

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ЭЛЕКТРОРАДИО- ИЗМЕРЕНИЯ

ПРАКТИКУМ

В. Ю. Петров

3-е издание



УМО СПО рекомендует
МРО рекомендует

Юрайт
ПРАВОСЛАВНЫЙ

В. Ю. Шишмарёв

ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ ПРАКТИКУМ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СПО

3-е издание, исправленное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом среднего профессионального образования в качестве практического пособия для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования



Курс с практическими заданиями и дополнительными материалами доступен на образовательной платформе «Юрайт», а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Москва • Юрайт • 2024

УДК 621.3.08(075.32)

ББК 31.22я723

Ш65

Автор:

Шишмарёв Владимир Юрьевич — доктор технических наук, профессор, действительный член (академик) Академии безопасности, обороны и правопорядка, действительный член (академик) Московской академии естествознания, гранд-доктор философии Европейской академии информатизации, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор кафедры технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов Института аэрокосмических конструкций, технологий и систем управления Московского авиационного института.

Рецензенты:

Галкин В. И. — кандидат технических наук, главный специалист Московского института электромеханики и автоматики;

Хрусталева З. А. — председатель предметной цикловой комиссии специальности «Радиоаппаратостроение», преподаватель высшей квалификационной категории Московского техникума космического приборостроения Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

Шишмарёв, В. Ю.

Ш65

Электрорадиоизмерения. Практикум : практическое пособие для среднего профессионального образования / В. Ю. Шишмарёв. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 234 с. — (Профессиональное образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-08588-4

Пособие содержит практические и лабораторные работы к учебнику «Электрорадиоизмерения» (Издательство Юрайт, 2018) и состоит из двух разделов. В первом разделе представлены основы теории и практики измерений (международная система и эталоны единиц физических величин, классификация, показатели измерительных приборов и др.). Второй раздел включает в себя лабораторные работы с необходимыми справочными сведениями и описанием методики выполнения работы.

Соответствует актуальным требованиям федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, преподавателей и всех интересующихся.

УДК 621.3.08(075.32)

ББК 31.22я723

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-08588-4

© Шишмарёв В. Ю., 2018

© Шишмарёв В. Ю., 2018, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2024

Оглавление

Предисловие	8
Условные обозначения	11

Раздел I. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Физические величины как объект измерений	12
1.2. Международная система единиц физических величин	13
1.3. Основные понятия об измерениях	14
1.4. Виды средств измерений	17
1.5. Эталоны единиц физических величин	19
1.6. Эталоны Международной системы единиц (СИ)	21
1.7. Основные методы измерений	24
1.8. Классификация и показатели измерительных приборов	26
1.9. Погрешности измерений	29

Раздел II. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1. Измерение сопротивлений с помощью мостов постоянного тока	33
Цель работы	33
Основные сведения	33
Одинарные мосты постоянного тока	33
Измерение средних сопротивлений	34
Чувствительность моста	35
Измерение малых сопротивлений	36
Измерение малого сопротивления методом двойного отсчета	37
Измерение малого сопротивления двойным мостом	38
Методика выполнения работы	39
Комбинированная схема одинарного и двойного моста	39
Определение условия наивысшей чувствительности схемы одинарного моста	40
Измерение сопротивления на одинарном мосте	41
Измерение сопротивления шунта на двойном мосте	41

Лабораторная работа № 2. Измерения индуктивностей и емкостей с помощью мостов переменного тока	44
Цель работы.....	44
Основные сведения	44
Теория простого моста	44
Мост для сравнения постоянных индуктивностей.....	45
Мост для измерения емкостей	47
Мост для измерения индуктивностей.....	49
Универсальный мост	50
Мост для измерения сопротивлений	53
Мост для измерения емкостей	53
Мост для измерения индуктивностей.....	54
Методика выполнения работы	54
Измерение индуктивности с помощью моста по схеме рис. 2.2; 2.3	54
Измерение емкости и индуктивности с помощью моста по схеме рис. 2.4	56
Измерение сопротивлений с помощью универсального моста	58
Измерение емкости с помощью универсального моста	58
Измерение индуктивности с помощью универсального моста	59
Лабораторная работа № 3. Измерение электрических величин компенсационным методом в цепях постоянного тока.....	61
Цель работы.....	61
Основные сведения	61
Методика выполнения работы	65
Лабораторная работа № 4. Измерения компенсационным методом с помощью потенциометра переменного тока	71
Цель работы.....	71
Основные сведения	71
Методика выполнения работы	78
Методика измерений на потенциометре	78
Методика измерений на аппарате АТТ	80
Лабораторная работа № 5. Изучение электронно-лучевого осциллографа и его применение для измерений.....	83
Цель работы.....	83
Основные сведения	83

Классификация осциллографов	83
Структура осциллографа	84
Виды разверток в осциллографе	87
Электронно-лучевая трубка	91
Управление осциллографом	93
Методика выполнения работы	94
Лабораторная работа № 6. Применение электронного осциллографа для исследования характеристик ферромагнитных образцов	99
Цель работы.....	99
Основные сведения	99
Методика выполнения работы	104
Лабораторная работа № 7. Применение датчиков Холла для измерения электрических и магнитных величин.....	107
Цель работы.....	107
Основные сведения	107
Методика выполнения работы	115
Лабораторная работа № 8. Изучение резонансного метода измерения и измерителей добротности.....	117
Цель работы.....	117
Основные сведения	117
Методика выполнения работы	120
Методика выполнения работы на низкочастотном измерителе.....	120
Методика выполнения работы на высокочастотном	122
измерителе.....	122
Лабораторная работа № 9. Исследование амплитудно-фазовых частотных характеристик четырехполюсников	126
Цель работы.....	126
Основные сведения	126
Методика выполнения работы	130
Лабораторная работа № 10. Изучение электронно-лучевых осциллографов со ждущей разверткой и применение их для измерений	132
Цель работы.....	132
Основные сведения	132
Методика выполнения работы	137
Подготовительные операции	137
Измерение длительности импульса	138

Измерение амплитуды импульса	139
Измерение частоты следования и скважности импульса	139
Измерение длительности переднего и заднего фронтов импульса	140
Наблюдение на экране электронного осциллографа двух кривых.....	140
Лабораторная работа № 11. Изучение электронно- лампового вольтметра.....	142
Цель работы.....	142
Основные сведения	142
Методика выполнения работы	145
Лабораторная работа № 12. Изучение электронно- счетного частотомера и осциллографа и применение их для измерения частоты сигналов.....	148
Цель работы.....	148
Основные сведения	148
Электронно-счетный частотомер.....	148
Погрешности измерения электронно-счетного частотомера	150
Использование осциллографа в качестве измерителя частоты.....	153
Методика выполнения работы	155
Лабораторная работа № 13. Изучение цифровых измерительных приборов и преобразователей.....	158
Цель работы.....	158
Основные сведения	158
Основы построения цифровых измерительных приборов....	158
Методы преобразования напряжения в цифровой код	161
Вольтметр для измерения мгновенных значений напряжения.....	162
Вольтметр для измерения среднего значения напряжения ..	164
Вольтметр с преобразованием напряжения в частоту	167
Вольтметр с промежуточным преобразованием частоты в фазу.....	170
Методика выполнения работы	172
Лабораторная работа 14. Изучение затухающих электромагнитных колебаний	175
Цель работы.....	175
Основные сведения	175
Методика выполнения работы	178

Лабораторная работа № 15. Измерение индуктивности и емкости в цепи переменного тока	180
Цель работы.....	180
Основные сведения	180
Методика выполнения работы	184
Лабораторная работа № 16. Исследование прямоугольных импульсов в линейных цепях	187
Цель работы.....	187
Основные сведения	187
Методика выполнения работы	191
Лабораторная работа № 17. Изучение возможных искажений электрических сигналов в электронных усилителях	194
Цель работы.....	194
Основные сведения	194
Методика выполнения работы	198
Лабораторная работа № 18. Изучение электрических методов измерения неэлектрических величин	201
Цель работы.....	201
Основные сведения	201
Методика выполнения работы	205
Лабораторная работа № 19. Изучение статистических методов обработки опытных данных	209
Цель работы.....	209
Основные сведения	209
Методика выполнения работы	212
Лабораторная работа № 20. Изучение нормального закона распределения	215
Цель работы.....	215
Основные сведения	215
Методика выполнения работ	217
Приложения	220
Приложение 1.....	220
Приложение 2.....	224
Приложение 3.....	226
Приложение 4.....	229
Список литературы	232
Новые издания по дисциплине	
«Электрорадиоизмерения» и смежным дисциплинам	234

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время ни одна сфера человеческой деятельности не обходится без разнообразных измерений. Важную роль измерения играют в контроле деталей, изделий и технологических процессов, повышении качества, управлении производством, научных исследованиях.

Целенаправленная подготовка специалистов в этой области должна предусматривать приобретение навыков по применению средств измерений на практике.

Это учебное пособие является полезным и для студентов, и для преподавателей.

Достаточно большое число представленных лабораторных работ позволяет учебным заведениям и преподавателям выбирать из предложенного перечня наиболее актуальные работы для конкретной специальности.

При отсутствии в учебном заведении отдельных приборов и оборудования предлагаемое учебное пособие может быть использовано также для проведения расчетно-практических работ.

Для проведения расчетно-практических работ в этом случае может быть предложена следующая общая методика.

1. Осуществляется практическое изучение конкретного вопроса измерений в соответствии с изложенной в учебном пособии теоретической частью.

2. Проводится ознакомление с принципиальными схемами измерений и конкретными схемами измерительных приборов и установок.

3. По заданию преподавателя делаются технические расчеты в соответствии с методиками, изложенными в соответствующих работах. При этом отдельные данные, получаемые экспериментальным путем, могут быть заданы преподавателем.

4. Согласно полученным расчетным и заданным данным студентами строятся графики и составляются отчеты в соответствии с приведенными в каждой работе методиками.

5. По заданию преподавателя студенты письменно или устно отвечают на контрольные вопросы, которые имеются в конце каждой работы.

При подготовке к выполнению каждой работы студент должен:

- изучить соответствующие теоретические разделы по учебному пособию;
- ознакомиться с методикой выполнения данной лабораторной работы;
- изучить схему лабораторной установки и применяемые приборы;
- составить таблицы для записей результатов;
- изучить правила техники безопасности при работе с приборами и устройствами.

Проверка готовности студента к выполнению каждой работы проводится преподавателем при личном опросе.

По каждой работе студент составляет отчет, который должен содержать схемы измерений и результаты исследований и расчетов в виде таблиц и графиков с необходимыми пояснениями и выводами.

Перед началом выполнения работы необходимо:

- удостовериться, что лабораторная установка отключена от сети электропитания;
- проверить шины заземления и их подключение к лабораторному стенду;
- посмотреть, нет ли наружных повреждений кабелей электропроводов и соединительных проводов.

При проведении лабораторных работ студент должен:

- собрать схему, предъявить ее преподавателю или лаборанту и только после их разрешения производить включение стенда;
- проверить работоспособность системы отключения питания;
- включить лабораторный стенд и провести необходимые работы согласно методическим указаниям.

После завершения работ лабораторный стенд предъявляется для проверки преподавателю или лаборанту и затем выключается. Все органы управления стендом должны находиться в исходном положении.

Студентам запрещается:

- самостоятельно устранять неисправности;
- открывать корпуса приборов и устройств;
- класть посторонние предметы на рабочие места;
- включать и выключать приборы и устройства, не относящиеся к выполняемому заданию;
- участвовать в работах, выполняемых другими бригадами на других установках;
- оставлять без надзора включенные стенды, приборы и установки.

