при частоте дискретизации 100 МГц. Тем не менее, и здесь видны погрешности линейной интерполяции сигнала.

Наличие «длинной» памяти и возможность изменения ее длины, дает возможность манипуляции со скоростью дискретизации в широких пределах, особенно при исследовании сигнала в диапазоне времени развертки до 20 мкс. При уменьшении времени развертки объем памяти автоматически сокращается. Наличие большого объема внутренней памяти и применение передовых принципов обработки сигнала дает возможность получить эквивалентную частоту дискретизации периодических сигналов до 25 Гв/с. Эквивалентная частота дискретизации связана с длиной памяти формулой:

$$f_{\text{вэлв}} = \frac{\text{Длина памяти}}{20 \cdot \text{Длительность развертки}}$$

20 — делений на экран выбрано из расчета времени длительности развертки на весь экран (с учетом того, что память 500 бит, т. е. в два раза больше разрешения ЖКИ в 240 точек), поскольку «длина» сигнала в два раза больше «длины» экрана.



Рис. 8.60. К дискретизации со случайным выбором отсчетов

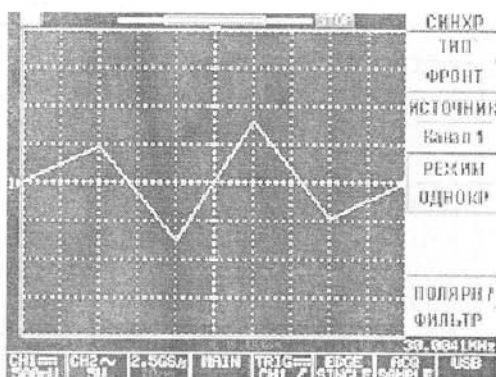


Рис. 8.61. Отображение сигнала с частотой 30 МГц при однократной развертке на экране осциллографа Good Will

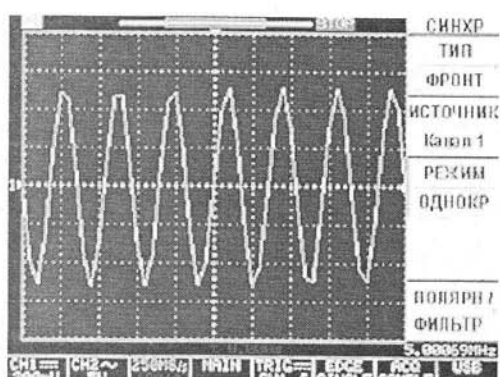


Рис. 8.62. Отображение сигнала с частотой 5 МГц при однократной развертке на экране осциллографа Good Will

При длине памяти 500 бит (это аппаратное ограничение длины памяти на развертке более 200 нсек при переходе на эквивалентную дискретизацию) и времени развертки 1 псек, получаем $f_{в экв} = 25$ Гв/с! Еще раз подчеркнем: понятие эквивалентной дискретизации применимо только для периодических сигналов. При исследовании однократных сигналов Tektronix обеспечивает максимальную частоту дискретизации 1 Гига выборки в секунду, а GW Instek только 100 Мв/с. Детальное сравнение (увы, не вполне объективное) можно найти в статье «Цифровые осциллографы компании Good Will Instruments Co. Ltd. (GW Instek)» на Интернет-сайте ЗАО «Прист».

8.7.6. Курсорные и автоматические вычисления

Как и аналого-цифровые осциллографы, приборы фирмы Good Will имеют возможности в проведении *курсорных* и *автоматических измерений* — рис. 8.63. Есть также возможность выполнения над сигналами ряда математических операций, например усреднения и сглаживания для очистки сигналов от шума.

В режиме автоматических измерений вычисляются:

- Временные параметры: частота (F), период (T), время нарастания, время спада, скважность импульсов, длительность импульса (положительную и отрицательную);
- Амплитудные параметры: максимальное и минимальное значение (V_{max} , V_{min}); размах от пика до пика (V_{p-p}); средневывпрямленное, среднеквадратичное, среднее амплитудное значения; среднее из минимального (V_{lo}) и максимального значения (V_{hi}).

На экран можно выводить до 5 измеряемых параметров по обоим каналам. То есть на экран одновременно выводится 10 результатов измерений, плюс результат измерения частоты 6-ти разрядным частотомером, который всегда присутствует на экране.

Интересно сравнить вывод результатов вычислений в осциллографах других фирм. На рис. 8.64 такой вывод показан для осциллографа фирмы Tektronix серий TDS 1000 и 2000. Нетрудно заметить, что этот прибор выводит меньшее число ав-

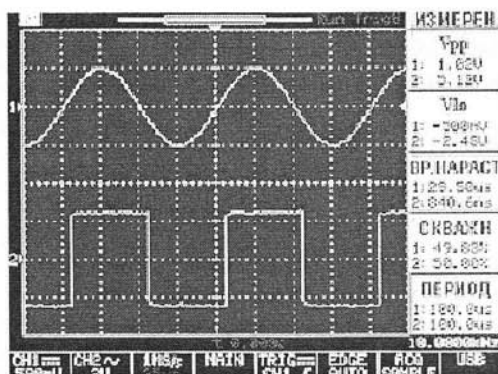


Рис. 8.63. Просмотр осциллограмм с выводом результатов автоматических вычислений на осциллографе фирмы Good Will

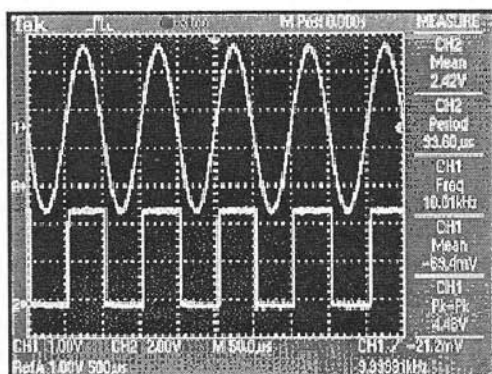


Рис. 8.64. Просмотр осциллограмм с выводом результатов автоматических вычислений на осциллографе фирмы Tektronix

томатически измеряемых параметров (максимум 8). Однако по числу таких измерений лидируют все же старшие модели осциллографов фирмы Tektronix.

8.7.7. Особенности работы разверток и синхронизации

Цифровые осциллографы имеют характерные особенности и в канале X, связанные с работой развертки и синхронизации. Так, помимо традиционных для большинства осциллографов режимов запуска развертки, таких как автоматический, ждущий и однократный запуск развертки, осциллографы серии GW Instek GDS-820 обладают уникальными режимами запуска развертки:

- запуск развертки по длительности импульса;
- задержка запуска развертки по времени;
- задержки запуска развертки по событию;
- выделение телевизионных строк.

Запуск развертки по длительности импульса. В этом режиме запуск развертки происходит при длительности импульса, соответствующей определенным условиям. Этими условиями могут быть:

- длительность импульса равна заданному значению;
- длительность импульса не равна заданному значению;
- длительность импульса больше заданного значения;
- длительность импульса меньше заданного значения.

При совпадении заданных условий для длительности импульса, происходит запуск развертки.

При использовании аналоговых осциллографов проблемой был просмотр переднего фронта импульсных сигналов, если его длительность превышала время задержки развертки (обычно десятки-сотни нс). В этом случае фронт импульсов был просто не виден. Эта проблема обычно решалась введением в усилители канала Y довольно громоздких кабельных линий задержки. Однако они сужают полосу частот усилителей и из-за явлений отражения сигналов при неточном согласовании приводят к искажениям формы импульсов.

Некоторые дорогие аналоговые осциллографы имеют задержанную развертку (лупу времени), которая запускается с любого места основной развертки. Это удобно при исследовании тонких особенностей сигналов, например выбросов ступенек и т. д.

Проблема просмотра фронтов и особенностей сигналов практически отпала в цифровых осциллографах, поскольку у них нулевой отсчет времени обычно начинается в центре окна индикатора и может плавно перемещаться в любое место экрана и даже далеко за его пределы.

При задержке запуска развертки по времени пользователь может задать время задержки от момента появления импульса синхронизации до момента запуска линии развертки (рис. 8.65). Эту задержку можно регулировать в пределах 100 нс...1,3 мс. В момент появления первого импульса запускается схема задержки синхронизации, время задержки определяется пользователем и равно T . После окончания этого времени линия развертки будет запущена первым импульсом, следующим после окончания времени задержки.

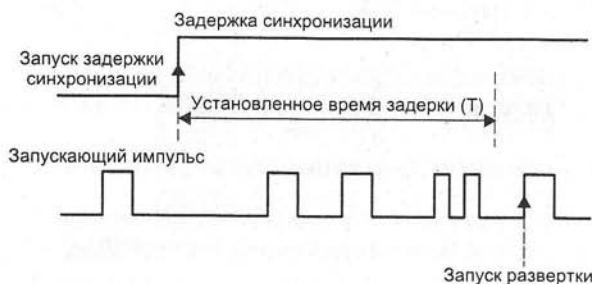


Рис. 8.65. Временные диаграммы запуска развертки по заданному времени задержки

При запуске развертки по событию пользователь может задать количество событий (импульсов) от момента появления импульса синхронизации до момента запуска линии развертки (рис. 8.66). Пользователь может регулировать количество событий в пределах 2...65000. В момент появления первого импульса запускается схема задержки схемы синхронизации. Количество импульсов задержки (на рис. 8.66 их два) определяется пользователем. После окончания последнего события линия развертки будет запущена первым импульсом, следующим после окончания времени задержки (третий импульс).

В режиме выделения телевизионных строк возможно выделение телевизионных строк в системах телевидения PAL, SECAM, NTSC по заданному номеру

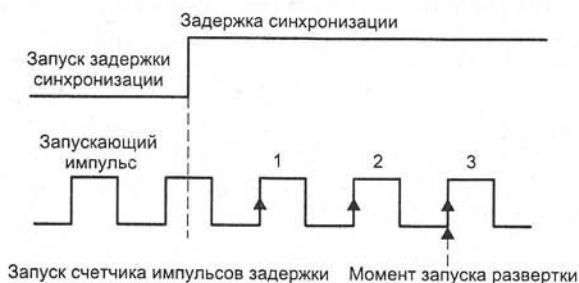


Рис. 8.66. Временные диаграммы запуска развертки по событию

строки и поля, причем в отличие от аналоговых осциллографов, также имеющих такой режим запуска развертки, яркость свечения луча в этом режиме не зависит от выбранного режима.

8.7.8. Быстрое преобразование Фурье и другие возможности осциллографов Good Will

Осциллографы 800-серии фирмы Good Will обладают и функцией быстрого преобразования Фурье (БПФ). Т. е. они способны выполнять функции цифрового программного анализатора спектра с большим динамическим диапазоном. Он позволяет оперативно отобразить спектр сигнала присутствующего в настоящий момент на экране осциллографа (рис. 8.67) и измерить параметры всех его гармоник.

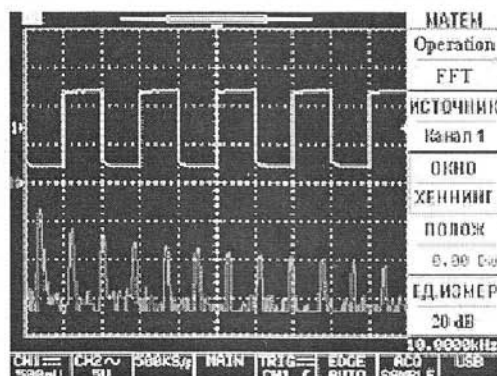


Рис. 8.67. Осциллограммы меандра и его спектра

Имеются в серии осциллографов GDS-800 и такие достаточно специфические возможности, как процедура обучения и режим допускового контроля. В режиме обучения осциллограф обучается настройкам и результаты их заносятся во внутреннюю энергонезависимую память прибора. Можно записать состояние всех органов управления включая не только положение переключателей В\дел и Время\дел, но уровни и режимов синхронизации, режимов работы каналов, режимов измерения и т. д. Вызов этих профилей из памяти достаточно прост и существенно сокращает время установки органов управления при проведении большого числа однотипных операций, при которых необходимо периодически устанавливать разные режимы работы осциллографа. Это необходимо, например, на сборочном конвейере или в цеху, где впервые применена привязка вызова профилей ко времени.

Это означает, что в режиме обучения осциллографа оператор устанавливает необходимый профиль. В этом режиме у оператора нет необходимости вообще производить какие-либо манипуляции с органами управления осциллографа. Это режим еще более облегчает процесс применения осциллографа на конвейере, где встречаются периодические последовательности однотипных операций.

В режиме *допускового контроля* в осциллографе, по одному из портов с компьютера или в ручном режиме с передней панели осциллографа, записывается так называемая *маска*. Это некий шаблон в пределах которого должен находиться сигнал. Если входной сигнал находится в пределах этого шаблона, осциллограф индицирует режим «годен»; если какая-нибудь часть входного сигнала выходит за пределы маски — осциллограф индицирует режим «не годен». Гнездо выхода «го-

ден не-годен» находится на задней панели. Этот режим может быть применен в системах телекоммуникации для постоянного контроля за формой сигнала, или при наладке и регулировке различного оборудования, когда есть необходимость подстройки формы сигнала по определенному шаблону.

8.7.9. Применение осциллографов с Цифровым Люминофором

Как уже отмечалось в главах 3 и 4 в осциллографах серии 3000 фирмы Tektronix реализована новая концепция *Цифрового Люминофора*. Так именуют электронный блок с памятью, включенный между АЦП и дисплеем — рис. 8.68. Здесь: Amp — входной усилитель оси Y, A/D — аналого-цифровой преобразователь, Digital Phosphor — блок Цифрового Люминофора, Display — дисплей, uP — процессор управления дисплеем. Основное назначение Цифрового Люминофора заключается в повышении степени визуализации всех, в том числе редко и случайно повторяющихся, сигналов.

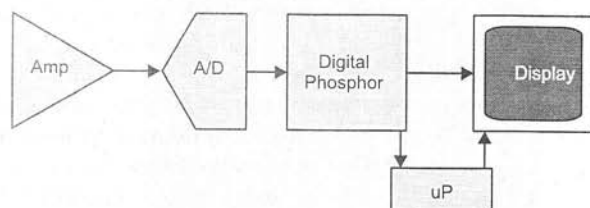


Рис. 8.68. Упрощенная функциональная схема осциллографа с цифровым люминофором

Функциональная схема рис. 8.68 проясняет суть осциллографирования с помощью таких осциллографов: по существу осциллограмма с дополнительным параметром — интенсивностью формируется в блоке Цифрового Люминофора и с помощью управляющего процессора периодически и с высокой скоростью передается дисплею для отображения. Затрачиваемое на это время не входит во время накопления и преобразования информации. Все это и обеспечивает новые возможности таких осциллографов.

На рис. 8.69 показана осциллограмма осциллографа с Цифровым Люминофором (DPO), отображающая нестабильный процесс и содержащая сверху гистограмму интенсивности.

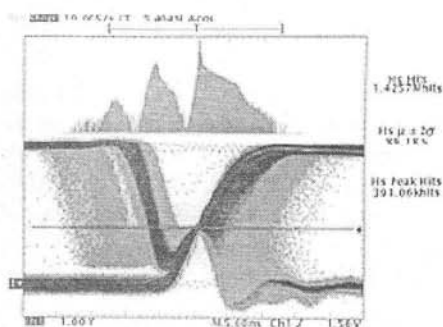


Рис. 8.69. Осциллограмма сложного нестабильного процесса с гистограммой интенсивности

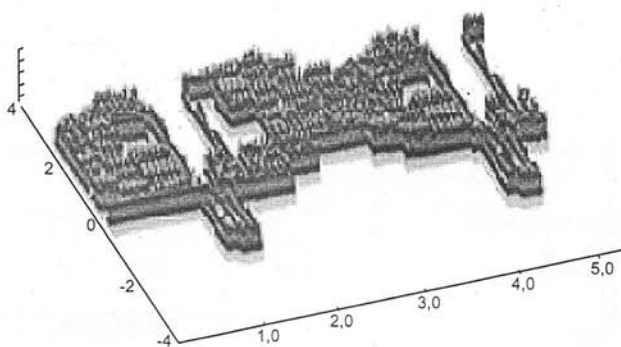


Рис. 8.70. Трехмерные осциллограммы телевизионных сигналов

На другом рисунке (рис. 8.70) показана трехмерная осциллограмма множества телевизионных сигналов. Третье измерение здесь задано уже не интенсивностью, а высотой осциллограмм — при их построении помимо осей X и Y введена ось Z , так что осциллограммы строятся как поверхности в 3D пространстве.

Наличие третьего измерения (интенсивности сигнала или высоты Z) резко расширяет объем информации о сигнале и нередко позволяет выяснить такие его особенности, которые не видны при обычном двумерном (2D) осциллографировании. Это открывает широкие возможности в диагностике сложных процессов, например в двигателях внутреннего сгорания при их тестировании в службах сервиса.

Осциллографы с Цифровым Люминофором копируют и функции аналоговых запоминающих осциллографов, накапливая в блоке Цифрового Люминофора множество осциллограмм и отображая затем их на экране дисплея. На рис. 8.71 представлена иллюстрация такого режима работы DSO. Нетрудно понять, что этот режим, подобный режиму аналогового послесвечения в других осциллографах, позволяет эффективно отслеживать случайные сбои в работе исследуемых устройств или редко повторяющиеся неисправности.

Для наблюдения сложных процессов и построения фигур в плоскости X - Y (например, сложных фазовых портретов систем с несколькими особыми точками, например фокусами) также полезен Цифровой Люминофор. Рис. 8.72 дает пример осциллограммы такого рода.

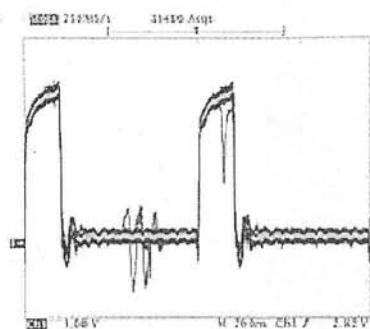


Рис. 8.71. Пример работы осциллографа с Цифровым Люминофором в режиме накопления осциллограмм

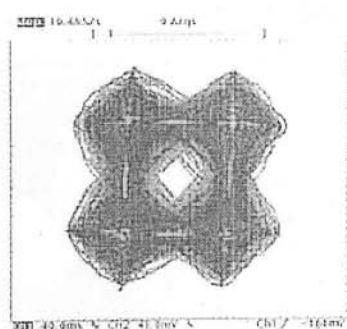


Рис. 8.72. Пример осциллограммы процесса, построенной в плоскости Z

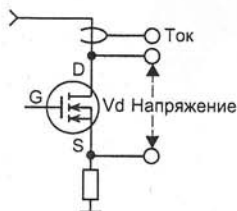


Рис. 8.73. Ключ на мощном полевом транзисторе — основной компонент преобразовательных устройств



Рис. 8.74. Серия осциллограмм для ключа на мощном полевом транзисторе

Благодатной областью применения осциллографов с Цифровым Люминофором является энергетика и устройства импульсного и иного преобразования электрической энергии. Как известно, ключевые преобразователи на современных переключающих приборах (мощных полевых и биполярных транзисторах, тиристорах, GTO модулях и т. д.) теоретически обеспечивают коэффициент полезного действия до 100%, но характеризуются очень сложными процессами. Разобраться в них без современных осциллографов просто невозможно.

На рис. 8.73 показано включение ключа на мощном полевом транзисторе в измерительную схему преобразователя. С помощью токовой петли контролируется ток, текущий через транзистор. Для контроля напряжения на нем желательно применение осциллографа с оптической развязкой входа.

Рис. 8.74 демонстрирует возможность представления серии осциллограмм напряжения и тока ключа рис. 8.73, полученных с помощью осциллографа с Цифровым Люминофором. Следует отметить, что осциллограммы могут быть цветными, что заметно повышает их информативность.

Многие преобразователи используют широтно-импульсную модуляцию, уровень которой постоянно меняется при изменении питающего напряжения и нагрузки. Это требует запоминания осциллограмм, иллюстрирующих модуляцию. Пример таких осциллограмм представлен на рис. 8.75. Здесь также используется режим накопления осциллограмм и представление их с разной интенсивностью.

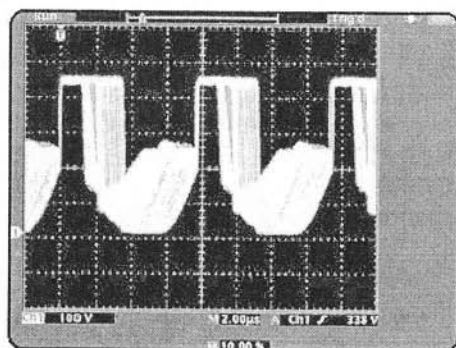


Рис. 8.75. Осциллографирование непрерывно изменяющихся импульсов

Разумеется, осциллографы с Цифровым Люминофором имеют и многие другие возможности, уже описанные выше. Это курсорные вычисления, автоматические вычисления, представление цифровых данных на экране дисплея вместе с осциллограммами, быстрое преобразование Фурье и работа в режиме анализатора спектра и т. д. Все это делает такие приборы наиболее универсальными в мире современных осциллографов и, несмотря на высокую стоимость таких приборов, обеспечивает им массовость применений и сбыта. Выпуск таких приборов компанией Tektronix достигает десятков тысяч в год.

8.8. Работа с массовыми цифровыми осциллографами серии DS-1000

8.8.1. Начало работы с осциллографами серии DS-1000

Выше уже говорилось о сравнительно дешевых цифровых осциллографах южнокорейской компании EZ Digital серии DS-1000 с полосой частот исследуемых сигналов 80, 100, 150 и 250 МГц (модели DS-1080, DS-1100, DS-1150 и DS-1250). Это осциллографы нового поколения, которые построены на типовой элементной базе. Ряд других фирм, например, GoodWill, Aligent и др. выпускает подобные осциллографы, но они заметно дороже своих собратьев фирмы EZ Digital.

Пользователи этими массовыми приборами, привыкшие к работе с обычными аналоговыми осциллографами, могут испытать недоумение и даже разочарование от работы с новыми цифровыми осциллографами. В связи с этим ниже работа с такими приборами описана достаточно подробно. Выбор в качестве основы для описания цифрового осциллографа DS-1250 связан с тем, что этот прибор можно рассматривать как наиболее типичный для этого класса приборов. Для испытания прибора был применен функциональный генератор MSG-9810A фирмы METEX, также один из самых дешевых приборов в этом классе.

Уже при включении осциллографа кнопкой POWER (1 на рис. 8.76) можно заметить загрузку его встроенного программного обеспечения. На экране появляется окно с данными об этом. Спустя несколько секунд устанавливается режим измерений. Однако, для повышения точности измерений рекомендуется прогреть осциллограф в течении 10—15 минут.

Несмотря на большое число функций осциллографа его передняя панель (рис. 8.76) выглядит очень простой. На ней нет привычных ручек переключателей с оцифрованными делениями, их заменяет кнопочное управление с применением множества меню и представление цифровых данных прямо на экране дисплея. Положение ручек—переключателей отображается на экране дисплея.

Внизу осциллографа видны клемма заземления, петля калибратора (выдает меандр с частотой 1 кГц и двойной амплитудой 1 В), входы каналов CH1 и CH2 и вход внешнего запуска (триггера) EXT. Подключив ко входам каналов пробники, и обычным образом проведя их коррекцию по сигналу калибратора (см. раздел 8.1.7), можно немедленно начать работу с осциллографом. Если вы затрудняетесь в установках прибора (на первых порах это не удивительно), то просто нажмите кнопку 2 AUTOSET в группе кнопок 3. Прибор автоматически произведет все нужные установки и через несколько секунд выдаст осциллограммы — рис. 8.77. Стоит отметить, что автоматическая установка возможна только при достаточно простых сигналах (синус, меандр, треугольное колебание и др.).

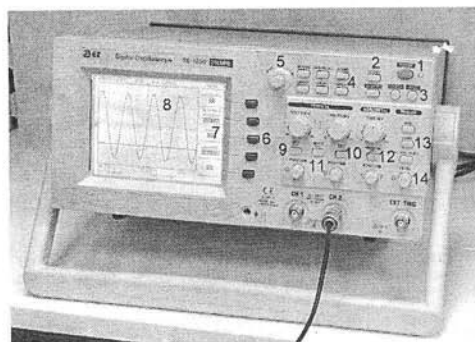


Рис. 8.76. Передняя панель осциллографа DS-1250 фирмы EZ Digital

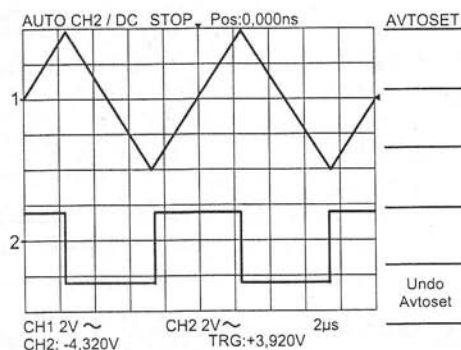


Рис. 8.77. Осциллограммы треугольных и прямоугольных TTL импульсов функционального генератора на частоте 100 кГц

8.8.2. Применение режима усреднения осциллограмм

С первого взгляда на осциллограммы видно, что они испещрены мелкими ступеньками и выбросами, которые пользователи аналоговыми осциллографами обычно трактуют как шум сигналов. У аналоговых осциллографов собственный шум каналов ничтожно мал и появление подобных искажений скорее всего и впрямь порождено шумами сигнала. Но у цифровых осциллографов рассматриваемого класса этот шум присутствует даже при просмотре идеальных (без шума) сигналов и при заземлении входов. Этот шум обусловлен цифровым представлением сигналов — их квантованием.

Есть три основных фактора возникновения «цифрового шума». Прежде всего, это конечная разрядность аналого-цифровых преобразователей осциллографа. Она равна 8, т. е. непрерывный сигнал имеет $2^8=256$ уровней, отчетливо заметных как его ступеньки. ЖКИ-дисплей осциллографов тоже имеет конечное число пикселей по вертикали и горизонтали (320×240 пикселей) и даже идеальный сигнал воспроизводит как ступенчатый. Наконец, имеется шум квантования, связанный с нестабильностью положения ступенек. Все эти факторы и ведут к появлению характерного «цифрового шума» на осциллограммах. К сожалению, он наблюдается почти у всех цифровых осциллографов.

Описанное явление весьма неприятно и неопытные пользователи могут приписать его за наличие шума даже у чистых реальных сигналов. Поэтому сразу отметим, что для выявления малого шума цифровые осциллографы данного типа подходят плохо. Для снижения видимости «цифрового шума» (или, напротив, для лучшего просмотра шума) разработчик рекомендует правильно подобрать яркость и контрастность изображения осциллограмм на экране и применять синий светофильтр. Однако на осциллограммах, полученных с помощью компьютера (формат рисунков BMP), такие меры не дают эффекта и «цифровой шум» отчетливо наблюдается (см. рис. 8.77).

Заметное подавление шума квантования возможно путем усреднения осциллограмм. Для этого надо активизировать кнопку ACQUIRE (Сбор отсчетов) в группе кнопок 4. В правой части экрана 7, отведенной под меню, появится ряд опций, которые можно вводить группой кнопок 6. Вторая сверху опция Average (Усреднение) позволяет задать усреднение осциллограмм по 2, 4, 8, 16, 32, 64 и 128 осциллограммам или отказаться от усреднения — значение опции Off. На

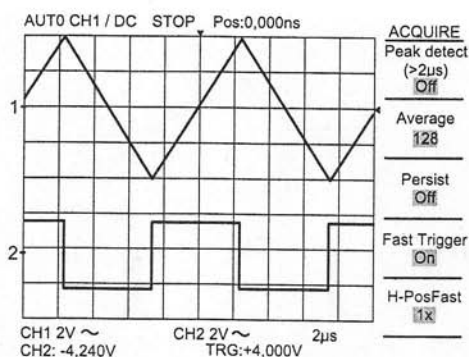


Рис. 8.78. Осциллограммы треугольных и прямоугольных TTL импульсов функционального генератора на частоте 100 кГц при усреднении по 128 осциллограммам

рис. 8.78 показаны осциллограммы рис. 2 при введении усреднения по 128 осциллограммам.

Надо отметить, что усреднение процесс довольно длительный и может занять с десяток секунд и более. При этом подавляются только шумы квантования (но не погрешности разрядности АЦП и дисплея). Поэтому некоторые эффекты квантования сигнала остаются все же видимыми. Кроме того, надо учитывать, что подавляется и реальный шум, присутствующий в сигналах, что практически исключает его отчетливое опознавание. Таким образом, усреднение это мера, которую надо применять с осторожностью и с пониманием.

8.8.3. Режим наложения осциллограмм (персистенции)

Теперь пора разобраться с информацией, которая отображается на экране дисплея цифрового осциллографа, помимо осциллограмм. Верхняя строка на рис. 3 дает информацию о следующих данных:

- AUTO — автоматический режим развертки;
- CH1 — запуск развертки сигналом первого канала;
- \neg — запуск развертки положительным перепадом;
- DC — пропускание постоянной составляющей сигнала;
- STOP — текущее состояние (остановка);
- Pos: 0.0000 ns — положение маркера времени ▼ горизонтальной оси;
- ACQUIRE — название позиции текущего меню.

Снизу экрана представлены данные о масштабе по вертикали каналов CH1 и CH2, последнем измененном уровне смещения и пороге запуска TRG (он отмечается также знаком ◀ в правой части окна дисплея).

В правой части окна дисплея отображается текущее меню. Кроме команды усреднения в меню ACQUIRE можно задать ряд полезных опций. Так, опция Persist задает режим аналогового запоминания осциллограмм с наложением их друг на друга. Эту операцию можно наблюдать только на собственном дисплее осциллографа, что представлено на фото рис. 8.79. На нем показано наложение осциллограмм при плавном изменении амплитуды треугольного сигнала функционального генератора.

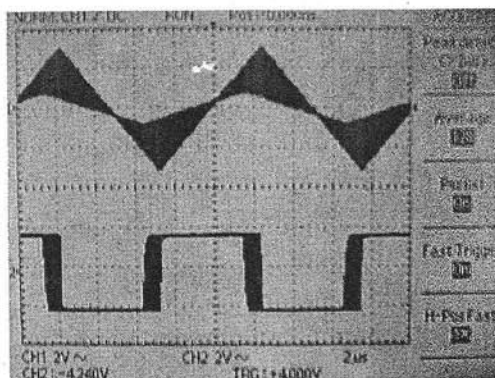


Рис. 8.79. Осциллограммы треугольных и прямоугольных TTL импульсов функционального генератора в режиме наслоения Persist

Этот рисунок — прямая фотография экрана дисплея. При использовании совместно с осциллографом компьютера наблюдать наслоение осциллограмм на компьютерных копиях экрана нельзя. Это одна из недоработок программного обеспечения.

8.8.4. Особенности наблюдения сигналов

Продолжим рассмотрение системы меню осциллографа. Каждая функциональная часть прибора имеет свое меню. Оно выводится в правую часть экрана дисплея 7 и в каждой позиции имеет до пяти опций, изменяемых синими функциональными кнопками 6. Например, каналы CH1 и CH2 имеют свои меню (кнопки 9 и 10), содержащие 4 позиции:

- Display — включение (On) или выключение (Off) осциллограммы выбранного канала.
- Coupling — подача на вход переменной составляющей сигнала (AC), полного сигнала с постоянной составляющей (DC) или заземление входа (Ground);
- Probe — установка масштабного коэффициента с учетом действия делителя напряжения пробника (1×, 10×, 100× или 1000×);
- Position Set to 0 — установка позиции осциллограммы в исходное положение (смещение 0).

Каналы вертикального отклонения имеют две поворотные ручки управления — делителя напряжения VOLTS/DIV и смещения по вертикали POSITION. В центре области VERTICAL передней панели осциллографа имеется кнопка 11 меню MATH. Оно поначалу имеет только две позиции:

Arithmetic — стандартные для двухканальных осциллографов арифметические операции с сигналами каналов (Off — операции отключены, CH1+CH2, CH1-CH2, CH2-CH1, CH1 Invert и CH2 Invert).

Advanced Functions — дополнительные функции (Off — отключено, остальные функции будут описаны немного позже).

Горизонтальный тракт осциллографа представлен на передней панели двумя субпанелями. Субпанель Horizontal имеет поворотную ручку установки масштаба развертки TIME/DIV, кнопку 12 меню и поворотную ручку смещения по горизонтали. Как характерный для цифровых осциллографов недостаток можно отметить возможность появления стробоскопического эффекта, при котором похожее на

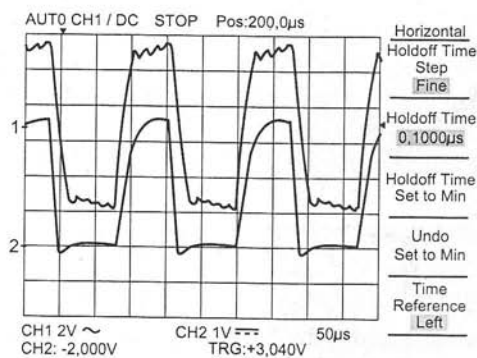


Рис. 8.80. Стробоскопический эффект при наблюдении импульсов с частотой 5 МГц

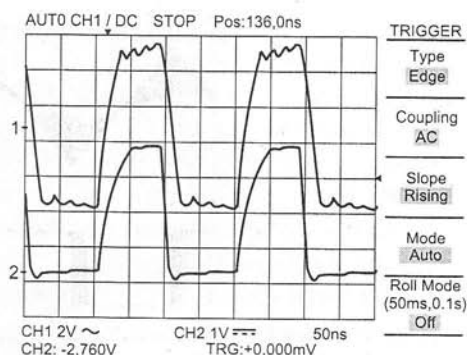


Рис. 8.81. Правильные осциллограммы импульсов с частотой 5 МГц

правду изображение осциллограмм наблюдается при грубо неверной установке масштаба развертки по горизонтали. Такой случай представлен на рис. 8.80.

Единственное, что указывает на неверность установки, это масштаб длительности развертки в 50 мкс на деление, что дает значение частоты намного меньше истинного значения. Кроме того, осциллограммы в этом случае обычно неустойчивы. Просто уменьшив длительность развертки, можно получить правильные и вполне устойчивые осциллограммы — рис. 8.81. При этом масштаб длительности развертки составляет 50 нс/дел, т. е. в 1000 раз меньше, чем в случае просмотра в стробоскопическом режиме.

8.8.5. Работа с разверткой и системой запуска



Как видно из рис. 8.80 и 8.81 меню Horizontal имеет 5 установок:

- Holdoff Time Step — установка шага времени удержания Holdoff Time (Coarse — большого и Fine — малого).
- Holdoff Time — установка времени Holdoff Time (ручкой 5).
- Holdoff Time Set to Min — установка минимального времени Holdoff Time.
- Undo Set to Min — возврат к предыдущей установке времени Holdoff Time.
- Time Reference Right — установка отсчета временного маркера ▼ (Center — по центру временной оси, Right — справа и Left — слева).

Из этих установок наиболее существенна последняя, поскольку она задает нулевую точку отсчета времени. Как нетрудно заметить, она не обязательно находится в начале линии развертки и это тоже специфика цифровых осциллографов.

Канал запуска развертки и синхронизации I3 представлен панелью TRIGGER. Поворотная ручка LEVEL 14 задает плавное изменение порога запуска. Сам порог отображается на дисплее знаком ◀ что позволяет наглядно судить о том, какая точка осциллограммы соответствует моменту запуска. Кнопка SOURCE позволяет выбрать источник (CH1 — канал CH1, CH2 — канал CH2, EXT — со входа внешнего запуска и LINE — от питающей сети переменного тока). Ручка SET LEVEL TO 50% устанавливает уровень запуска в середине сигнала, используемого для запуска. В большинстве случаев это дает наиболее устойчивый запуск.

Кнопка MENU панели запуска открывает меню запуска. Оно имеет следующие установки:

- Type — тип запуска (Edge — перепадом сигнала запуска, TV — телевизионным сигналом).
- Coupling — (AC—закрытый вход, DC—открытый вход, LF Reject — с фильтром нижних частот, HF Reject — с фильтром верхних частот).
- Slope — выбор для запуска нарастающего (Rising ) или спадающего (Falling ) перепада.
- Mode — режим развертки (Auto — автоколебательный, Normal — нормальный, Single — одиночный).
- Roll Mode (50 ms, 0.1 s) — режим прокрутки для указанных разверток.

В случае запуска TV остальные позиции меню (кроме Type) исчезают и появляется позиция Sync (синхронизация TV-сигналов по строкам Line и по кадрам Field). Выбор правильного режима запуска весьма важен, но он ничем не отличается для такового у аналоговых осциллографов. Поэтому в его детали вдаваться не будем.

8.8.6. Работа с основной группой кнопок меню

Основная группа 4 из шести кнопок вводит шесть различных дополнительных меню:

- MEASURE — цифровых измерений;
- SAVE/RECAL — записи осциллограмм в память и вызова их из памяти;
- ACQUIRE — сбор данных (меню было описано);
- CURSOR — курсорные измерения;
- UTILITY — утилиты обслуживания осциллографа;
- DISPLAY — дисплея.

Меню DISPLAY содержит следующие опции:

- Type — тип представления осциллограмм (Vector — векторный с соединением точек линий, Dots — точечный);
- Format — формат вывода осциллограмм (YT — временная зависимость, XY — полярный для просмотра фигур Лиссажу);
- Grid — вывод сетки (Full — полной, Cross — упрощенной в виде креста, Board — в виде «ящика» с делениями по его периметру);
- Contrast Increase — увеличение контраста изображения;
- Contrast Decrease — уменьшение контраста изображения.

Отметим, что увеличение и уменьшение контраста на экране выполняется шагами в 5%, но кнопка knob 5 позволяет делать это с разрешением в 1%. От контраста сильно зависит степень видимости на осциллограммах шумов и коротких выбросов. Для повышения контраста рекомендуется устанавливать на экран осциллографа светофильтр зеленого или синего цвета.

8.8.7. Применение режима XY

В режиме XY задается построение функции от двух сигналов (ось X канал CH1 и ось Y канал CH2) как параметрической кривой. Следует сразу отметить, что режим XY в описываемых осциллографах реализован настолько неудачно, что его реальное применение для измерений весьма сомнительно. Параметрические графики типа фигур Лиссажу в этом режиме строятся по точкам (режим Vectors отключается), при этом отображается лишь движущаяся часть фигуры с обновлени-

ем примерно раз в секунду. Получить отчетливую замкнутую фигуру просто не удастся. Иногда положение спасает режим наложения наблюдаемых кривых. В этом режиме аналоговый осциллограф намного более удобен.

8.8.8. Работа с курсорами и курсорные измерения

Кнопка CURSOR группы 4 позволяет перейти к режиму курсорных измерений. Вводимое ею меню имеет следующие установки:

- Type — тип курсора (Off — нет, Voltage — напряжение, Time — время).
- Source — выбор источников (CH1 или CH2).
- Cursor 1 — вывод первого курсора.
- Cursor 2 — вывод второго курсора.
- Delta — вывод разности показаний курсоров.

На рис. 8.82 показано применение горизонтальных курсоров для измерения двойной амплитуды треугольных импульсов. Каждый курсор передвигается плавно с помощью ручки 5 многооборотного потенциометра. Параметр Delta определяет исходный параметр. А на рис. 8.83 показан пример измерения периода колебаний тех же импульсов с помощью вертикальных курсоров.

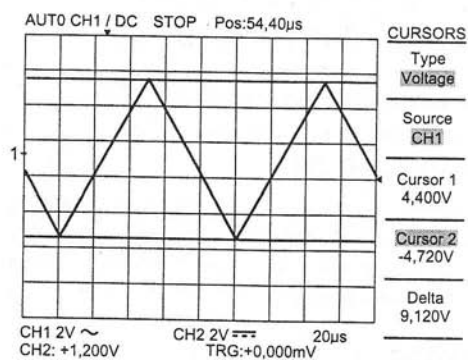


Рис. 8.82. Пример измерения двойной амплитуды треугольных импульсов

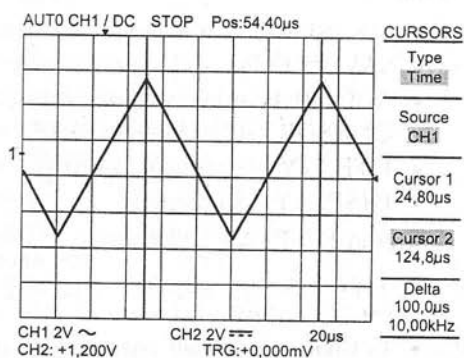


Рис. 8.83. Пример измерения периода колебаний

Курсорные измерения особенно удобны при измерении тонких особенностей сигналов, поскольку возможно автоматическое измерение параметров.

8.8.9. Автоматические измерения

Продолжим рассмотрение возможностей осциллографов, реализованных с помощью меню, вводимых группой кнопок 4. Меню MEASURE (Измерение) превращает осциллограф в цифровой мультиметр. Для каждого из двух каналов вертикального отклонения измеряется десять параметров сигналов, но в область меню экрана выводится только пять пар из них — рис. 8.84. Сверху отображаются значения измеряемых параметров сигнала первого канала, снизу — второго. Если один из каналов отключен, то выводятся показания для сигнала только одного канала.

В режиме измерений каждая из функциональных синих кнопок группы 6 позволяет установить один из следующих параметров:

- None — отсутствие измеряемого параметра.

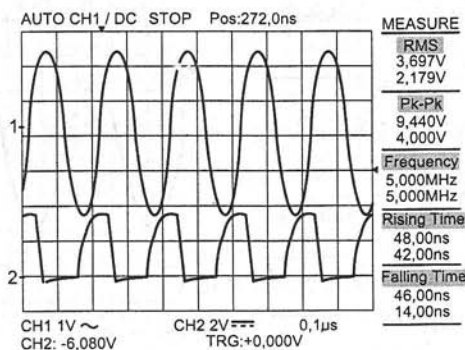


Рис. 8.84. Наблюдение двух процессов с выводом результатов вычислений

- Pk-Pk — напряжение от пика до пика (двойная амплитуда).
- RMS — среднеквадратическое значение за период.
- Mean — среднее значение за период.
- Frequency — частота (число периодов в секунду).
- Rising Time — время нарастания (на уровнях 10 и 90% от Pk-Pk).
- Falling Time — время спада (на уровнях 90 и 10% от Pk-Pk).
- Period — период повторения сигнала.
- +Width — относительная ширина положительной полуволны (в %).
- -Width — относительная ширина отрицательной полуволны (в %).
- Duty — относительная длительность импульса (в %).

Параметры автоматически не измеряются, если размах осциллограмм меньше 2 делений, а период наблюдаемых сигналов меньше 0.4 деления. При этом на экран дисплея выводится знак «?». Если период повторения наблюдаемого сигнала больше периода регистрации, то выводится сообщение «Invalid».

8.8.10. Применение пикового детектора

Обнаружение тонких деталей осциллограмм — одна из привлекательных возможностей цифровых осциллографов. На рис. 8.85 представлена осциллограмма синусоиды, на которую наложены короткие выбросы. Они настолько коротки, что просто не видны. Кажется, что синусоида идеальна.

Опция Peak Detector меню ACQUIRE включает пиковый детектор с минимальной длительностью обнаруживаемых выбросов сигнала 10 нс. Он облегчает выявление кратковременных импульсов, если они присутствуют в сигналах. Если задать эту опцию включенной (On), то на осциллограмме будут отчетливо просматриваться выбросы и шумы — рис. 8.86.

8.8.11. Просмотр деталей осциллограмм

Еще одна характерная особенность цифровых осциллографов это большая длина записи, ограниченная памятью, отведенной под осциллограмму. У осциллографов серии DS-1000 она равна 32 Кбайта, что намного больше длины видимой части осциллограммы. Но, у многих более дорогих осциллографов она еще больше — от 128 Кбайт до нескольких десятков мегабайт.

Опция Fast Trigger меню ACQUIRE, по умолчанию включенная, задает ускоренный запуск развертки. Другая опция H-Pos Fast позволяет ускорить перемещение окна

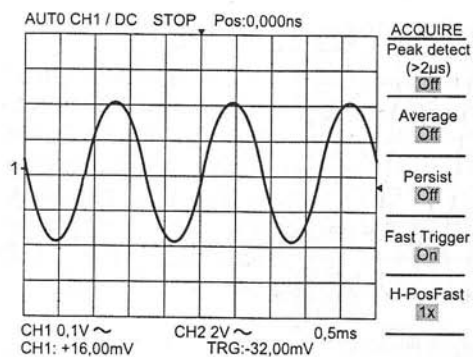


Рис. 8.85. Просмотр синусоиды, на которую наложены короткие выбросы при отключенном пиковом детекторе

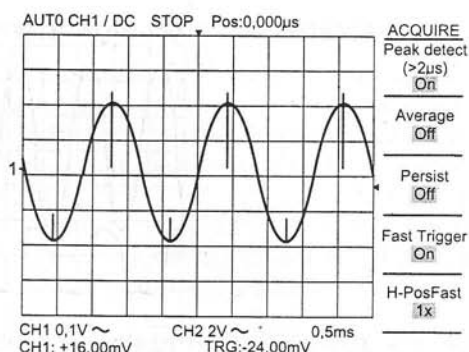


Рис. 8.86. Просмотр синусоиды, на которую наложены короткие выбросы при включенном пиковом детекторе

просмотра осциллограмм при его перемещении по горизонтали. Тут сразу уместно отметить, что осциллограф выводит на экран дисплея 8 только небольшую часть зарегистрированной осциллограммы — эта часть размещается в окне просмотра.

Для плавного перемещения окна просмотра по оси времени нужно использовать ручка POSITION горизонтального тракта. Более того, если осциллограф находится в режиме STOP, то можно осуществлять зум (Zoom) или просмотр особенностей осциллограмм в увеличенном масштабе (в аналоговых осциллографах такая возможность часто называется «лупой времени»). Это делается за счет выбора меньшего масштабного коэффициента развертки. На рис. 8.87 показана эта возможность применительно к наблюдению короткого выброса на вершине сигнала и измерения его амплитуды с помощью курсоров.