В результате изучения дисциплины студент должен освоить:

трудовые действия

- владения современными методиками для решения задач электрорадиоизмерений;
- методами синтеза схем для проведения различных видов измерений;
- методиками расчета и построения преобразователей электрических величин;
- способами анализа формы, параметров, фаз и спектра сигналов;
- методами построения амплитудно-частотных характеристик;

необходимые умения

- собирать физические макеты лабораторных установок по приведенным в пособии схемам;
- проводить технические расчеты по формулам и методикам, изложенным в пособии;
- проводить экспериментальные исследования, предусмотренные методиками выполнения лабораторных работ;
- строить необходимые графики по результатам проведенных расчетов и экспериментов;
- проводить сравнительный анализ получаемых расчетных и экспериментальных данных;

необходимые знания

- основ теории измерений;
- принципов построения преобразователей электрических и неэлектрических величин;
- методов электрических и радиотехнических измерений;
- способов измерения токов, напряжений, сопротивлений, емкости, индуктивности, мощности, энергии, частоты и других электротехнических и радиотехнических величин и параметров;
- микропроцессорных и компьютерных измерительных систем.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АИП	—	аналоговый измерительный прибор
АТТ	—	аппарат для проверки трансформаторов тока
АЦП	—	аналого-цифровой преобразователь
ВБ	—	вспомогательная батарея
ВГ	—	вибрационный гальванометр
ВТ	—	воздушный трансформатор
ГЗ	—	гальванометр зеркальный
ГИ	—	генератор импульсов
ГС	—	гальванометр стрелочный
ДН	—	делитель напряжения
ЗГ	—	звуковой генератор
ЗУ	—	запоминающее устройство
ИК	—	интегрирующий контур
ИП	—	измерительный прибор
ЛАТР	—	лабораторный автотрансформатор
ЛВ	—	ламповый вольтметр
МС	—	магазин сопротивлений
МЭП	—	магнитоэлектрический прибор
НЭ	—	нормальный элемент
ОК	—	образцовая катушка
ОС	—	обратная связь
ТТ	—	трансформатор тока
УПТ	—	усилитель постоянного тока
УС	—	устройство сравнения
УШ	—	универсальный шунт
ФВУ	—	фазовращающее устройство
ЦАП	—	цифроаналоговый преобразователь
ЦИП	—	цифровой измерительный прибор
ЭК	—	электронный коммутатор
ЭЛО	—	электронно-лучевой осциллограф
ЭЛТ	—	электронно-лучевая трубка
ЭО	—	электронный осциллограф
ЭСЧ	—	электронно-счетный частотомер

РАЗДЕЛ I. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Физические величины как объект измерений

Объектом измерений являются физические величины, которые принято делить на основные и производные. *Основные* величины независимы друг от друга, но важны для установления связей с другими физическими величинами, которые называют *производными*. Основным величинам соответствуют основные единицы измерений, а производным — производные. Совокупность основных и производных единиц представляет собой *систему единиц* физических величин.

Первой системой единиц считается метрическая система, в которой за основную единицу длины был принят метр, а за единицу массы — масса 1 см^3 химически чистой воды при температуре около $+4^\circ\text{C}$ — грамм (позже — килограмм). В 1799 г. были изготовлены первые прототипы (эталон) метра и килограмма. Кроме этих двух единиц метрическая система в своем первоначальном варианте включала в себя единицы площади (ар — площадь квадрата со стороной 10 м), вместимости (литр, равный объему куба с ребром 0,1 м) и др. Таким образом, в метрической системе еще не было четкого подразделения единиц величин на основные и производные.

Понятие системы единиц как совокупности основных и производных впервые предложил немецкий ученый К. Ф. Гаусс в 1832 г. За основные единицы в этой системе были приняты: миллиметр — единица длины, миллиграмм — единица массы, секунда — единица времени. Эту систему единиц называли *абсолютной*.

В 1881 г. была принята система единиц физических величин СГС, основными единицами которой являлись: сантиметр — единица длины, грамм — единица массы, секунда — единица времени. Производными единицами системы считались единица силы — килограмм-сила и единица работы — эрг. Неудобство системы СГС состояло в трудностях пересчета многих единиц в другие системы для определения их соотношения.

В начале XX в. итальянский ученый Дж.Джорджи предложил еще одну систему единиц, получившую название МКСА и довольно широко распространившуюся в мире. Основные единицы этой системы: метр, килограмм, секунда, ампер (единица силы электрического тока), а производные: ньютон — единица силы, джоуль — единица энергии, ватт — единица мощности.

Ученые разных стран предлагали и другие системы единиц физических величин и стремились создать единую международную систему измерений. Однако в настоящее время некоторые страны мира продолжают проводить измерения на основе исторически сложившихся у них единиц измерения, например Великобритания, США и Канада основной единицей массы считают фунт, причем его размер в системе «британских имперских мер» и «старых винчестерских мер» различен. В мировой практике наиболее широко распространена Международная система единиц (СИ).

1.2. Международная система единиц физических величин

В 1954 г. на Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) были определены шесть основных единиц физических величин для их использования в международных отношениях: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. В 1960 г. на ГКМВ была утверждена Международная система единиц — SI. Аббревиатура системы составлена из начальных букв французского названия «Système International d'Unités» — Система Интернациональная (СИ). В последующие годы на заседаниях ГКМВ были приняты дополнения и изменения, в результате чего в систему стали входить семь основных единиц, две дополнительных и ряд производных единиц физических величин, а также были разработаны следующие определения основных единиц:

единица длины — *метр* — длина пути, который проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды;

единица массы — *килограмм* — масса, равная массе международного прототипа килограмма;

единица времени — *секунда* — время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей;

единица силы электрического тока — *ампер* — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, создал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н;

единица термодинамической температуры — *кельвин* — термодинамическая температура, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. Кроме термодинамической температуры допускается применение температуры Цельсия (единица — градус Цельсия);

единица количества вещества — *моль* — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ кг;

единица силы света — *кандела* — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Международная система единиц (СИ) считается наиболее совершенной и универсальной по сравнению с предшествовавшими ей системами. Кроме основных единиц в ней есть дополнительные единицы для измерения плоского и телесного углов — радиан и стерadian соответственно, а также большое число производных единиц пространства и времени, механических величин, электрических и магнитных, тепловых, световых и акустических величин и т. д.

Практически все крупнейшие международные организации включили Международную систему единиц (СИ) в свои рекомендации по метрологии и призвали все страны — члены этих организаций — ее принять. В России СИ была официально введена в 1963 г. соответствующим государственным стандартом, причем следует учесть, что в то время все государственные стандарты имели силу закона и были строго обязательны для выполнения. Сегодня система единиц СИ действительно стала международной, но вместе с единицами этой системы применяются и внесистемные единицы, например тонна, сутки, литр, гектар и др.

1.3. Основные понятия об измерениях

Рассмотрим общепринятые в метрологии определения, которые соответствуют понятиям «измерения», «средства», «принципы», «методы» и «объекты измерений», «алгоритмы измерений» и «шкалы измерений» и др.

В соответствии с рекомендациями РМГ 29—2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения *измерением* называется процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Получаемая при этом информация называется *измерительной*.

Определенная информация об объекте измерения должна быть известна до проведения исследований, что является важным фактором, обуславливающим эффективность измерения. Такую ин-

формацию называют *априорной*. При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а следовательно, нельзя выбрать нужные методы и средства измерений.

Информация, получаемая в результате измерения, может держаться в объекте измерения в двух формах: пассивной и активной. *Пассивная* информация представляет собой совокупность сведений, характеризующих объект. К такой информации, например, относится информация о величине напряжения источника питания. Информация является *активной*, если она имеет форму энергетической характеристики какого-либо явления. Подобные энергетические явления называются *сигналами*. Их примерами являются электрические, оптические и акустические сигналы, используемые для передачи информации.

При определении значения интересующей физической величины результат измерения может быть представлен в виде аналитического соотношения, известного как основное уравнение метрологии:

$$A = kA_0,$$

где A — значение измеряемой физической величины; k — отношение измеряемой величины к образцу; A_0 — значение величины, принятой за образец.

Принцип измерений представляет собой совокупность физических принципов, на которых основаны измерения, например применение эффекта Холла для измерения мощности или эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения.

Метод измерений — это совокупность использования принципов и средств измерений. Это общее определение на практике часто конкретизируют, относя его только к применяемым средствам измерений, например метод измерения частоты частотомером, напряжения — вольтметром, силы тока — амперметром и т.д. Метод измерений следует отличать от *методики измерений*, которая представляет собой общий или поэтапный план проведения измерений, т.е. намеченного распорядка измерений, определяющего состав применяемых приборов, последовательность и правила проведения операций.

Объект измерений — это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

В технической литературе и нормативной документации часто встречается термин «алгоритм измерений», под которым следует понимать точное предписание о перечне и порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение искомого значения физической величины.

Достоверность измерений определяется степенью доверия к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах. Данную вероятность называют *доверительной*.

Правильность измерений — это метрологическая характеристика, отражающая близость к нулю так называемых систематических погрешностей результатов измерений.

Сходимость результата измерений определяет качество измерений и отражает близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами и средствами измерений в одних и тех же условиях.

Воспроизводимость результатов измерений характеризует качество измерений и отражает близкие результаты измерений одной и той же величины, полученные в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенные к одним и тем же условиям.

Измерения как экспериментальные процедуры определения значений измеряемых величин весьма разнообразны. Это объясняется множеством измеряемых величин, характером их изменения во времени, разными требованиями к точности измерений и т.д. Измерения классифицируют по определенным признакам. Одним из таких признаков является способ получения результата измерения. Измерения подразделяются на прямые и косвенные.

Прямым называется измерение, когда искомое значение физической величины находится непосредственно из опытных данных. Часто под прямыми понимают такие измерения, при которых не производится промежуточных преобразований. Это, например, измерение напряжения и силы тока такими электроизмерительными приборами, как вольтметр и амперметр. Прямые измерения очень распространены в практике измерений. Математически их можно охарактеризовать элементарной формулой

$$A = x,$$

где A — измеряемая величина; x — значение величины, найденное путем ее измерения и называемое результатом измерения.

Косвенным называется измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Косвенные измерения можно охарактеризовать следующей формулой:

$$A = (x_1, x_2, \dots, x_m),$$

где x_1, x_2, \dots, x_m — результаты прямых измерений величин, связанных известной функциональной зависимостью с искомым значением измеряемой величины A .

Косвенные измерения также характерны для практики электрорадиоизмерений, например измерение мощности методом амперметра-вольтметра, определение резонансной частоты колебательного контура по результатам прямых измерений емкости и индуктивности контура и т.д.

1.4. Виды средств измерений

На практике при измерении физической величины применяются технические средства, которые имеют нормированные погрешности и называются *средствами измерений*. К ним относятся:

- меры;
- измерительные преобразователи;
- измерительные приборы;
- измерительные установки и системы;
- измерительные принадлежности.

Мерой называют средство измерений, предназначенное для воспроизведения физических величин заданного размера. К данному виду средств измерений относятся гири, концевые меры длины и т.п. На практике используют однозначные и многозначные меры, а также наборы и магазины мер. Однозначные меры воспроизводят величины только одного размера (гиря), а многозначные — нескольких размеров физической величины, например миллиметровая линейка выражает длину предмета в сантиметрах и миллиметрах.

Наборы и магазины представляют собой объединения (сочетания) однозначных или многозначных мер для получения возможности воспроизведения некоторых промежуточных или суммарных значений величины. Набор мер составляет комплект однородных мер разного размера, которые применяются в нужных сочетаниях, например набор лабораторных гирь. Магазин мер — сочетание мер, объединенных конструктивно в одно механическое целое, в котором предусмотрена возможность посредством ручных или автоматизированных переключателей, связанных с отсчетным устройством, соединять составляющие магазин меры в нужном сочетании. По такому принципу устроены магазины электрических сопротивлений.

При пользовании мерами следует учитывать номинальное и действительное значения мер, а также погрешность меры и ее разряд. Номинальным называют значение меры, указанное на ней. Действительное значение меры должно быть зафиксировано в специальном свидетельстве в качестве результата высокоточного измерения с использованием официального эталона. Разность между номинальным и действительным значениями называется погрешностью меры.

Измерительный преобразователь — это средство измерений, которое служит для преобразования сигнала измерительной информации в форму, удобную для обработки или хранения, а также передачи в показывающее устройство. Измерительные преобразователи либо входят в конструктивную схему измерительного прибора, либо применяются совместно с ним, но сигнал преобразователя не поддается непосредственному восприятию наблюдателем. Например, преобразователь может быть необходим для передачи информации в память компьютера, для усиления напряжения и т.д. Преобразуемую величину называют входной величиной, а результат преобразования — выходной. Основной метрологической характеристикой измерительного преобразователя считается соотношение между входной и выходной величинами, называемое функцией преобразования.

Преобразователи подразделяются на первичные, непосредственно воспринимающие измеряемую величину; передающие, на выходе которых величина приобретает форму, удобную для регистрации или передачи на расстояние; промежуточные, работающие в сочетании с первичными и не влияющие на изменение рода физической величины.

Измерительные приборы (ИП) — это средства измерений, которые позволяют получать измерительную информацию в форме, удобной для восприятия пользователем. Различаются измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения. *Приборы прямого действия* отображают измеряемую величину на показывающем устройстве, имеющем соответствующую градуировку в единицах этой величины. Изменения рода физической величины при этом не происходит. К приборам прямого действия относятся, например, амперметры, вольтметры, термометры и т.п. *Приборы сравнения* предназначены для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны. Эти приборы широко используются в научных целях и на практике для измерения таких величин, как яркость источников излучения, давление сжатого воздуха и др.

Измерительные установки и системы — это совокупность средств измерений, объединенных по функциональному признаку со вспомогательными устройствами, для измерения одной или нескольких физических величин объекта измерений. Обычно такие системы автоматизированы и обеспечивают ввод информации в систему, автоматизацию самого процесса измерения, обработку и отображение результатов измерений для восприятия их пользователем. Эти установки (системы) используются и для контроля (например, производственных процессов), что особенно актуально для метода статистического контроля.

Измерительные принадлежности — это вспомогательные средства измерений величин. Они необходимы для вычисления попра-

вок к результатам измерений, если требуется высокая степень точности. Например, термометр может быть вспомогательным средством, если показания прибора достоверны при строго регламентированной температуре; психрометр — когда строго оговаривается влажность окружающей среды.

Измерительные принадлежности вносят определенные погрешности в результат измерений, связанные с погрешностью самого вспомогательного средства.

По метрологическому назначению средства измерений подразделяют на эталонные, образцовые и рабочие.

Эталонным называется средство измерений, обеспечивающее хранение и (или) воспроизведение единицы физической величины для передачи ее размера другим средствам измерения (образцовым или рабочим).

Образцовое средство измерения представляет собой меру или измерительные приборы, служащие для поверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых. От образцовых средств размеры единиц физических величин передаются далее рабочим средствам измерений.

Рабочие средства измерений применяют для определения параметров (характеристик) технических устройств, технологических процессов, окружающей среды и др. Они могут быть лабораторными (для научных исследований), производственными (для обеспечения и контроля заданных характеристик технологических процессов), полевыми (для самолетов, автомобилей, судов и т.п.). Каждый из этих видов рабочих средств отличается особыми показателями. Так, лабораторные средства измерений должны быть самыми точными и чувствительными, а их показания — характеризоваться высокой стабильностью. Производственные средства обладают устойчивостью к воздействиям температуры, влажности, вибрации и другим факторам производственного процесса, которые могут оказать влияние на достоверность и точность показаний приборов. Полевые средства работают в условиях, которые постоянно изменяются в широких пределах внешних воздействий.

1.5. Эталоны единиц физических величин

Эталон — это средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы физической величины и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке. Классификацию, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ Р 8.815—2015. Национальный стандарт РФ. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Основные понятия.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются физической величиной, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать по крайней мере тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Неизменность — это свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени. При этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

Воспроизводимость — это возможность воспроизведения единицы физической величины на основе ее теоретического определения с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость — это возможность обеспечения сличения с эталоном других СИ, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерений. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличений.

Различают следующие виды эталонов:

первичный — гарантирует воспроизведение и хранение единицы с наивысшей в стране точностью (по сравнению с другими эталонами той же величины). Первичные эталоны являются уникальными СИ. Они часто представляют собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники, и составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений;

специальный — обеспечивает воспроизведение единицы в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью неосуществима, и служит для этих условий первичным эталоном;

государственный — первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны. Утверждение проводит главный метрологический орган страны. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. Точность воспроизведения единицы физической величины должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять

потребностям науки и техники. В состав государственных эталонов включаются средства измерений, с помощью которых воспроизводят и (или) хранят единицу физической величины, контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы, осуществляют передачу размера единицы. Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран;

вторичный — хранит размер единицы, полученной путем сличения с первичным эталоном соответствующей физической величины. Также эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. В состав вторичных эталонов включаются СИ, с помощью которых хранят единицу физической величины, контролируют условия хранения и передают размер единицы.

По метрологическому назначению вторичные эталоны подразделяются на следующие виды:

эталон-копия — предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Он создается в случае необходимости проведения большого числа поверочных работ в целях предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он не всегда является его физической копией;

эталон сравнения — применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом;

эталон-свидетель — используется для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. В настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель. Его основное назначение — обеспечивать возможность контроля постоянства основного эталона;

рабочий эталон — применяется для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Это самые распространенные эталоны. В целях повышения точности измерений физических величин рабочие эталоны применяются во многих территориальных метрологических органах и лабораториях министерств и ведомств.

1.6. Эталоны Международной системы единиц (СИ)

Эталонную базу России составляют 114 государственных эталонов и более 250 вторичных эталонов единиц физических величин. Из них 52 эталона находятся во Всероссийском научно-ис-

следовательском институте метрологии им. Д.И.Менделеева (Санкт-Петербург), в том числе эталоны метра, килограмма, ампера, кельвина и радиана; 25 эталонов — во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (Москва), в том числе эталоны единиц времени и частоты; 13 эталонов — во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений, в том числе эталон канделы; соответственно 5 и 6 эталонов — в Уральском и Сибирском научно-исследовательских институтах метрологии.

В области механики в стране созданы и используются 38 государственных эталонов, в том числе первичные эталоны метра, килограмма и секунды, точность которых имеет чрезвычайно большое значение, поскольку эти единицы участвуют в образовании производных единиц всех научных направлений.

Единица времени «секунда» впервые определялась через период вращения вокруг оси Земли или Солнца. До недавнего времени секунда равнялась $1/86\,400$ части солнечных средних суток.

В 1967 г. на XIII Генеральной конференции по мерам и весам было принято новое определение секунды как интервала времени, в течение которого совершается $9\,192\,631\,770$ колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей. Данное определение реализуется с помощью цезиевых реперов частоты.

Репер, или квантовый стандарт частоты, представляет собой устройство для точного воспроизведения частоты электромагнитных колебаний в сверхвысокочастотных и оптических спектрах, основанное на измерении частоты квантовых переходов атомов, ионов или молекул.

До июля 1997 г. государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты определялись ГОСТ 8.129—83. С 1997 г. он заменен Правилами межгосударственной стандартизации — ПМГ 18—96 «Межгосударственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты».

Государственный первичный эталон единицы времени состоит из комплекса средств измерений:

метрологических цезиевых реперов частоты, предназначенных для воспроизведения размеров единицы времени и частоты в Международной системе единиц;

водородных стандартов частоты, служащих для хранения размеров единиц времени и частоты и одновременно выполняющих функцию хранителей шкал времени. Использование водородных реперов позволяет повысить стабильность эталонов. В настоящее

время за период времени от 100 с до нескольких суток нестабильность эталонов не превышает $5 \cdot 10^{-14}$ с;

группы квантовых часов, предназначенных для хранения шкал времени. Квантовые часы — устройство для измерения времени, содержащее генератор, частота которого стабилизирована кварцевым резонатором, и управляемое квантовыми стандартами частоты;

аппаратуры, состоящей из группы синхронизированных лазеров и сверхвысокочастотных генераторов, для передачи размера единицы частоты в оптический диапазон;

аппаратуры внутренних и внешних сличений, включающей в себя перевозимые квантовые часы и лазеры.

Диапазон значений интервалов времени, воспроизводимых эталоном, составляет $1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^8$ с, диапазон значений частоты равен $1 \dots 1 \cdot 10^{14}$ Гц. Единицы времени воспроизводятся со средним квадратичным отклонением результата измерений, не превышающим $1 \cdot 10^{-14}$ с за 3 мес, при этом неисключенная систематическая погрешность не превышает $5 \cdot 10^{-14}$ с. Нестабильность частоты эталона за интервал времени от 1 000 с до 10 сут не превышает $5 \cdot 10^{-15}$ с.

В области измерений электрических и магнитных величин, включая радиотехнические, созданы и функционируют 32 эталона. Они охватывают не только большой диапазон значений измеряемых величин, но и широкий спектр условий их измерений, прежде всего частоты, доходящей до десятков гигагерц. Основу составляют эталоны, которые наиболее точно воспроизводят основные единицы и определяют размеры производных единиц. Это государственные первичные эталоны единиц электродвижущей силы (ЭДС), электрического сопротивления и электрической емкости. Первые два из них разработаны недавно и основаны на квантовых эффектах Джозефсона и Холла соответственно.

До последнего времени единицу силы электрического тока — ампер — на практике приходилось определять по тем действиям, которые ток оказывал в окружающей среде, например выделение теплоты при прохождении тока через проводник, осаждение вещества на электродах при прохождении тока через электролит, механические действия тока на магнит или проводник с током. Последние и были положены в основу эталона ампера (1948), реализованного на токовых весах.

В связи с введением в метрологическую практику эталона единицы электрического напряжения — вольта на основе эффекта Джозефсона (ГЭТ 13—01, утвержденный Постановлением ГК РФ по стандартизации и метрологии от 2 апреля 2001 г. № 30) — и эталона единицы электрического сопротивления — ома на базе эффекта Холла — назначение ампер-весов как средства, необходимого для представления единицы напряжения, утратило смысл. Применение эффекта Джозефсона (для аппаратурной реализации) и константы Джозефсо-

на (для воспроизведения единицы напряжения) позволило повысить точность воспроизведения единицы тока примерно на два порядка. Новый эталон ампера состоит из двух комплексов. Первый основан на принципе установления размера ампера через вольт и ом с использованием квантовых эффектов Джозефсона и Холла, а второй — через фарад, вольт и секунду с применением методов электрометрии.

Государственный первичный эталон ампера состоит из аппаратуры, выполненной на основе:

квантовых эффектов Джозефсона и квантования магнитного потока (эффект Холла), в том числе меры электрического напряжения, меры электрического сопротивления, сверхпроводящего компаратора тока и регулируемых источников тока;

использования методов электрометрии, включая входной блок с набором мер постоянной электрической емкости, интегратор, измерительный блок с частотомером, цифровым вольтметром и компаратором.

Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений силы постоянного электрического тока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-16}$ до 30 А установлены ГОСТ 8.022—91. Современный государственный эталон ампера имеет следующие диапазоны воспроизводимых значений силы тока: $1 \cdot 10^{-3} \dots 1$ А (посредством квантовых эффектов) и $1 \cdot 10^{-16} \dots 1 \cdot 10^{-9}$ А (при использовании методов электрометрии). Он обеспечивает воспроизведение единицы силы тока со средним квадратичным отклонением результата измерений, не превышающим $5 \cdot 10^{-8}$ А при номинальных значениях силы тока $1 \cdot 10^{-3} \dots 1$ и $10 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ А. Неисключенная систематическая погрешность не должна превышать $2 \cdot 10^{-8}$ А при номинальных значениях силы постоянного тока $1 \cdot 10^{-3}$ и 1 А.

1.7. Основные методы измерений

Электрорадиоизмерения, так же как и другие виды измерений, базируются на определенных принципах. Под *принципом измерений* понимается совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Совокупность приемов использования принципов и средств измерений определяется как метод измерений, являющийся основной характеристикой конкретных измерений. Методы измерений подразделяют на метод непосредственной оценки и метод сравнения.

При *методе непосредственной оценки* численное значение измеряемой величины определяется непосредственно по показанию измерительного прибора (например, измерение напряжения с помощью вольтметра).

Метод сравнения представляет собой метод измерений, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Это может быть, например, измерение уровня напряжения постоянного тока путем сравнения с ЭДС нормального (эталонного) элемента. Различают следующие разновидности метода сравнения:

нулевой метод — действие измеряемой величины полностью уравнивается образцовой величиной;

дифференциальный метод — в этом случае измеряется разница между измеряемой и близкой ей по значению известной эталонной величиной (например, измерение электрического сопротивления методом неуравновешенного моста);

метод замещения — действие измеряемой величины замещается (например, с помощью последовательно проводимых во времени действий) образцовой величиной.

Из всех перечисленных методов сравнения нулевой метод обеспечивает наибольшую точность измерений физической величины. К нулевому методу относятся:

компенсационный метод — действие измеряемой величины компенсируется (уравнивается) образцовой величиной;

мостовой метод — при его использовании достигают нулевого значения тока в измерительной диагонали моста, в которую включается чувствительный индикаторный прибор (обычно нуль-индикатор).