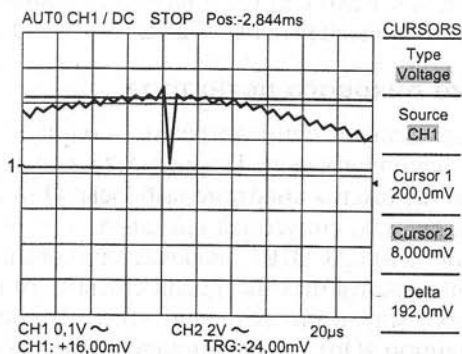


Рис. 8.87. Просмотр короткого пика на вершине синусоиды и измерение его амплитуды с помощью курсоров

Наличие памяти позволяет фиксировать значительный участок исследуемого процесса и затем изучать его. Однако считать это однозначно достоинством цифровых осциллографов нельзя. Дело в том, что это ведет к уменьшению частоты обновления содержимого памяти и видимой части изображения. В обычном режиме YT это не вызывает особых неудобств, поскольку ЖК-экран имеет память. Но в режиме XY это ведет к невозможности получения плавно вращающихся фигур Лиссажу и сильно ограничивает возможности этого режима. Это уже отмечалось.

8.8.12. Сохранение осциллограмм и установок осциллографа

На самом деле приборы имеют достаточный объем памяти для хранения до 10 осциллограмм и 10 настроек. Доступ к памяти осуществляется из меню SAVE/RECALL. Опция Type (Тип) позволяет задать тип хранимой в памяти информации: Waveform (Осциллограмма) или Setup (Установка) — установки осциллографа. Опция Reference (числа от 0 до 9) задает номер экрана или комплекта установок. Опции Save и Recall (со значениями On и Of) служат для записи или считывания данных (осциллограмм или настроек). Опция Source (со значениями CH1 и CH2) служит для выбора источника. Работа с меню SAVE/RECALL вполне очевидна.

8.8.13. Допусковый контроль осциллограмм

Теперь рассмотрим дополнительные функции (Advanced Functions) меню MATH (кнопка 11). Их две:

- Pass-Fail — пороговый контроль.
- FFT — быстрое преобразование Фурье (Fast Fourier Transform).

Функция Pass-Fail позволяет выбрать канал CH1 или CH2 для построения двух пороговых зависимостей, с которыми сравнивается осциллограмма измеряемого сигнала. Они строятся с помощью установки Zone Edit (редактирование пороговой зоны), которая позволяет задать верхнюю пороговую осциллограмму (Upper Side) и нижнюю (Lower Side) и перейти к построению основной осциллограммы (в центре рис. 8.88). Если основная осциллограмма выходит за заданную зону, осциллограф переходит в режим остановки и в верхней строке дисплея появляется надпись STOP. Переход в другие режимы работы отменяет действие функции Pass-Fail. Опция Off/On дает отключение или включение функции Pass-Fail.

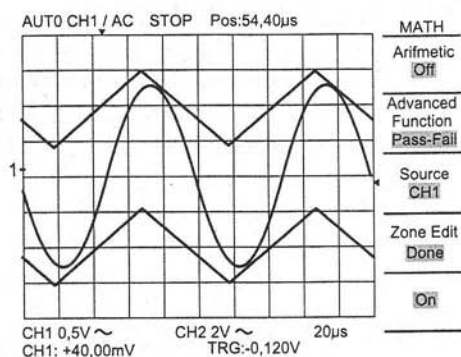


Рис. 8.88. Пример допускового контроля осциллограммы

8.8.14. Быстрое преобразование Фурье и получение спектрограмм

Быстрое преобразование Фурье (FFT) это еще одна принципиально новая и важная возможность, присущая цифровым осциллографам и позволяющая получать спектрограммы сигнала. При таком преобразовании точки массива временной зависимости исследуемого сигнала преобразуются в точки его частотной зависимости — см. подраздел 1.1.8. Спектрограмма это зависимость уровня частотных составляющих спектра сигнала, выраженная в децибелах (дБ), от частоты.

Осциллограф реализует так называемое оконное быстрое преобразование Фурье (подраздел 1.4.3). Вид спектрограммы при нем сильно зависит от вида окна (Window), в котором осуществляются преобразования. Можно задать окно следующего типа: Rectangle — прямоугольное окно, Hamming — окно Хэмминга, Hanning — окно Хэннинга, Blackman — окно Блэкмана и Flattop — окно со скругленной плоской вершиной.

Выбор типа окна зависит от решаемой задачи. К примеру, прямоугольное окно дает высокое разрешение по частоте, но плохое по амплитуде. Окна Хэмминга, Хэннинга и Блэкмана позволяют улучшить амплитудное разрешение и более четко наблюдать высшие гармоники спектра.

При использовании опции FFT появляется возможность выбора канала (CH1 или CH2), окна FFT и режима представления данных на экране (Off — данные FFT не отображаются, Only — отображается только спектрограмма, With Signal — отображается спектрограмма и осциллограмма сигнала — рис. 8.89).

Привыкшие к представлению спектров в учебниках пользователи осциллографов будут немало удивлены странным видом спектрограмм цифровых осциллографов. Вместо тонких вертикальных черточек, которыми обозначаются линии спектра в учебниках, реальные спектрограммы представлены довольно сложными кривыми и имеют постоянно меняющийся уровень шума внизу. Вид кривых спектральных составляющих сильно зависит от выбранного окна. А шум вполне реально присутствует в реальном сигнале, а потому и виден на спектрограмме. Масштаб спектрограмм задается в логарифмических единицах — дБ (0 дБ соответствует уровню 1 В), что усиливает визуализацию слабых сигналов и шума.

Для измерения уровня и частоты спектральных составляющих можно использовать курсоры, активизировав кнопку MEASURE. В позиции меню Source надо выбрать FFT, а в позиции Type Magnitude для измерения уровня с помощью горизонтальных курсоров или Frequency для измерения частоты с помощью вертикальных курсоров. Для перемещения курсора используется ручка 6. На рис. 8.90 показан пример измерения основной спектральной составляющей почти чистого синусоидального сигнала. Превышение им уровня шумов составляет около 45 дБ или почти 200 раз. Таким образом, шум не так уж и значителен, как это может показаться при просмотре спектрограммы.

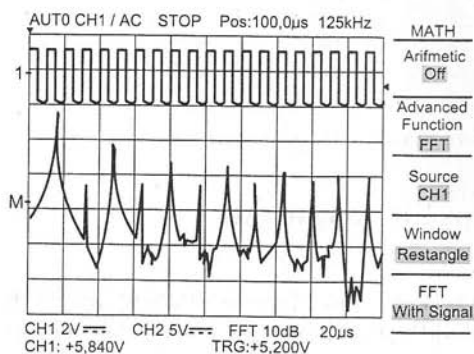


Рис. 8.89. Пример быстрого преобразования Фурье для прямоугольных импульсов (меандра)

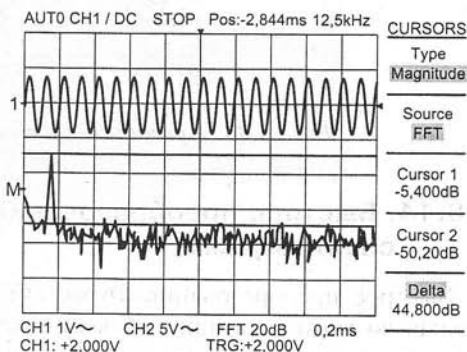


Рис. 8.90. Курсорное измерение уровня спектральной составляющей синусоидального сигнала

8.8.15. Подключение осциллографов к принтеру

Возможности осциллографов серии DS-1000 существенно расширяются при использовании периферийного оборудования — печатающих устройств и компьютеров. Для этого необходима дополнительная интерфейсная карта, которая вставляется сзади осциллографа. Осциллографы описываемой серии на наш рынок поставляются с такой картой и необходимым программным обеспечением. Все это входит в стоимость осциллографа.

Принтер может подключаться к осциллографу через параллельный или последовательный порт. При этом через последовательный порт RS-232 возможно подключение термопринтера Printy 2TM фирмы Sanej Electric Inc., а через параллельный — лазерный или струйный принтер LaserJetTM или DeskJetTM корпорации Hewlett Packard. Для получения распечатки на принтере достаточно активизировать первую кнопку **HARDCOPY** в группе кнопок 3.

8.8.16. Подключение осциллографа к компьютеру

Для вывода информации с осциллографа, управления им и получения распечаток принтером может использоваться настольный или мобильный персональный компьютер. Его можно подключить к осциллографу через порт RS-232 или порт универсальной быстрой последовательной шины USB. Для этого также нужна интерфейсная плата и программное обеспечение (программа SoftView). Установка программного обеспечения самая обычная.

На рис. 8.91 показано полностью открытое окно программы SoftView. Такой вид оно имеет при осциллографировании синусоидального и TTL сигналов функционального генератора MSG-9810A. Как нетрудно заметить, окно дисплея просто копирует экран осциллографа. Однако даже для осциллографа с монохромным экраном осциллограммы представлены в цвете (это заставляет задуматься о

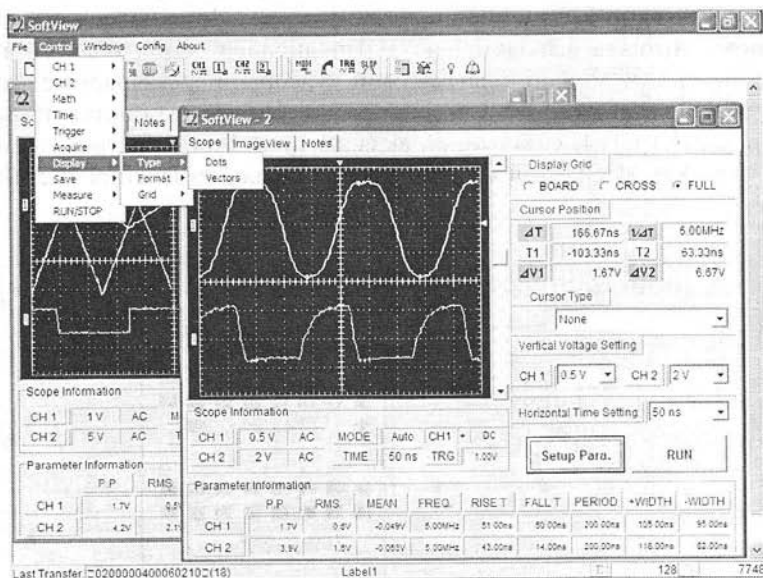


Рис. 8.91. Окно программы SoftView при осциллографировании двух сигналов с функционального генератора MSG-9810A

целесообразности приобретения осциллографов с цветным экраном, например, более дорогой модели DS-1250C). Проку от наблюдения двух осциллограмм прямо на экране дисплея с разными цветами не так уж и много, а при просмотре их на экране дисплея они и так воспроизводятся с разными и произвольно выбираемыми цветами.

Нетрудно заметить, что вид окна программы SoftView (рис. 8.91) существенно отличается от вида передней панели осциллографа (рис. 8.76). Однако основные органы управления (хотя и в несколько ином виде) налицо. Так, в правой части окна программы имеются области для установки вида масштабной сетки осциллографа, данные о положении курсоров (кстати, они перемещаются мышью), список выбора типа курсоров и установки каналов вертикального и горизонтального отклонения. Наиболее впечатляет панель внизу окна с выводом всех 10 пар измеряемых автоматически параметров сигналов по обоим каналам — CH1 и CH2. Кнопка Setup Para. служит для инициализации связи с осциллографом, кнопка RUN запускает измерения (при этом ее название меняется на STOP).

Меню программы имеет следующие позиции:

- File — типовые операции с файлами (открытие нового файла, запись, загрузка и печать принтером).
- Control — управление осциллографом от компьютера (на рис. 8.91 это меню представлено в открытом виде).
- Windows — расположение окон (каскадное, как на рис. 8.91, или друг за другом).
- Config — выбор используемого порта, его параметров и панели выбора цветов (рис. 8.92).
- About — вывод окна с данными о программе.

С работой окна (рис. 8.91) не все благополучно. Правильно выводятся на вкладке Scope только обычные осциллограммы — как с одного, так и с двух каналов. Курсоры, которые выводятся на экран дисплея осциллографа, в окне программы не видны, но можно задавать свои курсоры, перемещаемые мышью (они, однако, отсутствуют на экране осциллографа). Не отображаются также спектрограммы в режиме FFT. К счастью, на вкладке ImageView спектрограммы просматриваются (рис. 11). Но на ней не видны курсоры для измерения спектрограмм.

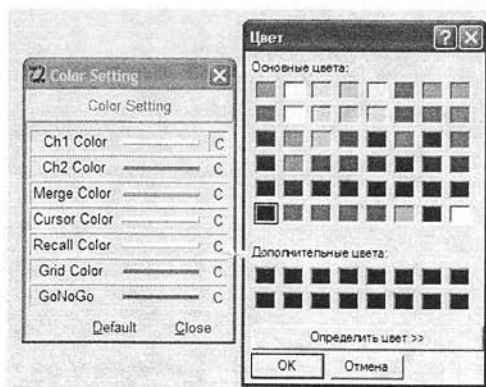


Рис. 8.92. Панель выбора цветов

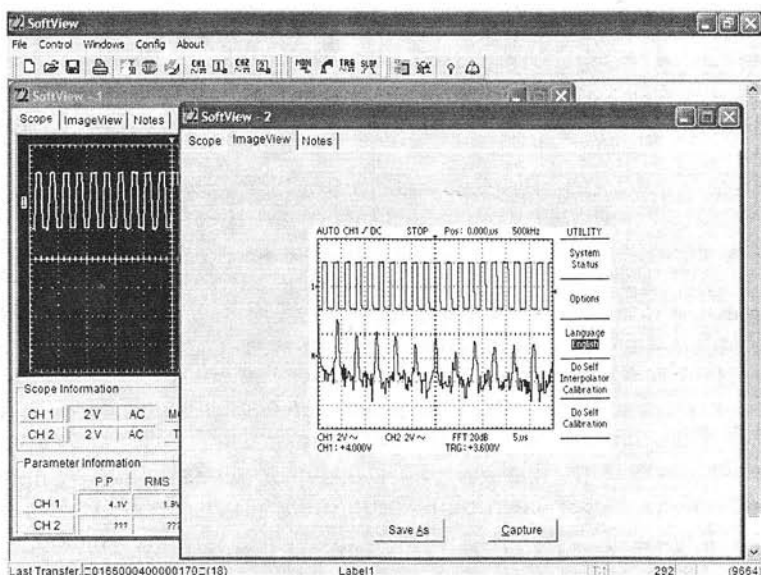


Рис. 8.93. Вкладка *ImageView* (на переднем плане видно окно с открытой вкладкой *Scope*, на которой отсутствует спектрограмма)

Для вывода изображения, присутствующего на экране осциллографа (даже если его нет на вкладке *Scope*), надо активизировать кнопку *Capture*. Кнопка *Save As* позволяет записать изображение в формате графических файлов *.bmp*. Вкладка *Notes* окна программы позволяет записать вместе с файлом осциллограммы в формате *.dso* текстовый файл комментария с форматом *.txt*.

8.8.17. Применение сервисных утилит

В заключении стоит отметить возможности сервисного меню *UTILITY* осциллографа. Она выводит набор утилит, которые видны в правой части окна осциллографа на рис. 8.93. Опция *System Status* позволяет просмотреть все установки осциллографа, а опция *Options* (Опции) установить опции подключения осциллографа периферийных устройств. Состав установок здесь зависит от наличия и типа интерфейсной карты. Опция *Language* (Язык) позволяет установить язык меню осциллографа. Можно надеяться, что в будущем в ее составе появится и русский язык (пока есть английский, французский и японский).

Особо следует отметить утилиты *Do Self Interpolator Calibration* (автокалибровка интерполятора) и *Do Self Calibration* (автокалибровка). Эти сервисные утилиты автоматически осуществляют настройку осциллографа, обеспечивающую максимальную точность представления осциллограмм и точность измерений. Перед началом этих процедур нужно отключить все входы от источников сигналов и отключить все пробники. Процедуры рекомендуется выполнять при первом включении осциллографов, при изменении температуры более чем на 5°C и через каждые 1000 часов работы. Время выполнения этих процедур достигает нескольких минут.

8.9. Особенности работы осциллографов с различными сигналами

8.9.1. Подключение осциллографа к источникам сигналов

Источниками сигналов для осциллографов могут быть как специальные генераторы (НЧ, ВЧ, функциональные и т. д.), так и исследуемые устройства на интегральных микросхемах и дискретных компонентах. При работе со специальными генераторами подключение к ним осциллографа, как правило, осуществляется с помощью специальных кабелей. Тут нужно соблюдать следующие правила:

- использовать кабели со стандартным волновым сопротивлением (в осциллографической технике 50 Ом, а в телевизионной 75 Ом);
- использовать только кабели, гарантированно предназначенные для данного осциллографа;
- при необходимости использовать специальные переходники, например переходник со входным сопротивлением 75 Ом и выходом 50 Ом для подключения к осциллографу 75-омных выводов телевизионных сигналов;
- применять по возможности наиболее короткие кабели из имеющихся;
- использовать в канале Y и в канале запуска-синхронизации развертки кабели одинаковой длины для выравнивания временных задержек сигналов: исследуемого и запуска;
- если есть возможность, откалибровать тракт измерений с помощью генератора тестовых прямоугольных импульсов с малым временем нарастания и спада.

Особенно часто осциллографы используются для просмотра сигналов на выводах транзисторов и интегральных микросхем. Для этого может использоваться стандартная конструкция осциллографического пробника с насадкой в виде жесткого крючка — рис. 8.94. Земляной зажим 1 с крокодилом 2 следует подключать достаточно близко к микросхеме 3, сигналы на выводах которой предполагается исследовать. Как видно из рис. 8.94, хотя крючок вполне устойчиво цепляется за вывод сравнительно большой (по размеру) микросхемы, есть риск замыкания вывода с соседними выводами.

Если крепление пробника на выводе микросхемы необязательно, то более удобным является подключение с помощью иглового наконечника пробника — рис. 8.95. Для доступа к игле достаточно снять с пробника насадку с крючком.

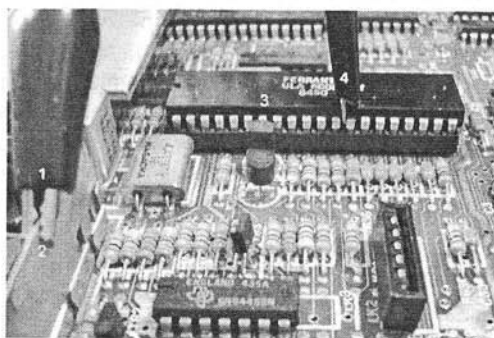


Рис. 8.94. Подключение осциллографического пробника к выводу микросхемы с помощью крючка

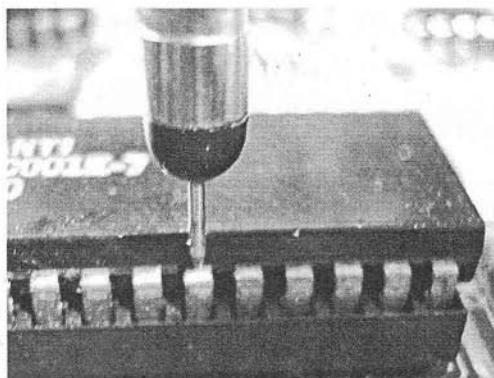


Рис. 8.95. Подключение осциллографического пробника к выводу микросхемы с помощью иглы

Но и в этом случае при неаккуратной работе возможно замыкание выводов микросхемы. Поэтому в состав аксессуаров пробника входит простой пластмассовый наконечник с двумя язычками, создающими изолированную прослойку между основным выводом, к которому подводится игла, и соседними выводами. Подключение пробника к выводу микросхемы с такой насадкой показано на рис. 8.96.

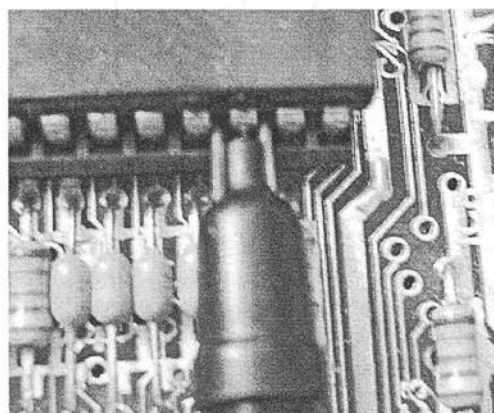


Рис. 8.96. Подключение осциллографического пробника к выводу микросхемы с помощью иглы с наконечником для изоляции от соседних выводов

Иногда возникает необходимость в подключении стандартного пробника к коаксиальному разъему. Для этого в состав аксессуаров пробника включен специальный переходник — рис. 8.97. На рис. 8.98 показан щуп пробника с коаксиальным переходником

Неизменным является следующее правило измерений — длина соединительных проводников должна быть минимальной. Иначе просмотр сигналов с наносекундными (и тем более субнаносекундными) фронтами будет невозможен из-за сильных колебательных процессов во входных цепях.

Обычные пробники имеют слишком длинный провод заземления (10—15 см). Это ведет к большой индуктивности цепи и «звону» на осциллограммах. Лучше всего при просмотре сигналов с короткими фронтами снять наконечник пробника и подключить землю максимально коротким и толстым проводом. Иногда к проб-

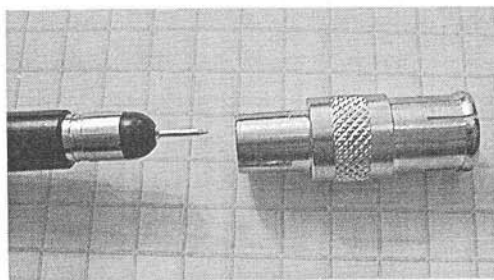


Рис. 8.97. Коаксиальный переходник для подключения к осциллографическому пробнику

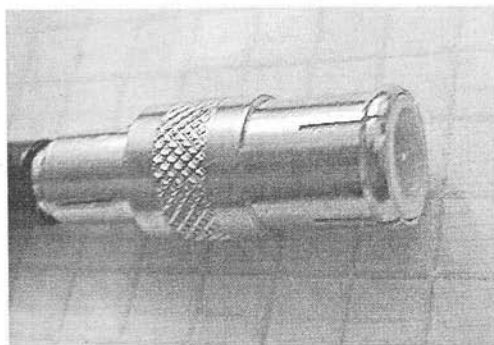


Рис. 8.98. Щуп пробника с коаксиальных переходником

никам придается пружинка с коротким выводом, которая одевается на земляную трубку пробника и служит для короткого подключения земли.

8.9.2. Просмотр сигналов с цифровых устройств

Сигналы с цифровых устройств могут быть повторяющимися и неповторяющимися, например, хаотично изменяющимися. Просмотр повторяющихся сигналов с цифровых устройств особых тонкостей не имеет и аналогичен просмотру сигналов с генераторов синусоидальных или импульсных сигналов. А вот регистрация неповторяющихся сигналов может вызвать трудности. Особенно при использовании аналоговых осциллографов. К счастью современные, даже сравнительно недорогие, цифровые осциллографы в этом отношении имеют ряд положительных свойств. Прежде всего это возможность работы в однократном режиме запуска развертки, сохранении осциллограммы в памяти и возможности просмотра по частям сохраненной осциллограммы.

Рис. 8.99 показывает типичную осциллограмму одного из разрядов входной шины микропроцессора, установленного на системной плате компьютера, снятую в режиме однократной развертки (Single). В режимах Auto и Normal стабильную картину получить нельзя. «Замороженный» сигнал имеет хорошую прямоугольную форму и его анализ может легко выполняться.

На рис. 8.100 показан подобный сигнал со входов микросхемы динамической памяти. Здесь форма сигнала заметно отличается от прямоугольной и анализ осциллограммы позволяет сделать вывод о работе микросхемы на пределе своих возможностей. Для удобства анализа целесообразно выводить сразу несколько

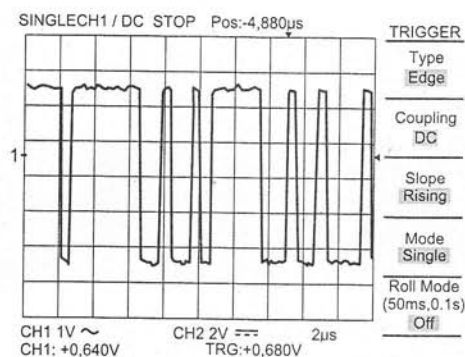


Рис. 8.99. Осциллограмма с одного из входов шины данных микропроцессора

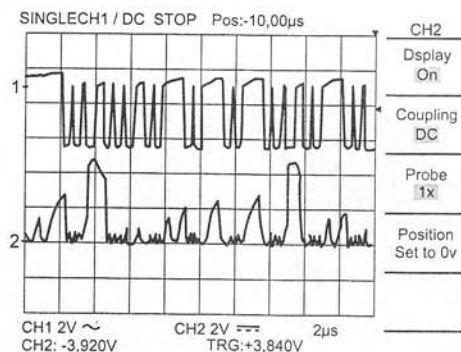


Рис. 8.100. Осциллограмма с одного из входов шины данных микросхемы динамической памяти

сигналов, что оправдывает применение многоканальных осциллографов. В нашем случае показана пара сигналов при запуске развертки также в режиме одиночного запуска Single.

В целом осциллографическое исследование цифровых устройств низкого и умеренного быстродействия [52] особых трудностей не вызывает. Здесь важна не столько техника снятия осциллограмм, сколько логический анализ полученных результатов. Совсем другое дело высокоскоростные импульсные устройства: здесь буквально каждый сантиметр (а порою и миллиметр) длины проводников может привести к сильному звону и искажению осциллограмм. В этом случае надо стремиться к предельному сокращению длины проводов и переходу к подключению через согласованные коаксиальные разъемы. Этот вопрос детально обсуждается в [54].

8.9.3. Измерение крутизны и нелинейности пилообразных сигналов

Схемы развертки, функциональные генераторы и другие устройства генерируют сигналы с примерно линейным нарастанием и спадом. В этом случае возникает задача измерения крутизны и нелинейности таких сигналов. Для измерения крутизны достаточно измерить на некотором отрезке dt (конечном) приращение сигнала du на его практически линейном участке. Тогда средняя крутизна определяется как du/dt .

Прекрасным датчиком крутизны du/dt является конденсатор малой емкости. Ток, текущий через него равен:

$$i_c(t) = C \frac{du(t)}{dt}.$$

Он пропорционален крутизне напряжения, поданного на конденсатор. Изменение тока служит мерой коэффициента нелинейности изменяющегося напряжения $u(t)$.

Практически измерение крутизны и нелинейности сигналов с линейным нарастанием и спадом может измеряться по параметрам импульсов, получаемых на выходе дифференцирующей RC-цепи с постоянной времени $RC < T/5$, где T — период повторения напряжения, крутизна изменения которого измеряется. На рис. 8.101 показаны входные треугольные импульсы с выхода функционального генератора и сигнал на выходе дифференцирующей RC-цепи ($R=100$ КОм и $C=100$ пФ). В данном случае $RC=10$ мкс, а период $T=1$ мс.

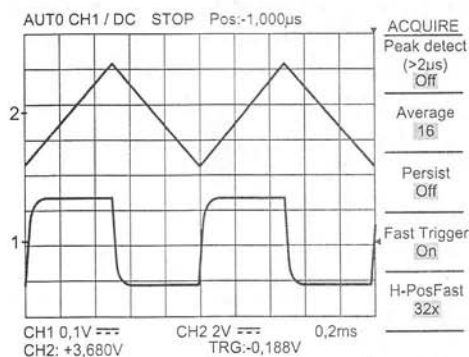


Рис. 8.101. Осциллограммы треугольного импульса на входе дифференцирующей RC-цепочки и на ее выходе

Импульсы на выходе RC-цепи имеют близкую к прямоугольной форму при практически неизменной вершине положительного и отрицательного полупериодов. Это говорит о высокой степени линейного треугольного сигнала. Крутизну изменения сигнала нетрудно вычислить как i/C , при этом i определяется делением амплитуды сигнала на выходе RC-цепи на значение R .

8.9.4. Осциллографирование телевизионных сигналов

Несмотря на то, что телевидение известно уже многие десятки лет, просмотр телевизионных сигналов остается важной сферой применения осциллографов. Новое поколение телевизоров работает с целым рядом телевизионных систем (SECAM, PAL, NTSC и др.), использует новейшую элементную базу, плазменные и ЖК панели. Все это делает осциллографирование телевизионных (в широком смысле этого слова) сигналов необходимым, как при проведении исследовательских и конструкторских работ, так и в наладке и ремонте современной телевизионной техники.

Большинство современных осциллографов, как аналоговых, так и цифровых, имеет те или иные специальные средства для просмотра телевизионных сигналов. Мы рассмотрим лишь наиболее простые из них. К ним относятся синхронизация (и запуск) развертки от телевизионного сигнала. На рис. 8.102 и 8.103 представле-

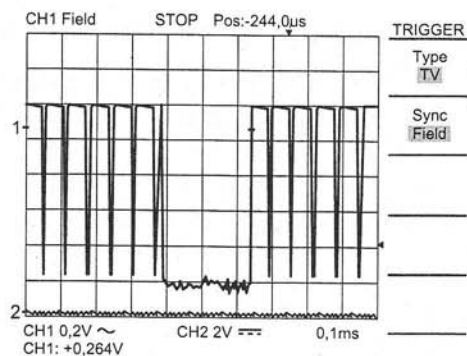


Рис. 8.102. Осциллограмма телевизионного сигнала с адаптера ПК (в середине виден кадровый синхроимпульс)

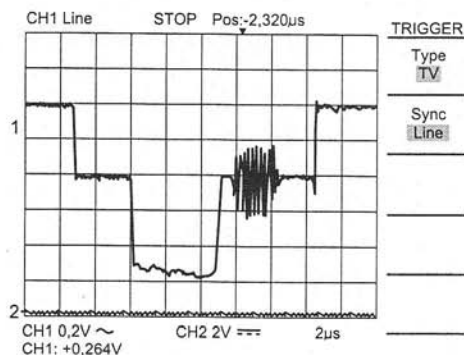


Рис. 8.103. Осциллограмма телевизионного сигнала с адаптера ПК (в середине виден строчный синхроимпульс и вспышка цветовой поднесущей)

ны осциллограммы с кадровым и строчным синхроимпульсом, полученные с помощью цифрового 250-МГц осциллографа DS-1250. В первом случае используется режим TV Filed (запуск кадровым синхроимпульсом), а во втором TV Line (запуск строчным синхроимпульсом). В обоих случаях наблюдается четкая синхронизация, а на рис. 8.103 отчетливо просматривается вспышка цветовой поднесущей на средней полочке строчного синхроимпульса.

Специальные телевизионные осциллографы имеют более сложные схемы запуска развертки, позволяющие отдельно просматривать любой заданный кадр или любую заданную строку и анализировать телевизионные сигналы самым детальнейшим образом. Однако описание таких узкоспециализированных осциллографов выходит за рамки данной книги.

Глава 9. Практическая работа с компьютеризированными лабораториями

Компьютеризированные (виртуальные) лаборатории это новый этап современной техники измерений. Их возможности трудно переоценить. Однако многие ошибочно полагают, что такие лаборатории по карману только очень крупным научным лабораториям. Цель этой главы заключается в том, чтобы показать, что это не так и что уже есть общедоступные виртуальные лаборатории с мощными средствами обработки вполне реальных сигналов. Применение таких лабораторий показано на ряде простых и наглядных примеров.

9.1. Интерфейс компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000

9.1.1. Общий вид окна лаборатории PC-Lab 2000

Компьютеризированная лаборатория PC-Lab 2000, описанная в главе 7, является достаточно дешевым комплексом, обеспечивающим вместе с персональным компьютером класса IBM-PC вполне полноценную и доступную обработку сигналов в двух каналах с полосой частот до 50 МГц. Эта лаборатория может использоваться в научных исследованиях электронных устройств умеренного быстродействия, в качестве учебного комплекса по изучению возможностей цифровой обработки сигналов и даже квалифицированными радиолюбителями.

Ниже представлено описание достаточно массовой версии 1.38 лаборатории PC-Lab, появившейся в конце 2004 года и более новой реализации PC-Lab 2000 v. 2.01, появившейся в начале 2006 г. Внешний вид окна лаборатории, развернутого во весь экран дисплея компьютера, представлен на рис. 9.1.

Жирными надписями поясняется место расположения основных органов управления и важнейших функциональных частей лаборатории. Отметим их назначение:

- Меню — основное меню лаборатории с открывающимися позициями (на рис. 9.1 открыта позиция File);
- Кнопки режимов работы — ряд больших кнопок, задающих режимы работы лаборатории в качестве осциллографа, анализатора спектра, регистратора событий, функционального генератора и анализатора схем в частотной области;
- Экран — область экрана, в которой отображаются осциллограммы, маркеры (курсоры) для выполнения курсорных измерений и данные основных измерений;
- Маркеры — две пары (горизонтальные и вертикальные) точечных линий представляющих перемещаемые мышью курсоры;
- Органы управления каналом CH1 — кнопки выбора и автоустановки канала 1, слайдер Position смещения осциллограммы по вертикали, кнопки коэффициентов чувствительности канала CH1 и кнопки выбора типа входа;

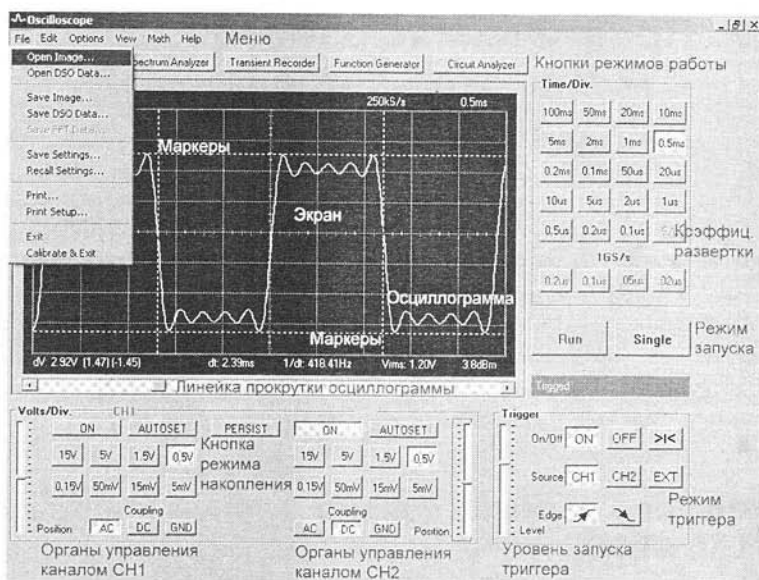


Рис. 9.1. Внешний вид окна лаборатории на диске

- Органы управления каналом CH2 — кнопки выбора и автоустановки канала 2, слайдер Position смещения осциллограммы по вертикали, кнопки коэффициентов чувствительности канала CH2 и кнопки выбора типа входа;
- Кнопка управления режимом накопления — кнопка PERSIST, задающая режим накопления (запоминания) осциллограмм;
- Коэффициенты развертки — набор кнопок, задающих коэффициенты развертки (длительность на 1 большое деление масштабной сетки экрана);
- Режимы запуска — кнопки для многократного и разового пуска развертки;
- Режим триггера — три группы кнопок, управляющих синхронизацией и триггером развертки (включения и выключения синхронизации On/Off, выбора источника синхронизации Source и управления направлением запуска Edge_
- Уровень запуска триггера — слайдер Level, задающий уровень и полярность запуска.

Эти органы управления являются вполне типовыми для современных цифровых запоминающих осциллографов. Это значит, что пользователь, освоивший работу с PC-Lab 2000, готов к грамотному применению любого современного цифрового запоминающего осциллографа. Впрочем, верно и обратное — пользователь таким осциллографом не встретит трудностей при работе с данной лабораторией.

В области каналов окна осциллографа следует особо выделить кнопки ON и AUTOSET. Первая, будучи отжатой, отключает канал и его луч не отображается. А вторая включает режим автоматической установки коэффициентов чувствительности и развертки, при которых можно достаточно удобно наблюдать сигнал. Это особенно удобно, если параметры сигнала не известны и получение его на экране осциллографа связано с трудностями.

Сразу уместно отметить, что работа с органами управления лабораторий осуществляется мышью. Например, для нажатия той или иной кнопки достаточно установить на нее курсор мыши и щелкнуть левой клавишей мыши. Для переме-

щения курсора, движка слайдера или линейки прокрутки достаточно установить на них курсор мыши, нажать левую клавишу мыши и, удерживая эту клавишу, начать перемещение мыши. Завершается оно отпусканием левой клавиши мыши.

9.1.2. Добавление текста в окно экрана

Функции правой клавиши мыши в лаборатории PC-Lab 2000 ограничены. Она предназначена только для задания на экране и позиционирования текстового комментария. Установив курсор мыши в нужном месте экрана надо щелкнуть правой клавишей мыши — появится окно добавления текста Add Text — рис. 9.2, которым можно задать нужный текст.

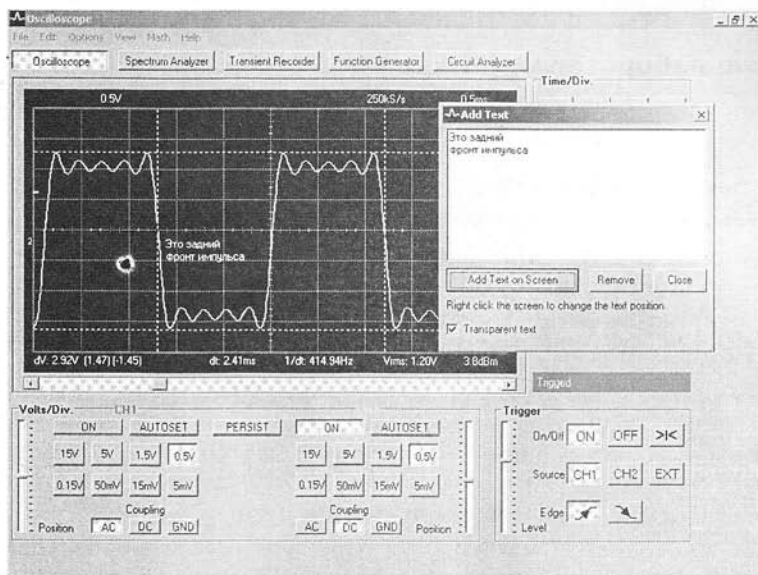


Рис. 9.2. Добавление текста в экран

К сожалению, вставить в экран можно только одну надпись, для чего достаточно в окне Add Text нажать мышью кнопку Add Text on Screen. Надпись с экрана можно убрать, нажав кнопку Remove. Можно закрыть окно Add Text, нажав кнопку Close. Фон текстовой надписи непрозрачный, поэтому изображения курсоров или осциллограмм под текстовой надписью исчезают — рис. 9.3.

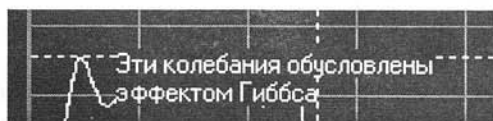


Рис. 9.3. Тестовая надпись, закрывающая осциллограмму и маркеры

Если установить опцию Transparent text, то выводимая надпись приобретает прозрачный фон и через нее можно видеть осциллограмму и маркеры. Этот вариант вывода представлен на рис. 9.4.

Следует отметить, что куда более сложное тестовое и цветовое оформление осциллограмм возможно с помощью обычных графических редакторов. Поэтому

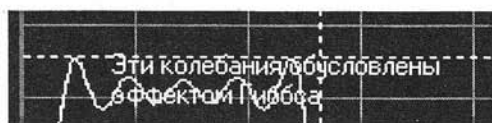


Рис. 9.4. Тестовая надпись с прозрачным фоном, не закрывающая осциллограмму и маркеры

усложнять комментирование в PC-Lab 2000 не оправдано. Тем более, что PC-Lab 2000 создает графические файлы экрана и их можно обрабатывать в любом графическом редакторе. Это чрезвычайно удобно при оформлении презентаций научных докладов на конференциях, подготовке отчетов, диссертаций и дипломных проектов.

9.1.3. Меню лаборатории PC-Lab 2000

Как всякая программная система, виртуальная лаборатория PC-Lab 2000 имеет стандартное меню (рис. 9.1) с рядом позиций:

- File — операции с файлами;
- Edit — выполнение команд копирования Copy и переноса Paste;
- Options — установка опций лаборатории;
- View — установка видимости параметров на экране;
- Math — установка математических операций;
- Help — открытие окна справки.

Каждая позиция меню открывается указанием на нее курсором мыши и щелчком левой клавиши мыши (см. рис. 9.1 с открытой позицией File). При этом становится возможным исполнение относящихся к ней команд. Меню PC-Lab 2000 является контекстно-зависимым. Проявляется это в отсутствии позиции Math в меню режима регистрации и частотного анализа схем.

Некоторые из позиций меню содержат общепринятые команды. Например, таковы команды Copy и Paste в позиции Edit меню. Команда Copy копирует содержимое экрана в буфер Clipboard операционной системы Windows (для определенности отметим, что приведенное здесь описание относится к работе PC-Lab 2000 в среде операционной системы Windows XP любой модификации). Команда Paste вызывает из буфера изображение и размещает его на экране. Таким образом, можно возратить изображение на экран, если оно было размещено в буфере. Щелчок левой клавиши мыши при курсоре, установленном на экране стирает изображение осциллограмм, введенных командой Paste. Но изображения курсоров и масштабной сетки остаются.

9.1.4. Позиция Options меню

В позиции меню Options задается установка следующих опций:

- FFT Windows — установка частотных окон при БПФ;
- FFT Options — установка опций БПФ;
- Hardware Setup... — установка порта, используемого осциллографом;
- Color... — установка цвета объектов экрана;
- Trigger Options — установка опции очистки сигнала синхронизации от шума.

Первые две опции относятся к применению лаборатории в качестве анализатора спектра и мы рассмотрим их немного позже. Позиция Hardware Setup ... откры-

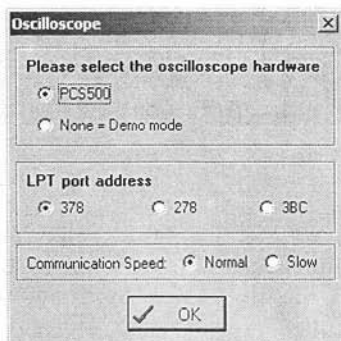


Рис. 9.5. Окно установки режима работы осциллографа и адреса порта LPT

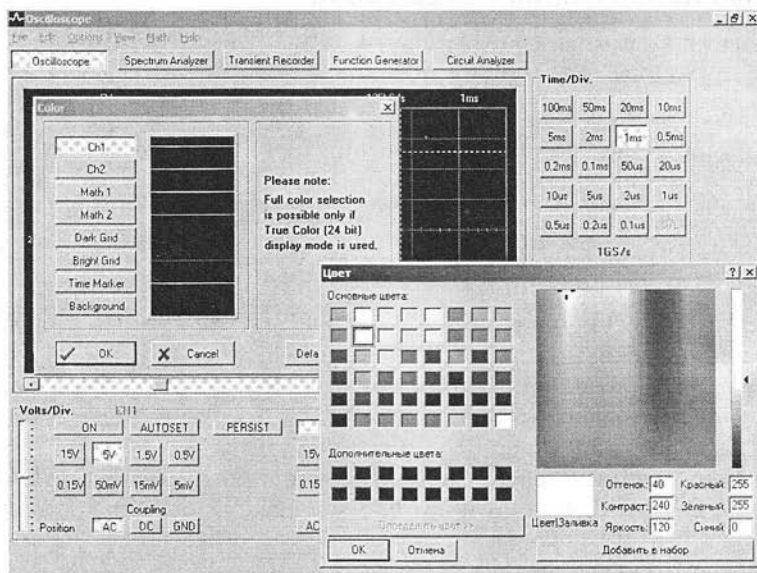


Рис. 9.6. Окна смены цветов объектов экрана (слева, сверху) и выбора цветов (справа, снизу)

вает окно установки режима работы осциллографа (режим демонстрации или реальной работы), а также адрес параллельного порта, по которому осциллограф PCS500 подключается к компьютеру. Это окно представлено на рис. 9.5 и в особых комментариях не нуждается.

Важное значение имеет позиция Color, позволяющая изменить цвета всех объектов экрана и его фона. Эта опция выводит окно смены цветов объекта экрана и окно выбора цветов — рис. 9.6. Действие с этими окнами вполне очевидно. Второе окно появляется при активизации одной из кнопок первого окна.

По умолчанию экран имеет черный фон и разные цвета осциллограмм и иных объектов, например масштабной сети, курсоров и т. д. Такая цветовая гамма удобна при работе с дисплеем, но не всегда. Более четкое представление осциллограмм получается, если они имеют черный цвет на белом фоне — рис. 9.7. Такая цветовая схема соответствует принятой при черно-белой печати книг и статей и в дальнейшем будет использована именно она.

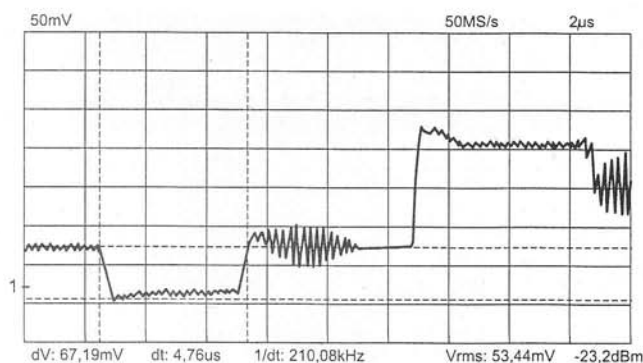


Рис. 9.7. Осциллограмма фрагмента телевизионного сигнала, имеющая черный цвет на белом фоне

9.1.5. Опции позиции View

Позиция View меню содержит контекстно-зависимый набор команд. Это, прежде всего, опции осциллографа:

- RMS value — вывод данных об измерении значения RMS AC сигнала;
- dBm value — вывод данных об измерении значения dBm AC сигнала;
- Sample Rate — вывод данных о скорости дискретизации (в S/s);
- Waveform Parameters... — вывод окна задания и вывода значений автоматически измеряемых параметров сигналов.