Измерения также можно классифицировать и по другим признакам. Так, по способу преобразования измеряемой величины и форме представления результаты измерений подразделяются на аналоговые (непрерывные) и цифровые (дискретные).

При осуществлении *аналоговых измерений* измерительный прибор производит непрерывное преобразование измеряемой величины, результатом которого является перемещение указателя относительно шкалы, луча осциллографа по экрану и т.д. Заключение о численном значении величины делает оператор (наблюдатель), отмечая положение указателя относительно отметок шкалы измерительного прибора. Погрешность измерения при этом ограничивается геометрическими особенностями указателя и шкалы и обычно не превышает 0,05 %.

При *цифровых измерениях* сравнение измеряемой величины с рядом образцовых значений производится в приборе автоматически, а оператор получает численное значение измеренной величины в цифровой форме. В этом случае все показатели зависят от точности сравнения в приборе и исключаются субъективные ошибки оператора. Современные цифровые приборы, как правило, обеспечивают более высокую точность, чем аналоговые. Роль оператора упрощается, так как его работа заключается лишь в правильном считывании числового значения.

По характеру изменения измеряемой величины во времени различают статический и динамический режимы измерений.

Статический режим измерений представляет собой режим измерений, при котором средство измерений работает в статическом режиме, т. е. когда выходной сигнал остается неизменным в течение времени его использования (или меняется так медленно, что каждый результат измерений может быть выражен только одним числом).

Динамический режим измерений — это режим измерений, результатом которого является функциональная зависимость измеряемой величины от времени, т. е. в этом случае выходной сигнал средства измерений изменяется во времени в соответствии с изменением во времени измеряемой величины. Таким образом, динамические измерения применяют для измерения параметров величин, имеющих зависимость во времени.

В соответствии с методом и свойствами применяемых средств измерений все рассмотренные выше виды измерений могут выполняться либо с однократными, либо с многократными наблюдениями. *Наблюдением при измерении (измерительным наблюдением)* называется единичная экспериментальная операция, итогом которой является результат наблюдения. Он всегда имеет случайный характер и представляет собой одно из значений измеряемой величины.

1.8. Классификация и показатели измерительных приборов

Измерительные приборы по принципу действия в общем виде можно подразделить на электромеханические и электронные. По структурной схеме приборы подразделяются на аналоговые и цифровые.

Аналоговый измерительный прибор (АИП) — это средство измерений, показания которого являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины. Аналоговые измерительные приборы подразделяются на четыре основные группы.

В первую, самую большую группу входят приборы для измерения параметров и характеристик сигналов (например, осциллографы, вольтметры, частотомеры, анализаторы спектра и т. д.).

Вторую группу образуют приборы для измерения параметров и характеристик активных и пассивных элементов электрических схем. Это измерители сопротивления, емкости, индуктивности, параметров микросхем, транзисторов, а также приборы для снятия частотных и переходных характеристик.

Третью группу составляют измерительные генераторы, являющиеся источниками сигналов различных амплитуды, формы и частоты.

К четвертой группе относятся такие элементы измерительных схем, как преобразователи, аттенюаторы, циркуляторы, фазовращатели, направленные ответвители и т.д.

Цифровым измерительным прибором (ЦИП) называется средство измерений, автоматически вырабатывающее дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

По конструктивному исполнению измерительные приборы подразделяются на показывающие и регистрирующие.

Показывающий измерительный прибор — устройство, допускающее только считывание показаний оператором.

Регистрирующий измерительный прибор — прибор, в котором предусмотрена регистрация показаний.

По принципу действия измерительные приборы подразделяются на ряд классов, перечисленных ниже:

измерительные приборы прямого действия — в них предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, т.е. без применения цепей обратной связи, например амперметры, вольтметры;

измерительные приборы сравнения — предназначены для непосредственного сравнения измеряемой величины с известной величиной, например электроизмерительный потенциометр;

интегрирующие измерительные приборы — устройства, в которых измеряемая величина интегрируется по времени или по другой независимой переменной, например электрический счетчик энергии;

суммирующие измерительные приборы — приборы, показания которых функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к ним по различным каналам, например ваттметр для измерения суммы мощностей нескольких электрических генераторов.

Измерительные приборы характеризуются следующими основными показателями.

Диапазон измерений — область значений измеряемой величины, для которой нормированы допустимые погрешности измерительного прибора (средства измерений).

Диапазон показаний — размеченная область шкалы, ограниченная ее начальным и конечным значениями, т.е. указанными на ней наименьшим x_{\min} и наибольшим x_{\max} возможными значениями измеряемой величины (этот диапазон может быть шире диапазона измерений).

Предел измерений — наибольшее значение измеряемой величины.

Область рабочих частот (диапазон частот) — полоса частот, в пределах которой погрешность прибора, полученная при изменении частоты сигнала, не превышает допустимого предела.

Цена деления шкалы — разность значений измеряемой величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Чувствительность (S) по измеряемому параметру — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему его изменению измеряемой величины. Чувствительность подразделяется на абсолютную, относительную и предельную.

Абсолютную чувствительность можно рассчитать по формуле

$$S_a = \frac{\Delta y}{\Delta x},$$

где Δy — изменение сигнала на выходе; Δx — изменение измеряемой величины.

Относительная чувствительность определяется следующим образом:

$$S_{\text{отн}} = \frac{\Delta y / (\Delta x)}{x},$$

где x — измеряемая величина.

Предельная чувствительность (по напряжению, току или мощности) — это минимальная величина исследуемого сигнала (напряжения, тока или мощности), подаваемого на вход прибора, которая необходима для получения отсчета с погрешностью, не превосходящей допустимой.

Разрешающая способность — минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, которая может быть различима с помощью прибора.

Порог реагирования (чувствительности) — изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение показаний, обнаруживаемое наблюдателем при нормальном для данного прибора способе отсчета.

Вариация показаний — средняя разность между показаниями прибора, соответствующими данной точке диапазона измерений, при двух направлениях медленного многократного изменения измеряемой величины. Показанием называется значение измеряемой величины, определяемое по отсчетному устройству прибора и выраженное в принятых единицах этой величины. Вариация характеризует, насколько устойчиво повторяются показания прибора при измерениях одних и тех же значений величин.

Время установления показаний (время успокоения) — промежуток времени, прошедший с момента изменения измеряемой величины до момента установления показаний. Для аналоговых приборов момент установления показаний определяется моментом, когда амплитуда колебаний указателя становится не больше чем погрешность прибора.

Погрешности измерительного прибора (инструментальные погрешности) оказывают существенное влияние на точность измерения физической величины.

1.9. Погрешности измерений

С 1 января 2001 г. постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии (Госстандарта России) от 17.05.2000 № 139 введены в действие Рекомендации РМГ 29—99 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения». Рекомендации разработаны взамен ранее действующего ГОСТ 16863—70 и являются фактически межгосударственным стандартом, принятым во всех странах СНГ.

В указанных Рекомендациях, в частности, узаконены основные термины и определения, касающиеся погрешностей измерений и средств измерений. Далее приводятся наиболее часто используемые термины и определения погрешностей, установленные в Рекомендациях.

Погрешность результата измерений — это отклонение результата измерений от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях. На практике используют действительное значение величины x_d . Абсолютную погрешность измерения определяют по следующей формуле:

$$\Delta x_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} - x_d,$$

где $x_{\text{изм}}$ — измеренное значение величины.

Синонимом термина «погрешность измерения» является термин «ошибка измерения», применять который не рекомендуется.

Систематическая погрешность измерений — это составляющая погрешности результата измерений, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же физической величины. В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют:

- на постоянные;
- прогрессивные;
- периодические;
- погрешности, изменяющиеся по сложному закону.

К *постоянным* относятся погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто.

Прогрессивными являются непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности

вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

Периодические погрешности представляют собой погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

Инструментальная погрешность измерений — составляющая погрешности измерений, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

Погрешность метода измерений — составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений. Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Погрешность метода также называют теоретической погрешностью. Иногда погрешность метода может проявляться как случайная.

Субъективная погрешность измерений — составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора. Встречаются операторы, которые систематически опаздывают снимать отсчеты показаний средств измерений или опережают сроки снятия показателей. Иногда субъективную погрешность называют личной погрешностью или личной разностью.

Случайная погрешность измерений — составляющая погрешности результата измерений, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины.

Абсолютная погрешность измерений — погрешность измерений, выраженная в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность измерений — погрешность измерений, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины. Относительную погрешность в долях или процентах, %, находят из отношений

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \text{ или } \delta = \frac{\Delta x}{x} 100,$$

где Δx — абсолютная погрешность измерений; x — действительное или измеренное значение величины.

Рассеяние результатов в ряду измерений — это несовпадение результатов измерений одной и той же величины в ряду равно-

точных измерений, как правило, обусловленное действием случайных погрешностей.

Количественную оценку рассеяния результатов в ряду измерений вследствие действия случайных погрешностей обычно получают после введения поправок на действие систематических погрешностей. Оценками рассеяния результатов в ряду измерений могут быть: размах, средняя арифметическая погрешность (по модулю), средняя квадратичная погрешность или стандартное отклонение (среднее квадратичное отклонение, экспериментальное среднее квадратичное отклонение), доверительные границы погрешности (доверительная граница или доверительная погрешность).

Размах результатов измерений представляет собой оценку R_n рассеяния результатов единичных измерений физической величины, образующих ряд (или выборку из n измерений), вычисляемую по формуле

$$R_n = x_{\max} - x_{\min},$$

где x_{\max} и x_{\min} — наибольшее и наименьшее значения физической величины в данном ряду измерений соответственно.

Рассеяние обычно обусловлено проявлением случайных причин при измерении и носит вероятностный характер.

Средняя квадратичная погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений — это оценка рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения, определяемая по следующей формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n}},$$

где N — общее число измерений; x_i — результат одного единичного измерения; \bar{x} — среднее арифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов.

На практике широко распространен термин «среднее квадратичное отклонение». Под отклонением в соответствии с формулой, приведенной ранее понимают отклонение единичных результатов в ряду измерений от их среднего значения. В метрологии это отклонение называется погрешностью измерений.

Доверительные границы погрешности результата измерений представляют собой наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений. Доверительные границы по-

грешности в случае нормального закона распределения вычисляются по формуле $(\pm tS, \pm tS_x)$. Показатели S, S_x являются средними квадратичными погрешностями соответственно единичного и среднего арифметического результатов измерений; t — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и числа измерений n .

Поправка — это значение величины, вводимое в неисправленный результат измерений для исключения составляющих систематической погрешности. Знак поправки противоположен знаку погрешности. Поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют поправкой к значению меры, а поправку, вводимую в показание измерительного прибора, — поправкой к показанию прибора.

Точность результата измерений является одной из характеристик качества измерений, отражающей близость к нулю погрешности результата измерений. Чем меньше погрешность измерений, тем больше их точность.

Статическая погрешность измерений — погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения.

Динамическая погрешность измерений — погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения.

Промах — погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Иногда вместо термина «промах» применяют термин «грубая погрешность измерений».

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятия основной и производной физических величин.
2. Что представляет собой Международная система единиц?
3. Дайте определения терминам «измерение», «объект измерения», «метод и средства измерений».
4. Каковы основные виды и методы измерений?
5. Какое назначение имеют различные виды эталонов и как организована передача размеров от эталонов к рабочим ИП?
6. Что такое эталоны единиц: силы электрического тока, времени и частоты?
7. Дайте определение понятию «средства измерений» и приведите его классификацию.
8. Как классифицируются и какими показателями характеризуются ИП?
9. Каковы основные задачи поверки средств измерений и российской системы калибровки средств измерений?

Лабораторная работа № 1 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Ознакомление с правилами пользования мостами постоянного тока, определение чувствительности мостовой схемы и выбор наиболее выгоднейших параметров моста, измерение сопротивлений средней величины, измерение малых сопротивлений методом двух отсчетов и двойным мостом.

Основные сведения

Одинарные мосты постоянного тока

В схеме простого (одинарного моста), составленного из резисторов $R1...R4$, каждая ветвь сопротивлений между двумя узлами называется *плечом моста* (рис. 1.1). Плечи, имеющие общие узлы, называются *смежными*, а не имеющие общих узлов — *противоположными*.

Ветвь, соединяющая узлы c и d и в которую включен гальванометр Γ , называется *измерительной диагональю*, а соединяющая узлы a и b — *диагональю источника питания* U_n .

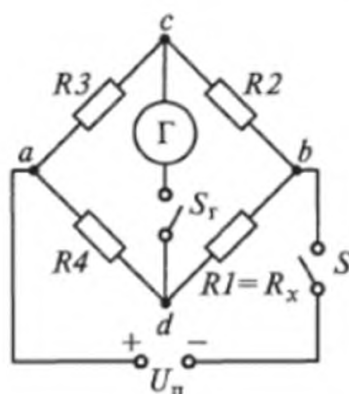


Рис. 1.1. Принципиальная схема одинарного моста

Такая схема имеет следующие основные свойства:

- 1) при соблюдении попарного равенства произведений противоположных плеч в измерительной диагонали ток отсутствует;
- 2) при соблюдении п. 1 общее токораспределение не нарушается, если диагональ cd будет изменять свое сопротивление от 0 до ∞ ;
- 3) равновесие моста не нарушается, если диагональ источника и измерительную диагональ поменять местами.

Измерение средних сопротивлений

Измерение средних сопротивлений, т.е. сопротивлений значительно превосходящих сопротивления контактов и соединительных проводов, производится по схеме одинарного моста (см. рис. 1.1). Условие равновесия моста, т.е. отсутствие тока в измерительной диагонали моста, наиболее просто определяется методом эквивалентного генератора. Ток в измерительной диагонали моста I_{Γ} вычисляют по следующей формуле:

$$I_{\Gamma} = \frac{E_3}{R_3 + R_{\Gamma}} = \frac{U(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_3 + R_{\Gamma})(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}, \quad (1.1)$$

где E_3 — ЭДС эквивалентного генератора; R_3 — внутреннее сопротивление эквивалентного генератора; R_{Γ} — сопротивление гальванометра.

Изменением сопротивления одного из плеч моста, например R_2 , можно добиться того, что разность в числителе правой части уравнения (1.1) будет равна нулю, т.е.

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (1.2)$$

При этом $I_{\Gamma} = 0$. Такое состояние моста называется *равновесием*, а признаком его является отсутствие тока в гальванометре. Из уравнения (1.2) можно рассчитать одно неизвестное сопротивление плеча моста (например, $R_1 = R_x$):

$$R_x = R_2 \frac{R_4}{R_3}.$$

Привести мост в состояние равновесия можно двумя способами:

- 1) оставляя неизменным отношение плеч R_4/R_3 , изменять R_2 ;
- 2) оставляя неизменным плечо R_2 , менять отношение плеч R_4/R_3 .

Мост, на котором измерение производится по первому способу, называется *магазинным*. Мост для измерения по второму способу называется *линейным*, или *реохордным*.

Чувствительность моста

Важным свойством моста, характеризующим его эксплуатационные качества, является *чувствительность* моста S_m , под которой понимается изменение тока ΔI_r в диагонали указателя равновесия, приходящееся на единицу относительного изменения сопротивления плеча моста, или иначе отношение отклонения указателя нуля (гальванометра) на $\Delta\alpha$ к процентному изменению со-

противления какого-либо плеча $\frac{\Delta R}{R} 100 \%$:

$$S_m = \frac{\Delta\alpha}{\frac{\Delta R}{R} 100 \%}$$

Понятие чувствительности моста следует отличать от понятия порога чувствительности моста.

Порогом чувствительности называют то наибольшее изменение сопротивления плеча, при котором отклонения гальванометра столь малы, что глаз не способен их заметить (область нулевых отклонений).

Чувствительность моста зависит от многих факторов: чувствительности гальванометра и его сопротивления, сопротивлений плеч моста и измеряемого сопротивления, источника питания и его сопротивления.

Применяя метод эквивалентного генератора, можно вывести формулу чувствительности моста:

$$S_m = \frac{\Delta\alpha}{\frac{\Delta R}{R} 100 \%} = \frac{U_n S_i q}{(R_3 + R_r)(1 + q)^2 100 \%},$$

где U_n — напряжение источника питания; S_i — чувствительность гальванометра по току; q — отношение смежных плеч моста,

$$q = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}.$$

Эта формула показывает, что чувствительность моста при данных напряжениях источника питания U_n и чувствительности гальванометра S_i зависят от отношения сопротивлений смежных плеч моста q , расположенных по обе стороны от измерительной диаго-

нали, от сопротивления эквивалентного генератора R_g и сопротивления гальванометра R_g .

Наилучшая чувствительность моста соответствует наибольшему значению выражения

$$S_m = \frac{q}{(1+q)^2}.$$

Исследуя это выражение на максимум, находим, что при $q = 1$, т.е. когда $R_1 = R_4$, $R_2 = R_3$ чувствительность моста будет наилучшей, чувствительность также повышается с уменьшением R_g . Наименьшее R_g определяется значением внешнего критического сопротивления гальванометра.

Измерение малых сопротивлений

Измерение малых сопротивлений, т.е. сопротивлений, соизмеримых с сопротивлениями соединительных проводов и переходными сопротивлениями контактов, производится на специальных мостах.

При измерении малых сопротивлений необходимо, чтобы независимо от метода измерений сопротивления соединительных проводов и контактов не входили в измерительную схему последовательно с малыми сопротивлениями. Это условие обеспечивается применением сопротивлений, имеющих две пары зажимов: токовые и потенциальные.

На рис. 1.2 дана схема измерения при помощи вольтметра V и амперметра A малого сопротивления R с четырьмя зажимами: двумя токовыми (I_1 и I_2) и двумя потенциальными (U_1 и U_2). Переходные сопротивления контактов в этой схеме не влияют на результат измерения, так как сопротивления токовых зажимов I_1 и I_2 не входят в измерительную схему, а переходные сопротивления зажимов U_1 и U_2 входят последовательно с большим сопротивлением вольтметра и не могут исказить результата измерения.

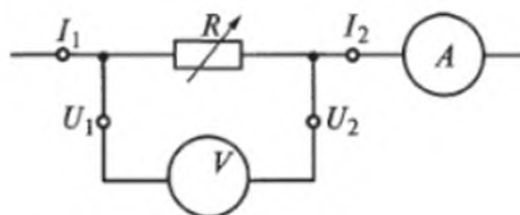


Рис. 1.2. Схема измерения сопротивления при помощи вольтметра и амперметра

Измерение малого сопротивления методом двойного отсчета

Измерение малого сопротивления методом двойного отсчета производится на одинарном мосте (рис. 1.3). В этой схеме два малых сопротивления R_x и R_0 соединяются медной шиной y большего сечения. Для повышения чувствительности моста необходимо параллельно источнику питания U_n включить плечи с сопротивлением одного порядка: $R_0 \approx R_x$ и $R_3 \approx R_4$. Последовательно с R_x и R_0 в измерительную схему входит сопротивление y , состоящее из сопротивления соединительной шины и сопротивления токовых контактов I_2 и I_3 . Для учета этого сопротивления необходимо уравновесить мост при двух различных схемах включения зеркального (ГЗ) и стрелочного (ГС) гальванометров. Если переключатель S_2 находится в положении 1, то равновесие моста запишется уравнением

$$(R_x + y) R_3 = R_0 R_4. \quad (1.3)$$

При положении 2 имеем

$$R_x R_3 = (R_0 + y) R_4. \quad (1.4)$$

Решая уравнения (1.3) и (1.4) с двумя неизвестными, можно найти сопротивления R_x и y .

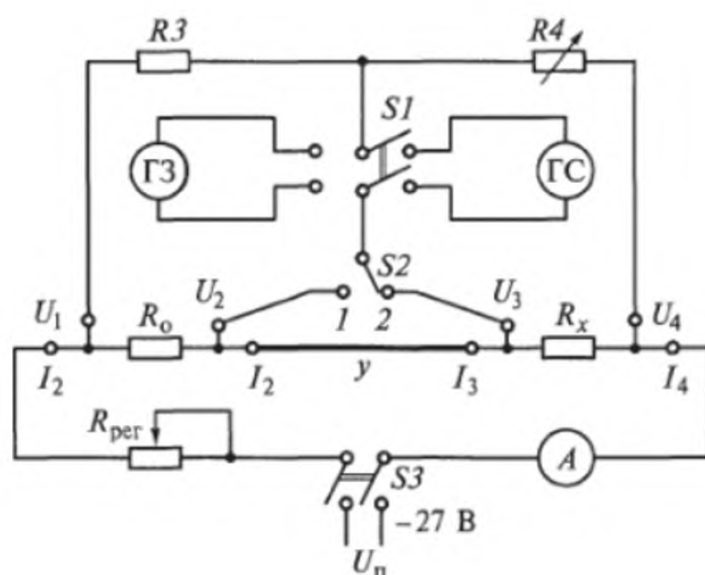


Рис. 1.3. Схема для измерения малых сопротивлений методом двойного отсчета

Измерение малого сопротивления двойным мостом

Двойной мост дает возможность измерить малое сопротивление путем одного уравнивания моста, таким образом упрощается измерение. На рис. 1.4 приведена схема двойного моста, которая имеет дополнительные плечи — резисторы $R1'$ и $R2'$.

Теория моста показывает, что неизвестное сопротивление может быть точно определено по следующей формуле:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_o + y \frac{R_1 R'_2 - R_2 R'_1}{R_2 (R'_2 + R'_1 + y)}.$$

Если при измерении соблюдают равенства $R_1 = R'_1$ и $R_2 = R'_2$, то числитель дополнительного слагаемого близок к нулю и для технических расчетов можно с достаточной точностью пользоваться формулой

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_o.$$

Так как приведение к нулю разности $R_1 R'_2 - R_2 R'_1$ потребовало бы высокой точности подгонки сопротивлений, а практически это осуществить нельзя, то второй множитель дополнительного слагаемого u должен быть достаточно мал, т. е. сопротивление u следует выполнять проводом большего поперечного сечения.

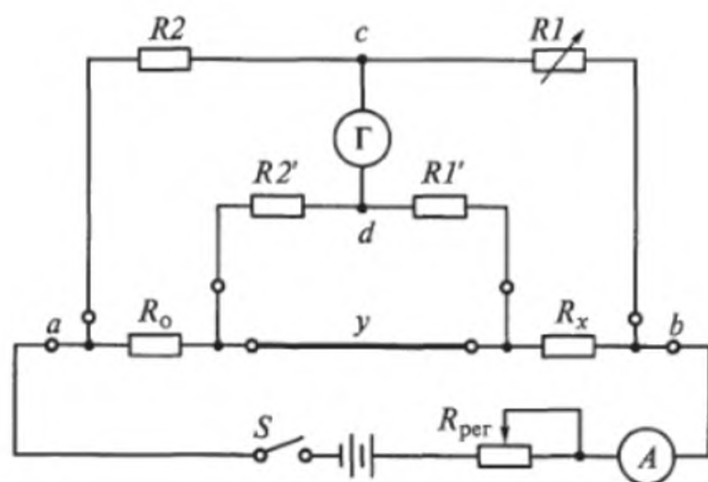


Рис. 1.4. Принципиальная схема двойного моста с дополнительными плечами

Методика выполнения работы

Комбинированная схема одинарного и двойного моста

На данном приборе сопротивления свыше 100 Ом измеряются по схеме одинарного моста (рис. 1.5).

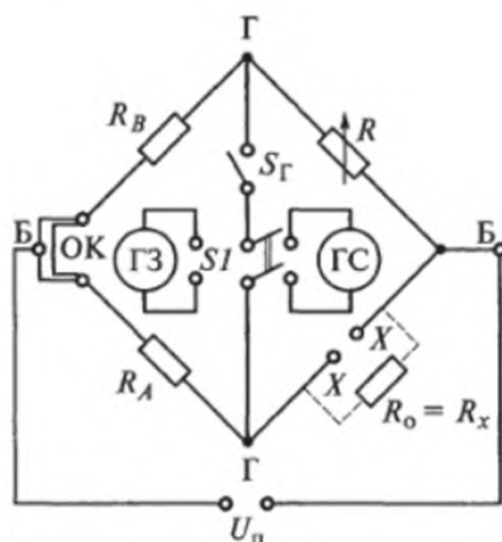


Рис. 1.5. Упрощенная принципиальная схема одинарного моста

Сопротивление меньше 100 Ом измеряется по схеме двойного моста (рис. 1.6). Здесь включение сопротивлений образцовых катушки R_{OK} и R_x в измерительную часть схемы осуществляется при помощи калиброванных проводов 1...4, что повышает точность измерения.