Следующая группа команд задает вывод следующих маркеров:

- Markers DSO
- Markers FFT f&V
- Markers FFT f&dV
- Markers FFT f&Spectral Density dV/sqrt(H)

Есть еще две важные команды:

- Bright Grid — задание повышенной яркости масштабной сетки;
- Dot Join — задание соединения точек.

Соответствующие данные размещаются в верхней или нижней частях экрана и представляют численные значения выбранных параметров.

9.1.6. Позиция Math задания математических операций

Осциллограф PCS500 может выполнять ряд операций с сигналами каналов CH1 и CH2. они заданы в позиции Math меню:

- CH1 + CH2 — построение осциллограммы суммы сигналов двух каналов;
- CH1 — CH2 — построение осциллограммы разности двух каналов;
- XY Plot — работа в режиме XY (канал CH1=Y, CH2=X)
- Inverse CH2 — инверсия сигнала в канале CH2.

Каждый включенный режим выводит изображение кнопки со своим названием под кнопкой PERSIST. Для примера на рис. 9.8 показана подготовка к работе с режимом сложения осциллограмм каналов CH1 и CH2.

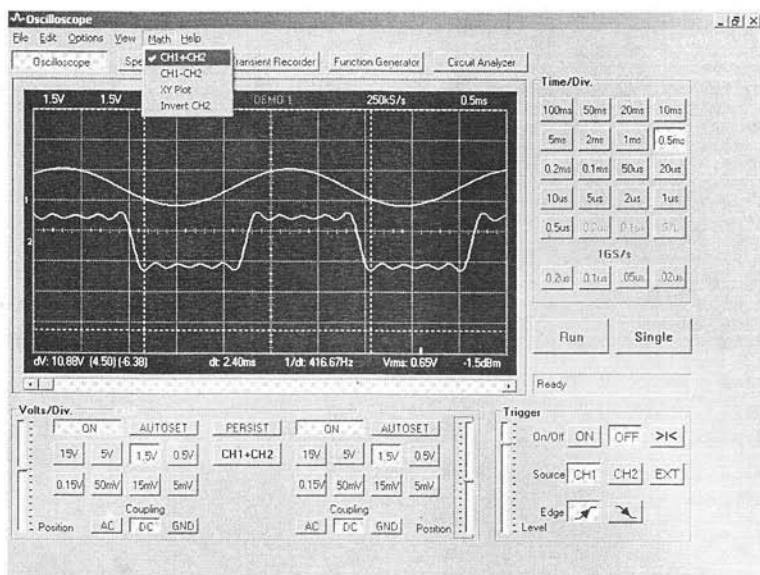


Рис. 9.8. Пример установки режима CH1 + CH2

Кнопка режима может быть нажатой или отжатой. При нажатой кнопке выполняется соответствующая операция — рис. 9.9. Полученная осциллограмма является суммой осциллограмм, показанных на рис. 9.9. При отжатой кнопке осциллограф возвращается к стандартному режиму отображения сигналов от обоих каналов.

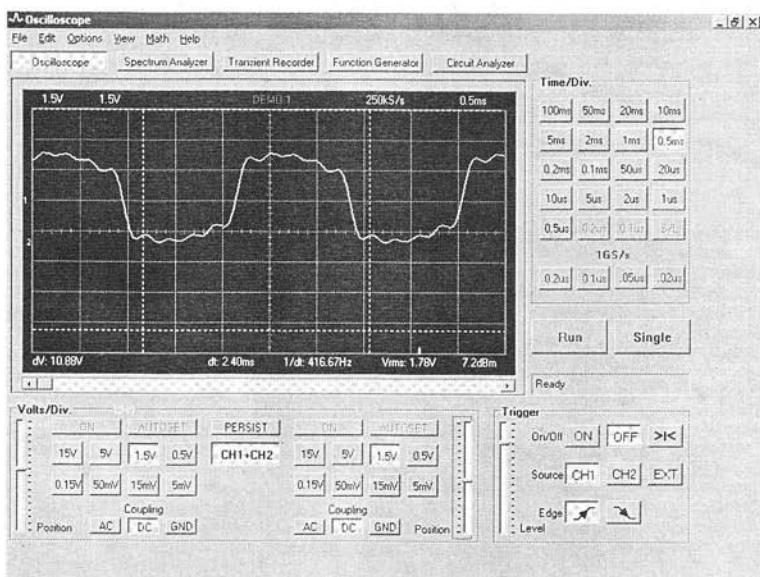


Рис. 9.9. Пример работы в режиме CH1 + CH2

На рис. 9.10 показан пример работы в режиме CH1 — CH2. Нетрудно убедиться в том, что на этот раз полученная осциллограмма представляет разность осциллограмм, представленных на рис. 9.8. Этот режим позволяет осциллографировать

9.1.7. Меню файловых операций File

Как известно, компьютер хранит информацию в виде файлов. Это особая структура кодов, хранящихся на магнитном диске или во флэш-памяти, имеющая название и расширение. Расширение отделяется от названия точкой. Например, data.txt это текстовый файл с именем data и расширением txt. Расширение файла характеризует его тип, например, .txt — текстовый файл формата ASCII, .doc — текстовый файл формата текстового редактора Word, .exe — исполняемый файл и т. д.

Виртуальная лаборатория PC-Lab 2000 обменивается данными с компьютером через файлы. Для этого она позволяет создавать и считывать файлы ряда характерных для нее форматов. Основные файловые операции PC-Lab 2000 сосредоточены в позиции File меню. Она содержит следующие команды (см. рис. 9.1, где эта позиция открыта):

- Open Image... — открытие окна загрузки файла изображения экрана (формат .bmp);
- Open DSO Data ... — открытие окна загрузки файла данных осциллографа (в формате .txt);
- Save Image ... — открытие окна записи изображения экрана в формате .bmp;
- Save DSO Data ... — открытие окна записи данных осциллографа в формате .txt;
- Save FFT Data ... — открытие окна записи данных анализатора спектра (в формате .txt);
- Save Settings ... — запись сделанных установок в формате .set;
- Recall Settings ... — сброс сделанных установок и загрузка ранее сделанных;
- Print ... — вывод окна печати изображения экрана;
- Print Setup ... — вывод окна установок печати;
- Exit — завершение работы с программой;
- Calibrate & Exit — калибровка и выход из программы.

Знак ... означает, что соответствующая команда открывает окно файловых операций — загрузки или сохранения файла. Эти окна идентичны и отличаются только титульной строкой. Поэтому ограничимся приведением на рис. 9.12 окна открытия файла рисунков — копий экрана.

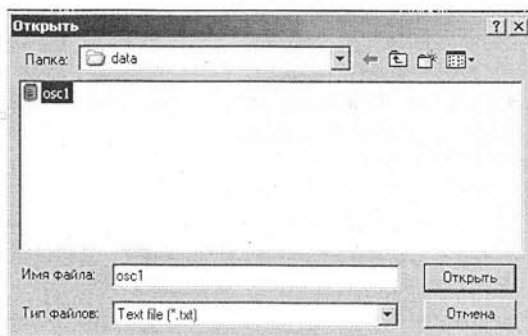


Рис. 9.12. Окно открытия файлов

Отметим, что все записанные файлы хранятся в папке (директории) с именем data, которая имеется в директории программы PC-Lab 2000.

9.1.8. Работа со справкой PC-Lab 2000

Позиция Help меню открывает доступ к справке по виртуальной лаборатории PC-Lab 2000. Эта позиция содержит три команды:

- Contents — вывод окна справки;
- Installing Windows XT driver — инсталляция драйвера, необходимого при работе PC-Lab 2000 в среде операционной системы Windows NT;
- About ... — вывод окна с данными о текущей версии осциллографа.

Основная команда Contents выводит стандартное и принятое в приложениях под операционную систему Windows окно справки, показанное на рис. 9.13. Окно позволяет работать со справкой и содержит 4 вкладки:

- Содержание — работа с указателем по контексту (содержимому разделов);
- Указатель — работа с алфавитным указателем;
- Поиск — поиск нужных данных по ключевым словам;
- Избранное — просмотр избранных разделов.

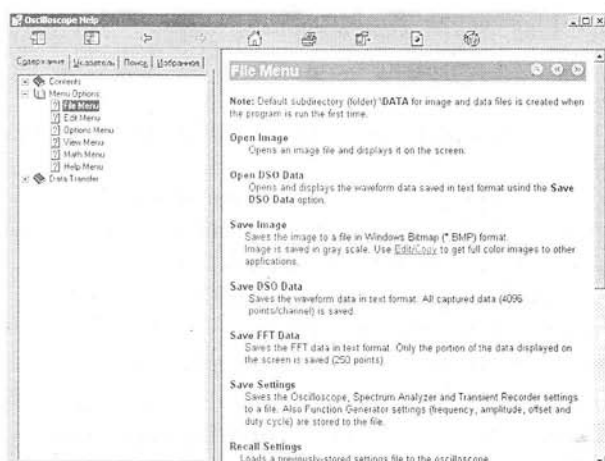


Рис. 9.13. Окно справки по PC-Lab 2000

Работа со справками приложений под Windows общеизвестна и в подробном описании не нуждается. Отметим лишь, что текст справки по PC-Lab 2000 довольно лаконичен (что видно из страницы справки, показанной на рис. 9.13) и представлен на английском языке. Команда About... выводит окно с указанием текущей версии программы — оно уже было показано на рис. 4.19 в центре основного окна PC-LAB 2000.

9.2. Осциллографирование в PC-Lab 2000 в реальных условиях

9.2.1. Просмотр синусоидальных колебаний высоких частот

До сих пор мы демонстрировали возможности PC-Lab 2000 в демонстрационном режиме работы. Читатель может с его помощью ознакомиться со многими возможностями этой виртуальной лаборатории, не приобретая ее аппаратуру. До-

статочно установить на ПК программу PC-Lab 2000. Однако, наибольший интерес, естественно представляет работа с этой лабораторией в реальных условиях и с реальными сигналами и с реальными аппаратными средствами лаборатории. Только это позволяет выявить как достоинства, так и недостатки данного инструмента и оценить его возможности в измерительной практике.

Начнем изучение возможностей лаборатории с просмотра реального высокочастотного синусоидального сигнала. Осциллограф PC-Lab 2000 имеет диапазон частот до 50 МГц и на этой частоте АЧХ осциллографа уже имеет заметный спад — до уровня -3 дБ. Подадим на вход осциллографа сигнал от ВЧ-генератора с частотой 50 МГц и кнопкой AUTOSET запустим процесс измерений. Через несколько секунд появится картинка с синусоидой и по кнопкам в окне осциллографа можно судить о заданных параметрах — рис. 9.14.

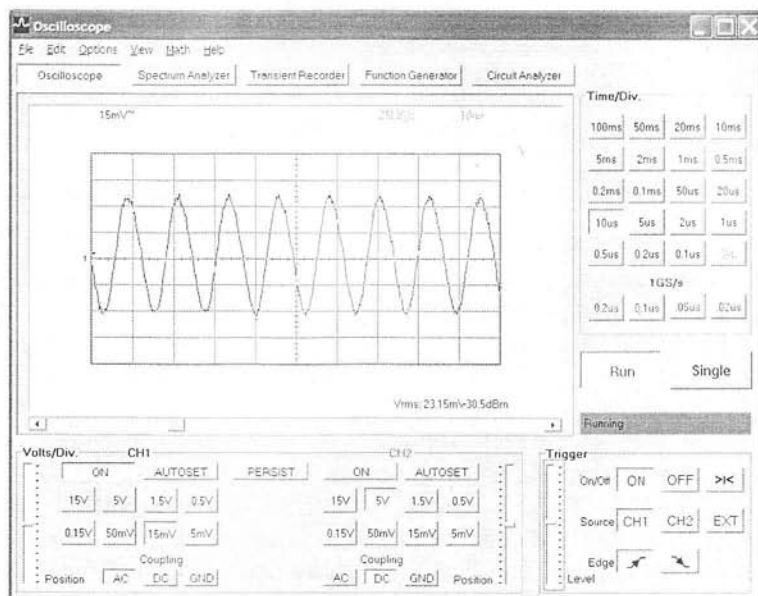


Рис. 9.14. Начало просмотра в автоматическом режиме синусоидального сигнала с частотой 50 МГц

Полученная осциллограмма, несмотря на ее привлекательный вид, типичная «обманка» цифрового осциллографа. Об этом можно судить по установке в нажатое положение кнопки развертки -10 мкс/дел. Из этого можно сделать вывод, что осциллограф показывает частоту сигнала чуть ниже 100 кГц вместо 50 МГц. Откуда же взялась такая неплохая форма сигнала? Это результат работы осциллографа в стробоскопическом режиме, который, вообще говоря, не является для данного осциллографа узаконенным. Обратите внимание на то, что частота стробирования установлена 25 Мс/с (или 25 Мв/с). Это явно недостаточно для представления сигнала с частотой 50 МГц. Вы можете убедиться в том, что на других развертках можно увидеть все что угодно (точки, шумы и т. д.), но только не устойчивую 50-МГц синусоиду.

В данном случае мы имеем именно тот случай, когда надо воспользоваться работой с частотой выборок 1 Гв/с с усреднением сигналов по многим периодам. При этом можно использовать 4 кнопки установки длительности развертки: 1, 2, 3, 4.

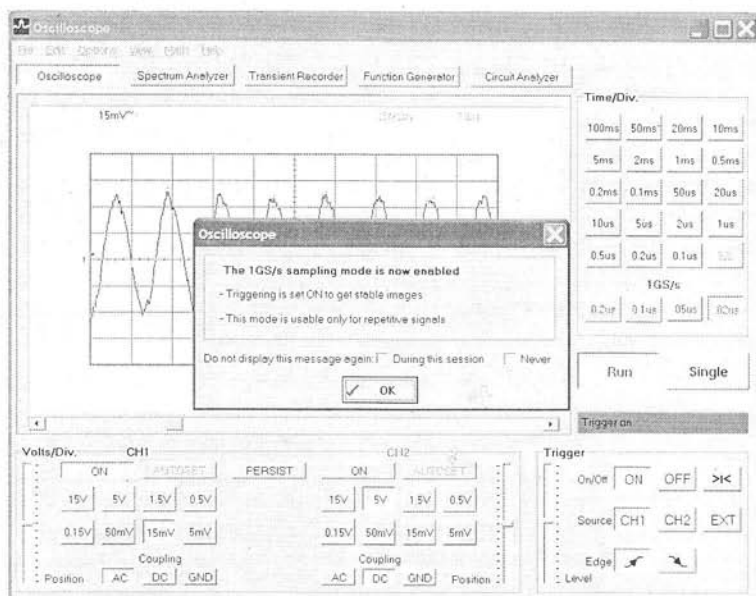


Рис. 9.15. Переход к осциллографированию с высокой частотой выборки

0,1, 0,05 и 0,02 мкс/дел под надписью 1 Gs/s. Выбрав самую короткую длительность (0,02 мкс/дел), мы запустим режим осциллографирования с эффективной частотой выборки в 1 Gs/s. При этом в центре окна осциллографа появляется окно с предупреждением о переходе к работе с высокой частотой выборки — рис. 9.15.

Нажав кнопку ОК этого окна можно увидеть, как в течении нескольких секунд идет обработка осциллограмм. Она завершается выводом осциллограммы синусоиды с частотой 50 МГц — рис. 9.16. На практике осциллограмма немного «дышит», что не очень мешает ее наблюдению. Но почти сенсационно выглядит автоматическое вычисление всех двух десятков параметров этого сигнала с предельной для данного осциллографа частотой — рис. 9.17.

Впрочем, если понаблюдать за работой осциллографа, то можно выявить, что время от времени работа автоматической системы измерения параметров нарушается. Для части частотно-временных параметров наступает отказ от их вычислений и появляются значки ?? (трудности в измерениях) и даже ??? (невозможность измерений) — рис. 9.18. Это наблюдается, если размеры изображения слишком малы или, напротив, велики, если неудачно выбран уровень запуска триггера развертки или длительность развертки. Удивляться этому не стоит — в данном случае осциллограф работает на пределе своих возможностей. И то, что синусоида с частотой 50 МГц все же верно отображена, да еще и с правильным измерением ее параметров в автоматическом режиме, говорит о проработанности аппаратной и программной компонент PC-Lab 2000.

А теперь установим частоту синусоидального сигнала равной 10 МГц. На этот раз измерения проходят вообще «без сучка и задоринки» и параметры сигнала исправно вычисляются — рис. 9.19. Результат в данном случае понятен: частота сигнала, хотя и высока для данного типа осциллографа, но уже далека от его высокочастотной границы.

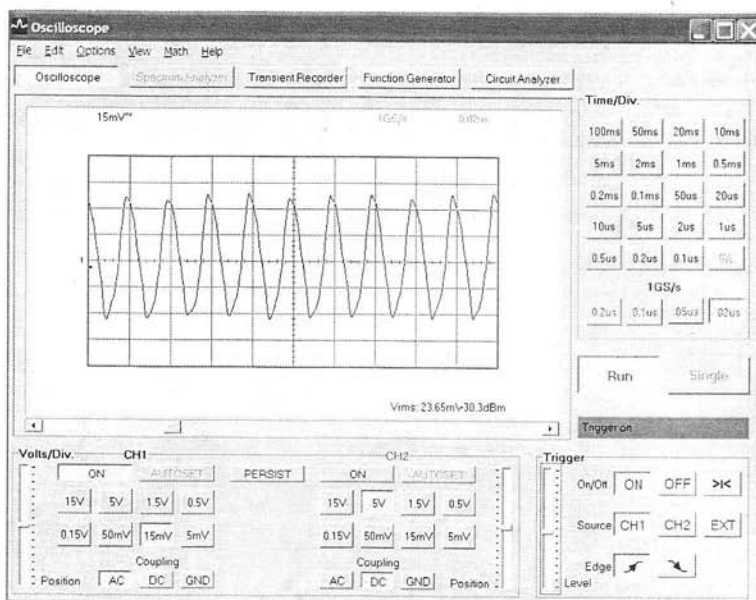


Рис. 9.16. Наблюдение сигнала с частотой 50 МГц и измерение его параметров

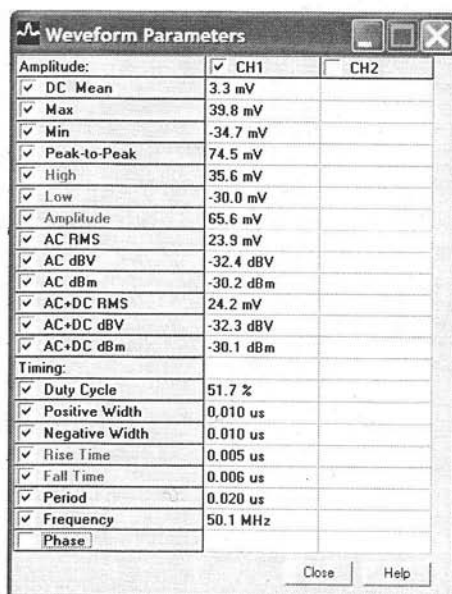


Рис. 9.17. Окно с результатами автоматического измерения параметров синусоидального сигнала с частотой 50 МГц

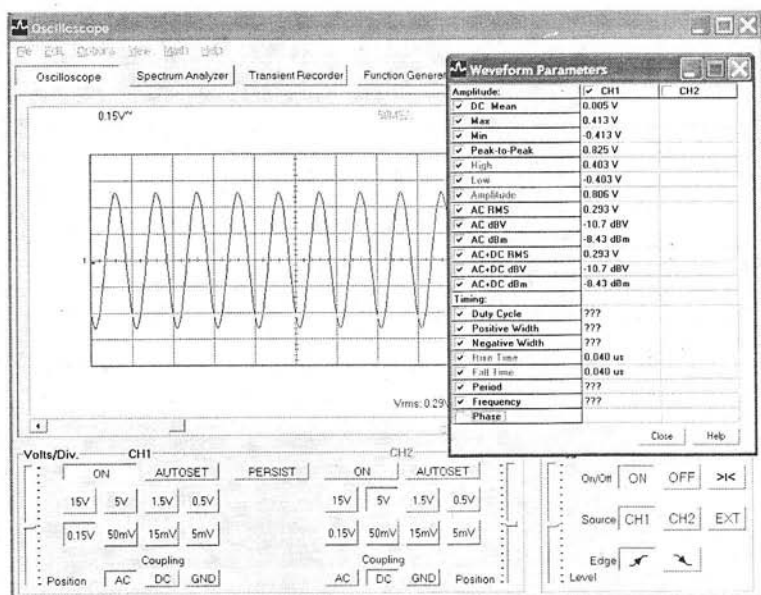


Рис. 9.18. Момент отказа от вычислений ряда частотно-временных параметров

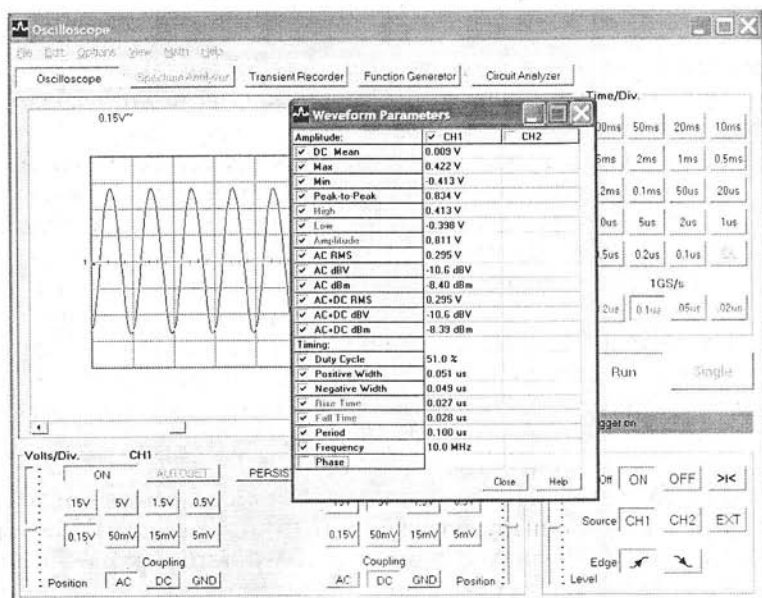


Рис. 9.19. Осциллографирование и автоматическое измерение параметров синусоидального сигнала с частотой 10 МГц

9.2.2. Просмотр амплитудно-модулированного сигнала

Просмотр амплитудно-модулированного высокочастотного сигнала на цифровом осциллографе требует от пользователя особого внимания в виду большой разности частот модулирующего и несущего колебаний. Установки длительности раз-

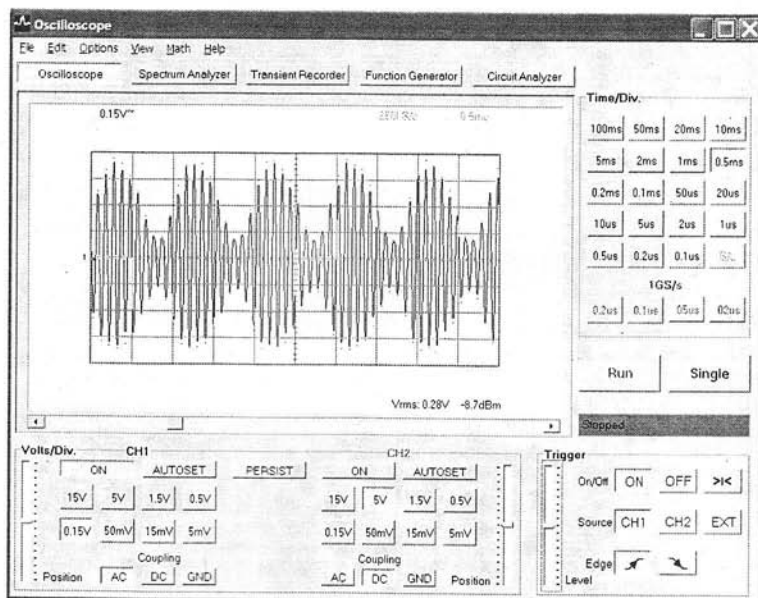


Рис. 9.20. Модулированное колебание с частотой 10 МГц при наличии стробоскопического эффекта

вертки, дающие возможность просмотреть огибающую модулированного сигнала, обычно не позволяют рассмотреть его высокочастотное заполнение. Более того, из-за проявления стробоскопического эффекта иногда можно увидеть «книжное» стилизованное изображение модулированного сигнала — рис. 9.20.

Осциллограмма рис. 9.20 могла бы сойти «за правду», если бы не множитель развертки в 0,5 мс/дел. Из его значения очевидно, что огибающая с частотой в 1 кГц просматривается верно, но вот высокочастотная начинка «выдается» с частотой примерно в 10 кГц, что почти в 1000 раз меньше реальной частоты сигнала в 10 МГц. Тут любопытно только одно — эту стробоскопическую картинку, тем не менее, можно использовать для измерения коэффициента модуляции и установки его нужного значения. Получить картинку модулированного ВЧ-колебания, подобную наблюдаемой на экране аналогового осциллографа (рис. 5.34, например) и со сплошной полосой высокочастотного заполнения, можно только у приборов с большой частотой выборки в режиме реального времени.

Впрочем, если резко снизить частоту несущей, то можно наблюдать реальное промодулированное колебание — рис. 9.21. Оно не совсем стабильно, но по нему можно вычислить коэффициент модуляции (к числу автоматически вычисляемых параметров он, увы, не входит). С помощью линейки прокрутки можно просмотреть все выборки сигнала в памяти осциллографа и убедиться в том, что моменты достижения амплитудой модулированного колебания минимального и максимального значения периодически повторяются. Это прекрасный пример применения длинной памяти в виртуальной лаборатории PC-Lab 2000.

9.2.3. Функциональная схема исследование электронных цепей и устройств

Для проведения исследования электронных цепей и устройств исследуемое устройство (или цепь) надо подключить к виртуальной лаборатории так, как это

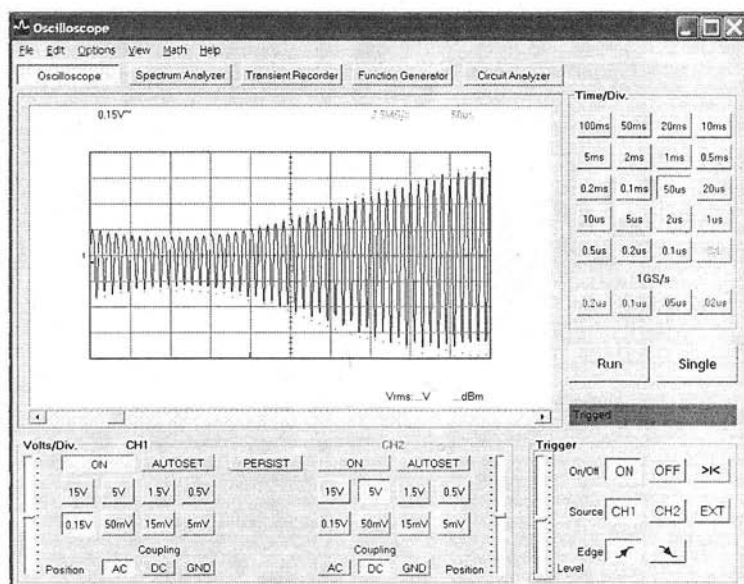


Рис. 9.21. Наблюдение синусоидального колебания с частотой 100 кГц, промодулированного синусоидой с частотой 1 кГц

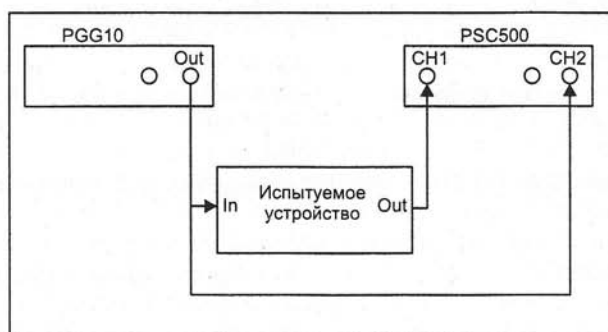


Рис. 9.22. Блок-схема испытания устройств (цепей) с помощью виртуальной лаборатории PC-Lab2000

показано на рис. 9.22. В качестве генератора испытательного сигнала используется виртуальный генератор PCG10, а для контроля за входным и выходным напряжениями — виртуальный осциллограф PCS500.

При исследовании переходных процессов безразлично, какой канал (CH1 или CH2) используется для контроля входного, а какой — выходного напряжения. Однако при использовании осциллографа в режиме XY (например, для контроля фазы по фигурам Лиссажу) нужно обеспечить использование каналов именно так, как показано на рис. 9.22. Для получения устойчивой внешней синхронизации соедините показанные на рис. 9.22 свободными разъёмы отрезком ВЧ-кабеля.

9.2.4. Исследование дифференцирующей RC-цепочки

Выше мы уже описали исследование дифференцирующей RC-цепочки с помощью аналогового осциллографа и встроенного в него калибратора, вырабатываю-

шего меандр с частотой 1000 Гц и амплитудой 0,25 В. Применяя виртуальную лабораторию PC-Lab 2000 с функциональным генератором PCG10, мы получаем неизмеримо большие возможности в выборе тестовых сигналов: см. рис. 4.11, на котором показаны окна функционального генератора. Это синусоидальные, прямоугольные, треугольные, шумовые, вида $\sin(t)/t$ сигналы генератора, полтора десятка разных сигналов из библиотеки сигналов и, наконец, сигналы, которые пользователь может задать самостоятельно и включить их в библиотеку сигналов.

Но пока ограничимся применением меандра с частотой 1 кГц и и двойной амплитудой 5 В для исследования дифференцирующей RC-цепи вида, показанного на рис. 5.37 слева, при $R=51$ кОм и $C=1000$ пФ. На рис. 9.23 показаны осциллограммы меандра от функционального генератора (верхний луч) и с выхода RC-цепи (нижний луч) при установке коэффициента развертки 0,5 мс/дел. При этом на рис. 9.23 показаны результаты курсорных измерений двойной амплитуды меандра (показания под экраном 5,02 В), периода ($dt=0,99$ мс) и частоты ($f=1/dt=1,01$ кГц). Погрешность измерения периода и частоты оказалась менее 1% (напомним, что частоты сигналов функционального генератора стабилизированы кварцем).

Сравнив осциллограммы рис. 9.23 с осциллограммами рис. 5.38, полученными от аналогового осциллографа ОСУ20, мы увидим, что по форме они абсолютно идентичны. Но в случае лаборатории PC-Lab 2000 любой версии появилась возможность курсорных измерений параметров сигналов на входе и выходе испытуемого устройств, да и вид осциллограмм выглядит куда более опрятно. А для новейшей версии лаборатории PC-Lab 2000 v. 1.38 (конец 2004 г.) можно провести автоматический замер 21 параметра как входных, так и выходных сигналов. Панель с этими параметрами и результатами их замера показана на рис. 9.23 справа.

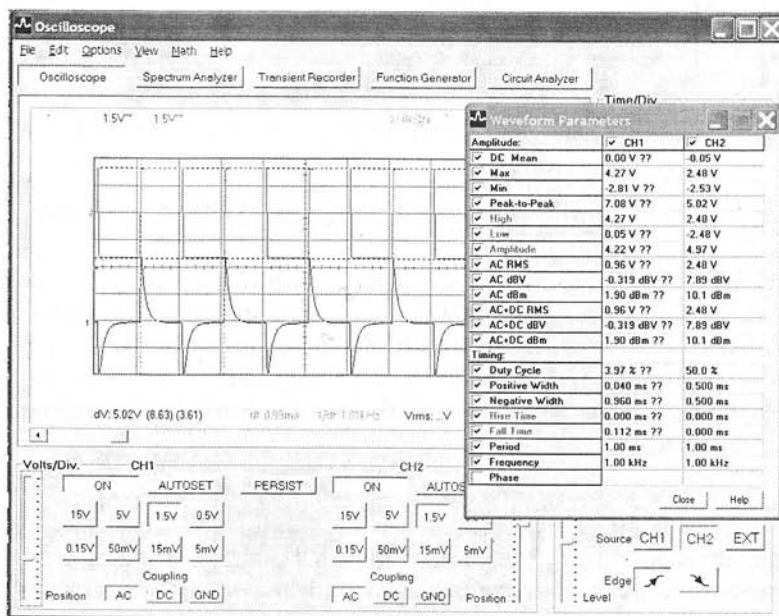


Рис. 9.23. Испытание дифференцирующей RC-цепи средствами лаборатории PC-Lab 2000

9.2.5. Получение семейств осциллограмм в режиме PERSIST

Новые версии PC-Lab 2000 дают еще одну замечательную возможность — построение множества осциллограмм в окне. Это эквивалентно применению 8-10 и более каналов. Для реализации такой возможности используется новый режим накопления осциллограмм PERSIST. Для устойчивой синхронизации в этом случае целесообразно перейти к внешней синхронизации осциллографа с выхода SINC OUT функционального генератора. После этого можно снять серию осциллограмм, например для разных двойных амплитуд меандра в 3, 4, 5 и 6 В. Полученное семейство осциллограмм представлено на рис. 9.24.

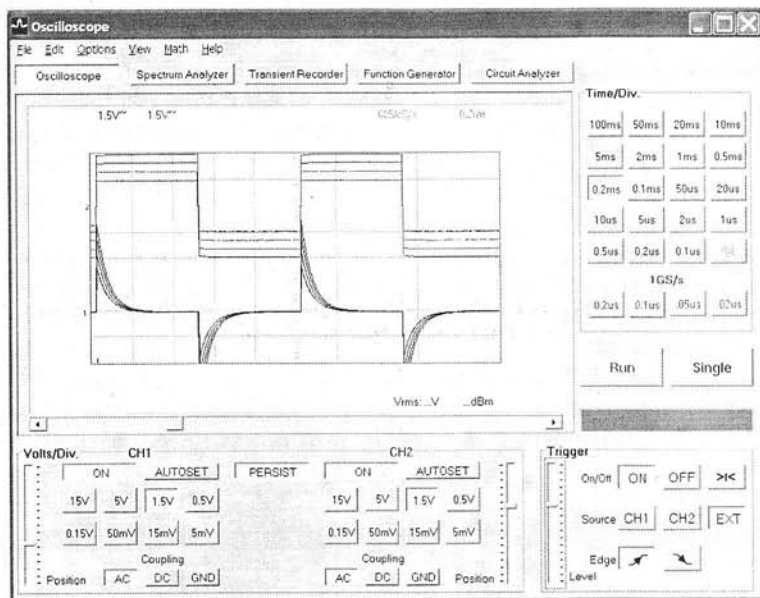


Рис. 9.24. Снятие семейства осциллограмм для разных двойных амплитуд меандра

Наличие функционального генератора с множеством форм, создаваемых им сигналов, открывает возможности всестороннего исследования электронных цепей и устройств. Например, на рис. 9.25 представлены семейства осциллограмм, иллюстрирующих реакцию дифференцирующей RC-цепи на импульсы треугольной форма с двойной амплитудой от 1 до 6 В, меняющейся с шагом в 1 В. Применена описанная выше техника съема множества осциллограмм.

9.2.6. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на меандр

Теперь проведем аналогичное исследование для интегрирующей RC-цепи при тех же значениях R и C . Результаты испытания прямоугольными импульсами (меандр) представлены на рис. 9.26. В правой части рис. 9.26 показано окно с результатами автоматического измерения параметров входных и выходных импульсов для данного примера.

Сравнивая осциллограммы на входе и выходе интегрирующей RC-цепи (рис. 9.26) с ранее представленными результатами испытания аналоговым осцил-

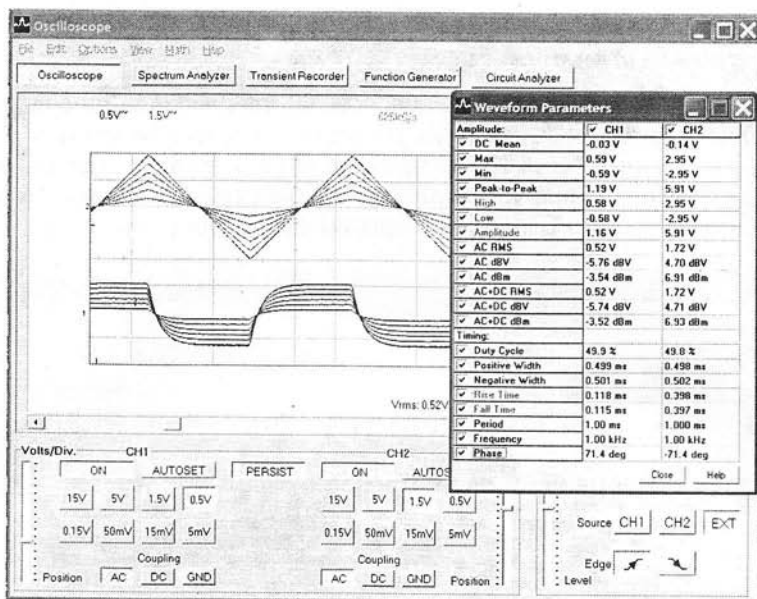


Рис. 9.25. Снятие семейства осциллограмм реакции дифференцирующей RC-цепи на сигнал треугольной формы

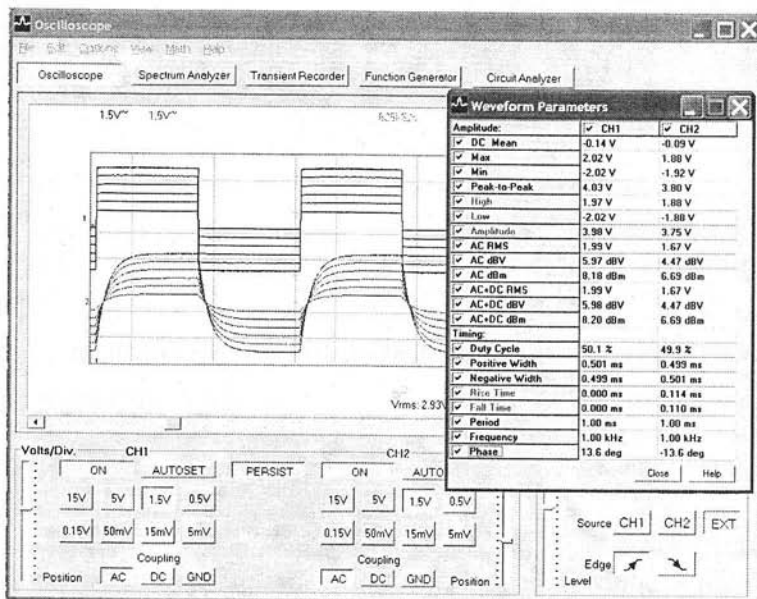


Рис. 9.26. Снятие семейства осциллограмм со входа и выхода интегрирующей RC-цепочки при различных амплитудах меандра на ее входе

логграфом ОСУ20, мы вновь убеждаемся в их идентичности и наличии у PC-Lab 2000 новых обширных возможностей.

9.2.7. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на сложные импульсы

Как уже отмечалось, функциональный генератор способен генерировать импульсы, временная зависимость которых может описываться библиотечным файлом. Покажем пример этого. На рис. 9.27 представлены окна функционального генератора в момент выбора файла библиотеки с именем *trap1*, который задает импульсы прямоугольной формы с линейно нарастающей вершиной.

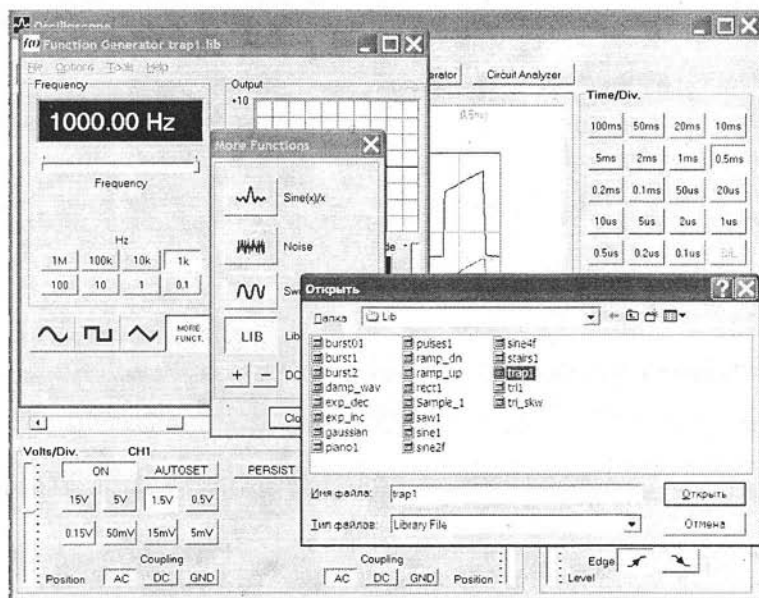


Рис. 9.27. Загрузка в функциональный генератор файла *trap1.lib*

На рис. 9.28 показаны осциллограммы реакции интегрирующей RC-цепи на заданные импульсы. В правой части рисунка выведено окно с результатами автоматических вычислений 21 параметра входного и выходного импульсов.

9.2.8. Исследование реакции LRC-цепочки на меандр

Теперь рассмотрим реакцию LRC-цепочки (колебательного контура — рис. 5.40) на прямоугольные симметричные импульсы (меандр). Осциллограммы для этого случая показаны на рис. 9.29 ($L=40$ мкГн, $C=10$ нФ, R как внешний резистор не включалось). Реакция цепи вполне оправдывает ее название — хорошо виден затухающий периодический процесс колебаний в контуре.

Из осциллограмм отчетливо видно, что функциональный генератор имеет конечное выходное сопротивление (50 Ом). В результате колебательный процесс проникает и во входную цепь генератора, что видно по наложению на меандр.

9.2.9. Исследование релаксационного генератора

В конце описания классических возможностей осциллографа — лаборатории PC-Lab 2000 рассмотрим исследование с ее помощью релаксационного генератора на аналоге однопереходного транзистора, выполненном на двух транзисторах с разным типом проводимости (рис. 9.30). Это устройство имеет S-образную вход-

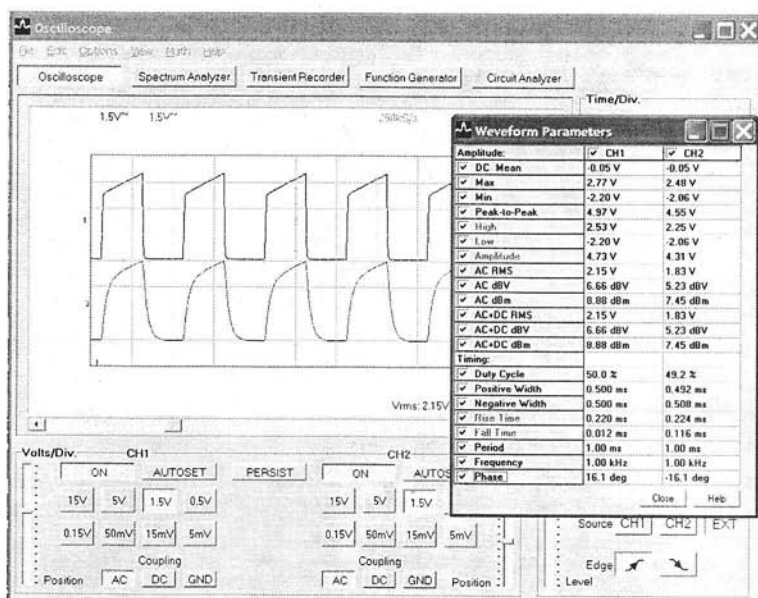


Рис. 9.28. Реакция интегрирующей RC-цепи на импульс из файла trap1.lib

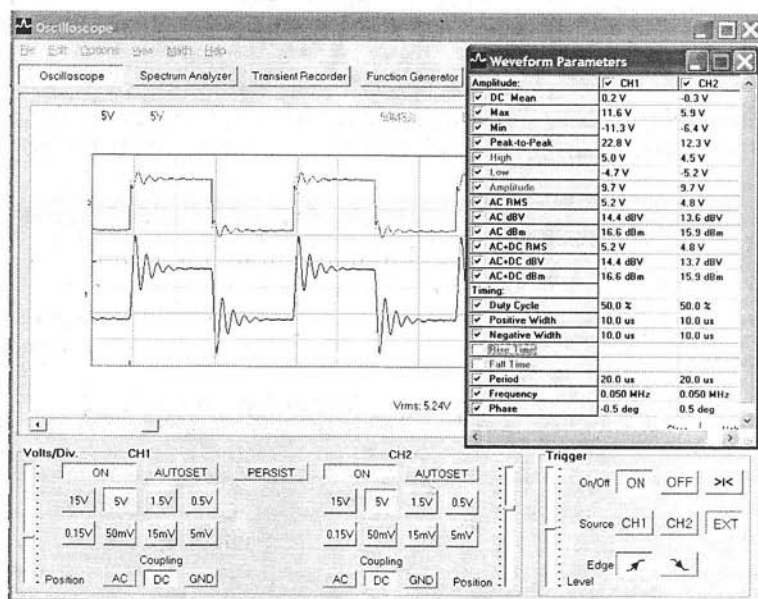


Рис. 9.29. Осциллограммы реакции LRC-цепочки на импульс — меандр

ную характеристику с напряжением включения $U_{\text{вкл}}$ и выключения $U_{\text{выкл}}$, задаваемыми делителем на резисторах R1, R2 и R3. В автоколебательном режиме работы конденсатор C заряжается через резистор R выключенных транзисторов до напряжения $U_{\text{вкл}}$. При этом транзисторы включаются, и конденсатор C разряжается до напряжения $U_{\text{выкл}}$. Далее процесс повторяется и на конденсаторе C формируется нелинейно изменяющееся пилообразное напряжение. На этапе разряда C на кол-

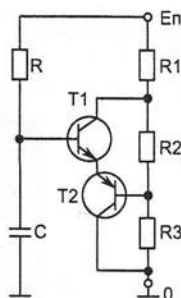


Рис. 9.30. Генератор релаксационных колебания на транзисторном аналоге однопереходного транзистора

лекторе транзистора Т1 формируется короткий почти прямоугольный импульс. Его можно использовать для запуска различных импульсных устройств.

На рис. 9.31 показаны осциллограммы и настройки осциллографа, использованные для исследования этого «живого» устройства. Осциллограмма пилообразных колебаний выглядит превосходно и словно срисована с учебника. А вот осциллограмма коротких импульсов с коллектора Т1 с первого взгляда непонятна. Импульсы имеют странно хорошую прямоугольную форму и разную амплитуду. Некоторые импульсы в моменты разряда С отсутствуют. Это следствие малой частоты стробирования — 2,5 Мв/с на развертке 50 мкс/дел. В результате на каждый импульс приходится по 2—3 отсчета, что и объясняет их явно неудовлетворительный вид.

Для более четкого представления процессов в данной схеме надо уменьшить длительность развертки до 10 мкс, что увеличит частоту стробирования до 25 Мв/с и позволит наблюдать импульсы более корректно — рис. 9.32. На этом рисунке

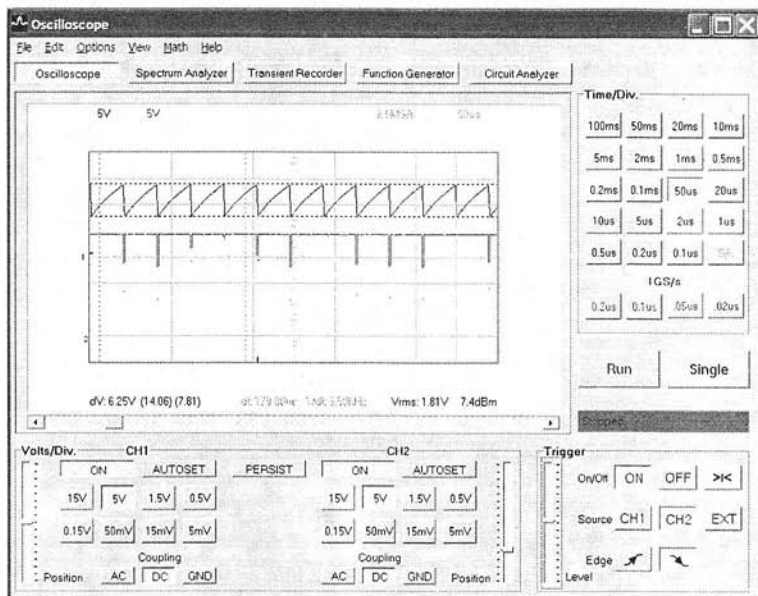


Рис. 9.31. Осциллограммы напряжений на конденсаторе С и коллекторе Т1 при длительности развертки 50 мкс/дел

представлены и результаты курсорных измерений уровней $U_{\text{вкл}}$ и $U_{\text{выкл}}$, а также периода и частоты колебаний релаксационного генератора.

Чтобы детально просмотреть спад напряжения при разряде C и форму импульсов на коллекторе $T1$ надо уменьшить длительность развертки до 2 мкс/дел. Этот случай показан на рис. 9.33. Заодно на нем показано окно с результатами автоматических вычислений параметров пилообразного напряжения и коротких импульсов на коллекторе $T1$. Они хорошо согласуются с результатами курсорных измерений и дают дополнительную (порою даже избыточную) информацию.

Рис. 9.34 иллюстрирует работу данного релаксатора в режиме синхронизации от функционального генератора. Вводом резкой несимметрии генератор переведен в режим формирования коротких отрицательных импульсов, которые подаются на базу транзистора $T2$ через конденсатор $C=30$ пФ. Нижний луч показывает форму напряжения на базе $T2$, верхний — пилообразное напряжение на конденсаторе C .

На базе $T2$ отчетливо видны синхронизирующие импульсы от функционального генератора и хорошо видно, что релаксационный генератор работает в режиме устойчивой синхронизации и деления частоты функционального генератора втрое. Каждый третий синхронизирующий импульс вызывает принудительное включение транзисторов и разряд конденсатора C . Изменяя частоту функционального генератора можно наблюдать синхронизацию для иной кратности частот и срыв синхронизации.

Приведенные примеры наглядно иллюстрируют корректную работу осциллографа виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 и обширные ее возможности в части представления очень четких осциллограмм, их записи в файлы, возможности представления множества осциллограмм на одном экране, а, главное, возможности автоматизации как начальных установок, так и измерения 21 параметра осциллограмм. Разумеется, пользователь не должен забывать, что это цифровой

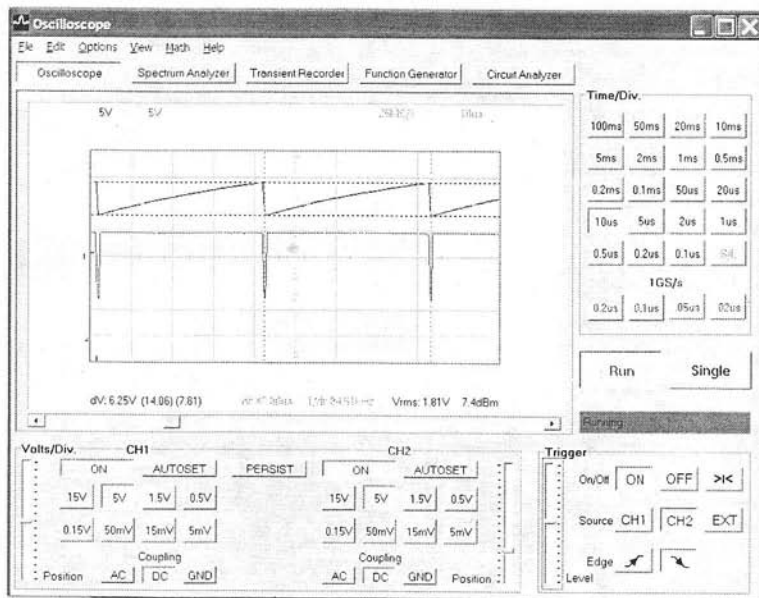


Рис. 9.32. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и коллекторе $T1$ при длительности развертки 10 мкс/дел

осциллограф с конечной скоростью выборки сигналов, что иногда приводит к специфическим эффектам, достаточно подробно отраженным выше.

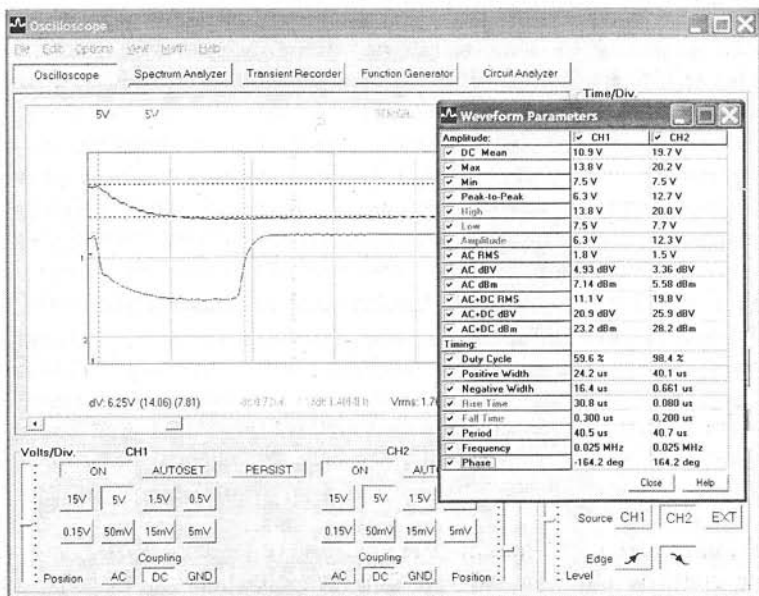


Рис. 9.33. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и коллекторе $T1$ + при длительности развертки 2 мкс и окно вывода результатов автоматических вычислений

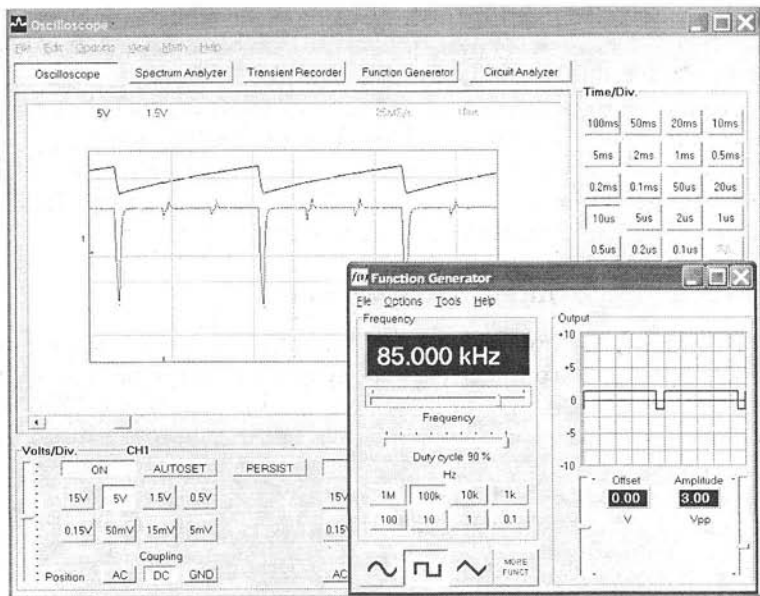


Рис. 9.34. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и базе $T2$ в случае синхронизации релаксационного генератора импульсами от функционального генератора

9.3. Анализ спектра реальных сигналов

9.3.1. Назначение анализаторов спектра

Анализаторы спектра сложные и дорогие физические приборы. Они строят графики спектра различных сигналов. В учебниках такие графики представлены вертикальными черточками для каждой гармоники или иной частотной составляющей спектра. При этом в учебниках рассматриваются спектры идеализированных сигналов, не содержащих шумов и наводок, свойственных реальным сигналам. Поэтому прежде всего стоит уяснить, что от анализаторов спектра вы не получите идеальных спектров, которые описаны в учебниках. Спектры у них представлены пиками конечной ширины и отягощены шумами и наводками. Нужны специальные навыки, чтобы правильно интерпретировать показания анализаторов спектра.

Существуют различные типы анализаторов спектра. Есть приборы, которые построены на основе перестраиваемого по частоте узкополосного радиоприемника. Обнаруживая частотную составляющую спектра, приемник создает сигнал, который отображается пиком на экране ЭЛТ. Анализаторы этого типа строят спектр реальных сигналов и наглядно демонстрируют физическую реальность спектров. Тут уместно отметить, что до появления таких анализаторов спектры воспринимались как математическая абстракция. На самом же деле спектры вполне реальные, и именно на спектральном подходе базируется большая часть возможностей современной радиотехники и радиоэлектроники.

Другие анализаторы основаны на построении спектров чисто математическими методами, описанными в главе 1. Для этого сигналы дискретизируются и представляются достаточно большой выборкой, позволяющей вычислять сотни и даже тысячи гармоник. Обычно при этом используется дискретное быстрое преобразование Фурье. Благодаря появлению современных ПК такое преобразование стало возможным за вполне приемлемое время.

То, что недавно было доступно избранным из числа специалистов-радиотехников с разработкой цифровых осциллографов (в том числе виртуальных) стало доступным преподавателям и студентам вузов и даже радиолюбителям. Осциллограф PCS500A виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 имеет режим работы в качестве анализатора спектра. Он и рассмотрен ниже.

9.3.2. Спектр синусоидального сигнала

Начнем изучать возможности анализатора спектра на базе виртуального осциллографа PCS500A с простого примера — получения спектра реального синусоидального сигнала с частотой 100 кГц от функционального генератора. Получив изображение сигнала на экране осциллографа переключим его в режим анализатора спектра, нажав мышью кнопку Spectrum Analyzer. Получим спектр такого сигнала, показанный на рис. 9.35.

Подвигав ползунок линейки прокрутки под спектрограммой, мы увидим множество и более мелких пиков. Некоторые расположены слева от пика рис. 9.35 и отображают спектральные линии субгармоник сигнала, другие расположены справа и отражают спектры гармоник сигнала. Любой реальный сигнал имеет как субгармоники, так и высшие гармоники. Чем чище сигнал, тем их меньше. Кроме того отчетливо виден шум у оснований пиков. Это шум как реального сигнала,

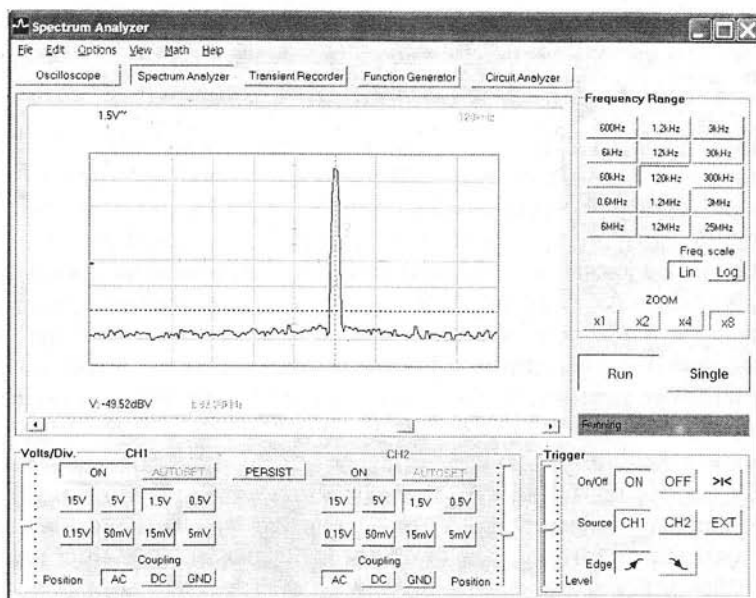


Рис. 9.35. Спектр синусоидального сигнала с частотой 100 кГц

так и самого анализатора спектра. Частично он обусловлен шумами квантования и джиттером (нестабильностью моментов выборки).

Рис. 9.35 дает явный повод для оптимизма. Пик спектра синусоидального сигнала четко выделяется на фоне шумов и является явно самым большим по высоте. По обе стороны от этого пика, в основном видны, шумовые составляющие. Это говорит о том, что функциональный генератор генерирует достаточно чистый синусоидальный сигнал. С помощью курсорных вычислений высота и положение (частота) пика четко вычисляются. Так, замер частоты дает значение 99.98 кГц. Уровень шумов явно меньше -50 дБ. Ширина пика характеризует разрешающую способность. Она не очень высока и составляет сотни герц.

9.3.3. Работа с окнами и режимами усреднения

Разрешающая способность и точность проведения спектрального анализа в сильной степени зависит от математической обработки данных. Изначально спектральный анализ выполняется из предположения о прямоугольном виде АЧХ, выделяющей частотные составляющие спектра. Однако, точность спектрального анализа и степень очистки спектрограмм от шума может быть повышена применением окон специального вида. Напомним, что команда FFT Windows в позиции Options меню анализатора спектра открывает доступ к шести окнам:

- Rectangle — прямоугольное окно, дающее узкие пики, позволяющие различать синусоидальные составляющие и работать при наличии белого шума.
- Bartlett — окно Бартлетта дающее узкие пики спектра с быстрым затуханием,
- Hamming — Хэмминга, дающее хорошее спектральное разрешение
- Hanning — Хэннинга, дающее хорошее спектральное разрешение, приемлемое в большинстве случаев и применяемое по умолчанию.
- Blackman — окно Блэкмана с широкой вершиной пиков и быстрым спадом,

- Flat Top — окно с плоской вершиной, дающее хорошее амплитудное разрешение, но плохое разрешение по частоте и размытые пики.

Кроме того, анализатор спектра в PC-Lab 2000 имеет три опции усреднения в позиции Options меню (команда FFT Options):

- Maximum — усреднение по максимальному значению,
- RSM Average — усреднение по среднеквадратическому значению;
- Vector Average — усреднение по вектору данных.

Нормально режимы усреднения отключены и спектрограмма постоянно обновляется. В этом случае шумы, джиттер и наводки ведут к нестабильности спектрограммы. На рис. 9.36 показана спектрограмма синусоиды при использовании опции усреднения RMS Average. Нетрудно заметить существенное ослабление шумовой дорожки спектра.

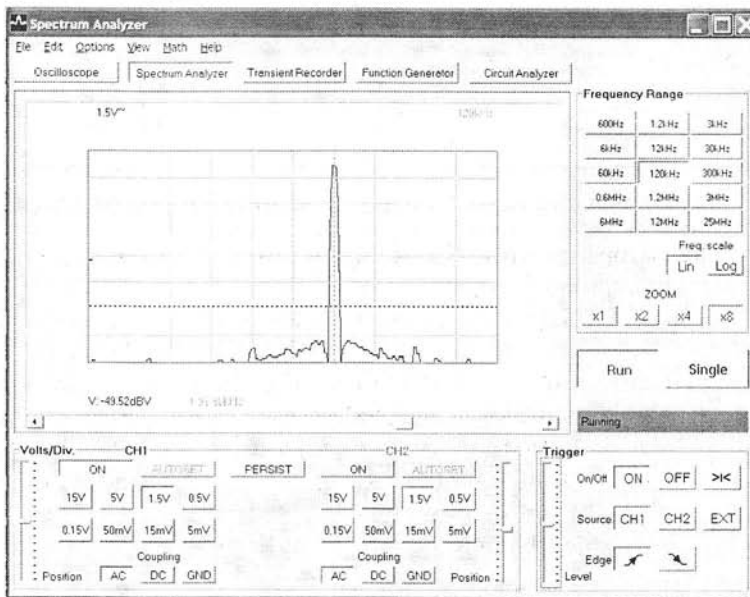


Рис. 9.36. Спектрограмма синусоидального сигнала при использовании опции RMS Average

Другой путь резкого уменьшения шумов заключается в введении операции усреднения в векторе Vector Average. Эта операция, если она включена, работает постоянно и требует длительного времени — порою до десятков секунд. Но она существенно ослабляет шумы и повышает разрешение спектрограмм. На рис. 9.37 показан спектр синусоиды при использовании окна Блэкмана и операции Vector Average. Можно отметить резкое уменьшение шума. Даже самые сильные частотные составляющие имеют уровень меньше 60 дБ, т. е. ослаблены более чем в 1000 раз.

9.3.4. Спектр амплитудно-модулированного колебания

Теперь перейдем к изучению спектра амплитудно-модулированного (AM) сигнала. Для его получения воспользуемся генератором GW GRG450B и зададим коэффициент модуляции 60—80%. Из теории известно, что спектр амплитудной мо-

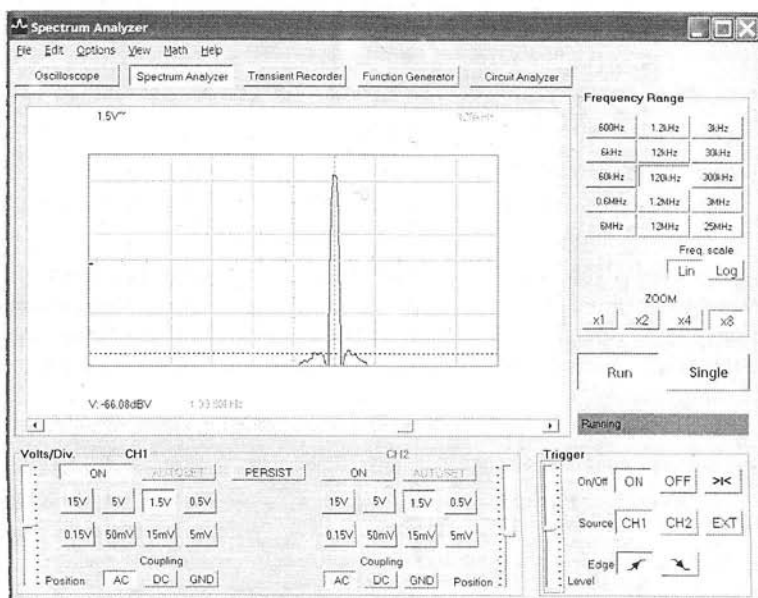


Рис. 9.37. Спектрограмма синусоидального сигнала при использовании окна Блэкмана опции Vector Average

дуляции представлен частотой несущей (в нашем случае 100 кГц) и двумя боковыми частотами. Если модулирующий сигнал имеет частоту 1 кГц, то боковые частоты будут равны 99 и 101 кГц. Но если форма модулирующего синусоидального сигнала искажена, то появятся боковые частоты 98 и 102 кГц от второй гармоники, 97 и 103 кГц от третьей гармоники и т. д.

Подав сигнал генератора на вход анализатора спектра и установив полосу анализа в 120 кГц получим спектрограмму, представленную на рис. 9.38. Спектрограмма явно свидетельствует, что с качеством сигнала у этого простого генератора до благополучия далеко. В районе 100 кГц виден большой и размытый пик, в котором едва-едва угадываются боковые полосы от амплитудной модуляции. В области частоты 50 кГц хорошо виден спектр субгармоники. А в области низких частот видны фон и низкочастотные помехи.

Для повышения частотного разрешения можно применить «лупу частот» и увеличить разрешение в 1, 2, 4 или 8 раз с помощью кнопок в зоне ZOOM. Если применить еще окно Блэкмана и задать усреднение RMS Average, то можно получить вполне сносную спектрограмму АМ-сигнала — рис. 9.39. Теперь отчетливо виден не только пик несущей, но и по два пика с каждой стороны от него. Наличие второго пика у спектрограммы говорит о том, что форма модулирующего сигнала заметно отличается от синусоидальной. Так оно и есть — (см. рис. 5.34)!

Можно избавиться от шума, введя усреднение Vector Average. Полученная в этом случае спектрограмма показана на рис. 9.40.

А теперь продадем коронный номер — отключим амплитудную модуляцию. После нескольких минут усреднения будет получена осциллограмма, показанная на рис. 9.41. Из нее хорошо видно, что полного отсутствия модуляции нет — остались четко видимые пики, говорящие о наличии паразитной модуляции с частотой 1 кГц. Видимо с экранированием у генератора GW GRG450B не все в поряд-

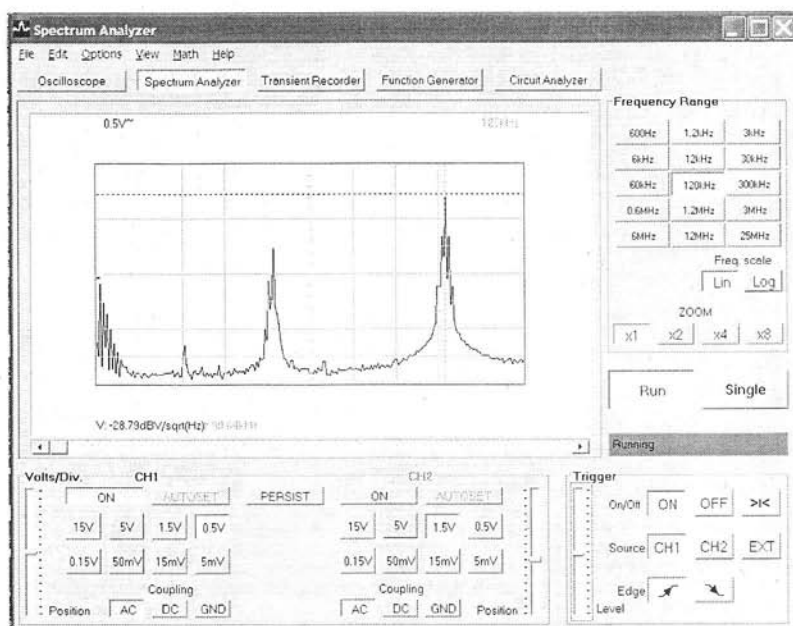


Рис. 9.38. Спектр сигнала с АМ с выхода генератора GW GRG450B при стандартных установках

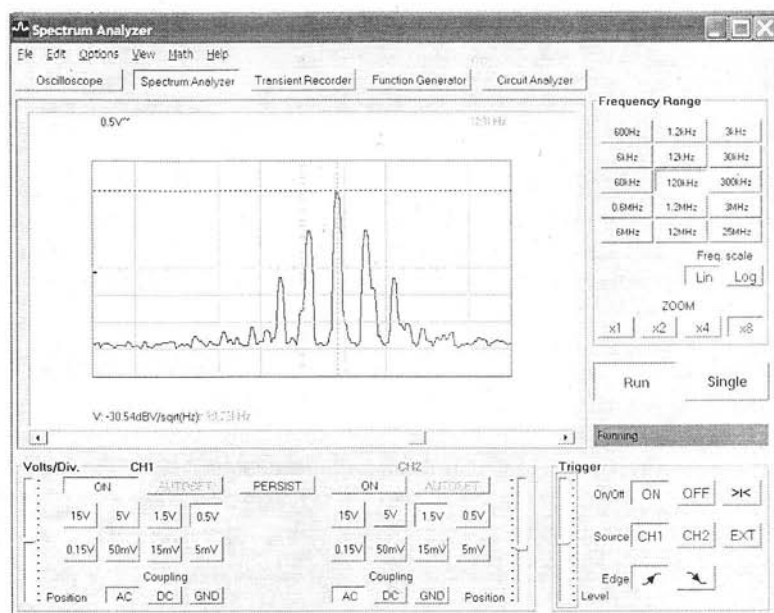


Рис. 9.39. Спектр сигнала с АМ с выхода генератора GW GRG450B при использовании окна Блэкмана и усреднения RMS Average

ке. Зато анализатор спектра оказался на высоте — обратите внимание, что уровень большего бокового лепестка составляет $-59,06 \text{ dBV}$, т. е. он очень мал.

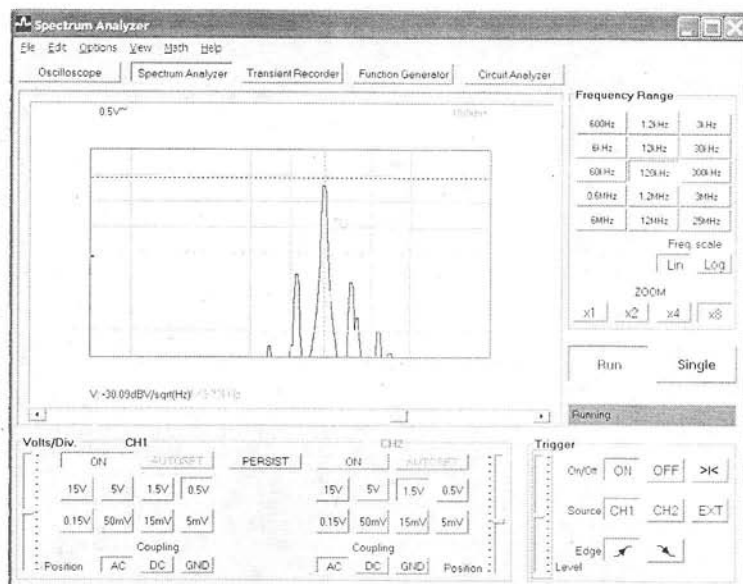


Рис. 9.40. Спектр сигнала с АМ с выхода генератора GW GRG450B при использовании окна Блэкмана и усреднения Vector Average

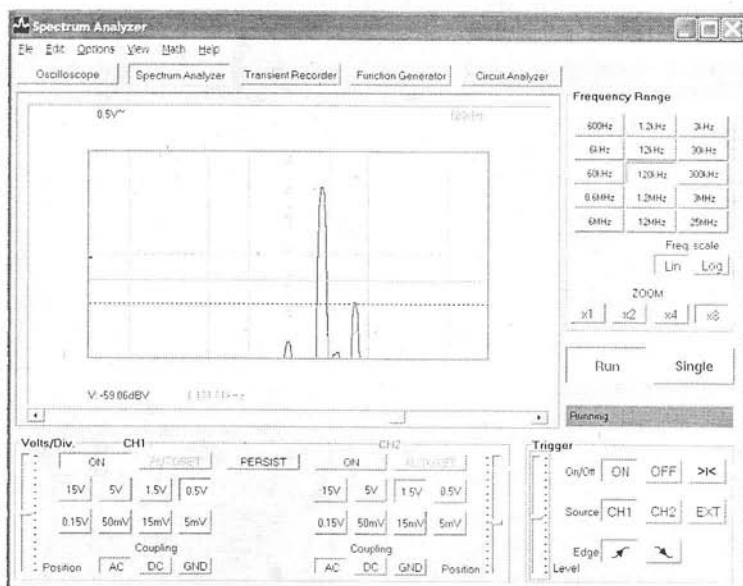


Рис. 9.41. Спектр сигнала с АМ с выхода генератора GW GRG450B при использовании окна Блэкмана и усреднения Vector Average

Амплитудная модуляция применяется в радиовещании на частотах до 30 МГц. Однако, на таких частотах анализатор спектра на базе виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 практически не применим для анализа этого явления. Его разрешения хватает лишь для наблюдения спектра АМ-сигналов на частотах порядка десятков-сотен кГц.

9.3.5. Спектр прямоугольных и треугольных импульсов

Функциональный генератор PCG10 позволяет генерировать множество видов импульсов с самыми разнообразными формами. Подавая эти импульсы на вход анализатора спектра, нетрудно получить их спектр. Например, на рис. 9.42 представлен спектр прямоугольных импульсов с частотой 100 кГц заполнением 10%. Для получения наглядной спектрограммы она очищена от шума применением опции Vector Average. Нетрудно заметить, что амплитуда гармоник спадает (первый ноль огибающей спектра приходится на частоту $1/t_H$).

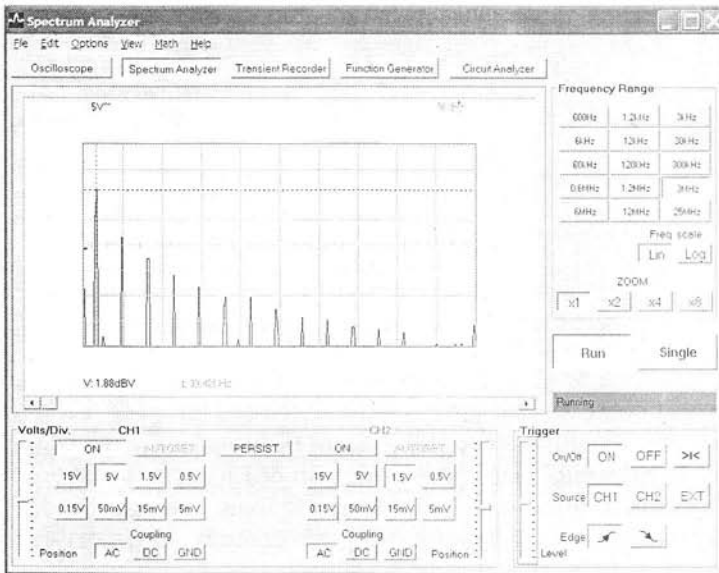


Рис. 9.42. Спектр прямоугольного импульса с заполнением 10%

Если смириться с конечной «толщиной» всплесков спектральных составляющих, то можно признать, что спектр прямоугольных импульсов вполне соответствует предсказанному аналитически виду. А теперь посмотрим на спектр треугольных импульсов с частотой 100 кГц, показанный на рис. 9.43. Теоретически он должен содержать только нечетные гармоники. Но анализатор спектра показывает, что в спектре явно есть и четные гармоники.

Просто надо помнить, что реальный сигнал отличается от идеального. И его спектр содержит не нулевые, а малые по амплитуде четные гармоники. Замерив уровни этих составляющих, можно заметить, что амплитуды 2, 4, 6 и т. д. гармоник и впрямь малы. Но, по мере увеличения номеров гармоник разница в амплитудах четных и нечетных гармоник уменьшается. Это еще один пример «отличия» теоретических сведений от наблюдаемых, связанный с высокой чувствительностью анализатора спектра.

9.3.6. Спектр сигнала вида $\sin(t)/t$

В состав дополнительных сигналов функционального генератора включен сигнал $\sin(x)/x$ или $\sin(t)/t$. С помощью этого сигнала выполняется интерполяция точек при восстановлении дискретно заданных временных зависимостей. Но, фундаментальное значение этого сигнала состоит не только в этом, но и в том, что такой

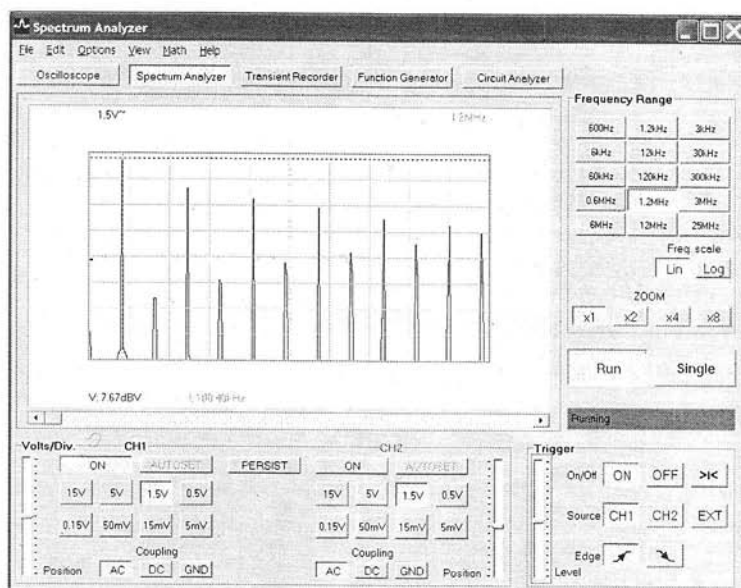
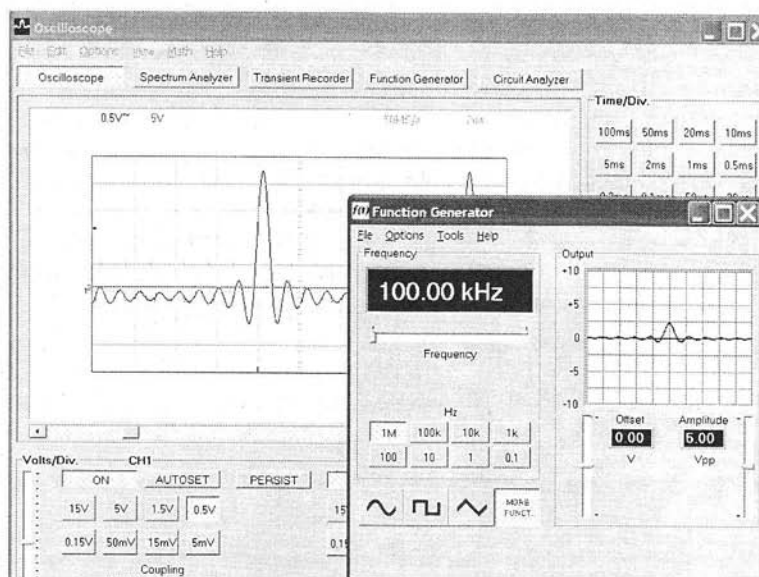
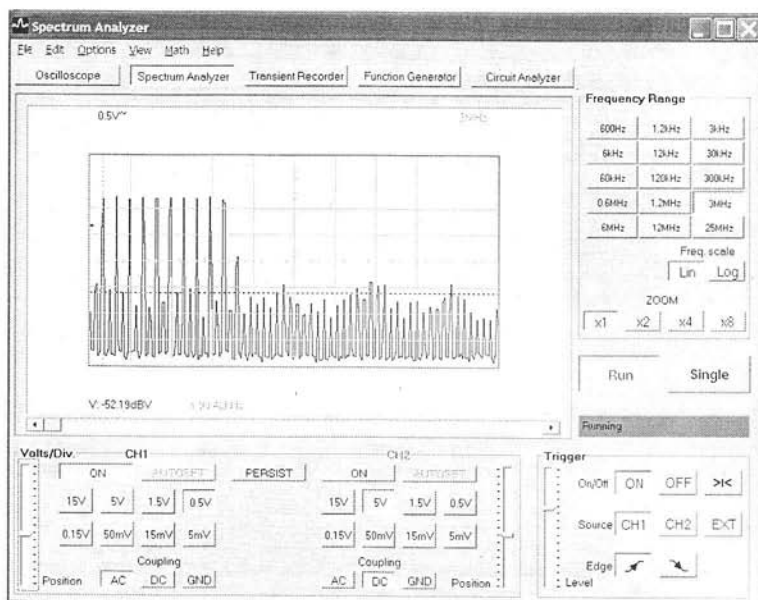


Рис. 9.43. Спектр треугольных импульсов

импульс дает равномерный спектр гармоник. Попробуем убедиться в этом. На рис. 9.44 показана подготовка к этому эксперименту. Показана панель функционального генератора с заданием генерации данного импульса и его осциллограмма.

А на рис. 9.45 показана спектрограмма данного импульса. Нетрудно заметить, что первый десяток гармоник и впрямь имеет одинаковую амплитуду, а затем спектр обрывается до уровня шума. Курсор показывает, что уровень шума составляет примерно -52 дБ, то есть он очень мал.

Рис. 9.44. Вывод и осциллограмма импульса вида $\sin(t)/t$

Рис. 9.45. Спектрограмма сигнала $\sin(t)/t$

9.4. Работа с построителем АЧХ и ФЧХ устройств

9.4.1. Назначение и роль построителя АЧХ и ФЧХ

Для многих линейных цепей существует прямая связь между переходными характеристиками цепей и их амплитудно-частотными (АЧХ) и фазо-частотными (ФЧХ) характеристиками. Однако многие устройства традиционно используют свойства частотной селекции сигнала и для них построение АЧХ и ФЧХ принципиально важно. Для этого приходится использовать набор испытательных генераторов, электронные вольтметры и фазометры. По полученным АЧХ и ФЧХ можно судить о возможных режимах работы линейных цепей, их устойчивости при охвате обратными связями и селективных свойствах.

Утомительная процедура снятия АЧХ и ФЧХ по точкам в виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 устранена благодаря применению функционального генератора в качестве генератора качающейся частоты. Схема измерений соответствует показанной на рис. 9.22. Следует учесть, что построение фазо-частотной характеристики есть только в версиях PC-Lab 2000 v. 1.34 и выше, в более ранних версиях, эта возможность отсутствовала.

9.4.2. Построение АЧХ и ФЧХ дифференцирующей RC-цепи

Подключим в измерительную схему рис. 9.22 дифференцирующую цепь рис. 5.37 (левая цепь). Пустив построение АЧХ и ФЧХ нажатием клавиши Circuit Analyzer, увидим окно, представленное на рис. 9.46. Слева окна расположены зоны:

- Vertical Scale — выбор коэффициентов вертикального отклонения (ось значений сигнала на входе испытуемого устройства);



Рис. 9.46. Построение АЧХ и ФЧХ дифференцирующей RC-цепи

- Frequency Range — выбор пределов частоты (максимальной частоты качания);
- Frequency Start — выбор начальной частоты качания.

Слева под окном графиков можно задать опции логарифмической шкалы (Log. Freq. Scale) и шаг изменения частоты (Log. Freq. Step). Кнопки управления выполняют следующие функции:

- Start — запуск построения графиков АЧХ и ФЧХ (пунктирной линией);
- Pause — временная остановка построения графиков с возможностью восстановления построения;
- Stop — остановка работы построителя графиков.

На рис. 9.46 представлены построенные АЧХ и ФЧХ дифференцирующей цепи, которая выполняет функции фильтра низких частот первого порядка. Вид характеристик полностью соответствует теоретическим зависимостям за исключением небольшого всплеска в конце построения. Было также помечено, что на последнем шаге построения оно неожиданно прерывается и происходит переброс на несколько точек назад. Эта недоработка легко устраняется кнопкой Pause, нажимаемой на предпоследнем шаге. Построение идет довольно медленно, так что время нажать эту кнопку несложно.

9.4.3. Построение АЧХ и ФЧХ колебательного LRC-контура

Совершенно аналогичным образом были построены АЧХ и ФЧХ колебательного (резонансного) LCR-контура, показанные на рис. 9.47. Контур выполнен на основе катушки индуктивности $L=40$ мкГн и конденсатора $C=10$ нФ.

Построенные АЧХ и ФЧХ хорошо соответствуют расчетным зависимостям. АЧХ дает заметный выброс на резонансной частоте, а ФЧХ в области этого выброса меняет фазу на -180° .

Диапазон частот при построении АЧХ и ФЧХ ограничен максимальной частотой в 1 МГц. Это позволяет проиллюстрировать на специально подобранных при-

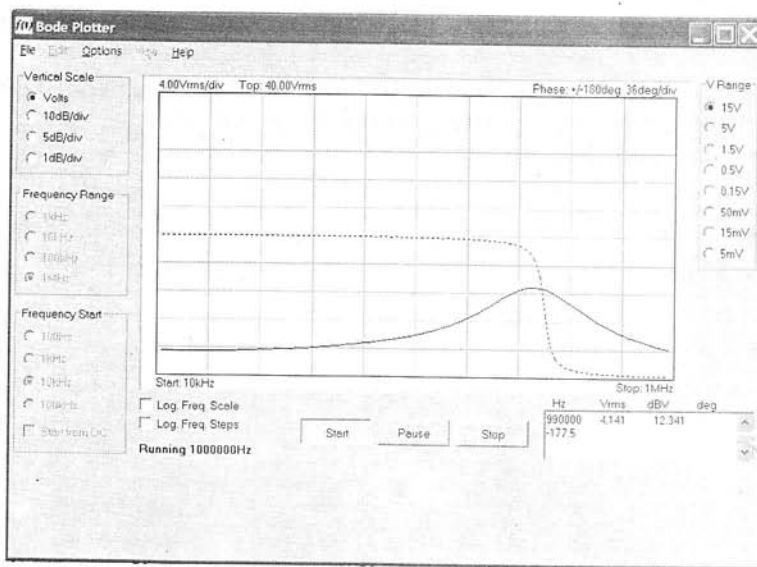


Рис. 9.47. Построение АЧХ и ФЧХ колебательного LRC-контура

мерах большинство нюансов поведения линейных цепей в частотной области. Но выполнить построение АЧХ и ФЧХ в широком диапазоне частот (а он ныне простирается до единиц и десятков ГГц) дешевая виртуальная лаборатория PC-Lab не может. Для этого создана обширная серия построителей АЧХ и ФЧХ радиочастотных цепей, систем и устройств. Любой из приборов этой серии стоит намного дороже, чем лаборатория PC-Lab.

9.5. Работа PC-Lab 2000 с системой Mathcad

9.5.1. Передача осциллограмм в среду системы Mathcad

Важным достоинством виртуальной лаборатории PC-Lab является легкость ее стыковки с программными средствами для обработки информации. К таким средствам относятся языки программирования, например Delphi или Visual Basic. Примеры простых программ на них даны в справке по новым реализациям PC-Lab 2000. Однако, куда интереснее такая стыковка с мощными системами компьютерной математики, такими, как Mathcad, MATLAB, Maple, Mathematica и др., имеющими мощные готовые средства обработки сигналов.

Следует сразу отметить, что необходимость в такой стыковке заметно уменьшилась после реализации в PC-Lab 2000 v.01.38 (и выше) автоматического вычисления 21 важнейшего параметра сигналов. В связи с этим пристыковать какую-либо из систем компьютерной математики к PC-Lab разумно только в том случае, когда желательно использовать специфические возможности таких систем. Такая необходимость может возникнуть при выполнении серьезных исследований в области обработки сигналов.

Благодаря текстовому формату данных виртуальной лаборатории и файлов данных системы Mathcad взаимодействие их решается довольно просто. Надо привести в соответствие внутреннюю структуру файлов данных и дать им нужные расши-

рения. Рассмотрим такую задачу: нужно передать осциллограммы виртуального осциллографа в среду Mathcad и построить их уже средствами Mathcad.

Для этого надо снять осциллограммы и записать их в среде PC Lab 2000 в виде файла, например, demo.txt. Пример текстового файла данных (осциллограммы двух каналов осциллографа) дан ниже:

TIME STEP:

125 = 1ms

VOLTAGE STEP:

CH1: 32 = 1.5V

CH2: 32 = 1.5V

N	CH1	CH2
0	176	88
1	176	88
2	177	88
3	178	87
4	179	87
5	179	87
....

Как нетрудно заметить, файл имеет заголовок, в котором указаны временной масштаб осциллограмм и масштабные множители для осциллограмм обоих каналов. В таком виде файл системой Mathcad не воспринимается, поскольку файлы данных этой системы (формат .prn) должны содержать чистую матрицу данных в формате электронных таблиц.

В связи с этим надо преобразовать файл demo.txt в файл demo.prn. Для этого, в простейшем случае, достаточно загрузить файл demo.txt в текстовый редактор Word и просто убрать верхнюю часть файла, оставив только матрицу данных. Далее надо записать этот файл с расширением prn. Если нужно передавать в Mathcad масштабные множители, можно создать трехэлементный вектор из них и записать, например, в виде файла m.prn.

Документ Mathcad, считывающий файлы demo.prn и m.prn представлен на рис. 9.48. На нем показана матрица данных D, соответствующая файлу demo.prn и вывод масштабных множителей из файла m.prn. Это позволяет построить осциллограммы уже в среде системы Mathcad с реальными масштабами по времени (миллисекунды) и уровню сигналов (вольты). Таким образом уже при построении графика проведена предварительная обработка данных из матрицы D.

Над полученными данными можно выполнять любые операции и преобразования, на которые способна система Mathcad.

9.5.2. Взаимодействие Mathcad с функциональным генератором

Несложно также организовать взаимодействие между Mathcad и функциональным генератором виртуальной лаборатории. Для исследования свойств его сигналов надо обеспечить их ввод в систему Mathcad. Тут необходимо учесть следующие обстоятельства, касающиеся организации библиотечных файлов функционального генератора:

- эти файлы имеют расширение .lib;
- файлы представляют одномерный массив из 3200 чисел;
- числа в массиве представлены в формате с плавающей запятой, а не точкой.