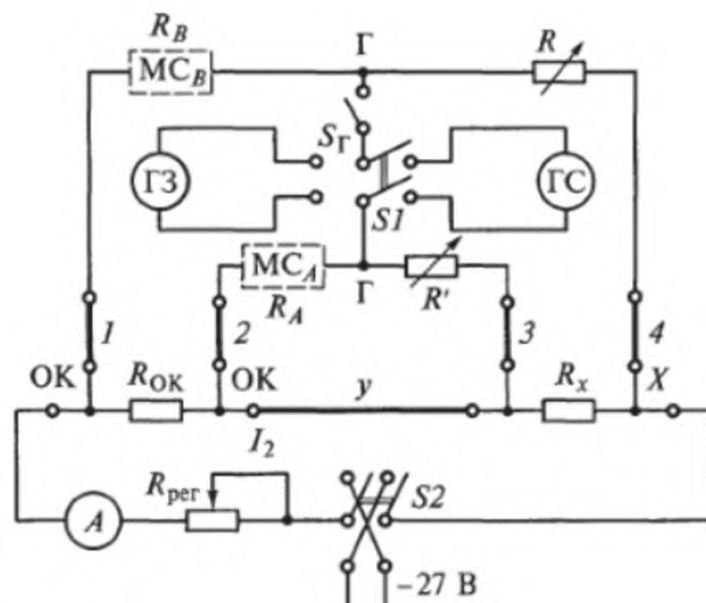


Рис. 1.6. Упрощенная принципиальная схема двойного моста

Определение условия наивысшей чувствительности схемы одинарного моста

1. Соберите схему одинарного моста (см. рис. 1.5):
 - а) к зажимам Г присоедините переключатель SI ;
 - б) с зажимов ОК и Х снимите соединительные калиброванные провода 1... 4 (см. рис. 1.6);
 - в) на зажимы ОК поставьте перемычку;
 - г) к зажиму Б на перемычке и правому зажиму Х (см. рис. 1.5), соединенному с правым зажимом Б, присоедините источник питания (не более 7 В);
 - д) к зажимам Х присоедините образцовый резистор $R_o = R_x = 1\,000\text{ Ом}$.
2. Определите условие наилучшей чувствительности одинарного моста:
 - а) установите в плече моста сопротивление $R_A = 10\text{ Ом}$;
 - б) установите в плече В моста сопротивление $R_B = 10\text{ Ом}$;
 - в) в плече R установите сопротивление, определенное из уравнения

$$R_x = \frac{R_A}{R_B} R; \quad (1.5)$$

г) переключатель SI поставьте в положение ГС. Включите выключатель S_r гальванометра и убедитесь, что он не дает отклонения;

д) измените сопротивление плеча R на $\Delta R = 1\%$, отметьте и запишите в табл. 1.1 отклонение гальванометра $\Delta\alpha$.

Если отклонение $\Delta\alpha$, вызванное изменением R на 1%, оказалось менее одного деления, увеличьте R на 2...3%;

Таблица 1.1

№ п/п	$R_o = R_x$, Ом	R_A , Ом	R_B , Ом	R_A/R_B , Ом	R , Ом	ΔR , Ом	$\Delta\alpha$, град	$\frac{\Delta R}{R} 100\%$	$S_m = \frac{\Delta\alpha R}{\Delta R \cdot 100\%}$
1	1 000	10	10	1					
2	1 000	100	100	1					
3	1 000	1 000	1 000	1					
4	1 000	10 000	10 000	1					
5	1 000	100	10	10					
6	1 000	1 000	100	10					
7	1 000	10 000	1 000	10					

е) последовательно установите в плечах A и B сопротивления согласно табл. 1.1. При каждом значении сопротивлений плеч повторите пп. 2 в, г, д.

3. Вычислите чувствительность для каждого случая. Сравните данные опыта с данными теории.

Измерение сопротивления на одинарном мосте

1. Присоедините к зажимам X по указанию преподавателя измеряемое сопротивление R_x .

2. Установите отношение плеч R_A и R_B равным единице и уравновесьте мост переменным резистором R , определив таким образом предварительное значение измеряемого сопротивления.

3. Определите более точное значение сопротивления, для чего в плече A установите сопротивление R_A одного порядка с сопротивлением R_x .

4. Соответственно формуле равновесия моста (1.5) выберите такое значение R_B , при котором R получит наибольшее значение в пределах до 1 000 Ом.

5. Установите определенные таким образом предварительные значения R_A и R_B .

6. Изменяя сопротивление R , уравновесьте мост. Запишите значение сопротивления R в табл. 1.2.

Таблица 1.2

№ п/п	R_A , Ом	R_B , Ом	R_A/R_B	R , Ом	R_x , Ом

Измерение сопротивления шунта на двойном мосте

1. Для обеспечения наилучшей чувствительности моста подберите сопротивление R_{OK} , наиболее близко подходящее по значению к измеряемому сопротивлению пункта R_x . Для этого предварительно рассчитайте измеряемое сопротивление шунта по его данным (напряжению и току).

2. Соберите схему двойного моста (см. рис. 1.6):

а) снимите перемычку с зажимов ОК. Подключите зажимы ОК соединительными калиброванными проводами к потенциальным зажимам образцовой катушки R_{OK} , а зажимы X — к потенциальным зажимам измеряемого шунта R_x ;

б) соедините последовательно сопротивления R_{OK} , R_x , регулировочный реостат $R_{рег}$, амперметр A , переключатель $S2$. Сопротивления R_{OK} и R_x соедините толстой медной шиной y .

Таблица 1.3

№ п/п	R_{OK} , Ом	R_B , Ом	R , Ом	R_x , Ом	$\delta_{ш}$, %

3. Измерьте сопротивление шунта:

а) исходя из условия равновесия моста

$$R_x = R_{OK} \frac{R}{R_B},$$

по данным R_x и R_{OK} выберите такое значение R_B , при котором R будет максимальным. Вычислите R и установите его значение на мосте;

б) подключите переключатели магазинов сопротивлений MC_A и MC_B так, чтобы соблюдалось равенство $R_A = R_B$;

в) поставьте переключатель $S1$ в положение ГС;

г) замкните переключатель цепи питания $S2$ и установите реостатом $R_{рег}$ ток 4...5 А. Включите S_1 и, изменяя сопротивление плеча R , добейтесь отсутствия тока в гальванометре;

д) переведите переключатель $S1$ в положение ГЗ и изменением десятых и сотых долей ома в плече R добейтесь отсутствия тока в ГЗ. Значение R запишите в табл. 1.3;

е) для устранения влияний, имеющих место в схеме термоэлектродвижущих сил, на точность измерения измените направление тока, проходящего через измеряемое сопротивление и ОК, и уравновесьте мост еще раз. Измеряемое сопротивление определите как среднее арифметическое значение двух измерений;

ж) вычислите относительную погрешность измерения сопротивления шунта по следующей формуле:

$$\delta_{ш} = \frac{R_n - R_x}{R_n} 100 \%,$$

где R_n — номинальное значение сопротивления шунта, определяющееся по току и напряжению, указанным на шунте; R_x — действительное значение измеренного сопротивления шунта.

Контрольные вопросы

1. При равенстве каких плеч чувствительность моста будет наилучшей, если гальванометр включить в диагональ ab , а аккумулятор — в диагональ cd ?

2. Каким образом удастся устранить влияние сопротивления соединительных контактов на результат измерения малых сопротивлений?

3. Почему соединительный провод между R_0 и R_x должен быть малого сопротивления?
4. Для чего рекомендуется измерять малое сопротивление при двух направлениях тока?
5. Почему нельзя измерять малое сопротивление на простом одинарном мосте путем одного уравнивания?
6. Почему при измерении малых сопротивлений в схему вводят два гальванометра (стрелочный и зеркальный)?
7. Что такое чувствительность моста (определение)?
8. От каких параметров зависит чувствительность моста?
9. Что такое порог чувствительности моста (определение)?
10. Что такое плечо сравнения?
11. Каково назначение токовых и потенциальных зажимов?
12. Каким условиям должен удовлетворять материал образцовых сопротивлений?
13. Почему необходимо точно выполнять указания о полярности зажимов при включении источника питания? Когда целесообразно изменить полярность источника питания?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И ЕМКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы

Измерение индуктивности, емкости и взаимной индуктивности при помощи мостов переменного тока.

Основные сведения

Теория простого моста

Схему простого моста переменного тока можно представить в виде четырех полных сопротивлений (рис. 2.1), соединенных в замкнутый четырехполюсник, в одну из диагоналей которого введен источник переменного тока U , а в другую — чувствительный указатель переменного тока с сопротивлением Z_{Γ} .

Равновесие моста будет иметь место при следующем условии:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4. \quad (2.1)$$

Если значения полных сопротивлений даны в показательной форме, то

$$Z_1 X_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 X_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}.$$

Уравнение равновесия распадается на два уравнения: для модулей:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4;$$

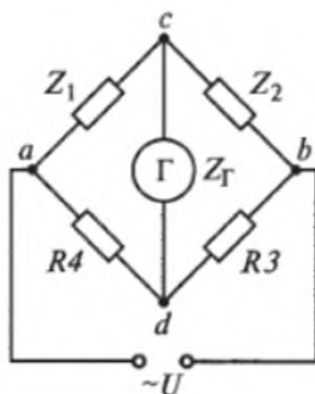


Рис. 2.1. Принципиальная схема моста переменного тока

уравнение для фазовых углов:

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4.$$

С помощью этих двух уравнений равновесия всегда можно правильно выбрать схему моста и найти выражения для определения неизвестных R , L , C и M .

Мосты переменного тока могут применяться также для определения угла потерь в диэлектрике и в ферромагнитных сердечниках, а также для измерения частоты переменного тока и др. Обычно выбирают схему так, чтобы в нее входило наименьшее число реактивных сопротивлений. В настоящей работе рассматриваются частотно-независимые мосты, т.е. мосты, равновесие которых не зависит от частоты питающего напряжения.

Если в уравнении (2.1) записать полные сопротивления в комплексном виде:

$$(R_1 + jX_1)(R_3 + jX_3) = (R_2 + jX_2)(R_4 + jX_4) \quad (2.2)$$

и раскрыть скобки, то получим:

$$R_1R_3 - X_1X_3 = R_2R_4 - X_2X_4;$$

$$R_1X_3 + R_3X_1 = R_2X_4 + R_4X_2.$$

Если мост собран для сравнения реактивных (искомого X_1 и известного X_2) сопротивлений, целесообразно два других плеча Z_3 и Z_4 сделать чисто активными.

Процесс уравнивания моста переменного тока состоит в последовательном и многократном изменении параметров до тех пор, пока разность потенциалов на концах измерительной диагонали не будет равна нулю. Минимальное число необходимых для уравнивания моста последовательных регулировок характеризует свойство, называемое *сходимостью*.

Мост для сравнения постоянных индуктивностей

Этот наиболее простой мост (рис. 2.2) характеризуется введением между сравниваемыми индуктивностями L_x и L_o переменного резистора R , который переключателем S может быть включен или в плечо L_x , или в плечо L_o .