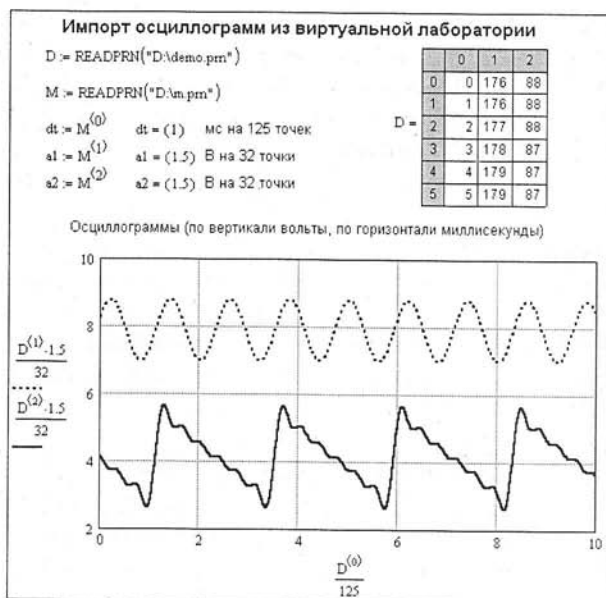


Рис. 9.48. Импорт данных с виртуальной лаборатории PC Lab 2000 и построение осциллограмм в среде Mathcad

Для представления сигнала из библиотеки в среде Mathcad надо переименовать файл библиотеки в файл с расширением .prn и затем заменить все запятые в числах на точки. Это легко сделать в текстовом редакторе Word с помощью команды «Заменить» и затем «Заменить все». Полученный файл может считываться функцией READPRN и представляться графически — рис. 9.49.

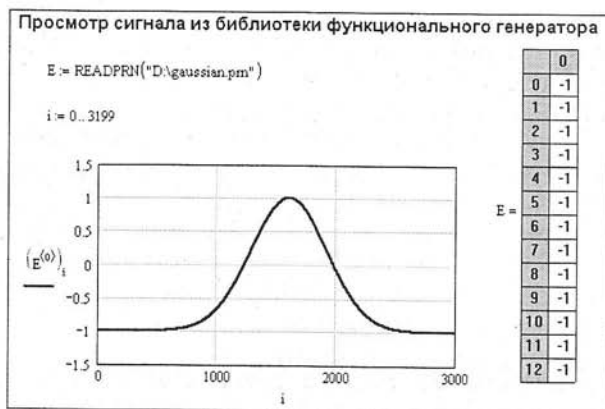


Рис. 9.49. Пример просмотра сигнала gaussian из библиотеки сигналов функционального генератора

9.5.3. Импорт спектрограмм

Аналогичным образом можно обеспечить в среде Mathcad импорт спектрограмм. Файлы спектрограмм имеют текстовый формат. Пример начала такого файла при его просмотре в редакторе Word:

N	f/[kHz]	V/[dBV]
0	0.0153	-40.7
1	0.2594	-50.1
2	0.5035	-47.9
3	0.7477	-4.6
4	0.9918	-49.8
5	1.2360	-55.1

Нетрудно заметить, что в данном случае файл имеет первую строку с именами столбцов. Данные представлены столбцами номеров отсчетов, частот и уровней спектрограммы в формате с плавающей точкой. Поэтому для считывания файла спектрограмм в Mathcad даже не требуется его обработка в текстовом редакторе. Файл можно сразу загружать в Mathcad, что показано на рис. 9.50, и выполнять его обработку, например сглаживание.

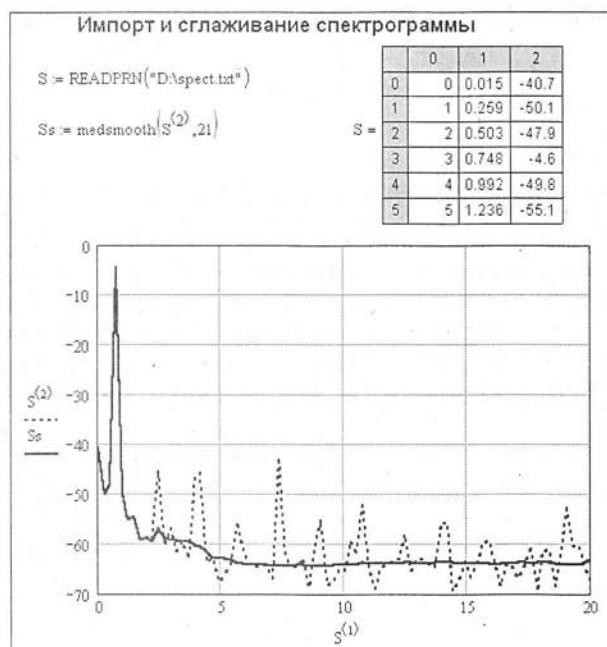


Рис. 9.50. Считывание спектрограммы с виртуальной лаборатории и ее сглаживание

9.5.4. Об экспорте данных из Mathcad

Разобравшись со спецификой форматов файлов виртуальной лаборатории и системы Mathcad читатель может легко решить и обратную задачу — экспорт файлов из системы Mathcad в виртуальную лабораторию. Можно экспортировать файлы осциллограмм, спектрограмм и создаваемых тестовых сигналов. Это полезно, например, для пополнения библиотеки таких сигналов для функционального генератора, поскольку собственный редактор сигналов имеет довольно ограниченные возможности.

В целом ПК оснащенный системой Mathcad и виртуальной лабораторией PC Lab 2000 способен решать сложнейшие задачи в обработке реальных сигналов и

исследовании и тестировании самой разнообразной радиоэлектронной аппаратуры. Трудно переоценить возможности такого комплекса в решении задач учебного характера, особенно если учесть, что при широчайших возможностях такой комплекс стоит намного дешевле радиоизмерительной лаборатории, укомплектованной такими обычными приборами, как осциллограф, функциональный генератор, анализатор спектра, регистратор и так далее.

9.6. Работа PC-Lab с системой MATLAB

9.6.1. Передача осциллограмм в среду системы MATLAB

Как уже отмечалось, файлы осциллограмм лаборатории PC-Lab 2000 имеют простой текстовый формат. Это позволяет легко ввести данные из них не только в систему Mathcad, но и в гораздо более мощную матричную систему MATLAB, уникальную по возможностям самой серьезной обработки сигналов [45—47].

Разумеется, опытный программист легко создаст программу на языке MATLAB, которая выделит лишь нужные данные — матрицу значений N , $CH1$ и $CH2$. Но мы, как и ранее, поступим еще проще: загрузим файл `demo.txt` в текстовый редактор WordPad или Word и просто уберем верхнюю часть файла, оставив только матрицу данных. Далее надо записать этот исправленный файл с помощью команды Save текстового редактора.

Теперь можно составить M-файл, который выделяет из файла массивы отсчетов верхнего $CH1$ и нижнего $CH2$ каналов виртуального осциллографа:

```
d=textread('E:\demo.txt','%f');
i=1:1000;
CH1=d(3*i+2); CH2=d(3*i+3);
```

Работа этого программного модуля основана на том, что функция `textread` считывает данные файла построчно и образует одномерный массив данных, представляющих собой тройки: номер отсчета, отсчет нижнего и отсчет верхнего каналов. Индексация идет с 1. Отсюда ясно, как выбираются данные для отсчетов сигналов верхнего и нижнего каналов. Таким образом, задача ввода реальных сигналов в MATLAB от первого до тысячного отсчета решена довольно просто. Номера используемых отсчетов задает индексная переменная i .

Теперь можно построить график сигналов, представленных 1000 отсчетами каналов $CH1$ и $CH2$ (рис. 9.51):

```
plot(i, CH1, i, CH2)
```

Над полученными данными можно выполнять любые операции, которые были описаны в предшествующих разделах, например выполнить то или иное преобразование или фильтрацию сигналов.

9.6.2. Взаимодействие MATLAB с виртуальным функциональным генератором

Несложно также организовать взаимодействие между MATLAB и функциональным генератором виртуальной лаборатории. Для исследования свойств его сигналов надо обеспечить их ввод в систему MATLAB. Тут надо учесть следующие обстоятельства, касающиеся организации библиотечных файлов функционального генератора и описанные выше, для стыковки с системой Mathcad.

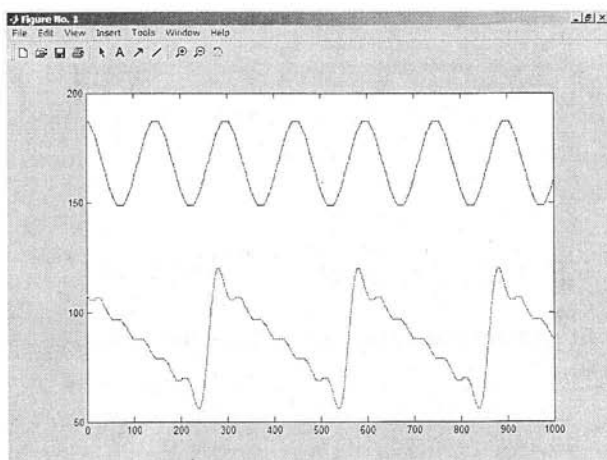


Рис. 9.51. Осциллограммы сигналов с двух каналов осциллографа виртуальной лаборатории PC Lab 2000, построенные в среде MATLAB

Для представления сигнала из библиотеки в среде MATLAB надо затем заменить все запятые в числах на точки. Это легко сделать в текстовом редакторе Word с помощью команды «Заменить» и затем «Заменить все». Полученный файл может считываться функцией `load` и представлен графически в окне графики системы MATLAB — рис. 9.52:

```
s=load('E:\gaussian.lib','ASCII');
plot(s)
```

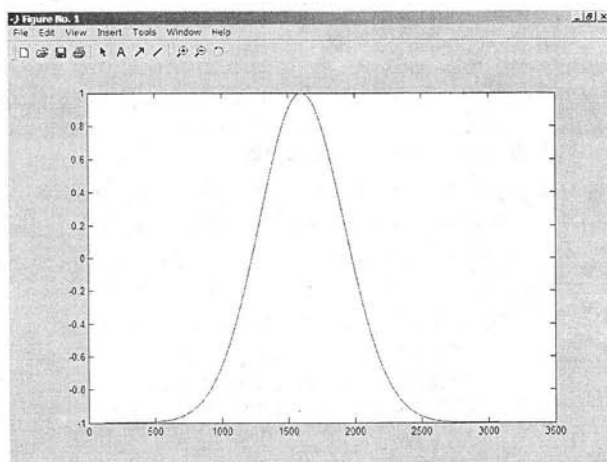


Рис. 9.52. Пример просмотра сигнала *gaussian* из библиотеки сигналов функционального генератора

9.6.3. Импорт спектрограмм в MATLAB

Аналогичным образом можно обеспечить в среде MATLAB импорт спектрограмм. Файлы спектрограмм имеют текстовый формат. Файл имеет первую строку с именами столбцов. Данные представлены столбцами номеров отсчетов, частот и

уровней спектрограммы. При этом данные представлены в формате с плавающей точкой. Поэтому для считывания файла спектрограмм в MATLAB достаточно в текстовом редакторе удалить первую строку. Для получения отсчетов частоты и уровня спектрограммы можно воспользоваться следующим фрагментом программы:

```
d=textread('E:\spectr.txt','%f');
```

```
i=1:200;
```

```
CH1=d(3*i+2); CH2=d(3*i+3);
```

Теперь можно построить спектрограмму в окне графики MATLAB (рис. 9.53):

```
plot(CH1, CH2); grid on;
```

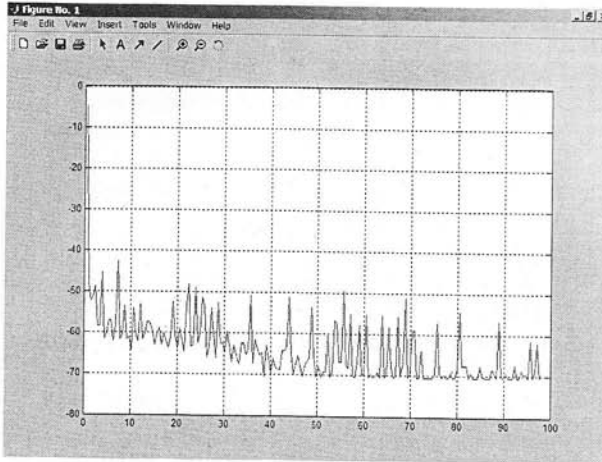


Рис. 9.53. Спектрограмма с виртуальной лаборатории в окне графики MATLAB

Над полученной спектрограммой можно выполнять самые разнообразные операции, например сглаживание, поиск нужных спектральных компонент и т. д.

9.6.4. Об экспорте данных из MATLAB

Разобравшись со спецификой форматов файлов виртуальной лаборатории и системы MATLAB читатель может легко решить и обратную задачу — экспорт файлов из системы MATLAB в виртуальную лабораторию. Можно экспортировать файлы осциллограмм, спектрограмм и создаваемых тестовых сигналов. Это полезно, например, для пополнения библиотеки таких сигналов для функционального генератора, поскольку собственный редактор сигналов имеет довольно ограниченные возможности, хотя и достаточные для большинства практических применений.

В целом, ПК оснащенный системой MATLAB и виртуальной лабораторией PC-Lab 2000, способен решать сложнейшие задачи в обработке реальных сигналов и исследовании и тестировании самой разнообразной радиоэлектронной аппаратуры. Трудно переоценить возможности такого комплекса в решении задач учебного характера, особенно если учесть, что при широчайших возможностях такой комплекс стоит намного дешевле радиоизмерительной лаборатории, укомплектованной такими физическими приборами, как осциллограф, функциональный генератор, анализатор спектра, регистратор и так далее.

9.7. Работа с виртуальными лабораториями АКТАКОМ

9.7.1. Подготовка виртуальных лабораторий

Как следует из раздела 4.8, АКТАКОМ предлагает на нашем рынке обширный набор приставок к компьютерам, позволяющих создавать универсальные и специализированные компьютеризированные виртуальные лаборатории. Например, их можно создать на основе виртуальных функциональных генераторов АНР-3121/3122 и осциллографов АСК-3106/3107/3117. Если лаборатория должна быть ориентирована на телевизионные измерения, то безусловно полезными будут приставки АНР-312/3129.

Наиболее просто виртуальную лабораторию можно организовать на базе комбинированного прибора АСК-4106, содержащего независимые друг от друга двухканальный осциллограф и двухканальный функциональный генератор. При первом запуске программы осциллографа-анализатора необходимо ввести ключ доступа, который приобретается как отдельная опция и соответствует подключенному прибору. Можно отказаться от ввода ключа, в этом случае программа запустится в демонстрационном режиме. В этом режиме доступны все функции программы, но данные не считываются из прибора, а «придумываются» математическим эмулятором (см. «Использование эмулятора сигналов»). Если программа запущена без подключенного прибора, она также автоматически перейдет в демонстрационный режим.

Для приобретения ключа доступа, который позволяет работать с программой осциллографа-анализатора и поставляется как отдельная опция, необходимо связаться с поставщиком оборудования. Приведенное ниже описание работы с виртуальной лабораторией на базе прибора АСК-4106 является переработкой материалов, размещенных на Интернет-сайте компании Эликс (www.eliks.ru).

9.7.2. Работа с осциллографом-анализатором

Комбинированный прибор АСК-4106 имеет понятный и удобный интерфейс (рис. 9.54), который может настраиваться пользователем. Например, пользователь может выбрать внешний вид и цветовое оформление панелей прибора, цветовую схему для осциллограмм, язык панелей (русский или английский), включить и записать свой вариант звукового сопровождения событий и др. К услугам пользователя всплывающие подсказки, «прилипающие» панели (прилипшие панели располагаются вплотную друг к другу, сливаются и перемещаются совместно, как одно целое). Каждый режим работы комбинированного прибора выполнен в виде отдельного окна, который пользователь может располагать в удобном для себя участке экрана монитора.

Программа осциллографа-анализатора АСК-4106, поставляемая с приставкой, обеспечивает следующие дополнительные функции:

- Произвольное масштабирование отображаемых данных, дополнительный обзорный график.
- Двухуровневая аварийная сигнализация в режиме цифрового самописца.
- Режим послесвечения (цифровой люминофор).
- Вычисление фазового сдвига между каналами.
- Режим цифрового вольтметра.
- Автоматическое измерение параметров фронтов и импульсов.
- Спектральный анализ (БПФ) и спектральная цифровая фильтрация сигнала.

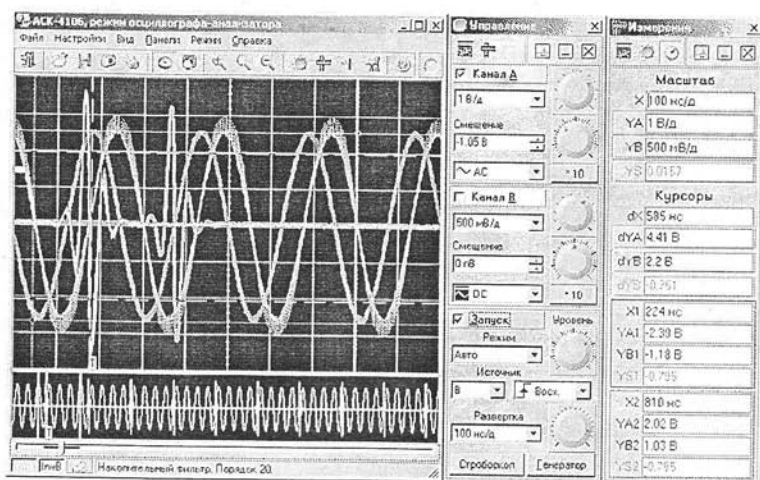


Рис. 9.54. Окно осциллографа-анализатора комбинированного прибора АСК-4106

- Вычисление следующих специальных функций: сумма, разность, отношение или произведение двух выбранных каналов; среднее геометрическое двух выбранных каналов; производная выбранного канала, интеграл выбранного канала, интеграл произведения каналов, корреляция двух выбранных каналов, передаточная функция двух выбранных каналов.
- Статистические вычисления и гистограмма распределения вероятности.
- Режим управляемой эмуляции сигналов, используется для работы программы при отсутствии реального прибора (с тестовыми или учебными целями).
- Встроенный калькулятор формул.

Окно программы осциллографа является главным средством отображения результатов измерений. Содержит изображения измеренных сигналов, дополнительных кривых, меток, курсоров и т. д. По левому краю основного графика может перемещаться ползунок, обозначающий уровень запуска канала А или В.

Если включен режим цифрового вольтметра, то поверх графика отображается панель, представляющая результаты измерения среднеквадратической, амплитудной и средней величин сигналов по обоим каналам. Аналогично, если включен режим определения фазового сдвига (см. «Вычисление фазового сдвига»), то поверх графика отображается панель с результатом определения фазового сдвига. Можно свободно передвигать эти панели мышью в любое место главной панели или даже совсем вынести их за пределы родительской панели: в этом случае они будут отображаться как отдельное окно.

Запоминающий осциллограф оснащен аппаратным буфером на 128 Кбайт по каждому каналу. График длиной более чем в 130000 точек, изображенный даже на полном экране монитора с разрешением по горизонтали в 800 точек, будет весьма приблизительным. Поэтому на основной график обычно выводится только небольшая часть записанного сигнала. Для того, чтобы оператор мог иметь общее представление о характере информации полного буфера и выбрать нужную часть для подробного отображения, служит обзорный график в нижней части панели. Вы можете изменить размер или совсем убрать обзорный график, передвигая мышью вверх или вниз границу между основным и обзорным графиками.

Как с помощью курсоров обзорного графика, так и элемента прокрутки можно выбирать нужную часть сигнала для подробного просмотра. По команде автоматической настройки на сигнал программа будет пытаться автоматически подобрать оптимальные для поданного сигнала настройки прибора: горизонтальную и вертикальную развертку и уровень синхронизации.

Осциллограф-анализатор является профессиональной версией стандартной программы осциллографа. Окно в режиме работы со стандартной программой показано на рис. 9.55. Обратите внимание на то, что окна управления и измерения, расположенные справа от окна осциллографа одни и те же в обоих вариантах программы.

Прибор АСК-4106 обеспечивает курсорные и автоматические измерения параметров импульсных сигналов. На рис. 9.56 показано окно выдачи результатов автоматических вычислений. Параметры, значения которых вычисляются и отображаются, вполне очевидны.

В этом окне опция «Канал» задает выбор канала, по которому проводятся измерения. Список «Статус» показывает состояние измерений параметров импульса. Возможны следующие сообщения:

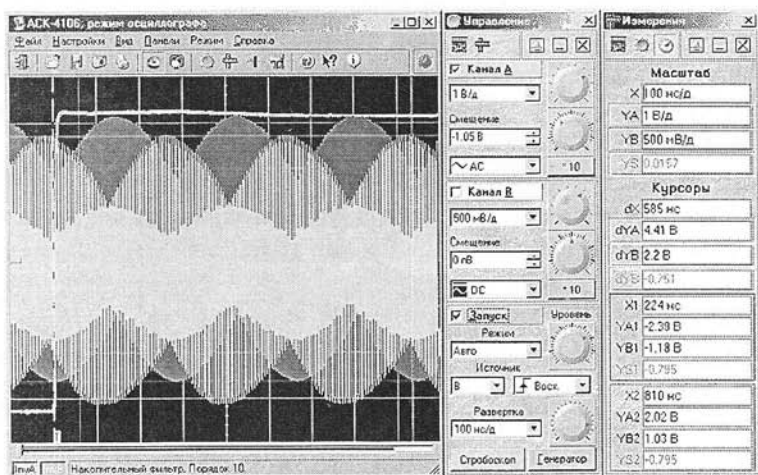


Рис. 9.55. Окно виртуального осциллографа стандартной программы



Рис. 9.56. Окно выдачи параметров автоматических вычислений

- Параметры успешно определены — определены все возможные параметры;
- Только «восходящие» параметры — определены только параметры, измеряемые на восходящем фронте;
- Только «спадающие» параметры — определены только параметры, измеряемые на спадающем фронте;
- Только параметры фронтов — определены только параметры, измеряемые на восходящем и спадающем фронтах;
- Параметры не определены — никакие параметры не определены.

Справа от строки статуса расположены три вспомогательных статусных «светодиода», показывающие успешность определения параметров (сверху вниз) периода, спадающего фронта и восходящего фронта. Успешное определение параметров отображается зеленым цветом, ошибка — красным.

Область «Параметры» окна содержит числовые поля, отображающие результаты измерений. Неопределенные параметры отображаются «недоступными». Используемые алгоритмы определения параметров описаны в разделе «Определение импульсных параметров».

Алгоритмы, используемые для определения параметров импульсов, могут использоваться для выполнения такой распространенной задачи, как выделение из отображаемого участка сигнала целого числа периодов.

9.7.3. Применение анализатора спектра

Виртуальный осциллограф приставки АСК-4106 позволяет провести спектральный анализ выделенного участка сигнала — рис. 9.57. Для этого используются алгоритмы прямого и обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В режиме БПФ отображаются следующие параметры:

- Число точек дискретизации сигнала, по которым проводится преобразование.
- Число точек для преобразования после передискретизации (ближайшее сверху число — степень двойки).
- Передискретизация необходима для использования алгоритма быстрого преобразования.

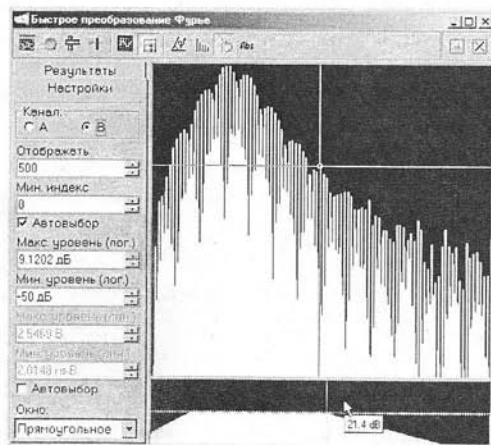


Рис. 9.57. Окно анализатора спектра

- Осн. частота — основная частота сигнала. Определяется по максимальному модулю коэффициентов разложения.
- Коэфф. н. и. (%) — коэффициент нелинейных искажений в процентном выражении.
- Частота — частота, соответствующая точке спектра, отмеченной курсором.
- Уровень — уровень в точке спектра, отмеченной курсором, относительно максимума (принимается за 0 дБ).
- Мощ. фильтра (%) — мощность фильтра в процентном выражении. Отношение мощности пропускаемых фильтром гармоник к полной мощности сигнала.

Пользователь может установить нужное число первых коэффициентов разложения, отображаемых на графике спектра. Это число не может быть больше половины базы. График БПФ отображает спектр выбранного сигнала в логарифмической шкале «частота-амплитуда». По желанию пользователя может также отображаться фазо-частотная зависимость. Для измерений используется вертикальный курсор.

При включенном режиме преобразования Фурье можно использовать возможность спектральной фильтрации сигнала. Суть его в том, что перед обратным преобразованием анализируемого сигнала вы можете оставить в нем только те частоты, которые вам нужны, и подавить нежелательные. По желанию пользователя на графике может отображаться фазо-частотная характеристика спектра.

9.7.4. Осуществление цифровой фильтрации

Кроме аппаратной фильтрации сигнала в цепях запуска, не влияющей на результаты оцифровки сигнала, система обладает возможностями цифровой фильтрации измеренного сигнала. Эти функции реализованы на программном уровне и действуют только на отображение уже собранных данных. Включить и выключить фильтрацию можно с помощью панели цифровой фильтрации. На рис. 9.58 показана эта панель для осциллографа анализатора, а на рис. 9.59 для стандартного осциллографа.

Простейшую фильтрацию обеспечивает алгоритм накопительного фильтра. Для каждой точки времени отображается среднее за указанное количество сборов значение сигнала. Таким образом, подавляются случайные шумовые составляющие сигнала. Для каждой точки времени отображается среднее за указанное количество сборов значение сигнала. Количество точек для усреднения задается пользователем в диапазоне от 0 до 50.

Полиномиальный фильтр не требует повторных измерений. Используется быстрый алгоритм многопроходного биномиального сглаживания. Количество про-

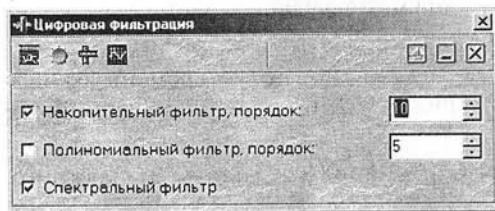


Рис. 9.58. Окно опций цифровой фильтрации для осциллографа-анализатора

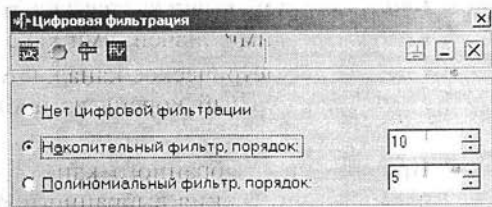


Рис. 9.59. Окно опций цифровой фильтрации стандартного осциллографа

ходов задается пользователем в диапазоне от 0 до 50. Резкие броски сигнала «размазываются» по ближним точкам, тем самым подавляются высокочастотные шумы. Однако этот фильтр может сильно исказить сигнал, имеющий «угловатую» форму. Включенный накопительный или полиномиальный фильтр действует на оба канала в выделенном временном диапазоне.

Большие возможности представляет использование спектрального фильтра. Для использования этой функции необходимо включить режим преобразования Фурье. В результате этого преобразования исследуемый сигнал представляется как суперпозиция гармонических колебаний с различными частотами, амплитудами и фазами. С помощью графических элементов панели Фурье-анализа пользователь может указать программе проводить обратное преобразование, предварительно усилив или ослабив указанные компоненты сигнала. Спектральный фильтр будет действовать только на тот канал, для которого проводится быстрое преобразование Фурье.

Для того, чтобы указать программе участок сигнала, который необходимо подвергнуть обработке, обозначить его начало и конец по временной шкале курсорами основного графика главной панели. Как правило, для спектральной фильтрации периодического сигнала удобнее использовать участок, содержащий целое число периодов основной частоты. Программа позволяет сделать это автоматически простым двойным левым щелчком мыши на основном графике.

9.7.5. Математическая обработка сигналов

Осциллограф приставки АСК-4106 имеет мощные математические средства для оперативной обработки собранных данных. Их можно определить в окне «Специальная функция», показанном на рис. 9.60.

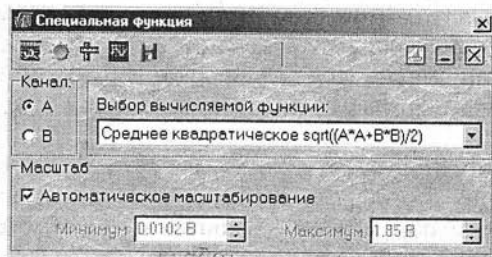


Рис. 9.60. Окно «Специальная функция»

На основной график главной панели, помимо осциллограмм по обоим каналам можно выводить математические функции от них:

- Сумма (разность, отношение, произведение) каналов А и В — Для каждой точки времени вычисляется указанная арифметическая операция между соответствующими значениями каналов А и В.
- Среднее геометрическое каналов А и В — Для каждой точки времени вычисляется квадратный корень из произведения соответствующих значений каналов А и В.
- Производная выбранного канала — Отображаются результаты дискретного дифференцирования выбранного канала.
- Интеграл выбранного канала — Вычисляется определенный интеграл для выбранного канала. В качестве аддитивной постоянной выбирается среднее значение сигнала в отображаемой области.

- Интеграл произведения каналов — Вычисляется определенный интеграл для произведения каналов. В качестве аддитивной постоянной выбирается среднее значение произведения сигналов в отображаемой области.
- Корреляция каналов А и В — Находит корреляцию массивов данных каналов А и В.
- Передаточная функция канала А к В — Передаточная функция — отношение лапласовских изображений двух функций. В программе для вычисления передаточной функции используется преобразование Фурье, как частный случай преобразования Лапласа, т. к. результаты этих преобразований, в общем случае, являются комплексными, для отображения на графике используются модули результатов. Вывод осуществляется в логарифмической шкале.

9.7.6. Статистические вычисления

Для большого числа определяемых программой параметров имеется возможность проведения статистической обработки этой величины по времени. Для этого следует в панели статистики выбрать параметры для обработки (Вы можете выбрать до трех одновременно обрабатываемых параметров) и включить статистические вычисления кнопкой. При каждом новом измерении новое значение выбранного параметра вносит соответствующие поправки в вычисляемые статистические величины. Окно с данными статистических вычислений представлено на рис. 9.61.

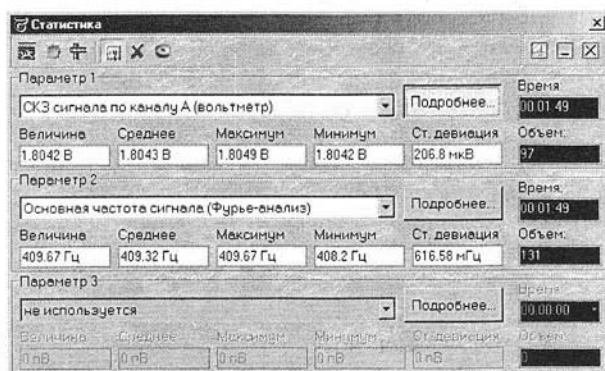


Рис. 9.61. Окно с данными статистических вычислений

Если выбранный параметр при очередном измерении не был определен (например, Вы ведете статистику по одному из параметров импульса, и в принятом сигнале импульс не обнаружен), то статистика не исправляется. В этом случае название параметра будет отображаться затемненным. Ниже приведено описание вычисляемых программой статистических параметров:

- Среднее — среднее арифметическое по выборке. Сумма всех набранных значений, деленная на их количество.
- Максимум — максимальное значение в выборке.
- Минимум — минимальное значение в выборке.
- Ст. девиация — стандартная девиация, квадратный корень из среднего квадрата отклонения каждого из значений в выборке от среднего значения. Учтите, что здесь используется упрощенный накопительный алгоритм расчета

девиации, не учитывающий изменения среднего значения. Это упрощение, как правило, приводит к небольшому занижению расчетного значения. Более строгий и точный алгоритм используется при использовании гистограммы (см. ниже).

9.7.7. Эмуляция сигналов

Для работы программы осциллографа в отсутствии реального прибора (с тестовыми или учебными целями) можно воспользоваться функцией эмулятора сигналов. Программа будет работать так, как будто к ней подключен реальный осциллограф, на входы которого подается периодически повторяющийся заданный пользователем сигнал. При этом можно: выбрать один из стандартных сигналов из выпадающего списка «Предопределенные формы» или задать сигнал в виде математической формулы в строке «Функция». Можно также просто нарисовать нужную форму мышкой на графике. Окно эмуляции сигнала показано на рис. 9.62.

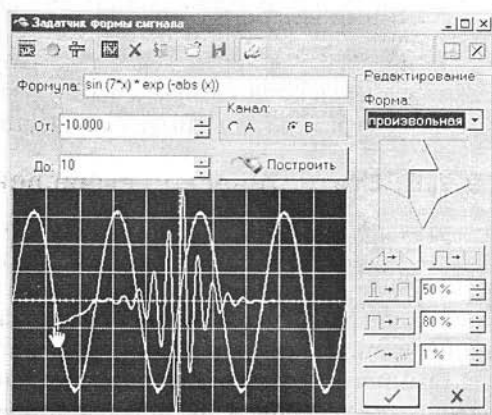


Рис. 9.62. Окно эмуляции сигналов

9.7.8. Работа в качестве виртуального самописца

Осциллограф приставки может работать в качестве самописца, регистрирующего длительные сигналы (рис. 9.63). Режим самописца качественно отличается от обычных режимов осциллографа тем, что чтение данных из прибора и их отображение производится в реальном времени, без остановки процесса измерений. Чтобы при этом не терялись возможности обработки данных на основном графике главной панели, введена отдельная панель самописца с «лентопротяжными» графиками. Данные в эти графики выводятся непрерывно по мере поступления новых данных.

Основной график самописца — немасштабируемый графический элемент «лентопротяжного» типа. Отображает десятую часть полного буфера данных прибора (т. е. 6553 выборки) с частотой 1 из 10 точек. Обзорный график самописца — немасштабируемый графический элемент «лентопротяжного» типа. Отображает полный буфер данных прибора (т. е. 131071 выборки) с частотой 1

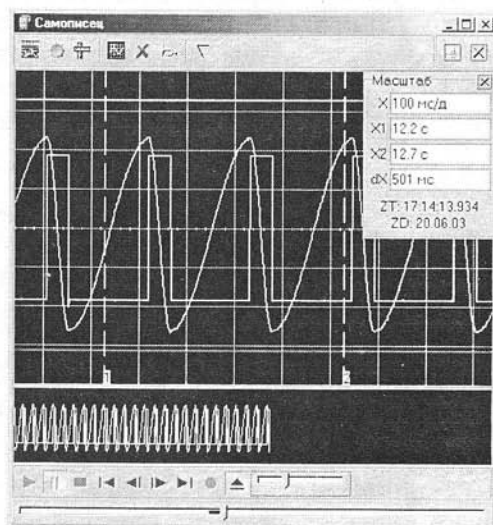


Рис. 9.63. Работа осциллографа в режиме самописца

из 100 точек. При этом можно скопировать накопленные в полном буфере данные для обработки в основной и обзорный графики главной панели. После копирования данных самописца их обработка ничем не отличается от измерений в обычных режимах.

В режиме самописца пользователь может выполнить следующие действия:

- Загрузить записанный ранее файл данных (восстанавливаются также сохраненные настройки прибора — диапазоны, развертка и т. д.).
- Сохранить данные и текущие настройки прибора в файл. Во всех режимах, кроме режима самописца, сохраняется текстовый файл в формате «CSV», в который записываются последние снятые данные. В режиме самописца создается двоичный файл, в который производится постоянное дописывание новых данных.
- Запустить (остановить) просмотр загруженного файла данных самописца.
- С помощью ползункового регулятора перемещаться по загруженному файлу данных самописца.
- С помощью ползункового регулятора изменять скорость прокрутки загруженного файла данных самописца.

Возможно также использование 2-х меток времени по системным часам ПК. На специальной панели отображаются следующие величины: X — масштаб горизонтальной оси основного графика самописца, X1 — положение первой метки времени, X2 — положение второй метки времени, dX — разница между метками времени, ZT — начало шкалы времени по системным часам ПК, ZD — начало шкалы времени (дата по календарю ПК).

С помощью регулятора аварийного предела (верхнего или нижнего) можно задавать предел, при выходе сигнала за который срабатывает аварийная сигнализация, при этом на экране появляется индикация «Тревога» (мигающий индикатор-«лампочка») и выполняется заранее заданная пользователем команда операционной системы, отражающая реакцию пользователя на аварийную ситуацию.

Для выбора скорости развертки нужно воспользоваться переключателем «Развертка (Выборки)» в панели управления. Вы можете выбрать скорость развертки прибора (т. е. частоту дискретизации оцифровки входных сигналов) от 100 МГц до 1 кГц (при фиксированном экране в 500 выборок это будет соответствовать времени развертки от 500 нс/деление до 50 мс/деление). На заполнение полного (128 Кбайт) буфера данных при этих развертках понадобится соответственно от 1,3 мс до 131 с.

Система поддерживает также несколько более быстрых разверток (эффективная частота дискретизации — до 10 ГГц). Применение этих разверток предполагает использование стробоскопического эффекта, и поэтому может применяться только к периодическим сигналам при наличии устойчивой синхронизации.

9.7.9. Задание аварийной сигнализации

Режим самописца может использоваться для аварийного контроля измеряемого параметра. Для этого необходимо в панели самописца задать горизонтальными курсорами графика верхний и нижний аварийные пределы.

При выходе измеряемого сигнала за установленные пределы возникнет аварийная ситуация. Если разрешена аварийная сигнализация в панели «Аварийная сигнализация», показанной на рис. 9.64, то возникновение аварийной ситуации будет обозначено цветовой и звуковой сигнализацией. Кроме того, будет выпол-

нена одна из команд операционной системе, указанных пользователем в соответствующих полях панели аварийной сигнализации. Поскольку пользователь может задать различные команды для аварийных ситуаций, вызванных выходом за верхний и за нижний пределы, то, тем самым, он может реализовать регулируемую систему для измеряемого самописцем параметра.



Рис. 9.64. Панель «Аварийная сигнализация»

В панели «Аварийная сигнализация» возможны следующие установки:

- Запретить сигнализацию — кнопка запрета сигнализации. Когда эта кнопка нажата, проверка аварийных условий не производится.
- Выключить сигнализацию — нажатие этой кнопки выключает запущенную сигнализацию, но не запрещает последующую проверку аварийных условий.
- Автоматически выключать при устранении — если эта метка установлена, сигнализация будет автоматически выключена, как только программа обнаружит, что аварийная ситуация устранена. Иначе, сигнализация будет работать до ее ручного выключения вне зависимости от последующего состояния контролируемого параметра.
- При выходе за верхний предел выполнить: — строковое поле. Записанная в это поле команда операционной системе будет выполнена при выходе хотя бы одного из отображаемых сигналов за установленный верхний предел (об установке аварийных пределов см. «Панель самописца»).

При выходе за нижний предел выполнить: — строковое поле. Записанная в это поле команда операционной системе будет выполнена при выходе хотя бы одного из отображаемых сигналов за установленный нижний предел.

9.7.10. Работа с разверткой и памятью

Программа осциллографа за один сеанс связи с прибором может считывать данные с большим запасом, позволяя в дальнейшем отображать с необходимой степенью подробности только часть собранного сигнала. Количество отображаемых выборок на осциллограмме при этом может быть как фиксированным, так и динамически изменяться пользователем в любое время просмотра сигнала. Для этого регулятор скорости измерений в панели управления имеет два режима: для фиксированной растяжки задается время развертки (десятая часть заданного количества выборок на экран, деленная на частоту дискретизации), для переменной — непосредственно частота дискретизации.

Пользователь может установить величину длины послезаписи в диапазоне от 0 до 131071 выборок. Указанное количество выборок будет собрано прибором после возникновения события запуска. Для установки величины длины послезаписи воспользуйтесь регулятором «Длина послезаписи» в панели настроек. Этот регулятор позволяет задавать длину послезаписи как в виде количества выборок, так и в виде временного интервала в секундах. Для исключения потери части данных сумма значений задержки запуска и длины послезаписи не должна превышать 131072. Не допускается одновременная установка нулевых значений указанных параметров.

9.7.11. Работа с курсорами

Обзорный (нижний) график главной панели содержит два вертикальных курсора. Если не включена опция фиксации разрешения основного графика, то на основном графике отображается та часть общего буфера снятых данных, которая заключена между этими курсорами на обзорном экране. Если разрешение основного графика фиксировано, то левый курсор задает его левую границу, а правая граница определяется заданным разрешением. Вы можете перемещать совместно оба курсора и, тем самым, перемещаться по буферу данных с помощью ползункового элемента прокрутки, расположенного непосредственно под обзорным графиком (см. раздел «Главная панель»).

В случае, когда пользователь использует достаточно большой общий буфер данных, выбрать нужную его часть для подробного рассмотрения с помощью курсоров становится затруднительно, т. к. даже небольшое перемещение курсора вызывает «катастрофические» изменения в размере выбранной области. Для устранения этой трудности введено автоматическое масштабирование обзорного графика. Когда курсоры сдвигаются друг к другу ближе, чем на одно деление обзорного графика (т. е. выделяете менее 10% от отображаемых на нем данных), график автоматически растягивается в 10 раз. Для обратной операции, т. е. 10-кратного сжатия обзорного графика, раздвиньте его курсоры более чем на 90% текущего размера графика. Область выделения на ползунке прокрутки графика показывает, какую часть всего буфера показывает сейчас обзорный график.

Для точного определения абсолютного или относительного положения точки на графике используются курсоры. Поместите курсор на точку графика, абсолютные координаты которой вы хотите измерить. Для перемещения курсоров перетаскивайте их левой кнопкой мыши. Затем прочитайте положение курсора на панели измерений.

Для определения относительных координат точки, т. е. расстояний между двумя выбранными точками, используются два курсора. Первый наведите на базовую точку, относительно которой проводится отсчет, второй на измеряемую точку. Разность положений курсоров отсчитывается на панели измерений. Проще всего отличить первый курсор от второго по цвету (цвета курсоров можно задать в панели настроек), но можно воспользоваться и тем менее заметным фактом, что метка первого курсора — квадрат, а второго — ромб. Это может оказаться особенно полезным при изучении черно-белых распечаток графика.

Вы можете перемещать курсоры по графику как с помощью мыши, так и с помощью клавиатуры, используя клавиши-стрелки. Одно нажатие клавиши вызывает перемещение курсора на единицу промежуточного деления шкалы в соответствующем направлении. Если при этом удерживать нажатой клавишу, то производится перемещение на единицу основного деления шкалы.

9.7.12. Режим мультиналожения

В программе осциллографа предусмотрена возможность симуляции режима послесвечения аналогового осциллографа (Цифрового Люминофора). Для этого при перерисовке основного графика новыми сигналами предыдущие не затираются, а гаснут постепенно, теряя яркость с каждым последующим обновлением экрана, полностью исчезая за 10 проходов луча.

Для включения и выключения этого режима используется команда «Цифровой люминофор» в меню «Вид».

9.7.13. Измерение фазового сдвига

В программе осциллографа существует возможность автоматического вычисления фазового сдвига сигнала канала В относительно канала А. Для ее использования обратитесь к командам «Фазовый сдвиг» меню «Вид». Выберите один из методов определения сдвига, и вычисленное значение фазового сдвига будет выводиться на специальную панель поверх основного графика. Диапазон выводимого значения угла сдвига: от -180° до $+180^\circ$.

Для определения величины фазового сдвига в данной программе применяются три метода. При геометрическом методе на основном графике определяются моменты переходов через среднее значение для обоих каналов, среднее по всем найденным периодам. Отношение разности между моментами начала периода каналов В и А к средней длительности периода по обоим каналам дает искомый сдвиг фаз. Недостатком этого простейшего метода является то, что он дает корректный результат только для сигналов идентичной формы (и, конечно, одинакового периода).

Метод косинуса потерь основан на формуле косинуса угла потерь:

$$\cos(\varphi) = \frac{\int_0^T U_A U_B dt}{T(U_{A\text{ RMS}} \cdot U_{B\text{ RMS}})},$$

где U_A , U_B — мгновенное значение сигнала по каналу А, В; $U_{A\text{ RMS}}$, $U_{B\text{ RMS}}$ — средне-квадратическое значение сигнала по каналу А, В.

Использование этого интегрального метода позволяет избежать грубых ошибок геометрических методов, возникающих из-за случайных помех, искажающих форму сигнала. Кроме того, в этом случае возможно определение сдвига фаз между сигналами различной формы.

Недостатком метода является невозможность определения знака угла сдвига фаз, поскольку измерения по разным каналам входят в формулу симметрично. Метод дает лишь абсолютное значение (модуль) угла.

Спектральный метод использует алгоритм быстрого преобразования Фурье для перевода сигналов из временной области в фазо-частотную. Далее, для обоих каналов определяется основная гармоника (по максимальной амплитуде), и сравниваются значения соответствующих фаз. Все остальные составляющие сигнала игнорируются. Недостатком этого метода можно считать неизбежную погрешность дискретного преобразования Фурье, ограничивающую точность определения фазового сдвига.

9.7.14. Применение режима цифрового вольтметра

В программе предусмотрен режим цифрового вольтметра. Для использования его надо обратиться к команде «Цифровой вольтметр» меню «Вид». Вычисленные среднеквадратическое, амплитудное и среднее значения уровня сигнала по обоим каналам будут выводиться на специальную панель поверх основного графика.

Вычисления проводятся для участка осциллограммы, ограниченного курсорами на основном графике. При выводе новой осциллограммы для того чтобы вновь провести вычисления показаний вольтметра по старой осциллограмме (например, для другого ее участка), вызовите команду «Перерисовать осциллограммы в главной панели».

Для удобства пользователя добавлена возможность усреднения показаний цифрового вольтметра по 5, 10, 25 или 50 последним измерениям. Напомним, что для полной статистической обработки этих показаний можно также воспользоваться панелью статистики.

9.7.15. Построение гистограммы распределения вероятности

В программе осциллографа предусмотрена возможность графического отображения распределения вероятности принимать определенные значения для одного из обрабатываемых статистических параметров (рис. 9.65). Кроме того, можно рассмотреть распределение измеренного значения сигнала в каждом отсчете по всему собранному буферу. Для этого надо воспользоваться панелью гистограммы, изображенной на рисунке ниже.

Гистограммы можно использовать в двух режимах. В первом — отображается распределение измеренной величины амплитуды сигнала в той части буфера собранных данных, который в настоящий момент выводится на основном графике главной панели. Во втором — распределение строится по одному из параметров, обрабатываемых в панели статистики. В этом режиме для обрабатываемого параметра отводится дополнительный буфер для хранения последних 1000 измерений, при этом возникает возможность определения моментов распределения высоких порядков, что позволяет определять такие статистические характеристики, как асимметрия и эксцесс. Кроме того, значение девиации также может быть вычислено точнее, чем приведено в панели статистики. Режим работы гистограммы зависит от положения кнопок «Подробнее...». Параметр, по которому строится распределение вероятности, указывается в заголовке гистограммы.

В панели «Курсоры» гистограммы выводятся:

- $X1(2)$ — X-координата (измеренные величины) по первому (второму) курсору.
- $Y1(2)$ — Y-координата (количество найденных величин в распределении) по первому (второму) курсору.
- dX — разность между 2 и 1 курсорами по оси X.

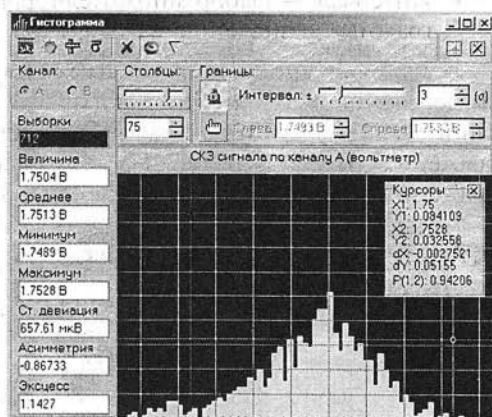


Рис. 9.65. Вывод гистограммы

- dY — разность между 2 и 1 курсорами по оси Y .
- P — вероятность попадания измеряемой величины в границы значений, обозначенные курсорами (по горизонтали).

В числовых полях панели гистограммы выводятся те же величины, что и в панели статистики, плюс дополнительные:

- Выборки — объем выборки распределения.
- Величина — текущее (последнее измеренное) значение выбранной величины.
- Среднее — среднее значение в распределении.
- Минимум — минимальное значение в распределении.
- Максимум — максимальное значение в распределении.
- Ст. девиация — стандартная девиация распределения (корень квадратный из дисперсии).
- Асимметрия — асимметрия распределения.
- Эксцесс — эксцесс распределения.
- Интервал — выбор множителя для автоматической установки границ гистограммы по значению стандартной девиации (сигме).

Центр горизонтальной шкалы гистограммы устанавливается равным среднему значению распределения, левая и правая ее границы отодвигаются от центра на указанное число сигм. Слева имеется ручная установка левой (нижней) границы отображения гистограммы, справа — ручная установка правой (верхней) границы отображения гистограммы. Столбцы — установка количества столбцов гистограммы.

9.7.16. Сохранение данных

Для сохранения собранных осциллограмм используется универсальный текстовый формат CSV (Comma Separated Values), который может быть в дальнейшем открыт как самой программой осциллографа, так и любым текстовым редактором или процессором электронных таблиц. Перед массивом данных в файл записываются комментарий пользователя и настройки осциллографа, что позволяет привязать сохраненные данные к абсолютным величинам.

Кроме цифрового сохранения результатов измерений в форме текстового файла, возможно сохранение в файл уже готового изображения полученных сигналов. Можно сохранить изображение сигналов на графике в файл в формате BMP (Windows bitmap). Сохраненное изображение затем можно загрузить в качестве фона графика для визуального сравнения сохраненных и новых сигналов.

Данные в режиме самописца записываются в наиболее экономичном битовом формате.

В начале файла записывается комментарий пользователя, настройки осциллографа, далее пишутся данные по мере их поступления. При необходимости можно преобразовать двоичный файл в тот же текстовый формат «CSV», который используется при записи данных в файлы в обычном режиме.

При загрузке сохраненных данных, программа останавливает текущие измерения, восстанавливает сохраненные в файле настройки прибора и отображает данные осциллографа точно так же, как обычные измерения. Далее с ними можно проводить любую доступную в программе обработку. Для просмотра файлов данных самописца используется встроенные программные средства, вызываемые с инструментальной панели самописца. С их помощью можно запустить или оста-

новить просмотр файла, перемещаться вручную по файлу и регулировать скорость его автоматической прокрутки.

9.7.17. Работа с модулем функционального генератора

Двухканальный виртуальный цифровой функциональный генератор сигналов произвольной формы представляет собой 12-разрядный цифровой прибор в стандартном конструктиве приборов серии «USB-лаборатория АКТАКОМ». Он выдает сигнал произвольной формы или сигнал одной из стандартных форм (синусоидальная, прямоугольная, треугольная и некоторые другие) по двум каналам одновременно. Задание формы и параметров сигналов производится пользователем с помощью компьютера независимо для каждого из каналов. Прибор имеет общий для обоих каналов вход внешней синхронизации для запуска генерации по внешнему событию. Прибор также вырабатывает выходной сигнал для синхронизации запуска других приборов. Главная панель функционального генератора представлена на рис. 9.66.

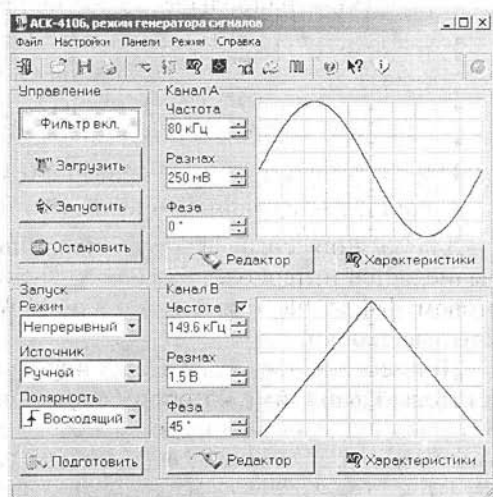


Рис. 9.66. Главная панель функционального генератора

С помощью списков слева от окна вывода формы сигнала имеются списки для установки следующих параметров сигналов:

- «Частота» — позволяет менять частоту сигнала в пределах от 0,1 Гц до 10 МГц (частота может быть установлена отдельно для каждого канала или ее можно изменять по обоим каналам одновременно, заблокировав регулятор частоты канала В).
- «Размах» — позволяет менять размах выходного сигнала по каналу А или В в пределах от 0,1 мВ до 2,5 В.
- «Фаза» — позволяет устанавливать фазу в пределах от -360° до $+360^\circ$.

Для выбора формы можно использовать следующие способы:

- Выбрать один из стандартных сигналов из выпадающего списка.
- Задать сигнал в виде математической формулы.
- Просто нарисовать нужную форму мышкой на графике.
- Загрузить форму сигнала из ранее подготовленного файла данных, возможно, обработанного внешним приложением.

Для одновременного задания формы сигнала по обоим каналам для генерации определенной фигуры Лиссажу, воспользуйтесь функцией «лазерное шоу».

Для записи формул Вы можете использовать символ переменной x , численные константы в формате с плавающей точкой или в экспоненциальном (123.456 или эквивалентное $1.23456E+2$). Разрешаются знаки операций: «+» (сложение), «-» (вычитание), «/» (деление), «*» (умножение), «^» (возведение в степень). Для из-

менения приоритета вычислений можно использовать круглые скобки (). Распознаются все элементарные функции: $\sin(x)$, $\cos(x)$, $\tan(x)$, $\operatorname{asin}(x)$, $\operatorname{acos}(x)$, $\operatorname{atan}(x)$, $\sinh(x)$, $\cosh(x)$, $\tanh(x)$, $\exp(x)$, $\ln(x)$, $\lg(x)$, \sqrt{x} . Возможно применение и числовых функций:

- $\operatorname{floor}(x)$ — наибольшее целое не превышающее x ;
- $\operatorname{ceil}(x)$ — наименьшее целое не ниже x ;
- $\operatorname{abs}(x)$ — абсолютная величина (модуль) x ;
- $\operatorname{deg}(x)$ — преобразует радианы в градусы;
- $\operatorname{rad}(x)$ — преобразует градусы в радианы;
- $\operatorname{sgn}(x)$ — знак x , если x — отрицательное число, возвращает (-1) , иначе (1) ;
- $\operatorname{rand}(x)$ — случайное число от 0 до заданного значения x ;

Для задания сигнала в виде таблицы используется функция $\operatorname{filetab}(\text{file}, x)$ — вычисляется интерполированное значение функции $f(x)$, заданной таблицей в текстовом файле file (см. прим. ниже). Аргумент функции должен заключаться в круглые скобки.

Примечание. Функция $\operatorname{filetab}$ использует для определения узлов интерполяции текстовый файл, имя которого должно быть указано в качестве первого аргумента, без кавычек, запятая в имени файла не допускается. Узлы интерполяции указываются в файле построчно, в формате: x, y . В первых двух строчках файла записывается постоянная служебная информация (идентификаторы типа файла, должны быть 31323133 и 434E5549). Например, файл со следующим содержанием:

```
31323133
434E5546
20.0,0.241
21.0,0.253
22.0,0.266
23.0,0.278
24.0,0.291
25.0,0.303
30.0,0.367
40.0,0.497
50.0,0.630
60.0,0.766
70.0,0.905
75.0,0.975
80.0,1.047
90.0,1.191
100.,1.337
120.,1.637
150.,2.100
170.,2.417
200.,2.901
220.,3.229
250.,3.728
```

задает функцию зависимости напряжения (в милливольтках) на концах термопары ВР(А)-2 от градиента температуры в диапазоне от 20 °С до 250 °С с переменным шагом.

В формулах можно использовать также обозначения констант:

- $\pi = 3.1415926535897932384626433832795$
- $e = 2.7182818284590452353602874713527$

Для разделения элементов формулы допустимо использовать пробелы (но не в именах функций). После задания сигнала у пользователя есть возможность определить его основные параметры: амплитуду, частоту и спектр с помощью панели свойств сигнала.

Для выбора режима запуска воспользуйтесь переключателем «Режим» в главной панели. Доступные следующие режимы:

- Однократный — генерация сигнала начинается по возникновению события синхронизации и заканчивается после однократной генерации заданного буфера данных;
- Непрерывный — генерация сигнала начинается по возникновению события синхронизации, после генерации заданного буфера данных происходит автоматический перезапуск генерации с начального адреса. Если во время генерации вновь происходит событие синхронизации, вызывается немедленный перезапуск.

Источник запуска устанавливается с помощью расположенного ниже переключателя «Источник»:

- Ручной — событие запуска вырабатывается по команде пользователя (кнопка «Запустить»);
- Внешний — событие запуска определяется по сигналу на входе внешней синхронизации. Для внешнего запуска можно выбрать полярность запускающего импульса;
- Восходящий — событие запуска вырабатывается по обнаружению восходящего (переднего) фронта запускающего импульса;
- Спадающий — событие запуска вырабатывается по обнаружению спадающего (заднего) фронта запускающего импульса.

Генератор оснащен аналоговым фильтром низких частот 5-го порядка с частотой среза около 15 МГц. Включить или выключить его можно с помощью кнопки «Фильтр вкл./выкл.» в главной панели или в панели ручного управления. Фильтр обеспечивает уменьшение шумов квантования сигналов генератора.

Хотя прибор не имеет аппаратных средств реализации модулированных сигналов, Вы можете использовать возможности задания сигнала математическим выражением (см. «Панель редактора сигнала») для решения этой задачи:

- $A(x) \cdot \sin(w_0 x + j_0)$ — амплитудная модуляция, $A(x)$ — модулирующий сигнал;
- $A \cdot \sin(w_0 x + j(t))$ — фазовая модуляция, $j(t)$ — модулирующий сигнал;
- $A \cdot \sin(w(t)x + j_0)$ — частотная модуляция, $w(t)$ — модулирующий сигнал;

Например: `filetab (func.csv, x)*sin (10*x)`. Данная формула задает амплитудную модуляцию с несущей частотой в 10 раз большей частоты модулирующего сигнала. Модулирующая функция описывается таблицей, считываемой из файла.

Для задания импульсных сигналов с заданной скважностью можно использовать возможности задания сигнала математическим выражением. Например, задайте следующую формулу: `sgn (x)`. Если при этом указать диапазон изменения переменной от -1 до 2 , результатом вычислений будет прямоугольный импульс со скважностью 3, или, иначе, с коэффициентом заполнения $1/3$.

Программа функционального генератора работает со следующими типами файлов данных:

- Файлы данных, подготовленных для загрузки в прибор. Записываются командой из главной панели. Это данные, уже прошедшие полную обработку в программе и содержащие значения выборок по обоим каналам генератора. Могут записываться как в текстовом, так и в битовом виде. Битовый формат экономичнее и эффективнее, зато текстовый позволяет использование внешнего редактора.
- Файлы шаблонов форм сигнала. Записываются командой из панели редактора сигнала. Это данные, содержащие только шаблоны формы по обоим каналам генератора.
- Файлы функций. Это данные, описывающие шаблон формы по одному из каналов как функцию для редактора математических выражений.
- Файлы «лазерного шоу». Записываются командой из панели «лазерного шоу». Это данные, содержащие шаблоны форм фигур Лиссажу.

Для этих файлов используется универсальный текстовый формат CSV (Comma Separated Values), который может быть в дальнейшем открыт как самой программой осциллографа, так и любым текстовым редактором или процессором электронных таблиц. Функция печати подготовленных выходных сигналов распечатывает изображение сигналов из панели свойств сигнала и некоторую дополнительную текстовую информацию о сигналах.

Пользователь имеет возможность использовать для просмотра или обработки данных, используемых прибором, любую удобную ему программу, способную работать с текстовыми файлами в формате «CSV». Этот формат, в котором сохраняются файлы данных, удобен в первую очередь своей универсальностью: его понимают самые разные программы, от MS Windows Notepad до MS Excel. Вы можете использовать для работы с этими файлами практически любой текстовый редактор или табличный процессор. Ограничения накладываются только на объем загружаемой информации.

Программа позволяет пользователю задавать форму сигналов по обоим каналам для генерации фигур Лиссажу в виде готового изображения («лазерное шоу»). Здесь Вы можете выбрать одну из стандартных фигур или нарисовать собственную, а затем отредактировать полученное изображение. Построенную фигуру можно записать в файл (как последовательность координат узловых точек фигуры) и в дальнейшем вновь загрузить ее в программу для работы. Сохраненный файл можно отредактировать в текстовом виде (см. раздел «Обработка файлов данных внешними табличными процессорами»).

Функциональный генератор имеет специальный редактор битовых последовательностей, окно которого показано на рис. 9.67. Он вызывается кноп-

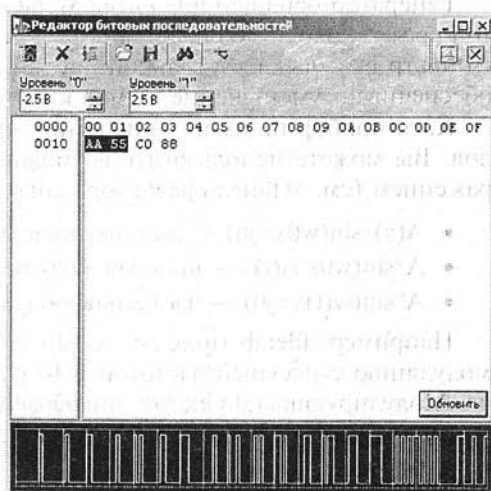


Рис. 9.67. Окно редактора битовых последовательностей

кой Редактор в основном окне функционального генератора (рис. 9.66). Окно редактора служит для создания, просмотра и редактирования небольших битовых файлов, используемых в качестве аргумента функции `binfile (file, x)`.

Цифровой бинарный сигнал является последовательностью прямоугольных импульсов, базовый и верхний уровень этих импульсов соответствуют уровням логических нуля и единицы. Для удобства представления таких сигналов в список функций интерпретатора математических выражений редактора сигналов введена функция `binfile (file, x)`, которая возвращает логическое значение (0 или 1), соответствующее значению бита `x` в указанном битовом файле. При этом:

- Уровень «0» — напряжение, соответствующее уровню логического нуля.
- Уровень «1» — напряжение, соответствующее уровню логической единицы.

Для создания и редактирования битовых файлов можно воспользоваться входящим в программу редактором битовых последовательностей. Ниже расположены два текстовых поля. Правое содержит текстовое представление редактируемой битовой последовательности в виде последовательности байтов, каждый байт изображается двумя шестнадцатеричными цифрами, байты отделяются друг от друга пробелами. Левое поле показывает шестнадцатеричный адрес (номер по порядку байта в файле) первого байта в соответствующей строке правого поля. Для того, чтобы задать нужную битовую последовательность, впишите последовательно нужные байты в правое текстовое поле и нажмите внизу кнопку «Обновить» или просто нажмите `Enter` на клавиатуре — введенный текст будет распознан, переведен в битовую форму и отображен на графике внизу панели.

9.7.18. Системные функции

Для того чтобы пользователю не приходилось при каждом запуске программы заново выставлять настройки системы, реализованы несколько функций сохранения и загрузки конфигурации системы. При каждом выходе из программы настройки системы сохраняются в файле `default.cfg` в рабочем каталоге. При следующем запуске программа читает этот файл и восстанавливает настройки. Кроме автоматического сохранения и загрузки настроек можно использовать команды «Записать» конфигурацию и «Прочитать конфигурацию» меню «Файл». Эти команды позволяют пользователю записывать и читать вручную различные варианты конфигурации системы для стандартных вариантов работы.

В программе предусмотрена возможность пользовательской настройки цветовой схемы. С помощью панели настроек можно выбрать цвета различных элементов графических индикаторов (фон, линии сетки, кривые сигналов, метки курсоров.), наиболее подходящие для Вашего рабочего места. Вы можете создать различные цветовые схемы и выбирать их с помощью функций записи и чтения конфигурации программы.

В программе предусмотрена возможность выбора одного из предустановленных или пользовательских языков интерфейса. Для этого все текстовые сообщения и надписи пользовательского интерфейса программы вынесены в доступные текстовые файлы. Уже не раз приводились примеры хорошей поддержки русскоязычного интерфейса.

Для того чтобы вызвать встроенный файл справки программы, воспользуйтесь командами меню «Справка».

Программа «Измерительный комплекс АСК-4106» предназначена для автоматического измерения комплекса характеристик различных радиоэлектронных

устройств. Программа позволяет снимать амплитудные, амплитудно-частотные, фазо-частотные и переходные характеристики тестируемого устройства. Для формирования входных тестовых сигналов используется модуль генератора АСК-4106, для измерения выходных сигналов — модуль осциллографа АСК-4109. Программа осуществляет поочередное управление обоими модулями в автоматическом режиме.

9.8. Работа АСК-4106 с реальными сигналами

9.8.1. Измерительная схема и развертывание лаборатории

Измерительная схема для снятия характеристик различных устройств и систем представлена на рис. 9.68. На вход исследуемого устройства (ИУ) с выхода соответствующего генератора подается воздействие в виде тестирующего сигнала с необходимыми параметрами (ТА). С выхода ИУ с помощью соответствующего регистратора (измерителя) снимается результат такого воздействия — отклик (ОА) и анализируются числовые значения выбранного параметра или характеристики. Для того чтобы скомпенсировать собственные искажения прибора (например, неравномерность АЧХ осциллографа), идентичный испытательный сигнал (ТВ) подается также с канала В генератора напрямую на канал В осциллографа. Теперь, сравнивая измеренные сигналы по обоим каналам (ОА и ОВ), обнаружим только влияние ИУ (пренебрегая тонкими различиями между каналами прибора). Регистратор синхронизируется с генератором с помощью канала С (см. ниже).

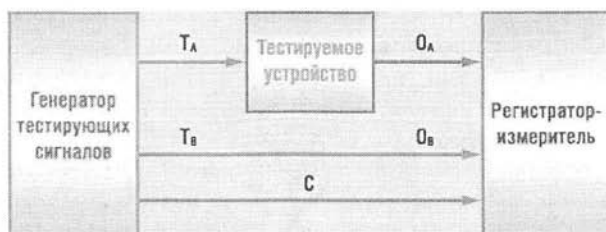


Рис. 9.68. Измерительная схема на базе прибора АСК-4106

Для проведения измерений необходимо подключить к прибору четыре соединительных радиокабеля, используя все его измерительные разъемы.

1. Выход синхронизации модуля генератора (СИНХРОНИЗАЦИЯ ВХОД/ВЫХОД) напрямую соедините с входом синхронизации модуля осциллографа (ВНЕС. А и В).
2. Выход канала В модуля генератора напрямую соедините с входом канала В модуля осциллографа.
3. Выход канала А модуля генератора соедините со входом исследуемого устройства.
4. Выход исследуемого устройства соедините со входом канала А модуля осциллографа.

Внешний вид развернутой лаборатории показан на рис. 9.69.

Для получения достаточно полной картины свойств испытываемого устройства, необходимо провести большое количество измерений при различных параметрах тестового сигнала. Соответственно, программа измерительного комплекса должна обеспечивать пользователя средствами описания такой последовательно-

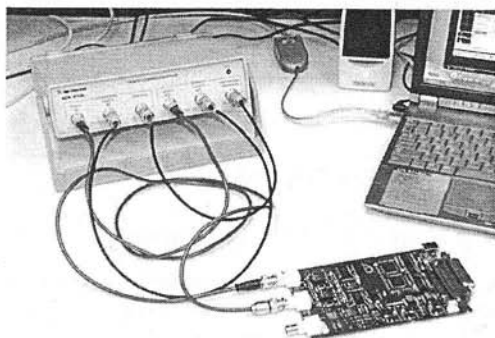


Рис. 9.69. Внешний вид виртуальной лаборатории на базе приставки АСК-4106 и ноутбука

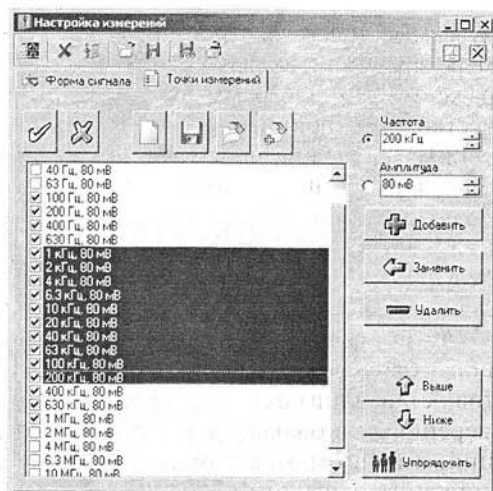


Рис. 9.70. Окно настройки измерений

сти сигналов для проведения всего комплекса испытаний «списком». В программе АСК-4106 для этой цели вводится понятие траектории измерений, в свою очередь представляющей собой последовательность точек измерений.

Каждая точка измерений — это совокупность нескольких величин: частоты повторения испытательного сигнала, размаха напряжения, шаблона формы и флага использования этой точки при измерениях (рис. 9.70). Шаблон формы задает характер испытательного сигнала: синус, прямоугольник, дельта-импульс или любая произвольная форма. Флаг использования позволяет исключать данную точку из текущей серии измерений, не удаляя ее из траектории. Программа содержит удобные средства для работы с траекториями измерений. Пользователь может создавать новые траектории, сохранять их в файлы, загружать сохраненные, составлять новые траектории, соединяя несколько существующих траекторий, сортировать точки в составе траектории, вносить изменения в отдельные точки или в группы точек измерений и т. д.

9.8.2. Автоматические измерения и определяемые параметры сигналов

Подключив тестируемое устройство к прибору, и задав требуемую траекторию измерений, можно переходить непосредственно к процессу испытаний. Программа позволяет запустить измерения в автоматическом или пошаговом (полуавтоматическом) режиме. В обоих режимах программа последовательно генерирует испытательные сигналы (ИС), задаваемые очередной точкой траектории измерений (шаг измерений). На каждом шаге измерений программа автоматически устанавливает длину буфера данных и скорость развертки осциллографа в соответствии с периодом повторения ИС в текущей точке измерений, так, чтобы оказались захваченными несколько периодов ИС с достаточным временным разрешением. Далее автоматически подбираются оптимальные величины усиления и смещений по обоим измеряемым каналам, проводя несколько настроечных захватов сигнала.

После настройки осциллографа производится результирующий захват осциллограмм, по которым далее будут проводиться вычисления. Все осциллограммы, по-

лучаемые и для настройки, и для результативных измерений, отображаются по мере захвата на вкладке «Форма» главного окна программы (рис. см. ниже). Изображения осциллограмм нужны только для визуального контроля оператора за качеством настройки прибора на сигнал, определение численных параметров измеренных сигналов проводится автоматически: программа сама выделяет в собранных данных целое число периодов повторения ИС. По каждому найденному периоду осциллограф вычисляет размах сигнала, его среднеквадратическое значение, частоту и фазу, затем полученные величины усредняются по всем периодам. Результаты измерений сохраняются в таблице данных и отображаются в главном окне программы.

Автоматический и полуавтоматический режимы отличаются только тем, что в пошаговом режиме программа после каждого шага измерений и вывода результатов останавливается, дает возможность не спеша ознакомиться с полученными измерениями и ожидает команды пользователя для начала следующего шага измерений, а в автоматическом — переход к следующему шагу производится сразу, без дополнительного подтверждения.

9.8.3. Предоставление результатов измерений

После определения параметров в очередной точке измерений, результаты заносятся в массив данных траектории и выводятся в графическом виде как амплитудно-частотная, амплитудная и фазо-частотная характеристики, а также в текстовом виде в таблице «Сводка измерений». Вкладка «Форма» представляет осциллограммы исследуемого устройства — см. рис. 9.71.

Зависимость среднеквадратического значения амплитуды выходного сигнала от частоты входного сигнала (амплитудно-частотная характеристика, АЧХ) изображается на вкладке «Частотные» (рис. 9.72). Ось значений этого графика может работать в двух различных режимах. В первом режиме по этой оси откладывается

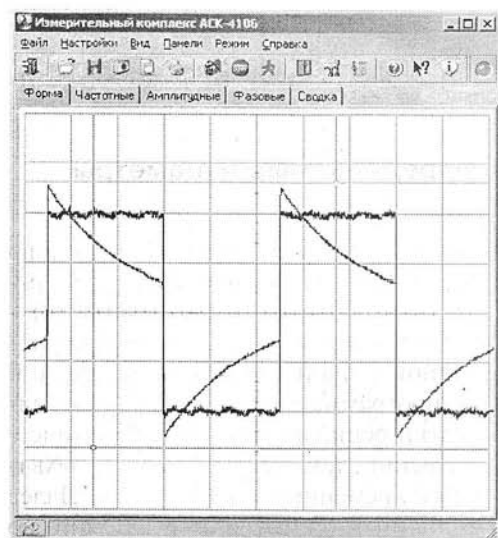


Рис. 9.71. Представление форм исследуемых напряжений

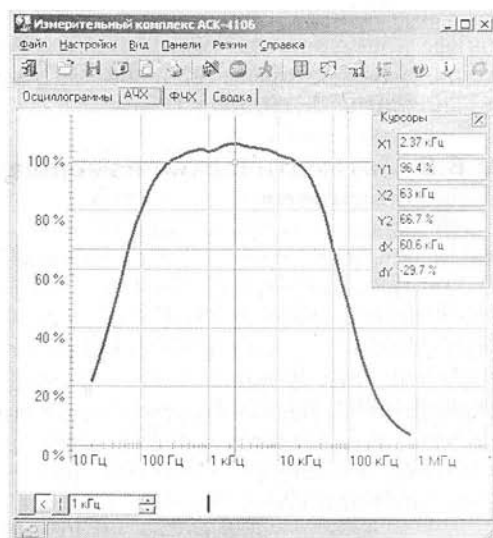


Рис. 9.72. Окно просмотра амплитудно-частотной характеристики

измеренная величина коэффициента усиления (отношение СКЗ выходного сигнала к СКЗ входного сигнала), в линейном или логарифмическом масштабе. Во втором — дополнительно включается возможность использования опорного уровня: выводится отношение измеренного в данной точке коэффициента усиления к некоторому фиксированному уровню, либо определенному на указанной частоте, либо введенному в явном виде.

Кроме обычных настроек (см. раздел «Настройка вида графиков») этот график позволяет переключать различные режимы оси значений:

- Коэффициент усиления — на шкале значений откладывается безразмерная величина отношения измеренных действующих значений напряжения сигнала реакции тестируемого устройства и сигнала тестового воздействия.
- Логарифмическая шкала (дБ) — вместо коэффициента усиления откладывается его десятичный логарифм.
- Нормировка по опорному уровню (%) — откладывается отношение величины коэффициента усиления в данной точке к другой фиксированной величине коэффициента усиления (заданной либо явно, либо измеренной на заданной частоте), выраженной в процентах.

Для выбора желаемого режима для шкалы значений графика АЧХ надо пользоваться соответствующей командой меню «Вид» главной панели.

На вкладке «Амплитудные» отображается зависимость среднеквадратического значения амплитуды выходного сигнала от среднеквадратического значения амплитуды входного сигнала (амплитудная или передаточная характеристика — рис. 9.73). Если текущая траектория измерений служит для измерения АЧХ и амплитуда входного сигнала поддерживается постоянной во всех измеряемых точках, этот график будет не слишком наглядным, представляя собой вертикальную линию. В этом случае пользователь может запретить программе строить не нужный график. Это же относится и к графикам АЧХ и ФЧХ (см. ниже) при измерении амплитудной характеристики (когда измерения проводятся при фиксированной частоте ИС).

По оси ординат откладывается измеренное действующее значение напряжения сигнала тестового воздействия, по оси значений — измеренное действующее значение напряжения сигнала реакции тестируемого устройства.

ФЧХ (фазо-частотная характеристика) изображается на последней графической вкладке: «Фазовые» (рис. 9.74). Здесь выводится зависимость величины угла сдвига фаз выходного сигнала от частоты входного ИС. Величины углов могут по выбору пользователя отображаться в градусах, радианах, градиентах или в долях полного круга. Диапазон определения угла сдвига фаз: от -180° до $+180^\circ$.

Программа позволяет выбрать один из трех методов определения фазового

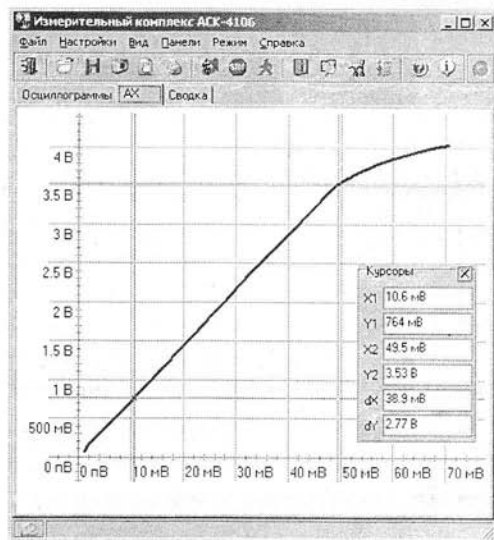


Рис. 9.73. Представление амплитудной (передаточной) характеристики

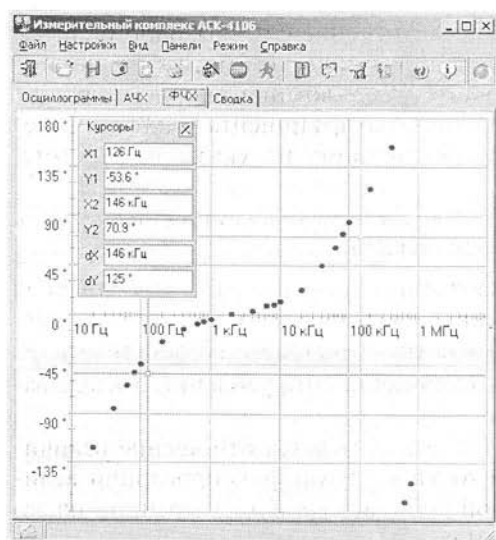


Рис. 9.74. Представление фазо-частотной характеристики



Рис. 9.75. Пример определения сдвига фаз между сигналами, один из которых не синусоидальный

сдвига: геометрический, метод «косинуса потерь» и спектральный. Они были описаны выше. Рис. 9.75 иллюстрирует определение фазы для случая, когда один из сигналов синусоидальный, а другой резко отличный от синусоидального. Этот пример — иллюстрация к реальной задаче определения сдвига фаз между сигналами напряжения и тока при измерении параметров петли гистерезиса магнитопроводов с ферритовым сердечником.

9.8.4. Настройка графиков

Все графики имеют возможность курсорных измерений. Для каждого графика в программе пользователь может выбрать наиболее удобные настройки с помощью специального диалогового окна. Здесь можно выбрать как удобные цвета для всех элементов графика, так и настроить стиль графиков, установить параметры осей (масштаб, шаг сетки, линейная или логарифмическая). Каждый график настраивается независимо с помощью окна «Настройка графиков» — рис. 9.76.

Общая настройка графиков осуществляется с помощью вкладки «Общие настройки». На ней возможны следующие установки:

- Показывать оси — разрешает прорисовку на графике линий осей и меток.
- Показывать сетку — разрешает отображение линий сетки.
- Стиль графика — выбирает стиль линии графика: линии, отдельные точки, полосы (стиль гистограммы), сплайн (сглаженная кривая по указанным точкам).
- Отступ слева (снизу) — размер отступа (в пикселях), на который изображение будет сдвинуто от левого (нижнего) края окна графика.
- Ширина линии — ширина (в пикселях) линии, используемой для прорисовки графика при использовании любого стиля, кроме точечного.
- Размер точки — диаметр точек (в пикселях), используемых для прорисовки графика при использовании стиля «точки».

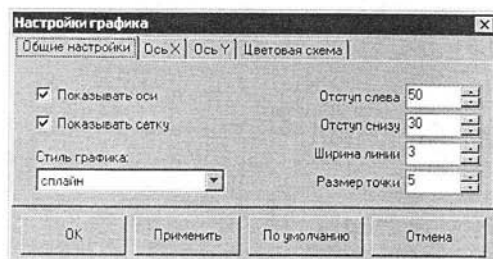


Рис. 9.76. Окно настройки графиков

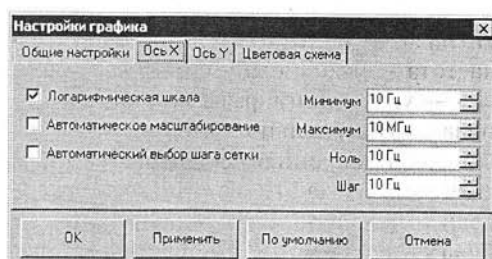


Рис. 9.77. Вкладка «Ось X»

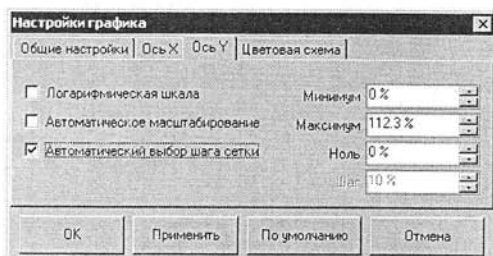


Рис. 9.78. Вкладка «Ось Y»

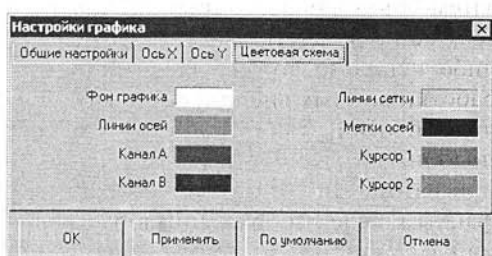


Рис. 9.79. Вкладка «Цветовая схема»

На вкладке «Ось X» (рис. 9.77) имеются установки:

- Логарифмическая шкала — включает режим логарифмической шкалы для оси ординат. Вместо оригинальных значений ординат выводятся их десятичные логарифмы. При использовании логарифмической шкалы не допустимы ординаты меньше либо равные нулю.
- Автоматическое масштабирование — если эта метка установлена, то по нажатию кнопки «ОК» или «Применить» значения минимума, максимума и нуля для оси ординат будут установлены программой автоматически на основе текущих данных, отображаемых на графике.
- Автоматический выбор шага сетки — если эта метка установлена, то по нажатию кнопки «ОК» или «Применить» значение шага сетки по оси ординат будет установлен программой автоматически на основе текущего масштаба этой оси.
- Минимум (Максимум, Ноль) — параметры масштаба оси ординат.

Соответственно на вкладке «Ось Y» (рис. 9.78) возможны установки, аналогичные отмеченным на вкладке «Ось X», но, конечно, применяемые к оси Y.

Наконец на вкладке «Цветовая схема» (рис. 9.79) можно задавать удобные пользователю цвета различных элементов графика. Щелчок левой кнопкой мыши — выбор цвета, щелчок правой кнопкой мыши устанавливает цвет по умолчанию.

9.8.5. Просмотр табличных данных

Просмотреть в числовом виде исходные данные для построения графических характеристик можно в таблице на вкладке «Сводка» — рис. 9.80. Для каждой точки измерений в эту таблицу построчно заносятся: «N» — номер точки измерений, «Частота ->» — заданная частота ИС, «Амплитуда ->» — заданная пиковая амплитуда ИС, «СКЗ ->» — измеренная среднеквадратическая амплитуда входного

сигнала, «Частота <-» — измеренная частота выходного сигнала, «Фаза <-» — угол сдвига фазы выходного сигнала относительно входного, «СКЗ <-» — измеренная среднеквадратическая амплитуда выходного сигнала.

Все результаты измерений, в том числе и содержимое этой таблицы, могут быть сохранены в текстовый файл в формате «CSV». Этот файл может быть затем либо вновь открыт самой программой измерительного комплекса, либо использован для дальнейшей обработки данных внешними приложениями, такими, как Microsoft Excel или подобными. Кроме того, все графики программы также можно сохранить в файлы в виде изображений в растровой или в векторной форме. Наконец, содержимое любой вкладки результатов измерений пользователь может снабдить собственным комментарием и вместе с ним отправить на печать.

9.8.6. Применение модуля анализа формы сигналов

Для изучения переходных характеристик испытываемых устройств пользователь может либо просто воспользоваться курсорными измерениями на графике формы сигналов, либо дополнительно использовать возможности автоматического измерения модуля анализа формы сигнала. Этот модуль объединяет возможности спектрального анализа (разложение сигналов в гармонические ряды, изображение спектров сигналов и их параметров: частот и амплитуд гармоник, коэффициента нелинейных искажений) и алгоритмов автоматического определения параметров импульса (частоты, длины импульса, времен нарастания и спада, величин выброса и т. д.). Окно модуля с открытой вкладкой «Спектральный анализ» показано на рис. 9.81.

Программа имеет возможность автоматического определения стандартных параметров импульсных сигналов — рис. 9.82. При этом программа будет пытаться обнаружить в собранных осциллографом данных импульсный сигнал. В случае отсутствия подходящего сигнала с помощью светодиодов статуса на вкладке «Параметры импуль-

Измерительный комплекс АСК-4106

Файл Настройки Вид Панели Режим Справка

Осциллограммы АЧХ ФЧХ Сводка

N	Частота >	Амплитуда >	СКЗ >	Частота <	Фаза <	СКЗ <
1	20 Гц	100 мВ	35.355 мВ	20.011 Гц	-122°	555.48 мВ
2	40 Гц	100 мВ	35.355 мВ	40.041 Гц	-85.2°	1.172 В
3	63 Гц	100 мВ	35.355 мВ	62.985 Гц	63.8°	1.6174 В
4	80 Гц	100 мВ	35.355 мВ	80.017 Гц	-53°	1.843 В
5	100 Гц	100 мВ	35.355 мВ	100.03 Гц	-44.9°	2.0203 В
6	200 Гц	100 мВ	35.355 мВ	200.07 Гц	-25°	2.3653 В
7	400 Гц	100 мВ	35.355 мВ	400.09 Гц	-13.4°	2.5069 В
8	630 Гц	100 мВ	35.355 мВ	630.15 Гц	-8.2°	2.5515 В
9	800 Гц	100 мВ	35.355 мВ	799.95 Гц	-5.95°	2.5657 В
10	1 кГц	100 мВ	35.355 мВ	899.49 Гц	-4.47°	2.5795 В
11	2 кГц	100 мВ	35.355 мВ	2.0004 кГц	0.569°	2.5936 В
12	4 кГц	100 мВ	35.355 мВ	3.9997 кГц	3.86°	2.5986 В
13	6.3 кГц	100 мВ	35.355 мВ	6.304 кГц	7.97°	2.5869 В
14	8 кГц	100 мВ	35.355 мВ	8.0007 кГц	9.63°	2.5763 В
15	10 кГц	100 мВ	35.355 мВ	9.9974 кГц	12.2°	2.5568 В
16	20 кГц	100 мВ	35.355 мВ	20.001 кГц	23.2°	2.4384 В
17	40 кГц	100 мВ	35.355 мВ	39.988 кГц	45.1°	2.1216 В
18	63 кГц	100 мВ	35.355 мВ	63.034 кГц	61.6°	1.6913 В
19	80 кГц	100 мВ	35.355 мВ	79.964 кГц	73.5°	1.4409 В
20	100 кГц	100 мВ	35.355 мВ	99.983 кГц	84.1°	1.2089 В
21	200 кГц	100 мВ	35.355 мВ	199.98 кГц	114°	600.41 мВ
22	400 кГц	100 мВ	35.355 мВ	400.26 кГц	153°	245.14 мВ
23	630 кГц	100 мВ	35.361 мВ	634.99 кГц	-171°	128.94 мВ
24	800 кГц	100 мВ	35.355 мВ	800.37 кГц	-153°	99.251 мВ

Рис. 9.80. Представление характеристики в форме таблицы

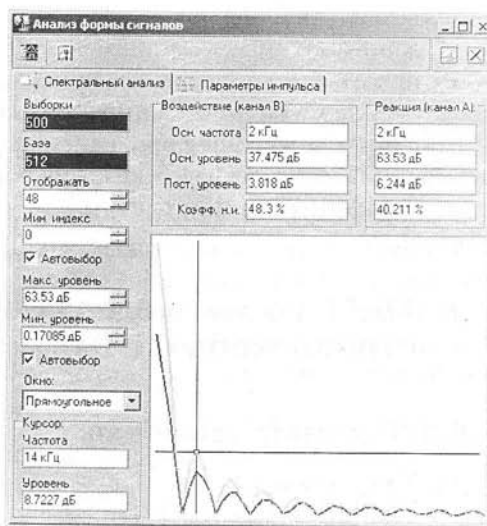


Рис. 9.81. Представление результатов спектрального анализа модулем анализа формы сигналов

льса» панели анализа формы сигнала будет выведено сообщение о том, что параметры не определены, либо определены частично. В противном случае новые результаты вычислений будут выведены в соответствующие числовые поля панели. Поля, соответствующие неопределенным параметрам, будут отображаться «недоступными».

Полученные результаты измерений можно сохранять и затем загружать их как данные результаты измерений, так и данные, определяющие условия измерений. Команды записи данных в файл, вызываемые пользователем из разных рабочих панелей программы, создают файлы разных форматов данных, хотя при этом используется одинаковый формат самих файлов (формат CSV). Для того чтобы не путать файлы разных данных, мы предлагаем помещать их в различные подкаталоги.

Программа позволяет пользователю распечатать результаты измерений, представленные на вкладках главной панели. Для этого выведите нужную вкладку на передний план и дайте программе команду «Печать» из меню Файл или воспользуйтесь кнопкой. Для предварительного просмотра результатов печати Вы можете использовать команду «Просмотр печати» или кнопку. Для переключения режимов черно-белой или цветной печати графиков используйте опцию Черно-белая печать на вкладке «Общие» панели настроек.

Пользователь имеет также возможность использовать для просмотра или обработки данных, используемых прибором, любую удобную ему программу, способную работать с текстовыми файлами в формате «CSV». Вы можете использовать для работы с этими файлами практически любой текстовый редактор или табличный процессор, ограничения накладываются только на объем загружаемой информации. В этом случае рекомендуется разбивать большой файл данных на несколько достаточно мелких порций.

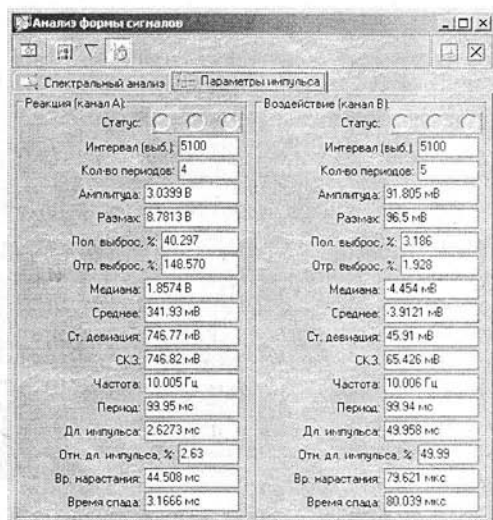


Рис. 9.82. Представление результатов анализа импульсов на вкладке «Параметры импульсов» модуля анализа формы сигналов

9.9. 18-ГГц осциллографический комплекс на базе стробоскопа С1-91/4 и приставки АСК-3106/4106

В ряде исследований сверхскоростных импульсных устройств на туннельных диодах, лавинных транзисторах и широкополосных операционных усилителях требуется осциллографирование быстропротекающих процессов в полосе рабочих частот до 10 ГГц и выше. К сожалению, современные цифровые осциллографы с такой полосой частот известных фирм Tektronix, Agilent и LeGroy стоят очень дорого, а старые советские стробоскопические осциллографы не позволяют качественно представлять осциллограммы и вводить их в компьютер для обработки.