Два смежных плеча моста Z_3 и Z_4 выполняются в виде двух активных сопротивлений R_3 и R_4 из калиброванной проволоки, сопротивление которой движком D делится на два плеча:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{AD}{DB} = \frac{a}{b}.$$

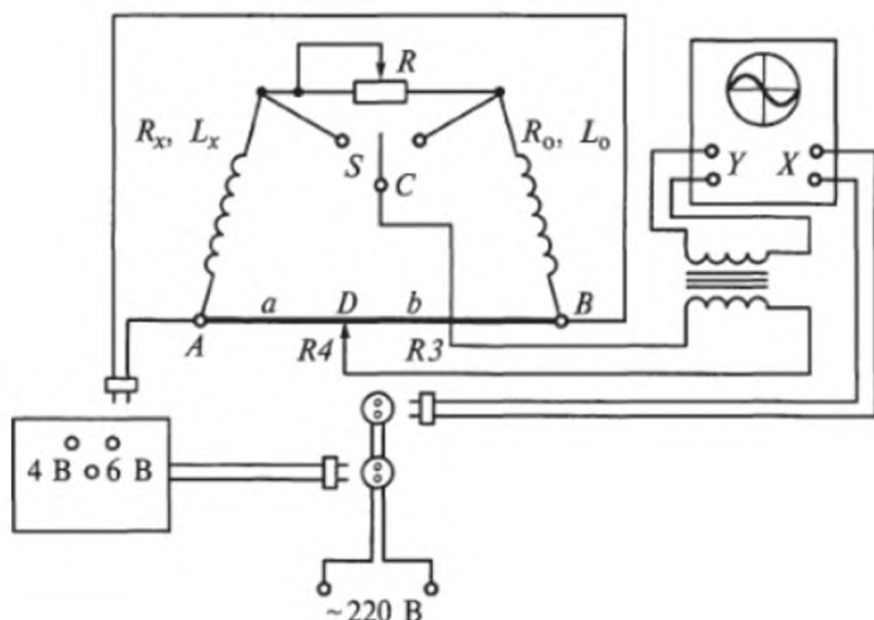


Рис. 2.2. Схема для измерения индуктивности

Общее условие равновесия моста (2.2) в данном случае (если переменный резистор R введен в плечо L_x) принимает следующий вид:

$$(R_x + R + j\omega L_x)R_3 = (R_0 + j\omega L_0)R_4.$$

Это уравнение распадается на два:

$$\begin{aligned} L_x R_3 &= L_0 R_4; \\ (R_x + R)R_3 &= R_0 R_4. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Если переменный резистор R введен в плечо L_0 , то последнее уравнение примет вид

$$R_x R_2 = (R_0 + R)R_5. \quad (2.4)$$

Для выполнения двух условий равновесия необходимо изменение двух параметров. В схеме с постоянными L_0 и L_x переменными являются отношение R_4/R_3 и переменное сопротивление R , включаемое последовательно с сопротивлением R_0 или R_x .

При помощи этого моста можно измерить взаимную индуктивность между двумя катушками. Для этого измеряют индуктивность двух последовательно соединенных катушек при встречном (рис. 2.3, а) и согласном (рис. 2.3, б) включении обмоток. В первом случае индуктивность обеих катушек

$$L' = L_1 + L_2 + 2M_{12},$$

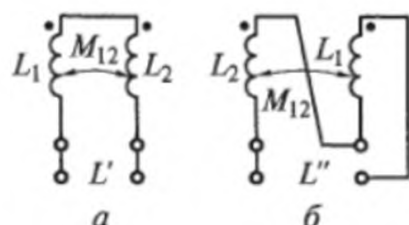


Рис. 2.3. Соединение обмоток:

a — встречное; *б* — согласное

а во втором

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M_{12},$$

где L_1 и L_2 — индуктивности первой и второй катушек взаимной индуктивности; M_{12} — взаимная индуктивность этих катушек.

Вычитая из первого равенства второе, получим

$$M_{12} = \frac{L' - L''}{4}. \quad (2.5)$$

Мост для измерения емкостей

Простой мост для сравнения неизвестной емкости с образцовой представлен на рис. 2.4, *a*. Из условия равновесия этого моста следует, что при сравнении двух емкостей два смежных плеча Z_1 и Z_4 должны содержать емкости, а два других — активные сопро-

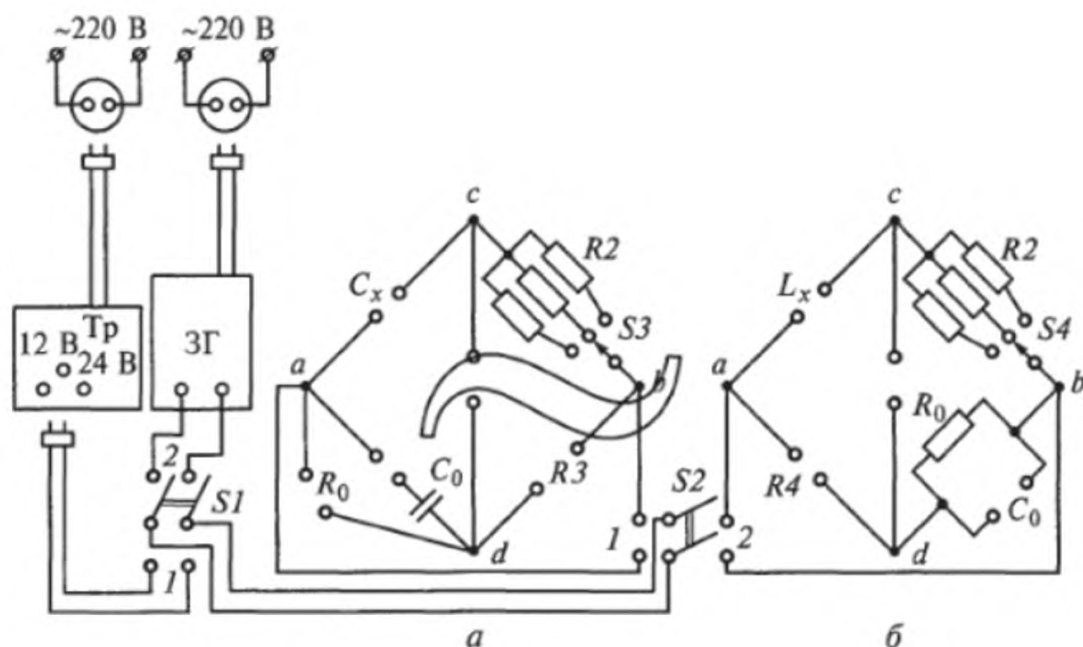


Рис. 2.4. Схемы мостов переменного тока:

a — для измерения емкости конденсатора; *б* — для измерения индуктивности катушек

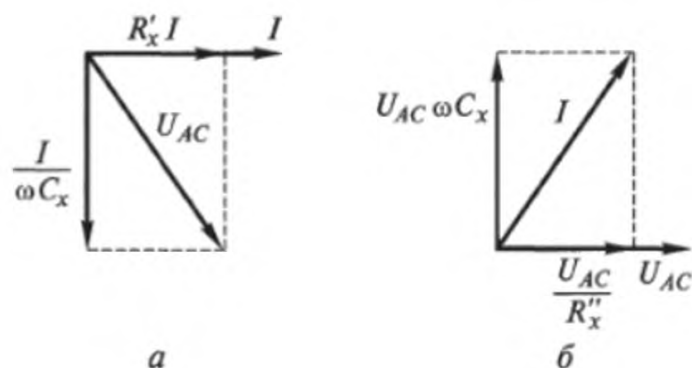


Рис. 2.5. Векторные диаграммы для схем замещения конденсатора:
 а — последовательное соединение конденсатора и резистора; б — параллельное
 соединение конденсатора и резистора

тивления. Для того чтобы правильно выбрать схему плеча сравнения, необходимо представить эквивалентную схему замещения измеряемого конденсатора. Известны две эквивалентные схемы замещения: последовательная и параллельная. Обе схемы образованы путем соответствующего соединения идеального конденсатора C_x и сопротивления R_x , эквивалентного потерям в диэлектрике.

Таким образом, если принята последовательная схема замещения измеряемого конденсатора, то и плечо сравнения Z_4 должно быть образовано путем последовательного соединения образцового конденсатора C_0 и резистора R_0 . В случае параллельной схемы замещения конденсатора C_x плечо сравнения Z_4 должно быть представлено параллельной схемой включения C_0 и R_0 .

Определение угла потерь δ_x и емкости неизвестного конденсатора C_x может быть произведено следующим образом:

а) разложение вектора напряжения (рис. 2.5, а) на активную и реактивную составляющие дает последовательное соединение емкости C_x и сопротивления R'_x , эквивалентного потерям;

б) разложение вектора тока (рис. 2.5, б) на активную и реактивную составляющие дает параллельное соединение конденсатора C_x и резистора R''_x , эквивалентного потерям:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega R'_x C_x;$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{\omega R''_x C_x}.$$

Отношение соответствующих сопротивлений

$$R'_x = \frac{\operatorname{tg} \delta_x}{\omega C_x} \text{ и } R''_x = \frac{1}{\omega C_x \operatorname{tg} \delta_x}$$

дает возможность определить кратность резисторов R'_x и R''_x :

$$\frac{R''_x}{R'_x} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta_x} = K.$$

Так как угол диэлектрических потерь δ_x очень мал (порядка $1 \dots 3^\circ$), то величина R очень велика.

Согласно двум эквивалентным схемам конденсатора с потерями для уравнивания моста необходимо ввести в плечо C_0 переменный резистор R_0 последовательно или параллельно. Для параллельного включения требуется сопротивление порядка миллионов ом, поэтому применяется схема замещения с последовательным соединением R_0 относительно C_0 . Уравнение равновесия для последовательной схемы имеет следующий вид:

$$\left(R'_x - \frac{j}{\omega C_x} \right) R_3 = \left(R_0 - \frac{j}{\omega C_0} \right) R_4.$$

Оно распадается на два:

$$R'_x = R_0 \frac{R_4}{R_3} \quad \text{и} \quad C_x = C_0 \frac{R_3}{R_4},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega R'_x C_x = \omega R_0 C_0.$$

Мост должен иметь два регулируемых сопротивления R_0 и R_3 (см. рис. 2.4). Если измеряемый конденсатор не имеет потерь, то сопротивление R_0 может быть выведено из схемы моста, так как соответствующее эквивалентное сопротивление R'_x также равно нулю.

Мост для измерения индуктивностей

Мост для сравнения индуктивности с емкостью представлен на рис. 2.4, б. Условия равновесия моста определяются из общего уравнения (2.2).

Согласно схеме (см. рис. 2.4) уравнение (2.1) примет следующий вид:

$$(R_x + j\omega L_x) R_0 = R_2 R_4 (1 + j\omega C_0 R_0).$$

Это уравнение распадается на два:

$$R_x = \frac{R_2 R_4}{R_0};$$

$$L_x = C_0 R_2 R_4,$$

откуда

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega R_3 C_0.$$

Выполнение условий равновесия осуществляется регулировкой емкостей C_0 и сопротивлений R_0 . Сходимость моста при этом наилучшая.

Универсальный мост

Измерительная часть прибора представляет собой четырехплечевой мост (рис. 2.6). Переключая соответствующим образом плечи моста, получают три основные измерительные схемы для измерения индуктивности L , емкости C и сопротивления R (рис. 2.7, 2.8 и 2.9).