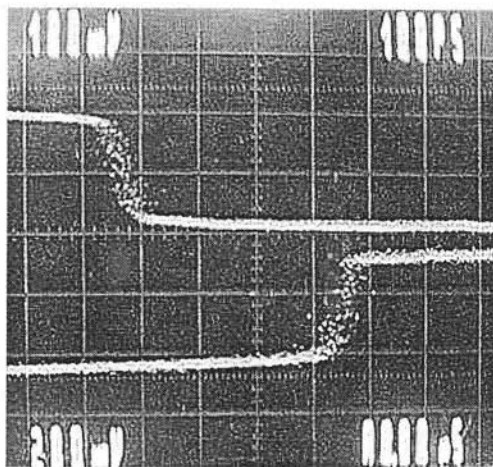


Рис. 9.83. Осциллограммы коротких перепадов напряжения (сняты прямо с экране осциллографа С1-91/4)

На рис. 9.83 показана снятая цифровым фотоаппаратом прямо с экрана стробоскопического осциллографа С1-91/4 (более поздняя аналогичная модель С1-122/4) осциллограмма импульсов перепадов напряжения с выходов формирователей на туннельных диодах, имеющих время нарастания не более 50 пс. Нетрудно заметить, что, при таких малых длительностях перепадов, отчетлива видна их сильная временная нестабильность (джиттер). Да и качество самого изображения невысокое.

К счастью, у указанного осциллографа с 18-ГГц стробоскопическим преобразователем Я4С-100 и блоком Я4С-100 имеются выходы аналоговых сигналов с обоих каналов Y и выход пилообразного напряжения медленной развертки с блока Я4С-101. Если подать их на входы любого цифрового осциллографа и (сигнал развертки) на вход синхронизации, то можно просматривать преобразованный (растянутый в сотни и тысячи раз во времени) сигнал. На основе этой идеи был создан 18-ГГц осциллографический комплекс для исследования быстропротекающих процессов, показанный на рис. 9.84.

В качестве узла стыковки стробоскопического осциллографа С1-91/4 с компьютером была применена дешевая и простая приставка к компьютеру — виртуальный осциллограф АСК-3106 [101]. Прибор обеспечивает просмотр сигналов, спектр которых находится в полосе частот до 70-100 МГц в достаточно широком диапазоне амплитуд. Но главное — с его помощью осциллограммы наблюдаются на экране компьютера, могут распечатываться принтером и подвергаться эффективной математической обработке. Для этого служит программы, предоставляемые с виртуальным осциллографом и созданные для разработки приложений с ним.

Одной из проблем в создании комплекса является его калибровка. Помимо калибровки самого стробоскопического осциллографа, кстати, довольно трудоемкой, надо тщательно учитывать коэффициенты масштабирования амплитуде и по времени. Последние сильно меняются при регулировке длительности медленной развертки и числа точек стробирования, а также при включении внутреннего сглаживания.

Было решено, что вместо этого целесообразно для калибровки применить генератор наносекундных импульсов, в качестве которого был выбран генератор на-

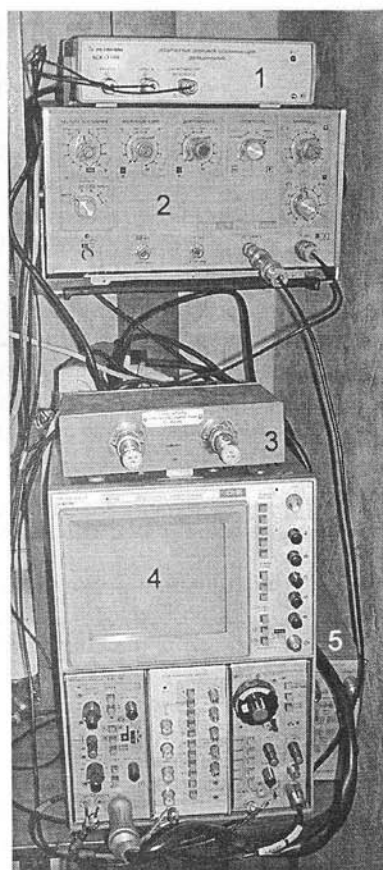


Рис. 9.84. 18-ГГц осциллографический комплекс:

1 — виртуальный USB-осциллограф АКТАКОМ АСК-3106, 2 — генератор наносекундных импульсов Г5-85, 3 — стробоскопический 18-ГГц преобразователь Я4С-100, 4 — стробоскопический осциллограф С1-91/4, 5 — двойная линия задержки Я4С-102

носекундных импульсов Г5-85, формирующий импульсы с длительностью от 1 нс до 200 мкс с амплитудой до 2,5 В на нагрузке 50 Ом. Предусмотрен также плавный сдвиг импульсов от 0 до 200 мкс. Длительность фронта импульсов не более 0,25 нс, что позволяет легко калибровать комплекс как по времени, так и по амплитуде исследуемых импульсов. Максимальная частота повторения импульсов — 1000 МГц. Погрешность калибровки составляет около 10%, но в субнаносекундном диапазоне времен, на которые рассчитан комплекс, это вполне приемлемо. При длительностях импульсов свыше десятков нс можно использовать только приставку АСК-3106.

Разумеется, генератор после калибровки и в процессе ее может использоваться как генератор запускающих импульсов для исследования внешних устройств. Может также использоваться блок формирования перепадов с длительностью до 50 пс Я4С-89, входящий в комплект осциллографа С1-91/4. Его можно применять, например, для снятия переходных характеристик сверхширокополосных усилителей, в том числе интегральных. Вместо генератора Г5-85 возможно применение генератора Г5-78 с длительностью импульсов от 1 нс до 500 мкс. Этот гене-

ратор формирует импульсы с амплитудой до 5 В, но длительность фронтов их около 0,5 нс. Однако генератор позволяет регулировать в широких пределах длительность переднего и заднего фронтов импульсов — от 0,5 нс до 500 мкс. Максимальная частота повторения импульсов — 500 МГц.

Для работы осциллографа-приставки АСК-3106 необходимо соответствующее программное обеспечение. Оно поставляется в варианте PO1 стандартной версии и PO5 — профессиональной. Ограничимся кратким описанием применения стандартной версии. Окно программы представлено на рис. 9.85. В центральном окне показана осциллограмма импульса с длительностью 1 нс от генератора Г5-85 (это минимальная длительность, которую способен обеспечить данный генератор). Установкой длительности развертки приставки и ручки СКАН стробоскопического осциллографа надо добиться, чтобы ширина импульса на осциллограмме соответствовала его длительности. Для более точной калибровки можно установить длительность импульса в 3 или 10 нс (желательно использовать только калиброванные длительности, кратные 1 и 3).

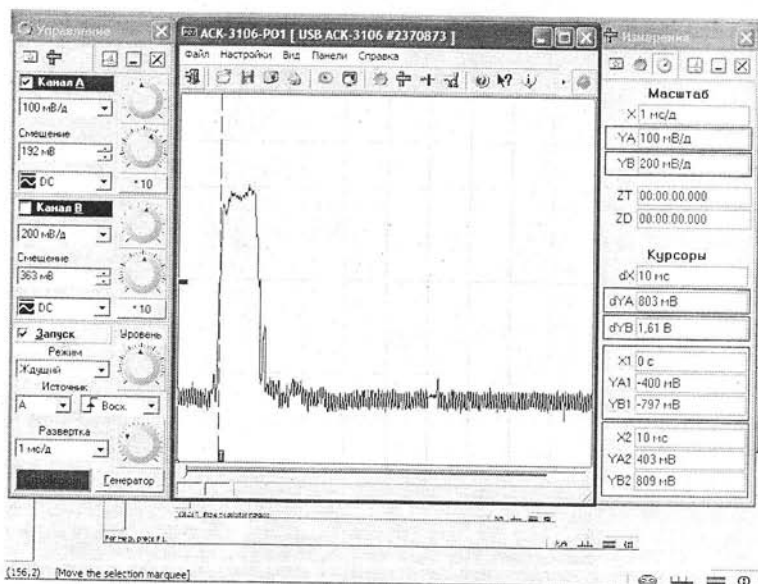


Рис. 9.85. Окно программы PO1 с осциллограммой калибровочного импульса минимальной (1 нс) длительности

Нетрудно заметить, что форма импульса сильно искажена шумами и высокочастотными несинхронными колебаниями. Использовать для их подавления сглаживание в самом стробоскопическом осциллографе нежелательно, поскольку при этом сильно изменятся коэффициент преобразования по времени и нужна перекалибровка комплекса. К тому же эффективность сглаживания на аппаратном уровне у этих, по нашим временам довольно старых, осциллографов невысока.

В связи с этим удобно использовать средства обработки осциллограмм, присутствующие в приставке АСК-3106. Эти средства (в окне «Цифровая фильтрация») представлены на рис. 9.86. В этом окне пока установлена опция включения полиномиальной фильтрации с заданным порядком (в нашем случае максимальным — 50). Этот вид фильтрации является улучшенным вариантом скользящего сглаживания и не требует длительной обработки многих осциллограмм.

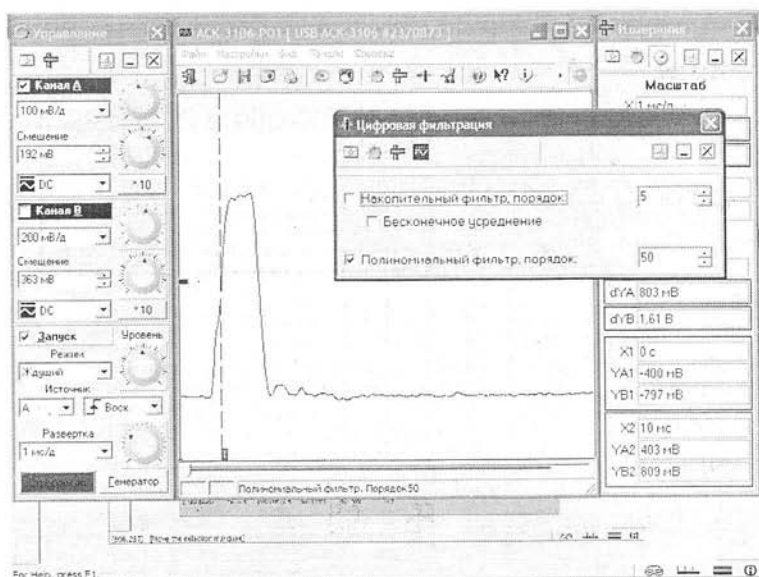


Рис. 9.86. Применение полиномиальной фильтрации

Считается, что полиномиальная фильтрация может заметно исказить осциллограммы с резкими углами. Однако в нашем случае (исследования импульсов с субнаносекундными фронтами) о резких углах говорить не приходится. Как нетрудно убедиться (сравнивая осциллограммы на рис. 9.86 и 9.85) полиномиальная фильтрация в нашем случае весьма эффективна и позволяет получить стабильное и слегка «дышащее» изображение осциллограммы. При этом обеспечена быстрая реакция на изменения сигнала.

На рис. 9.87 показано действие, помимо полиномиальной фильтрации, накопительной фильтрации, основанной на обработке заданного числа осциллограмм (в нашем случае 5). Отчетливо наблюдается дальнейшее улучшение фильтрации. Установив опций «Бесконечное усреднение» можно добиться самой высокой эффективности фильтрации, но при этом возрастает ее время — практически осциллограмма перестает меняться через 10–15 с. Однако при этом реакция на изменения сигнала оказывается резко замедленной.

Приставка АСК-3106 позволяет записать осциллограммы в виде файла данных и файла обычного рисунка. На рис. 9.88 показан вид осциллограммы, полученной из файла рисунка. Осциллограмма представлена без «лишнего» окружения и может быть просмотрена в любом графическом редакторе, отредактирована или распечатана принтером.

Стробоскопический осциллограф С1-91/4 и приставка АСК-3106 имеют по два канала СН1 и СН2. Это позволяет исследовать два сигнала и судить об их взаимном расположении по оси времени. Такой случай иллюстрирует рис. 9.89, на котором представлены трансформированные осциллограммы, соответствующие реальным осциллограммам рис. 9.83. Это осциллограммы перепадов, формируемых формирователями Ф00 и Ф02 на туннельных диодах из комплекта формирователя Я4С-89. Перепады имеют длительность не более 50 пс и характеризуют вполне приличную разрешающую способность во времени данного комплекса. Их вид намного лучше и четче, чем у оригинальных осциллограмм, показанных на рис. 9.83.

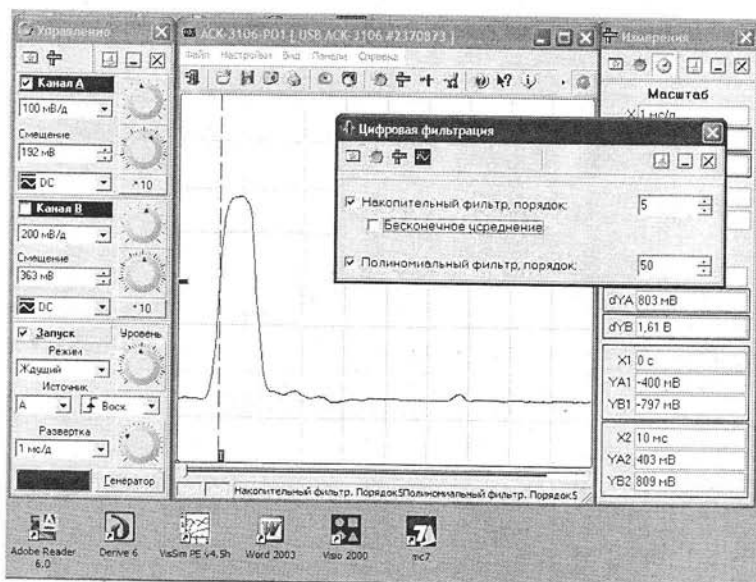


Рис. 9.87. Применение полиномиальной и накопительной фильтрации



Рис. 9.88. Представление осциллограммы в виде рисунка

Записав осциллограммы в виде рисунка можно обработать их в любом графическом редакторе. Например, можно нанести на осциллограммы масштабы по вертикали и по горизонтали, что и показано на рис. 9.90.

Но самое важное заключается в том, что осциллограммы, наблюдаемые на экране компьютера, могут подвергаться всесторонней обработке, в том числе математической. Можно осуществить (также с преобразованием масштаба) автоматическое измерение их параметров, выполнение преобразования Фурье и все то, что предусмотрено программным обеспечением приставки АСК-3106. Разумеется, вместо нее можно использовать любой цифровой осциллограф с узкой полосой частот.

В этом комплексе приставку АСК-3106 можно заменить на АСК-4106 [102], которая помимо двухканального осциллографа содержит двухканальный функциональный генератор (с частотами от 0,1 Гц до 10 МГц) и возможностью генерации

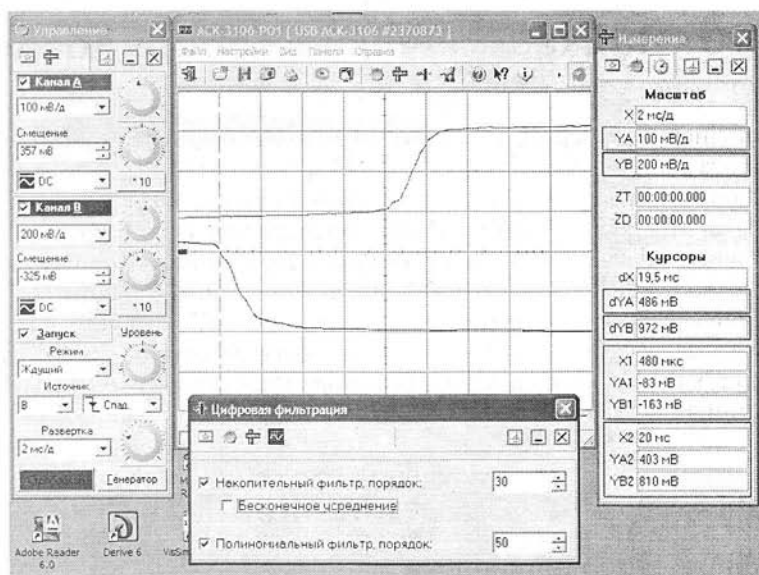


Рис. 9.89. Пример наблюдения реальных сигналов — перепадов напряжения от формирователей на туннельных диодах

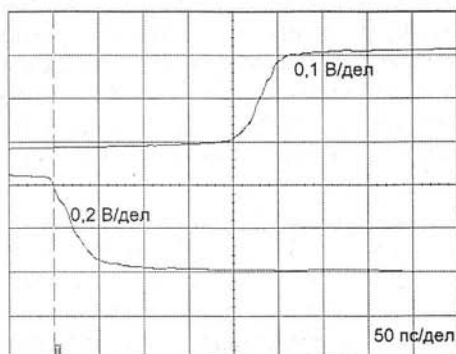


Рис. 9.90. Пример рисунка осциллограмм после их обработки — нанесения надписей о масштабах осциллограмм по вертикали и горизонтали

раздельно по каждому каналу произвольных, задаваемых пользователем, сигналов. Это заметно расширит функциональные возможности комплекса.

В заключении стоит отметить и недостатки такого комплекса. Во-первых, это необходимость ручной калибровки и настройки. Во-вторых — возможность наблюдения только периодических сигналов, тогда как более сложные современные цифровые осциллографы способны работать с произвольными сигналами в реальном времени. Однако стоит не забывать, что стоимость таких осциллографов с полосой частот около 10 ГГц и выше в десятки раз превосходит стоимость всего описанного комплекса — вместе с компьютером, к которому он подключается. В наше время затраты на создание такого комплекса не превышают 100 тысяч рублей. И хотя эта сумма не так уж и мала, она в десятки раз меньше стоимости современного 18-ГГц цифрового осциллографа ведущих производителей осциллографов.

Глава 10. Пайка и паяльное оборудование

Пока выполнение измерений, ремонта и наладки радиоэлектронных устройств невозможно без пайки. Однако в этом древнем искусстве и ремесле в последнее время произошли большие сдвиги в лучшую сторону. От примитивной пайки примитивными электрическими паяльниками перешли к применению специальных, порою «интеллектуальных» паяльников, специальных паяльных станций, газовых паяльников и паяльников для бесконтактной пайки горячим воздухом. Появились паяльники с рядом насадок для демонтажа без мучений даже больших интегральных схем, а также масса устройств облегчающих пайку и делающих ее намного более качественной и менее опасной. Описанию этих новых средств и посвящена данная глава.

10.1. Обычная пайка

10.1.1. Общие сведения о пайке

При тестировании и отладке радиоэлектронного оборудования, а тем более при его исследовании и сборке, не обойтись без паяльных работ. *Пайка* это самый распространенный способ соединения компонентов электронных устройств друг с другом и с печатной платой. Для пайки металлические выводы компонентов и печатные проводники печатных плат приводятся в соприкосновение друг с другом, нагреваются паяльником и заливаются припоем. Для улучшения растекания расплавленного припоя применяются *флюсы* — чаще всего канифоль или вещества на ее основе. Эти вещества способствуют повышению текучести расплавленного припоя.

Пайка компонентов, устанавливаемых на печатные платы в заводских условиях, выполняется специальными технологическими методами, например, волной припоя, импульсным разогревом всей поверхности платы с установленными на ней компонентами и т. д. Такие методы мы рассматривать не будем, и сосредоточимся на обычных методах пайки отдельных компонентов и их демонтажа, которые применяются в условиях ремонтных мастерских, в службах сервиса и при паяльных работах, которые вынуждены вести радиолюбители при сборке радиолюбительских конструкций.

10.1.2. Электрические паяльники и паяльные ванны

Даже во времена объемного монтажа аппаратуры на электронных лампах пайка была искусством, которое практики осваивали месяцами. Некоторым она упорно не давалась. В наше время применения многослойных и двухсторонних печатных плат с впаянными в них сложными микросхемами с большим числом выводов технология пайки и особенно демонтажа компонентов сильно усложнилась. Так что читателю этой книги стоит познакомиться хотя бы с основами этого непростого дела.

Начнем с того, что до сих пор основным инструментом пайки в обычных (а порою и в заводских) условиях остался добрый старый *электрический паяльник*. И ныне промышленность (как наша, так и зарубежная) выпускает массу паяльников разной конструкции и разной мощности. Рис. 10.1 (копия части страницы ка-

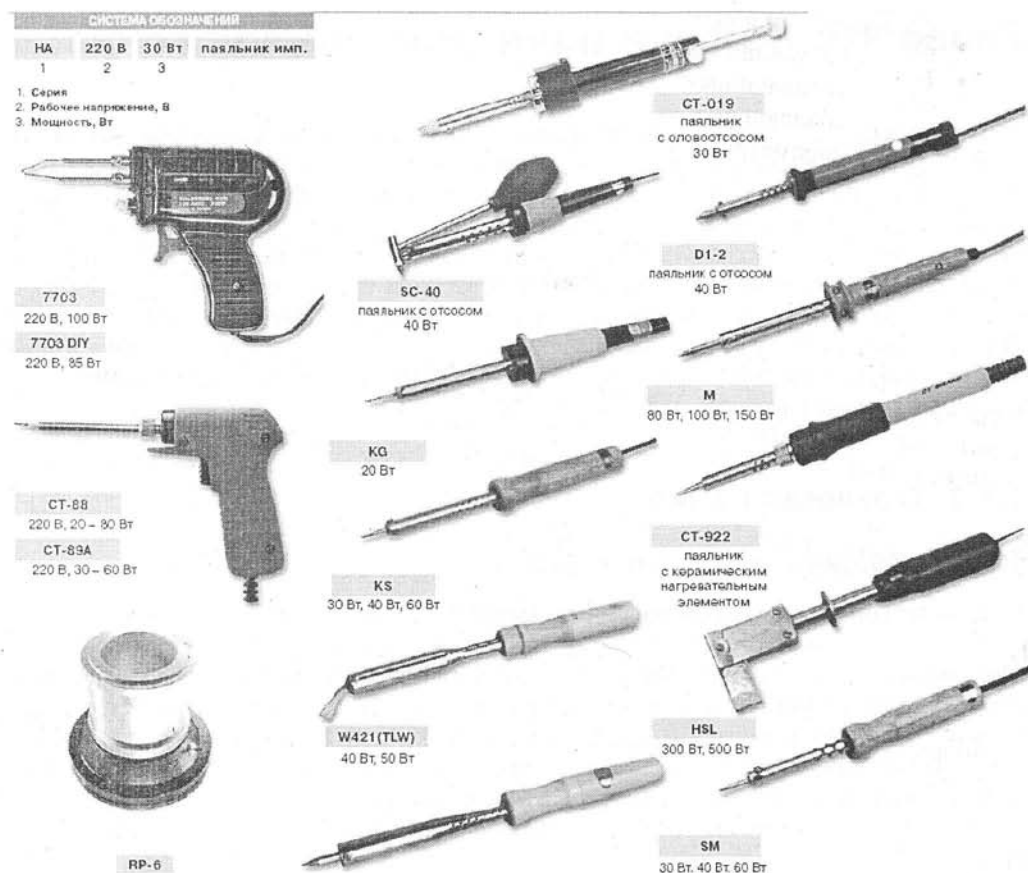


Рис. 10.1. Электрические паяльники

талога фирмы «Платан», посвященной электрическим паяльникам), демонстрирует разнообразие типов электрических паяльников и, в тоже время, удивительное сходство их конструкций.

Устройство обычного паяльника очень просто — жало с нагревателем внутри или снаружи, ручка и провод от нагревателя, проходящий через ручку и оканчивающийся вилкой. Ее вставляют в электрическую розетку и, дождавшись нагрева жала, начинают работать с паяльником. Часть тепла паяльника неизбежно рассеивается в окружающее пространство и в держатель жала и ручку. Конструкция держателя и ручки должна обеспечивать достаточно малый нагрев ручки, которая держится рукой.

Паяльники отличаются несколькими характеристиками:

- размером жала;
- мощностью, потребляемой от электрической сети;
- типом жала (прямое, изогнутое, круглое, овальное и т. д.) и его размером;
- напряжением питания;
- дополнительными приспособлениями, например, наличием отсоса припоя.

Для пайки обычных радиокомпонентов наиболее подходят паяльники с круглым жалом (иногда заточенным со скосом цилиндром) с мощностью от 15—18 до

40—50 Вт. Более мощные паяльники применяют для пайки медных и посеребренных экранов, демонтажа микросхем (с дополнительными приспособлениями), пайки силовых кабелей и т. д. Мощные паяльники имеют тяжелое жало овального сечения, которое часто устанавливается перпендикулярно держателю и ручке.

Мощность паяльника имеет решающее значение при пайке, поскольку она задает температуру припоя. Если она недостаточна, припой плохо плавится и пайка получается рыхлой и некачественной. Слишком высокая температура жала ведет к его перегреву и появлению окалины. Жало паяльника приходится часто чистить, припой на нем выгорает, качество пайки также ухудшается и есть опасность перегрева припаиваемых деталей и печатной платы. Чем меньше место пайки, тем тоньше должно быть жало. Поэтому ко многим паяльникам прилагается комплект жал, наподобие показанному на рис. 10.2.

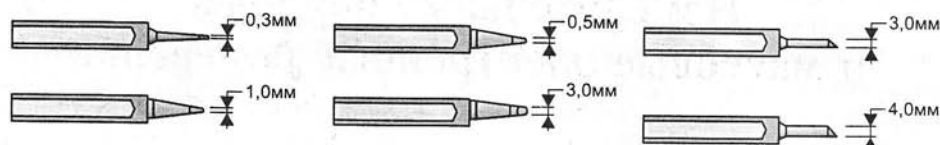


Рис. 10.2. Набор жал для паяльника с керамическим нагревателем

У наиболее совершенных паяльников нагреватель расположен внутри расширенной части жала. Однако у многих обычных паяльников жало, напротив вставляется внутрь нагревателя — трубки (рис. 10.3). Такая конструкция хуже, чем у нагревателя — вставки, поскольку дает большую площадь контакта с жалом (что увеличивает емкость), а значительная часть тепла рассеивается в окружающее пространство.



Рис. 10.3. Обычные сменные нагреватели

Для изоляции жала от нагревателя используются прокладки из слюды или керамическая трубка. Паяльники с керамической изоляцией лучше, поскольку предотвращают контакт спирали нагревателя с жалом. Такой контакт очень опасен, поскольку ведет к появлению на жале напряжения сети. Для паяльников на напряжение 220 В это опасно даже для жизни выполняющего паяльные работы. Поэтому пользуются популярностью низковольтные паяльники на напряжения от 12 до 36 В. Для их питания приходится применять понижающие трансформаторы.

Жало в простейшем случае выполняют из меди и формируют ковкой. Откованное жало лучше сопротивляется растворению его припоем. Поэтому рекомендуются после чистки жала напильником отковать его молотком. Часто используются и более стойкие многослойные жала, например, из стали, покрытой слоем никеля. Наконец есть жала из металлокерамики, устойчивые к растворению припоем.

В качестве примера можно назвать паяльное оборудование АКТАКОМ, где предлагается другой подход, основанный на использовании нагревательных элементов, изготовленных из специального сплава, впечатанного в алюмокерамический слой. Этот слой размещается в основном керамическом корпусе, полностью изолирующем нагреватель от окружающей среды, что обеспечивает защиту нагревательных элементов от окисления и гарантирует их многолетнее надежное использование. Сменные наконечники в этом случае полностью насаживаются на нагреватель. Это обеспечивает минимальный воздушный зазор, значительно снижающий тепловое сопротивление по сравнению с традиционной конструкцией, исключает потери, связанные с излучением тепла наружу, создает равномерный разогрев всей массы жала и позволяет резко уменьшить температуру нагревателя. Такое решение, даже при достаточно большой мощности паяльника (50 Вт), дает возможность поддерживать температуру с точностью до $0,5^{\circ}\text{C}$ и использовать при этом значительно более легкую, тонкую и удобную ручку паяльника. А специальное многослойное покрытие рабочей части жала (рис. 10.4), обладающее хорошей теплопроводностью, создает оптимальную высокоэффективную теплопередачу.



Рис. 10.4. Конструкция жала паяльников АКТАКОМ

В результате, паяльными станциями АКТАКОМ (например, АТР-1101, АТР-1102, АТР-1103 или АТР-1104, рис. 10.5.) можно вести монтаж с температурой жала $250\text{--}280^{\circ}\text{C}$ при полной гарантии сохранности печатных проводников и электронных компонентов. Широкий ассортимент сменных рабочих элементов — более 20 типоразмеров — позволяет использовать их при решении любых технологических задач современного производства.

При некоторых видах паяльных работ, например при обслуживании выводов компонентов или зачищенных концов проводов могут понадобиться паяльные ванны. Ванна поддерживает внутри температуру расплавленного припоя на достаточном для паяльных работ уровне. Это позволяет повысить и скорость обычной пайки, поскольку не требуется плавить припой перед пайкой.



Рис. 10.5. Паяльные станции АКТАКОМ

10.1.3. Припой и флюсы

Большое значение при пайке имеет выбор припоя. Вообще говоря, существуют мягкие и твердые припои, а также припои на основе серебра. Твердые припои и припои на основе серебра применяются при пайке крупногабаритных изделий, а мягкие припои при пайке небольших компонентов.

Уже давно припой выпускается в виде тонких трубочек, заполненных внутри канифолью — флюсом. Это упрощает подачу припоя и флюса одновременно к месту пайки и удобно при пайке мелких изделий — резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов и микросхем. Однако полезно иметь в своем хозяйстве и кусочки канифоли — иногда флюса в трубке может просто не хватить.

Сами по себе компоненты припоя олово и свинец не обладают достаточной прочностью и достаточно низкой температурой плавления. Поэтому мягкие припои обычно делают из их смеси. Наиболее распространены припои, содержащие 60% олова и 40% свинца (иногда и серебра). Такие припои в расплавленном состоянии хорошо покрывают медь и образуют с ней прочное и устойчивое к коррозии соединение. К тому же оно выглядит эстетично. Но часто выводы деталей покрываются коррозией, препятствующей смачиванию расплавленным припоем. Для пайки в этом случае приходится очищать выводы, например, мелкой шкуркой (рекомендуется не всегда), чернильным ластиком и т. д.

10.1.4. Газовые паяльники

Альтернативой электрическим паяльникам стали газовые паяльники — рис. 10.6. Их принцип действия аналогичен принципу действия газовых зажига-

лок. Непременными деталями газового паяльника является баллончик с газом, вентиль и газовая горелка, нагревающая жало или место пайки.

Газовые паяльники не нуждаются в электрической сети, и пайка ими осуществляется в любых условиях, например в отключенном распределительном щите. В комплект газового паяльника обычно входят: набор жал, газовый резак для пенопласта, паяльная ванна, паяльная игла и т. д. Дороговизна и необходимость постоянной замены или заполнения газом базовых баллончиков несколько омрачают перспективы замены газовыми паяльниками обычных электрических паяльников.

10.2. Паяльные станции

10.2.1. Простая паяльная станция SR 976ESD фирмы Solomon

Для выполнения достаточно удобной и качественной пайки зачастую одного паяльника оказывается недостаточно. В частности недостатком обычного паяльника является слишком большое (до 5—10 минут) время нагрева до температуры, достаточной для надежного расплавления припоя и осуществления пайки. Кроме того, температура жала быстро снижается при попытке прогреть паяльником место пайки. Специальные паяльники со стабилизацией температуры жала существуют, но продаются очень редко.

Более распространены специальные паяльные станции, состоящие из паяльника, подставки под него и блока питания паяльника с устройством стабилизации температуры. Таких станций выпускается много, но достаточно дешевых и пользующихся спросом зачастую не хватает.

На рис. 10.7 показана одна из бюджетных паяльных станций фирмы Solomon SR 976ESD. Буквы ESD указывают на антистатическое оформление станции — ее паяльник имеет экран, отделяющий керамический нагреватель от жала и терминал для подключения заземления. Это позволяет паять даже самые чувствительные к статическому электричеству микросхемы. Набор наконечников (жал) для паяльника этой станции представлен на рис. 10.2. Он рассчитан, в основном, на запайку деталей и микросхем.

В комплект паяльной станции входит блок питания низковольтного паяльника с простым регулятором температуры релейного типа. Жало нагревается усиленным током, пока температура его не достигнет заданного регулятором с ручкой уровня. При этом нагреватель отключается и температура жала падает. Уменьшившись до другого уровня, температура начинает подниматься и т. д. Так что паяльник ведет себя как релаксационное устройство. Светодиод на передней панели начинает мигать в такт с триггером. Время выхода на режим пайки около полутора минут. Улучшается и динамика установления температуры при контакте жала паяльника с местом пайки.

Приведем некоторые характеристики этой паяльной станции: напряжение питания 220 В 50 Гц, напряжение паяльника 24 В, мощность паяльника 50 Вт, тем-



Рис. 10.6.
Газовый паяльник



Рис. 10.7. Паяльная станция Solomon SR 976ESD

температура жала от 250 до 450 °С, точность установки температуры ± 10 °С, сопротивление изоляции жала от нагревателя не менее 100 МОм, габариты 175×103×90 мм, вес 870 г.

10.2.2. Улучшенные паяльные станции с электрическим паяльником

Существует множество паяльных станций улучшенного типа. Улучшения направлены на следующее:

- лучшая стабильность температуры жала паяльника;
- более быстрый нагрев до заданной температуры;
- улучшение динамики пайки;
- предотвращение остывания жала паяльника в момент контакта с объектами пайки;
- применение мер против статического электричества;
- применение множества насадок для операций демонтажа деталей и интегральных микросхем с многими выводами.

Примером станции улучшенного типа является станция АКТАКОМ АТР-3101 показанная на рис. 10.8. Это двухканальная ремонтная станция, объединяющая в одном блоке паяльную станцию и демонтирующее устройство, занимает минимальное пространство на рабочем месте и при сравнительно низкой стоимости позволяет создать высокоэффективное рабочее место.

Эта станция предотвращает появление эффекта твердой пайки. Станция имеет цифровую индикацию температуры жала паяльника и обеспечивает плавную регулировку температуры зоны пайки.

В комплект станции входит два паяльника. Один — монтажный, второй — демонтажный (рис. 10.9). Эта операция демонтажа традиционно очень сложна, потому что цепи заземления, силовые цепи и другие конструктивные элементы, расположенные внутри платы, могут отводить тепло от места пайки, в результате чего



Рис. 10.8. Двухканальная паяльная станция АКТАКОМ АТР-3101

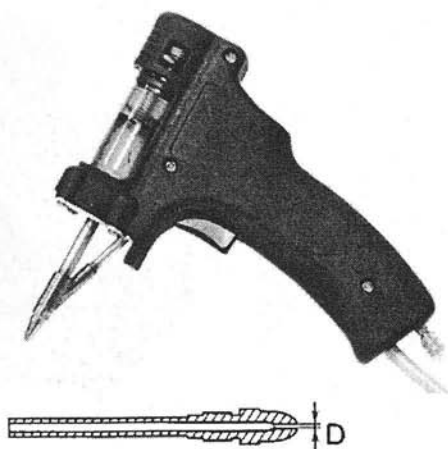


Рис. 10.9. Конструкция демонтирующего паяльника

припой не будет должным образом расплавлен, а узкие отверстия многослойных плат делают весьма затруднительным удаление расплавленного припоя. Кроме того, тепло, отведенное конструктивными элементами платы, может стать причиной отслоения печатных проводников, что делает плату непригодной для дальнейшего использования. Решить эту проблему можно путем применения соответствующих наконечников, позволяющих обеспечить, во-первых, наиболее эффективный подвод тепла к месту пайки таким образом, чтобы припой быстро расплавлялся при сравнительно низкой рабочей температуре, а во-вторых, полное удаление расплавленного припоя из самых маленьких отверстий печатных плат за счет создания таких перепадов давления и скорости откачки, что припой в месте пайки не успевает остыть и затвердеть.

Особая конструкция нагревательного элемента паяльной станции АТР-3101, а также специально подобранная геометрия рабочей части жала, способствуют эффективному и безопасному перемещению припоя при относительно низких температурах. Совмещение канала вывода расплавленного припоя в сборочный контейнер с керамическим нагревательным элементом гарантирует расплавленное состояние припоя во время операции выпаивания. Кроме того, демонтирующие станции АКТАКОМ снабжены мощной всасывающей припой системой, которая обеспечивает эффективное удаление припоя на многослойных печатных платах. Исполнительное устройство, подключаемое к основному блоку, выполнено в виде пистолета массой не более 400 г и практически не разогревается вследствие работы с достаточно низкими температурами.

Разумеется, описанная паяльная станция далеко не единственная в своем роде. Так, паяльная станция SR-998 фирмы Solomon обеспечивает автоматическую регулировку мощности в зависимости от площади пайки (так называемая «интеллектуальная пайка»). Мощность паяльника при этом меняется от 15 до 60 Вт. Габариты этой станции 135×95×52 мм. Станция комплектуется набором из 5 жал.

10.2.3. Паяльные станции для пайки горячим воздухом

Одним из наиболее высокотехнологичных решений при монтаже/демонтаже компонентов на платах РЭА является использование установок для пайки горя-



Рис. 10.10. Паяльная станция ATP-4501 с пайкой горячим воздухом

чим воздухом. В качестве примера ограничимся кратким описанием одной из таких станций — это станция ATP-4501. Ее внешний вид показан на рис. 10.10.

Эта станция рассчитана прежде всего на демонтаж сложных компонентов, таких как интегральные микросхемы с множеством выводов. С термофеном паяльной станции ATP-4501 может использоваться до 20 сменных насадок для всех типов размеров микросхем и элементов поверхностного монтажа (QFP, SOP, PLCC, SOJ, TSOL, TSOP, а также для дискретных элементов). Прецизионная ручная сборка насадок, строго выдерживающая размеры сопла, гарантирует высокую точность и качество монтажа без применения дорогостоящих дополнительных приспособлений. На рис. 10.11 показана только часть насадок, используемых для демонтажа интегральных микросхем.



Рис. 10.11. Некоторые типы наконечников для пайки горячим воздухом

Мощность паяльника этих паяльных станций достигает 320 Вт, что необходимо для распайки крупных микросхем. Температура жала или насадки паяльника может устанавливаться от 100 до 480 °С.

Фирма QUICK также выпускает множество паяльных станций для пайки горячим воздухом и демонтажа интегральных микросхем самой различной конструкции. Это станции QUICK-850/936/990D и др. Есть и станции для пайки обычным методом и горячим воздухом, например QUICK-704ESD.

10.3. Организация рабочего места для пайки

10.3.1. Меры против статического электричества

При организации пайки, прежде всего, надо беспокоиться о сохранности компонентов, которые могут выйти из строя вследствие перегрева или статического электричества. Даже при хорошей изоляции жала от нагревателя емкость между жалом и нагревателем ведет к появлению на жале переменного напряжения, что крайне опасно для интегральных микросхем, особенно с полевыми транзисторами и СВЧ-приборами, боящимися статического электричества и имеющими огромное входное сопротивление. «Спалить» микросхему даже исправным паяльником на 220 В ничего не стоит.

Поэтому для пайки таких микросхем (да и вообще радиоэлектронного оборудования малой мощности) используются специальные паяльники. Прежде всего это низковольтные паяльники на напряжение 12, 18 или 24 В и т. д., которые подключаются к сети переменного тока 127/220 В с частотой 50/60 Гц через понижающий трансформатор с хорошей изоляцией между обмотками.

Но и этого обычно недостаточно. Тело человека способно накапливать заряд статического электричества, способный пробить не только полевые, но и биполярные транзисторы интегральных микросхем. Некоторые виды одежды, например шелковые рубашки, резко усиливают накопление статического электричества. Это хорошо известно — при снятии такой одежды подчас появляются электрические искры и можно даже ощутить удар электрического разряда.

Самый рациональный способ избавиться от статического электричества заключается в заземлении как жала паяльника, так и тела человека, выполняющего пайку. Для этого ему на руку одевается заземляющий браслет — рис. 10.12. Он снимает с тела заряд статического электричества и предотвращает пробой микросхем или иных чувствительных к статическому электричеству компонентов.

Полезно приобрести и специальный пластиковый коврик, содержащий слой изоляции и проводящий слой. Заземление последнего устраняет накопление ста-



Рис. 10.12. Браслеты для заземления тела человека

тического электричества. Вообще же надо внимательно отслеживать все пути возникновения статического электричества и ликвидировать возможности его появления. Например, полезна даже такая простая мера, как прикосновение рукой к земле, прежде чем брать чувствительный к статическому электричеству прибор или микросхему в руки. Разумеется, это не нужно при использовании заземляющего браслета.

Казалось бы, пайка горячим воздухом исключает электрический пробой микросхем и иных компонентов, припаиваемых на печатную плату. Увы, но это не совсем так. Струя горячего воздуха может сама порождать электрические заряды, способные повреждать компоненты, чувствительные к статическому электричеству. Так что панацеей от всех бед при пайке пайка горячим воздухом все же не является.

10.3.2. Выбор инструментов для пайки

Выбор инструментов для пайки определяется, прежде всего, финансовыми возможностями и регулярностью работ, связанных с пайкой. Если финансовые возможности невелики, можно ограничиться приобретением качественного паяльника с керамическим нагревателем, простенького отсоса, пары пинцетов и достаточного количества припоя и флюса. Подставку под паяльник каждый может сделать из подсобных материалов, как и коробочку для припоя и флюса. Однако, при серьезных работах не обойтись без паяльной станции с набором насадок на жало паяльника.

Пайка и демонтаж дело не безопасное! Припой может разбрызгиваться и попасть на руки или в глаза. Первое неприятно, но не так уж и страшно. А вот второе может привести к непоправимой беде — вплоть до полного лишения зрения. Поэтому, если вы носите очки не стоит их снимать. Присмотритесь к очкам после пайки — вы наверняка заметите на стеклах очков следы капелек расплавленного припоя или флюса. Подумайте над тем, что могло бы случиться, попали они вам в глаза!

Отсюда можно сделать не просто полезную, а остро необходимую рекомендацию — приобретите защитные очки, даже если вы не носите обычные. Пайка мелких деталей на миниатюрные печатные платы (например, сотовых телефонов или MP3-плееров) требует очень хорошего зрения и хорошей освещенности рабочего места. Именно она провоцирует на снятие очков и рассматривание места пайки с близкого расстояния — тут совсем недалеко от беды, описанной выше.

Эта проблема легко решается применением специальных линз на подставках, которые крепятся на столе и располагаются над местом пайки. Такие линзы дают увеличение в 2—5 раз и позволяют с комфортом осматривать место пайки. Заодно они (правда, частично) защищают глаза от брызг припоя и флюса. Особенно удобны линзы с подставкой или креплением на столе и с встроенной лампой, освещающей место пайки. На рис. 10.13 показано несколько таких линз, выпущенных фирмой QUICK.

Порою более удобны бинокулярные линзы, которые крепятся на голове. Такие линзы (лупы) выпускает также компания QUICK — рис. 10.14. Заодно они прекрасно выполняют функцию защиты глаз при пайке.

10.3.3. Процесс пайки

Теоретически описывать процесс пайки это примерно тоже, что учить плаванью без воды. Поэтому ограничимся несколькими общими рекомендациями.

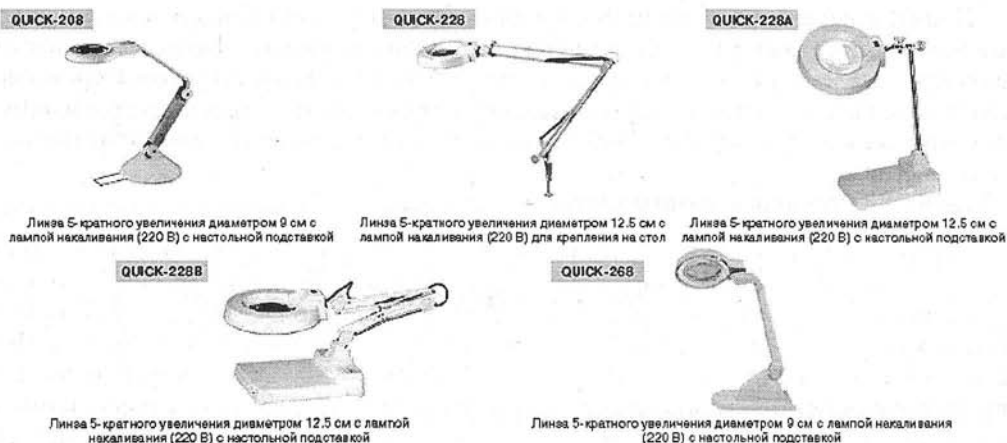


Рис. 10.13. Линзы с подсветкой фирмы QUICK

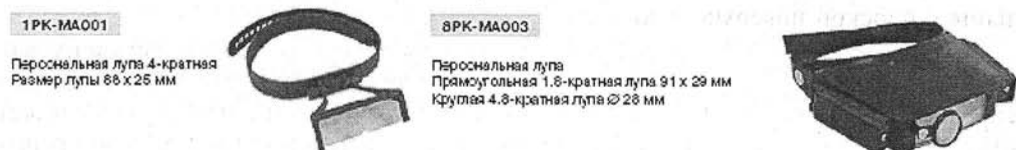


Рис. 10.14. Бинокулярные линзы фирмы QUICK, крепящиеся на голову

Наряду с температурой жала паяльника решающее значение имеет время пайки. Если оно мало, припой не успеет растечься и качество пайки будет низким — возможно, что припаиваемая деталь будет вообще не припаянной. При слишком большом времени пайки припой может выгореть, место пайки станет покрытым окислами припоя, а печатная плата и припаиваемая к ней деталь будут перегреты. Нередко это ведет к отслоению печатных проводников от платы. Оптимальное время пайки составляет 1—2 с, если жало паяльника достаточно нагрето и не заметно не остывает во время пайки. В этом отношении паяльники с керамическим жалом уступают паяльникам с металлическим жалом.

Если припаивается ножка микросхемы, то целесообразно прогреть место пайки и затем приложить к нему трубочку припоя (именно к месту пайки, а не к жалю паяльника). При этом (если температура пайки выбрана верно) припой быстро и равномерно растечется по месту пайки. Рекомендуется протереть его маленькой кисточкой со спиртом и затем покрыть лаком «цапон».

При пайке крупногабаритных изделий, например каркасов и экранов из меди, железа или жести используются кислотные флюсы. Однако применять их для пайки радиокомпонентов ни в коем случае нельзя. Это связано с тем, что в отличие от канифоли, остатки таких флюсов остаются химически активными после застывания при припое. При этом они дают довольно сильную коррозию в месте пайки. Канифоль активна и способствует растеканию припоя только в расплавленном состоянии. После остывания она становится химически инертной и предохраняет место пайки от коррозии. Тем не менее, рекомендуется очищать место пайки и в этом случае.

Пайка, в частности пары расплавленного флюса и дым от паяльника, ухудшают воздух в помещении, в котором ведутся паяльные работы. Поэтому не следует забывать о необходимости проветривания помещения. Если позволяют средства, стоит приобрести дымопоглотители и ионизаторы воздуха. Эту западную «экзотику» можно ныне приобрести в магазинах, торгующих паяльным оборудованием.

10.3.4. Распайка компонентов

Верхом профессионализма при пайке считается распайка ранее созданных паяных соединений. Распаять соединения даже в старой аппаратуре трудно, поскольку проводники и выводы элементов (например, резисторов или конденсаторов) обычно закручивались на лепестках ламповых панелей и монтажных панелек. После прогрева паяльником и расплавления припоя приходилось их разматывать с помощью пинцета, а иногда и жала паяльника. Это нередко вело к порче компонента и снижению срока службы жала паяльника. Если компонент неисправен (сгоревший резистор или пробитый конденсатор), то проще было откусить вывод кусачками и затем извлечь из места пайки остатки выводов. Это надо делать крайне осторожно, чтобы не испортить лепесток. Для таких работ надо выбирать паяльник с плоской поверхностью жала.

При распайке компонентов, установленных на печатной плате и имеющих выводы, проходящие через отверстия на другую сторону платы, вначале рекомендуется прогреть место пайки и с помощью отсоса (отдельного или на паяльнике) удалить припой с места пайки. Кроме отсоса для удаления припоя можно воспользоваться специально предназначенной для всасывания припоя оплеткой, похожей на оплетку коаксиального кабеля. Продаются бухточки с такой оплеткой.

После удаления припоя у выводов пинцетом или маленькими плоскогубцами обычно удастся оторвать вывод от места пайки и вынуть компонент. Для двух- или трехвыводных компонентов (резисторов, конденсаторов, диодов или транзисторов) все эти операции проделываются отдельно для каждого вывода.

Хуже обстоит дело с выпайкой многовыводных компонентов, например микросхем. Если пользоваться обычным паяльником, то придется основательно повозиться с каждым выводом, добившись, что бы он болтался в отверстии платы. Отсос для удаления припоя тут просто незаменим. Иногда для удаления припоя можно просто продуть отверстие с выводом компонента. Только после освобождения всех выводов микросхеме можно извлечь. Запайка новой микросхемы, как правило, трудностей не представляет, если распайка была выполнена аккуратно и плата не была повреждена.

Разумеется, эту работу гораздо проще проводить с применением специальных мощных паяльников или паяльных станций, которые оснащены специальными наконечниками для одновременного прогрева мест пайки всех выводов микросхемы. После такого прогрева микросхему нетрудно извлечь. Новую микросхему можно (вставив в освободившиеся отверстия) впаять тоже с применением таких насадок. Однако оставшегося припоя может не хватить для качественной пайки. Поэтому надо проверить визуально пайку каждого вывода и при необходимости подправить ее паяльником с обычным жалом. Можно применить и специальную пасту с припоем и флюсом, нанеся ее на места каждого вывода.

Иногда распайка сопровождается все же повреждением печатной платы — в лучшем случае отрывом от нее проводников, в худшем их повреждением. бывают и случаи появления трещин на плате и обрыва в их местах печатных проводников.

В таких случаях можно рекомендовать аккуратно напаять поверх нарушенного проводника обычный облуженный провод.

В заключении надо отметить, что в последнее время очень широко используются планарные компоненты и микросхемы, выводы которых распаиваются на той же стороне микросхемы, на которой они устанавливаются. Запайка таких компонентов с помощью паяльника с тонким жалом особых проблем не вызывает. А вот распайка без специальных насадок затруднительна из-за жесткости выводов и невозможности их отогнуть.

Вообще надо помнить, что успех любой серьезной работы и профессионализм в ее выполнении зависит, прежде всего, от инструментального обеспечения работ. К пайке это относится в первую очередь.

В заключении стоит отметить, что распайка печатных плат со сложными компонентами в обычных условиях крайне нежелательна из-за риска повреждения плат. Для ремонта аппаратуры с такими платами лучше сдать их в специальные мастерские, где есть необходимые для этого инструменты и специалисты, имеющие достаточный опыт ремонтных и паяльных работ.

Литература

1. Дьяконов В. П. Современная осциллография и осциллографы. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
2. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика. М.: Нолидж, 2001.
3. Дьяконов В. П. Энциклопедия Mathcad 2001i/11. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
4. Жуков А. И. Метод Фурье в вычислительной математике. М.: Физматлит, 1992.
5. Аналоговые измерительные приборы. Учебное пособие для вузов/Е. Г. Бишард, Е. А. Киселева, Г. П. Лебедев и др., изд. 2-е доп. и перераб. — М.: Высшая школа, 1991.
6. Atherton W. A. Karl Ferdinand Braun (1850—1918): inventor of the oscilloscope // Electronics and Wireless World. — 1990. — № 1. — p. 12—14.
7. Храмов Ю. А. Физики. Биографический справочник. 2-е изд. — М.: Наука, 1983. — 44 с.
8. Климин А. И., Урвалов В. А. Столетие электрона и электронного осциллографа // Радиоэлектроника и связь. — 1997. — № 1(12). — с. 32—11.
9. Мандельштам Л. И. Об одном методе объективного изображения колебательных процессов в простых и связанных конденсаторных контурах. Полное собр. трудов под ред. С. М. Рытова. Т. 1. — М. — Л.: АН СССР, 1948. — с. 147—153.
10. Жигарев А. А. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. М.: Высшая школа, 1972.
11. Моругин Л. А., Глебович Г. В. Наносекундная импульсная техника. М.: Советское радио, 1964.
12. Бонч-Бруевич А. М. Радиоэлектроника в экспериментальной физике. М.: Наука, Физматлит, 1966.
13. Блюдин Е. К., Борнар З. М., Кравченко К. В. и др. Портативные осциллографы. М.: Советское радио, 1978.
14. Куркин Ю. Л., Уточкин Б. А. Элементы и узлы транзисторных скоростных осциллографов. Новосибирск.: Наука, Сибирское отделение, 1975.
15. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Смердов В. Ю., Ремнев А. М. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М.: СОЛОН-Р, 2002.
16. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М.: Советское радио, 1973.
17. Ицхоки Я. С., Овчинников Н. И. Импульсные и цифровые устройства. М.: Советское радио, 1972.
18. Матвиенко А.Б. Основные характеристики современных осциллографов. Электронные компоненты. — 2004 — №11.
19. Дедюхин А. А. Основные характеристики современных осциллографов. [http:// www.prist.ru/info.php/articles/general_ch_modern_oscilloscopes.htm](http://www.prist.ru/info.php/articles/general_ch_modern_oscilloscopes.htm)
20. ГОСТ 22737-77. Осциллографы электронно-лучевые. Номенклатура параметров и общие технические требования.
21. ГОСТ 23158-78. Осциллографы электронно-лучевые универсальные. Методы испытаний.
22. ГОСТ 8.311-78. Осциллографы электронно-лучевые универсальные. Методы и средства поверки.

23. И. Чех. Осциллографы в измерительной технике. Пер. с нем. под ред В. А. Новопольского. М.: Энергия, 1965.
24. В. Куликов. Импортные аналоговые осциллографы на отечественном рынке. Ремонт и сервис, 1999, № 5.
25. Кудреватых Е. Ф., Баландин Н. И. Новое семейство аналоговых осциллографов АКТАКОМ. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2001, №1
26. В. Боравский. Осциллограф С1-68. Устройство, принцип работы и характерные неисправности. Ремонт и сервис, 2000, № 12.
27. Новое семейство аналоговых осциллографов АКТАКОМ. Ремонт и сервис, 2003, №2
28. Ю. Садиков. Общие принципы измерения характеристик электронных устройств. Ремонт и сервис, 2004, № 5.
29. Афонский А. А. Многофункциональные цифровые запоминающие осциллографы АСК-2022/2023. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2001, № 6
30. Дедюхин А. А. Цифровые осциллографы компании Good Will Instruments Co. Ltd. (GW Instek). Метрология и измерительная техника в связи, 2003, № 3.
31. А. Дедюхин А. А. Цифровые осциллографы компании Good Will Instruments Co. Ltd. (Instek). Ремонт и сервис, 2003, № 9.
32. А. Матвиенко. Осциллографы TDS5000. Ремонт и сервис, 2002, № 8.
33. Руководство по эксплуатации осциллографа Tektronix серии TDS5000B, 071-1420-01.
34. Руководство по эксплуатации осциллографа Tektronix серии TDS3000B, 071-0382-01
35. Руководство по эксплуатации осциллографа LeCroy серии WaveSurfer.
36. Руководство по эксплуатации осциллографа LeCroy серии WaveRunner.
37. Руководство по эксплуатации осциллографа LeCroy серии WavePro.
38. Рябинин Ю. А. Стробоскопическое осциллографирование. М.: Советское радио, 1972.
39. Дьяконов В. П. Intel. Новейшие информационные технологии. Достижения и люди. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
40. В. Дьяконов. Виртуальные ПК-осциллографы фирмы Velleman. М.: Ремонт и сервис, 2003, No 8
41. В. Дьяконов, В. Смердов. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman. М.: Ремонт и сервис, 2004, No 2.
42. В. Дьяконов. Компьютеризованная лаборатория PC-LAB2000. М.: Ремонт и сервис, 2003, No 9.
43. Фолкенберри Л. М. Справочное пособие по ремонту электрических и электронных систем. М.: Энергоатомиздат, 1989.
44. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Круг Б. И. Основы теории цепей. М.: Радио и связь, 2000.
45. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс. — 2002.
46. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 в математике и моделировании. М.: СОЛОН-Пресс. — 2003.
47. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. М.: СОЛОН-Пресс. — 2004.
48. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. Изд-е 2-е переработанное и дополненное. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.

49. Ю. Петропавловский. Быстродействующие и широкополосные операционные усилители фирмы TI/BURR-BROWN серии 600. Ремонт и сервис электронной техники, № 1. — 2006.
50. Шумский И. А. Основные направления развития современной осциллографии: «гонка» новых технологий на гигагерцовой дистанции. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2003, № 5
51. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2002.
52. Рональд Дж. Точи, Нил С. Уидмер. Цифровые системы. Теория и практика. 8-е издание. Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004.
53. Бернард Скляр. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004.
54. Э. Ред. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. Схемы, блоки, 50-омная схемотехника. Пер. с нем. — М.: Мир, 1990.
55. Дедюхин А. А. Обзор современных измерителей импеданса (измерители RLC). <http://www.prist.ru/info.php/articles/lcr-meters.htm>
56. <http://www.mprofit.ru/catalog203.htm>. Интернет сайт организации НПЦ МаксПрофит.
57. Ноткин М. Р. Функциональные генераторы и их применение. М.: Энергия, 1981.
58. <http://www.platan.ru>. Интернет сайт фирмы «Платан», каталог электронных компонентов и техническая документация.
59. Келехсаев Б. Г. Нелинейные преобразователи и их применение. Справочник. М.: Солон-Р, 1999.
60. Измерения в электронике. Справочник/Кол. авторов под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
61. Справочник по радиоизмерительным приборам. В 3-х томах/Колл. Авт. под ред. В. С. Насонова. М. Сов. Радио, 1979.
62. Дьяконов В. П., Стерлягов А. А. Широкополосные повторители на биполярных транзисторах и металл-окисел-полупроводник транзисторах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1973, № 6, с. 99—100.
63. Гольденберг Л. М. Импульсные и цифровые устройства. М.:Связь, 1973.
64. Справочник по микроэлектронной импульсной технике/В. Н. Яковлев, В. В. Воскресенский, С. И. Мирошниченко и др. К.: Техника, 1983.
65. Дьяконов В. П. Широкодиапазонный автоколебательный мультивибратор на интегральных микросхемах транзисторно-транзисторной логики. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1976, № 2, с. 103—105.
66. Дьяконов В. П. Ждущие мультивибраторы на интегральных схемах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1976, № 3, с. 158—161.
67. Дьяконов В. П., Лыков А. Г. Высокостабильные мультивибраторы на интегральных микросхемах ТТЛ. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1979, № 4, с. 141—143.
68. Шило В. Л. Функциональные аналоговые интегральные микросхемы. М.: Радио и связь, 1982.
69. Коломбет Е. А. Таймеры. М.: Радио и связь, 1983.
70. Горяинов С. А., Абезгауз И. Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.: Энергия, 1970.
71. Двухбазовые диоды в автоматике/А. Е.. Ольсевич и др. М.: Энергия, 1972.

72. Недолужко И. Г., Сергиенко Е. Ф. Однопереходные транзисторы. М.: Энергия, 1974.
73. Ерофеева И. А. Импульсные устройства на однопереходных транзисторах. М.: Связь, 1974
74. Дьяконов В. П., Дроздов В. Д., Лещинский Ю. Б. Генераторы пилообразного напряжения на однопереходных транзисторах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1974, № 2, с. 111—114.
75. Дьяконов В. П. Генератор прямоугольных импульсов с применением однопереходного транзистора. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1974, № 6, с. 109—110.
76. Дьяконов В. П., Дроздов В. Д. Анализ мультивибратора на приборе с S-образной вольтамперной характеристикой. Известия вузов — Приборостроение, т. XVI, № 3, с. 117—121.
77. Дьяконов В. П. Импульсные схемы с программируемыми однопереходными транзисторами. Известия вузов — Приборостроение, т. XVIII, № 5, 1975, с. 107—111.
78. Дьяконов В. П. Транзисторный аналог негatrona. Радиотехника и электроника, т. XXI, № 1, 1976, с. 188—192.
79. Дьяконов В. П. Импульсные схемы на транзисторном аналоге негatrona. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1975, № 5, с. 117—119.
80. Дьяконов В. П., Семенова О. В. Генератор импульсов на лямбда-транзисторе. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1979, № 6, с. 100—101.
81. Дьяконов В. П. Лавинные полупроводниковые негatronы и их применение (Обзор). АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1973, № 3, с. 9—20.
82. Дьяконов В. П., Али-Заде Д. Г. Уточненная зарядная концепция лавинного транзистора. Известия АН Азерб. ССР. Серия физико-технических наук, 1969, № 5, с. 100—107.
83. Дьяконов В. П. Теория и расчет релаксационных генераторов на лавинных транзисторах. Известия вузов — Приборостроение, т. XIV, № 9, 1971, с. 8—13.
84. Дьяконов В. П. Формирование мощных наносекундных импульсов лавинными транзисторами с ограниченной областью объемного заряда. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1972, № 3, с. 138—141.
85. Дьяконов В. П., Зиенко С. И. Физические основы работы лавинных транзисторов с ограниченной областью объемного заряда. Известия вузов — Приборостроение, т. XVII, № 6, 1974, с. 85—87.
86. Дьяконов В. П. Анализ переходных процессов емкостного релаксатора на лавинном транзисторе с учетом основных факторов его инерционности. Радиотехника и электроника, № 6, 1979, с. 1103—1109.
87. Дьяконов В. П., Самойлова Т. А. Математическая модель биполярного транзистора дл обычного и лавинного режимов работы. Радиотехника, т. 34, № 10, с. 13—18.
88. Дьяконов В. П. Предельные возможности лавинных транзисторов в импульсных цепях. Радиотехника, т.31, № 7, 1976, с. 90.
90. Дьяконов В. П. Коррекция формы импульсов в генераторах с разрядом накопительной линии через лавинный транзистор. Известия вузов СССР — Радиоэлектроника, т. XX, № 1, 1977, с. 79—81.
91. Дьяконов В. П., Самойлова Т. А. Колебательные процессы при формировании мощных наносекундных импульсов лавинными транзисторами и их модели-

рование на ЭЦВМ. Известия вузов СССР - Радиоэлектроника, т. XXI, № 10, 1978, с. 123—124.

92. Дьяконов В. П. Генераторы прямоугольных наносекундных импульсов на лавинных и мощных М. Д. П. -транзисторах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1980, № 4, с. 101—102.

93. Дьяконов В. П. Генераторы наносекундных импульсов на лавинном и М. Д. П. -транзисторах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1981, № 1, с. 126—127.

94. Дьяконов В. П. Импульсные схемы на интегральных лавинно-рекомбинационных диодах. Приборы и техника эксперимента, 1973, № 1, с. 144—147.

95. В. Дьяконов. Лавинные транзисторы и их применение. Схемотехника, 2006, №7, с. 2—4 №8, с. 2—5.

96. <http://www.eliks.ru>. Интернет-сайт компании Эликс.

97. Шумский И. А., Солдатов О. М. АКТАКОМ-IWATSU — новая серия аналоговых осциллографов на российском рынке. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2005, № 2, с. 26—31.

98. Уткин Ю. А. Новый осциллограф Tektronix DPO4000 изменяет рынок. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2006, №1, с. 20—25, №2, с/ 28, 29.

99. Шумский И. А. 7 ГГц в реальном времени — новый рекорд в обновленной версии TDS7000B. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2004, №1, с. 28—31.

100. Кудреватых Е. Ф. Основные принципы измерения характеристик электронных устройств. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2004, №1, с. 32, 33.

101. Суханов Е. В. Цифровой запоминающий осциллограф АСК-3106. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2003, №4, 22—26.

102. Афонский А. А., Суханов Е. В. Измерения по заданной траектории в USB-лаборатории (измерительный комплекс АСК-4106). Контрольно-измерительные системы и приборы, 2004, № 2, с. 19—22.

103. Афонский А. А., Харченко С. А. Генератор испытательных сигналов АКТАКОМ АНР-3125. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2004, № 4, с. 25—27.

104. Афонский А. А., Харченко С. А. Генератор испытательных сигналов АКТАКОМ АНР-3126. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2004, № 4, с. 30—32.

105. Афонский А. А., Суханов Е. В. Логический анализатор АКТАКОМ АСК-3166. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2004, № 5, с. 20—22.

106. Афонский А. А., Кудреватых Е. Ф., Суханов Е. В. Эволюционная революция в в USB-лаборатории АКТАКОМ. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2005, № 1, с. 25—29.

107. Джонни Хэнкок. Скорость обновления осциллограмм сигнала в осциллографе определяет вероятность захвата трудноуловимых событий. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2005, № 4, с. 31, 32.

108. Дьяконов В. Виртуальные лаборатории. Обзор приставок и плат к персональному компьютеру. Ремонт и сервис, 2005, № 7, с. 48—53.

109. Дьяконов В. Осциллографы-мультиметры. Ремонт и сервис, 2005, № 8, с. 58—63.

110. Дьяконов В. Стробоскопические осциллографы у барьера в 100 ГГц. Ремонт и сервис, 2005, № 12, с. 54—57.

111. Дьяконов В. Портативные осциллографы фирмы VELLEMAN. Ремонт и сервис, 2006, № 1, с. 48, 49.

112. Дьяконов В. Новая виртуальная лаборатория PC-Lab 2000 v. 1.38 фирмы VELLEMAN INSTRUMENTS. Ремонт и сервис, 2006, № 3, с. 46—51.

113. Дьяконов В. Аналоговые осциллографы широкого применения. Ремонт и сервис, 2006, № 4, с. 44—48.

114. Дьяконов В. Бюджетные цифровые запоминающие осциллографы. Ремонт и сервис, 2006, № 6, с. 51—55.

115. Дьяконов В. Цифровые запоминающие осциллографы среднего класса. Ремонт и сервис, 2006, № 8, с. 45—50.

Содержание

Предисловие.....	3
Глава 1. Основы электронных измерений и мультиметры	5
1.1. Измерения на постоянном токе.....	5
1.1.1. Источники напряжения и тока	5
1.1.2. Резисторы и резистивность	8
1.1.3. Измерения в произвольных цепях постоянного тока	8
1.2. Измерения переменного напряжения и тока	9
1.2.1. Параметры синусоидального напряжения и тока	9
1.2.2. Измерение истинного среднеквадратического значения (True RMS)	10
1.2.3. Советские милливольтметры с True RMS	12
1.2.4. Измерение тока бесконтактными методами	13
1.3. Измерители R, C, L и иммитанса.....	14
1.3.1. Понятие об индуктивности и емкости	14
1.3.2. Эквивалентные и измерительные схемы для индуктивности и емкости	15
1.3.3. Портативные измерители индуктивности и емкости	17
1.3.4. Измерители иммитанса (импеданса)	19
1.3.5. Измеритель иммитанса E7-22 и работа с ним	20
1.3.6. Стационарные лабораторные LCR-измерители компании Good Will	23
1.3.7. Специфика измерений L, C и R	25
1.4. Портативные аналоговые и цифровые мультиметры.....	27
1.4.1. Рынок мультиметров и тенденции их развития.....	27
1.4.2. Функциональная схема цифрового мультиметра.....	29
1.4.3. Обзор массовых моделей мультиметров	30
1.4.4. Мультиметры для промышленных применений.....	32
1.4.5. Мультиметры с токовыми клещами.....	34
1.4.6. Мультиметры — токовые клещи для измерения мощности в трехфазных сетях.....	36
1.4.7. Мультиметры с цифровыми и аналоговыми измерителями.....	38
1.4.8. Мультиметры-щупы	39
1.4.9. Цифровые мультиметры с интерфейсом RS-232	39
1.4.10. Многоцелевой мультиметр METEX M-6000D	44
1.4.11. Цифровые мультиметры M-3890D и M-3890DT фирмы METEX с интерфейсом USB	45
1.4.12. Работа USB-мультиметров с персональным компьютером	48
1.5. Цифровые частотомеры	50
1.5.1. Принципы построения цифровых частотомеров.....	50
1.5.2. Цифровые частотомеры АКТАКОМ серии АСН	50
1.6. Элементная база современных мультиметров.....	52
1.6.1. Микросхемы АЦП с цифровыми индикаторами.....	52
1.6.2. Микросхемы преобразователей True RMS в постоянное напряжение.....	53
1.6.3. Примеры применения микросхем MX536A/536	55
1.6.4. Пример построения вольтметра на основе микросхем MX536A/536	56
1.6.5. Микросхема AD693 усилитель сигнала температурного датчика.....	57

1.6.6. Микросхемы интерфейсов RS-232	57
Глава 2. Источники напряжений, токов и тестовых сигналов	59
2.1. Источники постоянных напряжений и токов.....	59
2.1.1. Кремниевые стабилитроны как источники опорного напряжения	59
2.1.2. Микросхемы источников опорного напряжения	61
2.1.3. Микросхемы последовательных стабилизаторов	64
2.1.4. Микросхемы параллельных стабилизаторов	66
2.1.5. Супервизоры питания	66
2.1.6. Микросхемы импульсных преобразователей DC-DC	67
2.1.7. Микросхемы импульсных преобразователей AC-DC.....	69
2.1.8. Источники постоянного тока	70
2.1.9. Лабораторные источники постоянного напряжения и тока.....	71
2.2. Источники синусоидальных сигналов	73
2.2.1. Типы источников синусоидального напряжения	73
2.2.2. Пример схемы RC-генератора.....	75
2.2.3. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общей базой	76
2.2.4. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором	77
2.2.5. LC-генераторы с упрощенным включением контура.....	77
2.2.6. Генераторы на пьезокерамических фильтрах.....	78
2.2.7. Кварцевые резонаторы	79
2.2.8. Кварцевые генераторы на логических микросхемах	81
2.2.9. Кварцевый генератор на операционном усилителе.....	82
2.2.10. Кварцевый генератор на биполярном транзисторе	82
2.2.11. Промышленные модули кварцевых генераторов	83
2.2.12. Промышленные генераторы низкочастотных сигналов.....	83
2.2.13. Генераторы стандартных сигналов (ГСС) высоких частот	85
2.3. Функциональные генераторы	87
2.3.1. Принципы построения функциональных генераторов	87
2.3.2. Формирователи синусоидального сигнала из треугольного	88
2.3.3. Микросхема функционального генератора MAX	89
2.3.4. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы Wavetek Meterman ..	93
2.3.5. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы METEX	94
2.3.6. Программа стыковки приборов METEX с компьютером	97
2.3.7. Функциональный генератор 33220A фирмы Agilent.....	98
2.4. Генераторы качающейся частоты (ГКЧ) и измерители АЧХ	99
2.4.1. Промышленные ГКЧ и измерители АЧХ	99
2.4.2. Применение функциональных генераторов в качестве ГКЧ	101
2.4.3. Построение ГКЧ на высоких частотах	102
2.4.4. Работа с измерителем АЧХ XI-50	103
2.5. Измерительные комплексы MS-9150/60/70 фирмы METEX	107
2.5.1. Приборный состав комплекса	107
2.5.2. Универсальный мультиметр комплексов.....	107
2.5.3. Функциональный генератор и частотомер комплексов	107
2.5.4. Встроенный лабораторный источник питания	108
2.6. Широкополосные и импульсные интегральные усилители и компараторы ..	108
2.6.1. О требованиях к интегральным усилителям	108

2.6.2. Широкополосные интегральные усилители фирмы BURR-BROWN	109
2.6.3. Интегральный аналог идеального биполярного транзистора	112
2.6.4. Сверхширокополосные дифференциальные усилители фирмы MAXIM	114
2.6.5. Сверхширокополосные одноходовые усилители фирмы MAXIM	115
2.6.6. Сверхскоростные интегральные компараторы	119
2.7. Источники импульсных сигналов	120
2.7.1. Промышленные генераторы импульсов	120
2.7.2. Импульсные генераторы на транзисторах и интегральных микросхемах	123
2.7.3. Импульсные генераторы на интегральном таймере	124
2.7.4. Импульсные устройства на негатронах	126
2.8. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов	133
2.8.1. Генераторы произвольных сигналов серии Tektronix AFG3000	133
2.8.2. Возможности генераторов серии AFG3000	136
2.8.3. Работа генераторов серии AFG3000 с компьютером	141
2.8.4. Генераторы произвольных сигналов других фирм	143
Глава 3. Основы электронной осциллографии	146
3.1. Сигналы и их спектры	146
3.1.1. Синусоидальные колебания и сигналы	146
3.1.2. Понятие о спектральном синтезе сложных сигналов	147
3.1.3. Фурье-анализ и синтез периодических функций	148
3.1.4. Дискретный Фурье-анализ и спектр периодических функций	150
3.1.5. Непрерывное преобразование Фурье для произвольного сигнала	150
3.1.6. Быстрое преобразование Фурье (БПФ)	152
3.1.7. Эффект Гиббса	152
3.1.8. Спектральный анализ дискретных сигналов	154
3.2. Начало осциллографии	155
3.2.1. Рождение электронной осциллографии	155
3.2.2. Осциллограф и трубка Брауна	155
3.2.3. Осциллографическая трубка с электростатическим отклонением	157
3.3. Современные осциллографические трубки	160
3.3.1. Особенности конструкции осциллографических ЭЛТ	160
3.3.2. Графическая скорость луча	161
3.3.3. Время установления отклоняющей системы	161
3.3.4. Отклоняющие системы осциллографических ЭЛТ	163
3.3.5. Осциллографические трубки специального назначения	165
3.4. Принцип действия и устройство аналогового осциллографа	167
3.4.1. Принцип действия осциллографа	167
3.4.2. Структурная схема аналогового осциллографа	168
3.4.3. Требования к усилителям осциллографа	171
3.4.4. Особенности широкополосных осциллографических усилителей	177
3.4.5. Принципы построения генераторов развертки	182
3.4.6. Узлы синхронизации осциллографов	185
3.4.7. Блоки питания осциллографов	185
3.5. Принцип действия и устройство цифрового запоминающего осциллографа	186
3.5.1. Блок-схема цифрового запоминающего осциллографа	186
3.5.2. Достоинства и недостатки цифровых запоминающих осциллографов	187

3.5.3. Получение спектрограмм сигнала цифровыми осциллографами.....	189
3.6. Параметры и выбор электронных осциллографов.....	192
3.6.1. Основные параметры.....	192
3.6.2. Дополнительные параметры	193
3.6.3. Выбор осциллографов	193
Глава 4. Аналоговые электронные осциллографы.....	203
4.1. Осциллографы первого и второго поколений.....	203
4.1.1. Первое поколение ламповых осциллографов.....	203
4.1.2. Массовые советские транзисторные осциллографы 60-х годов	203
4.1.3. Осциллографы для радиолюбителей	205
4.2. Современные сервисные аналоговые осциллографы	206
4.2.1. Сервисные осциллографы серий ОСУ и MPC.....	206
4.2.2. Отечественные сервисные осциллографы	208
4.3. Современные отечественные универсальные осциллографы	210
4.3.1. Отечественные универсальные осциллографы.....	210
4.3.2. Современные универсальные осциллографы фирмы Good Will	217
4.3.3. Современные универсальные осциллографы серии ACK.....	220
4.3.4. Осциллографы АКТАКОМ-IWATSU Hi-End класса	226
4.3.5. Универсальные осциллографы фирмы HITACHI.....	229
4.3.6. Осциллографы фирмы PINTEK.....	230
4.3.7. Аналоговые осциллографы фирмы EZ Digital	232
Глава 5. Стационарные цифровые и стробоскопические осциллографы	237
5.1. Цифровое представление аналоговой информации	237
5.1.1. Общие принципы построения цифровых осциллографов.....	237
5.1.2. О выборе числа отсчетов и восстановлении сигналов	240
5.1.3. Об интерполяции в цифровых осциллографах	241
5.2. Современные аналого-цифровые осциллографы.....	242
5.2.1. Аналого-цифровые осциллографы АКТАКОМ	242
5.2.2. Аналого-цифровые осциллографы фирмы Good Will	243
5.2.3. Аналого-цифровой осциллограф C1-137/2.....	244
5.3. Цифровые осциллографы.....	245
5.3.1. Цифровые осциллографы Минского приборостроительного завода	245
5.3.2. Цифровые осциллографы фирмы Good Will.....	249
5.3.3. Цифровые осциллографы АКТАКОМ	250
5.3.4. Цифровые осциллографы фирмы HITACHI.....	253
5.3.5. Цифровые осциллографы фирмы TEKTRONIX.....	254
5.3.6. Цифровые осциллографы фирмы LeGroy (общая оценка).....	260
5.3.7. Цифровые осциллографы LeGroy WaveRunner.....	262
5.3.8. Цифровые осциллографы LeGroy WaveSurfer	266
5.3.9. Цифровые осциллографы LeGroy WavePro	266
5.3.10. Цифровые осциллографы LeGroy WaveMaster.....	270
5.3.11. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц	271
5.3.12. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies.....	274
5.4. «Бюджетные» цифровые запоминающие осциллографы	276
5.4.1. Какие из цифровых осциллографов можно отнести к бюджетным.....	276

5.4.2. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы TEKTRONIX	276
5.4.3. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы Agilent	277
5.4.4. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы EZ Digital	277
5.4.5. «Бюджетные» осциллографы фирмы WENS	284
5.4.6. Цифровые осциллографы фирмы RIGOL	284
5.4.7. Цифровые осциллографы серии WaveJet фирмы LeGroy	286
5.5. Особенности осциллографов класса Hi-End	286
5.5.1. Сравнение осциллографов класса Hi-End различных фирм	286
5.5.2. Режимы выборок и пик-детектор	287
5.5.3. Получение глазковых диаграмм	288
5.5.4. Осциллографы фирмы Tektronix с Цифровым Люминофором	289
Глава 6. Портативные цифровые осциллографы	293
6.1. Тенденция микроминиатюризации цифровых осциллографов	293
6.2. Миниатюрные осциллографы объединения АКТАКОМ	293
6.2.1. Портативные осциллографы серии АСК	293
6.2.2. Осциллограф-щуп АСК-4011	294
6.3. Портативные осциллографы фирмы Fluke	295
6.3.1. Цифровые осциллографы — скопметры	295
6.3.2. Скопметры Fluke 105B/99B/96B/92B	295
6.3.3. Скопметры Fluke серии 120	297
6.3.4. Осциллографы и скопметры Fluke серии B	299
6.3.5. Скопметры серии 190	302
6.4. Мультиметры-осциллографы фирм BEETECH и WENS	304
6.4.1. Мультиметры-осциллографы фирмы BEETECH	304
6.4.2. Мультиметры-осциллографы WENS 820	306
6.5. Портативные осциллографы фирмы Velleman	306
6.5.1. Портативный осциллограф HPS5	306
6.5.2. Портативный персональный осциллограф HPS10	307
6.5.3. Портативный осциллограф HPS40	308
6.5.4. Панельный осциллограф VPS10	308
6.5.5. Малогабаритный цифровой осциллограф APS 320	308
6.6. Портативный осциллограф-мультиметр DMM-740	309
6.7. Портативные осциллографы/мультиметры фирмы METEX	310
6.7.1. Одноканальный осциллограф/мультиметр MS-1280	310
6.7.2. Осциллограф/мультиметр MS-2000	311
6.7.3. Осциллограф-мультиметр DG SCOPE	312
6.8. Портативные осциллографы корпорации Tektronix	313
6.8.1. Серия осциллографов Tektronix THS700	313
6.8.2. Серия осциллографов Tektronix TPS2012/2014/2024	314
6.8.3. Портативные осциллографы Tektronix TPS2012/2014/2024 с Цифровым люминофором	315
6.9. Цифровые осциллографы — ноутбуки фирмы Hitachi	317
Глава 7. Виртуальные PC-осциллографы и лаборатории	319
7.1. Виртуальные PC-осциллографы	319
7.1.1. Назначение виртуальных осциллографов и их типы	319

7.1.2. Виртуальные осциллографы в виде плат расширения ПК	320
7.2. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman.....	321
7.2.1. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman.....	321
7.2.2. Анализатор спектра виртуального осциллографа фирмы Velleman	323
7.2.3. Самописец на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman.....	323
7.2.4. Работа с PC-осциллографом фирмы Velleman.....	324
7.3. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman.....	327
7.3.1. Функциональные измерительные генераторы	327
7.3.2. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman.....	327
7.3.3. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы Velleman	329
7.4. Компьютеризированная лаборатория PC-Lab 2000	330
7.4.1. Создание компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000	330
7.4.2. Специальные возможности лаборатории PC-Lab 2000	331
7.5. Новые возможности виртуальной лаборатория PC-Lab 2000 v. 1.38	334
7.5.1. Развитие лаборатории PC-Lab 2000	334
7.5.2. Установка обновленной лаборатории PC-Lab 2000.....	334
7.5.3. Новый режим запоминания (персистенции) осциллограмм PERSIST.....	335
7.5.4. Отключение режима соединения точек графиков.....	336
7.5.5. Автоматизация измерений параметров осциллограмм.....	336
7.5.6. Режим запоминания спектрограмм.....	339
7.5.7. Другие возможности обновленной PC-Lab 2000	339
7.5.8. Виртуальный самописец PCS10 (K8047)	341
7.5.9. Виртуальный USB-осциллограф PCSU1000.....	343
7.5.10. Виртуальная лаборатория PC-Lab 2000SE	343
7.6. Осциллографические модули и платы фирмы BORDO	347
7.6.1. Цифровой осциллограф BORDO-421 с USB-интерфейсом.....	347
7.6.2. Цифровые осциллографы — плата В-121 и приставка В-323.....	348
7.6.3. Двухканальные цифровые осциллографы — платы PCI.....	351
7.6.4. Интерфейс пользователя осциллографов фирмы BORDO	353
7.7. Платы-осциллографы других фирм	353
7.7.1. Ультраскоростные платы М8-500, М8-500У и М8-1000.....	353
7.7.2. Приставка-осциллограф DSO-2100.....	355
7.7.3. Осциллографическая приставка SDS200	356
7.8. Виртуальная USB-лаборатория АКТАКОМ.....	358
7.8.1. Управляемые источники питания АТН-1535/1539	358
7.8.2. Функциональные генераторы АНР-3121/3122	358
7.8.3. Генератор измерительных телевизионных сигналов АНР-3125/3126	359
7.8.4. Цифровые запоминающие осциллографы АСК-3106/3107/3116/3117.....	360
7.8.5. Комбинированный прибор АСК-4106	362
7.9. Виртуальный характериограф АСС-4211	366
7.9.1. Приставка АСС-4211 и ее параметры	366
7.9.2. Работа с приставкой АСС-4211	366
7.10. Скоростные платы компании GaGe	367
7.10.1. Обзор продукции компании GaGe.....	367
7.10.2. Программное обеспечение виртуальных осциллографов GaGe	370
Глава 8. Осциллографические измерения	373

8.1. Подготовка аналогового осциллографа к работе	373
8.1.1. Включение аналогового осциллографа и подготовка его к работе	373
8.1.2. Подключение осциллографа к источнику сигнала	374
8.1.3. Выбор режимов работы усилителей канала Y	375
8.1.4. Калибровка чувствительности	376
8.1.5. Учет влияния входной цепи осциллографа	377
8.1.6. Применение компенсированных делителей напряжения	378
8.1.7. Установка точной компенсации делителя	380
8.1.8. Лабораторные испытания аналоговых осциллографов	382
8.2. Работа с разверткой и синхронизация	384
8.2.1. Изменение режимов развертки	384
8.2.2. Запуск нарастающим или спадающим изменением сигнала	385
8.2.3. Установка длительности и растяжка развертки	385
8.2.4. Наблюдение телевизионных сигналов	386
8.2.5. Выбор источника запуска и синхронизации развертки	386
8.3. Измерение параметров сигналов	387
8.3.1. Измерение амплитуды и уровней сигнала	387
8.3.2. Измерение временных интервалов	388
8.3.3. Измерение сдвига фаз синусоидальных сигналов	389
8.4. Измерения в режиме X-Y	389
8.4.1. Измерение фазового сдвига с помощью фигур Лиссажу	389
8.4.2. Сравнение частот с помощью фигур Лиссажу	391
8.4.3. Осциллограф в роли характериографа	391
8.5. Некоторые другие применения осциллографа	393
8.5.1. Наблюдение амплитудно-модулированных сигналов	393
8.5.2. Вычисление коэффициента модуляции	395
8.5.3. Применение калибратора для исследования переходных процессов в RC-цепях	395
8.5.4. Наблюдение переходных процессов в LRC-цепях	396
8.5.5. Курсорные измерения	397
8.6. Особенности измерений цифровыми осциллографами	398
8.6.1. Измерение постоянных напряжений и калибровка	398
8.6.2. Измерение частотных и временных параметров цифровых осциллографов	399
8.6.3. Выбор вида интерполяции	401
8.6.4. Использование накопления (аналогового послесвечения)	402
8.6.5. Работа с памятью цифрового осциллографа	402
8.6.6. Цифровой осциллограф в роли анализатора спектра	403
8.7. Специальные вопросы осциллографирования	404
8.7.1. О дискуссии «Good Will против Tektronix»	404
8.7.2. Как регистрируют процессы различные типы осциллографов	405
8.7.3. О роли памяти в цифровых осциллографах	406
8.7.4. Применение окна для просмотра части содержимого памяти	406
8.7.5. О случайной дискретизации и эффективной ее частоте	408
8.7.6. Курсорные и автоматические вычисления	410
8.7.7. Особенности работы разверток и синхронизации	411

8.7.8. Быстрое преобразование Фурье и другие возможности осциллографов Good Will	413
8.7.9. Применение осциллографов с Цифровым Люминофором	414
8.8. Работа с массовыми цифровыми осциллографами серии DS-1000	417
8.8.1. Начало работы с осциллографами серии DS-1000	417
8.8.2. Применение режима усреднения осциллограмм	418
8.8.3. Режим наложения осциллограмм (персистенции).....	419
8.8.4. Особенности наблюдения сигналов	420
8.8.5. Работа с разверткой и системой запуска	421
8.8.6. Работа с основной группой кнопок меню.....	422
8.8.7. Применение режима XY	422
8.8.8. Работа с курсорами и курсорные измерения	423
8.8.9. Автоматические измерения.....	423
8.8.10. Применение пикового детектора.....	424
8.8.11. Просмотр деталей осциллограмм	424
8.8.12. Сохранение осциллограмм и установок осциллографа	426
8.8.13. Допусковый контроль осциллограмм.....	426
8.8.14. Быстрое преобразование Фурье и получение спектрограмм	426
8.8.15. Подключение осциллографов к принтеру	428
8.8.16. Подключение осциллографа к компьютеру.....	428
8.8.17. Применение сервисных утилит	430
8.9. Особенности работы осциллографов с различными сигналами	431
8.9.1. Подключение осциллографа к источникам сигналов	431
8.9.2. Просмотр сигналов с цифровых устройств	433
8.9.3. Измерение крутизны и нелинейности пилообразных сигналов.....	434
8.9.4. Осциллографирование телевизионных сигналов.....	435
Глава 9. Практическая работа с компьютеризированными лабораториями.....	437
9.1. Интерфейс компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000	437
9.1.1. Общий вид окна лаборатории PC-Lab 2000	437
9.1.2. Добавление текста в окно экрана.....	439
9.1.3. Меню лаборатории PC-Lab 2000	440
9.1.4. Позиция Options меню	440
9.1.5. Опции позиции View	442
9.1.6. Позиция Math задания математических операций.....	442
9.1.7. Меню файловых операций File	445
9.1.8. Работа со справкой PC-Lab 2000	446
9.2. Осциллографирование в PC-Lab 2000 в реальных условиях	446
9.2.1. Просмотр синусоидальных колебаний высоких частот	446
9.2.2. Просмотр амплитудно-модулированного сигнала	450
9.2.3. Функциональная схема исследования электронных цепей и устройств.....	451
9.2.4. Исследование дифференцирующей RC-цепочки	452
9.2.5. Получение семейств осциллограмм в режиме PERSIST.....	454
9.2.6. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на меандр	454
9.2.7. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на сложные импульсы.....	456
9.2.8. Исследование реакции LRC-цепочки на меандр	456
9.2.9. Исследование релаксационного генератора	456

9.3. Анализ спектра реальных сигналов.....	461
9.3.1. Назначение анализаторов спектра	461
9.3.2. Спектр синусоидального сигнала.....	461
9.3.3. Работа с окнами и режимами усреднения.....	462
9.3.4. Спектр амплитудно-модулированного колебания.....	463
9.3.5. Спектр прямоугольных и треугольных импульсов	467
9.3.6. Спектр сигнала вида $\sin(t)/t$	467
9.4. Работа с построителем АЧХ и ФЧХ устройств.....	469
9.4.1. Назначение и роль построителя АЧХ и ФЧХ.....	469
9.4.2. Построение АЧХ и ФЧХ дифференцирующей RC-цепи.....	469
9.4.3. Построение АЧХ и ФЧХ колебательного LRC-контура	470
9.5. Работа PC-Lab 2000 с системой Mathcad	471
9.5.1. Передача осциллограмм в среду системы Mathcad.....	471
9.5.2. Взаимодействие Mathcad с функциональным генератором	472
9.5.3. Импорт спектрограмм	473
9.5.4. Об экспорте данных из Mathcad	474
9.6. Работа PC-Lab с системой MATLAB	475
9.6.1. Передача осциллограмм в среду системы MATLAB.....	475
9.6.2. Взаимодействие MATLAB с виртуальным функциональным генератором	475
9.6.3. Импорт спектрограмм в MATLAB	476
9.6.4. Об экспорте данных из MATLAB	477
9.7. Работа с виртуальными лабораториями АКТАКОМ	478
9.7.1. Подготовка виртуальных лабораторий.....	478
9.7.2. Работа с осциллографом-анализатором	478
9.7.3. Применение анализатора спектра	481
9.7.4. Осуществление цифровой фильтрации.....	482
9.7.5. Математическая обработка сигналов	483
9.7.6. Статистические вычисления	484
9.7.7. Эмуляция сигналов.....	485
9.7.8. Работа в качестве виртуального самописца.....	485
9.7.9. Задание аварийной сигнализации	486
9.7.10. Работа с разверткой и памятью	487
9.7.11. Работа с курсорами	488
9.7.12. Режим мультимасштабирования.....	489
9.7.13. Измерение фазового сдвига	489
9.7.14. Применение режима цифрового вольтметра.....	490
9.7.15. Построение гистограммы распределения вероятности	490
9.7.16. Сохранение данных	491
9.7.17. Работа с модулем функционального генератора	492
9.7.18. Системные функции.....	496
9.8. Работа АСК-4106 с реальными сигналами.....	497
9.8.1. Измерительная схема и развертывание лаборатории	497
9.8.2. Автоматические измерения и определяемые параметры сигналов	498
9.8.3. Предоставление результатов измерений	499
9.8.4. Настройка графиков.....	501
9.8.5. Просмотр табличных данных.....	502
9.8.6. Применение модуля анализа формы сигналов	503

9.9. 18-ГГц осциллографический комплекс на базе стробоскопа С1-91/4 и приставки АСК-3106/4106.....	504
Глава 10. Пайка и паяльное оборудование	511
10.1. Обычная пайка	511
10.1.1. Общие сведения о пайке	511
10.1.2. Электрические паяльники и паяльные ванны	511
10.1.3. Припой и флюсы	515
10.1.4. Газовые паяльники	515
10.2. Паяльные станции	516
10.2.1. Простая паяльная станция SR 976ESD фирмы Solomon	516
10.2.2. Улучшенные паяльные станции с электрическим паяльником	517
10.2.3. Паяльные станции для пайки горячим воздухом	518
10.3. Организация рабочего места для пайки	520
10.3.1. Меры против статического электричества	520
10.3.2. Выбор инструментов для пайки	521
10.3.3. Процесс пайки	521
10.3.4. Распайка компонентов	523
Литература.....	525