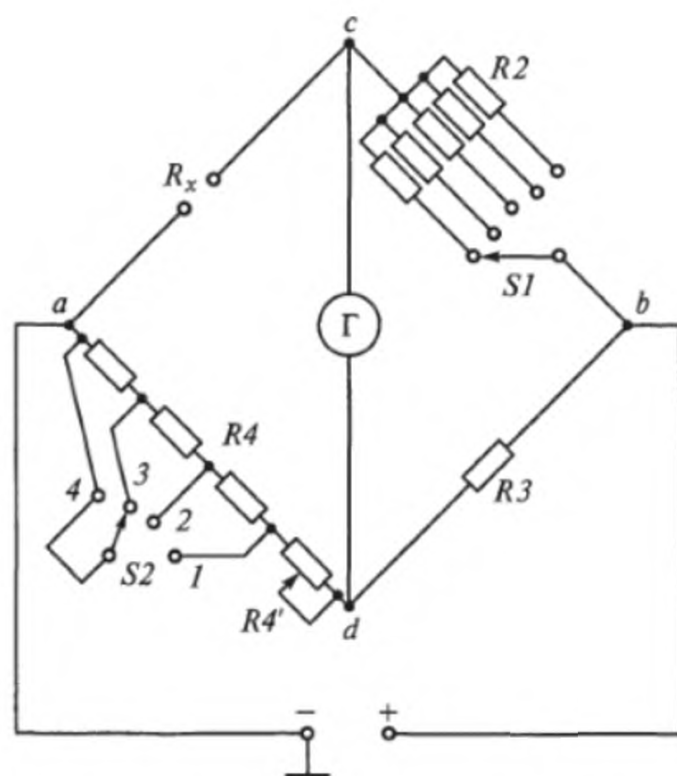


Рис. 2.6. Мост для измерения сопротивления резистора

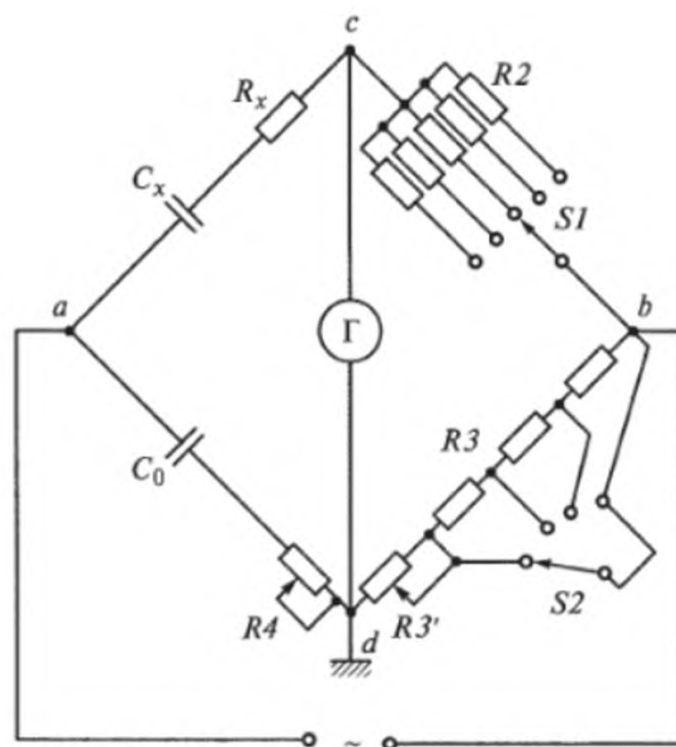


Рис. 2.7. Мост для измерения емкости конденсатора

При измерении сопротивлений плечи моста представляют собой активные сопротивления. При определении емкостей и индуктивностей два из четырех плеч моста являются комплексными.

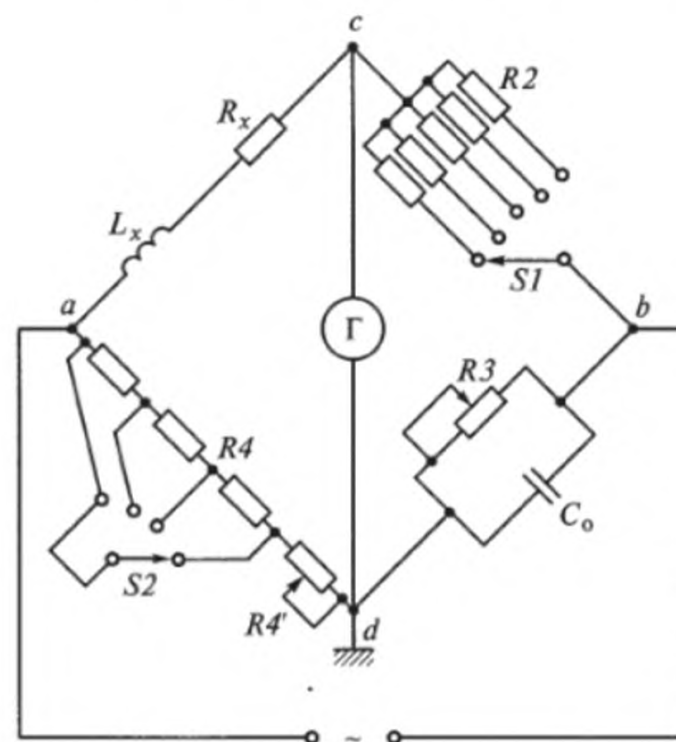


Рис. 2.8. Мост для измерения индуктивности катушки при добротности меньше 30

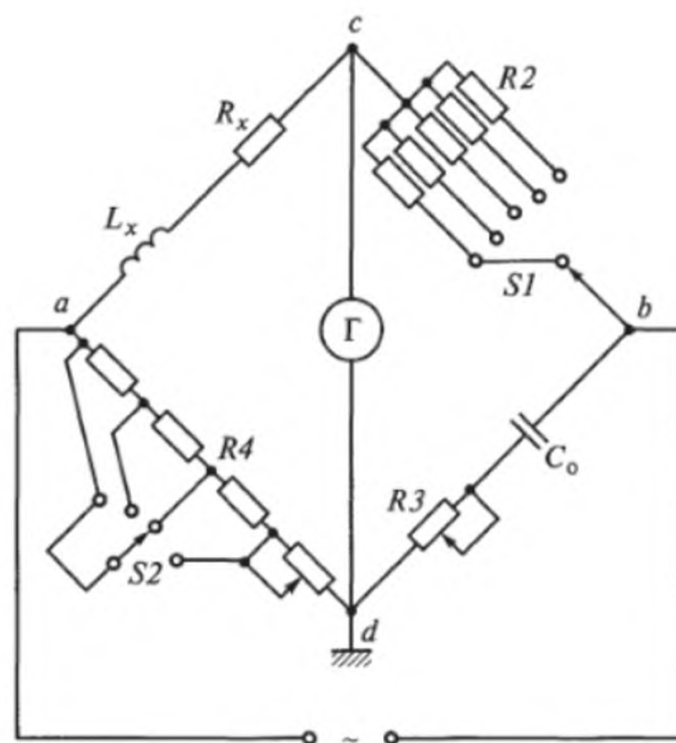


Рис. 2.9. Мост для измерения индуктивности катушки при добротности больше 30

Все три моста имеют одно и то же отсчетное плечо R_2 , что дает возможность сделать для прибора единое отсчетное устройство при измерении R , C и L . Плечо переключения поддиапазонов R_4 также является единым для всех мостов.

Мосты индуктивности и емкости отличаются друг от друга тем, что компенсация сдвига фаз находится у них в разных плечах (изменение схемы достигается простой коммутацией моста), и тем, что компенсация сдвига фаз для моста емкостей осуществляется плечом с последовательным соединением емкости и фазирующего сопротивления, а для моста индуктивности при измерении катушек с добротностью до 30 — плечом с параллельным соединением емкости и фазирующего сопротивления. При измерении катушек с добротностью выше 30 применяется схема последовательного соединения емкости и фазирующего сопротивления.

Питание моста осуществляется переменным током частотой 100 или 1 000 Гц или постоянным током (для моста сопротивлений). При пользовании внешним генератором выход его присоединяется к зажимам прибора «Внешний генератор».

При измерении сопротивлений равновесие достигается регулировкой переключателей $S1$ и $S2$. При определении емкостей и индуктивностей равновесие моста достигается регулировкой переключателей $S1$ и $S2$ и переменными сопротивлениями R_4 (см. рис. 2.7) и R_3 (см. рис. 2.8, 2.9).

Мост собран по блочной системе. В соответствии с этим его полная схема содержит блоки: а) моста; б) генератора; в) индикатора

равновесия моста; г) выпрямителя для питания генератора и индикатора генератор и выпрямитель на схемах не показаны).

Мост для измерения сопротивлений

При измерении сопротивлений применяется схема одинарного четырехплечевого моста постоянного тока (см. рис. 2.6). Чтобы обеспечить широкий диапазон измерений от 0,1 до 5 Ом, весь диапазон разбивается на семь поддиапазонов, которые могут меняться переключателем *SI* (на схеме рис. 2.6 показано пять). Плечом сравнения (третьим плечом) служит постоянное сопротивление $R_3 = 1\,000\text{ Ом}$. Четвертое плечо состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений: плавного (до 1 130 Ом) и ступенчатого (четыре ступени по 1 000 Ом).

Из условия равновесия этого моста можно определить величину измеряемого сопротивления:

$$R_x = \frac{R_2 R_4}{R_3}.$$

Измеряемое сопротивление R_x включается в первое плечо. Напряжение питания моста подводится к точкам *a* и *b* от выпрямителя, находящего в блоке генератора. Регулировка напряжения питания производится в блоке генератора.

На выходной диагонали моста включен вибропреобразователь, служащий для преобразования постоянного тока в переменный частотой 100 Гц, который поступает на вход усилителя индикатора равновесия.

Мост для измерения емкостей

В первое плечо моста для измерения емкостей включается измеряемая емкость (см. рис. 2.7). Второе плечо R_2 остается тем же, что и в мосте постоянного тока. Третье плечо является отсчетным для величины емкости и тоже остается таким же, как четвертое плечо в мосте постоянного тока. Четвертое плечо служит для компенсации сдвига фаз при наличии потерь. Последовательно с сопротивлением включается емкость 0,1 мкФ при работе моста на частоте 1 000 Гц или 1 мкФ при работе моста на частоте 100 Гц. Из условия равновесия при измерении емкости:

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_2};$$
$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_4 R_4.$$

Напряжение подается от встроенного генератора с симметричным выходом с частотой 100 или 1 000 Гц. Его можно регулировать. К выходной диагонали подключен индикатор.

Переключение частоты генератора, измерительных цепей индикатора и образцовых емкостей в четвертом плече моста производится ручкой в блоке генератора.

Мост для измерения индуктивностей

Принципиальные схемы мостов для измерения индуктивностей приведены на рис. 2.8, 2.9. Схема, показанная на рис. 2.8, применяется при измерении индуктивностей, имеющих добротность менее 30. Она почти совпадает со схемой моста для измерения емкости, но четвертое плечо становится третьим, а третье плечо четвертым и переменный резистор R_3 сопротивлением 49 000 Ом присоединяется параллельно образцовой емкости. Подача напряжения и все коммутации осуществляются точно таким же образом, как и в мосте емкостей. Из условия равновесия при измерении индуктивностей, если $Q < 30$:

$$L_x = R_2 C_3 R_4;$$

$$Q = \omega C_3 R_3.$$

Для измерения индуктивностей с $Q > 30$ применяется схема последовательного соединения R_3 и C (см. рис. 2.9). Отсчет производится по шкале «tg δ » в измерительном блоке, а добротность определяется следующим образом:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_x}.$$

Методика выполнения работы

Измерение индуктивности с помощью моста по схеме на рис. 2.2; 2.3

1. Измерьте индуктивность на мосте с постоянной L_0 :
 - а) соберите схему по рис. 2.2;
 - б) поставьте переключатель S в одно из крайних положений при $R = 0$;
 - в) включите осциллограф и автотрансформатор в сеть. Тумблер осциллографа поставьте в положение «Вкл.» (при этом должна загореться сигнальная лампа);
 - г) включите вилку питания моста в гнезда автотрансформатора на напряжение 4...5 В и ручками «Яркость» и «Фокусировка», а

Таблица 2.1

№ п/п	R_0 , Ом	L_0 , Гн	a , мм	a/b	R , Ом	R_x , Ом	L_x , Гн	M , Гн	$\text{tg}\delta$

также ручками вертикального и горизонтального отклонения луча получите на экране яркую тонкую горизонтальную линию, совместив ее с диаметром экрана: при этом ручка «Вертикальное усиление» осциллографа должна находиться в крайнем левом положении;

д) вращением по часовой стрелке ручки «Вертикальное усиление» получите на экране синусоиду и ручкой «Диапазон развертки» превратите изображение синусоиды в светящуюся полосу шириной 2...3 см;

е) перемещением движка резистора R добейтесь наименьшей ширины полосы;

ж) дальнейшее уменьшение ширины полосы производите изменением сопротивления R ; если при плавном увеличении сопротивления R амплитуда тока будет увеличиваться, включите сопротивление R в другое плечо моста, переводя переключатель S в другое крайнее положение;

з) после достижения второго минимума амплитуды перейдите на регулировку движком D ;

и) повторяя пп. 1 ж, з и доведя вертикальное усиление осциллографа до максимума, добейтесь полного равновесия моста;

к) запишите в табл. 2.1 значения R и R_4 (удобнее, не вычисляя R_4 , записывать положение движка D в миллиметрах шкалы), соответствующие полному равновесию моста.

Произведите подобным же образом измерение индуктивности второй катушки;

л) вычислите значения L_x и R_x по формулам (2.3) и (2.4).

2. Измерьте взаимную индуктивность катушек методом двух измерений:

а) соедините две катушки взаимной индуктивности последовательно в соответствии с рис. 2.3 и измерьте индуктивность L' системы двух катушек, как указано в пп. 1, е—к;

б) поменяйте местами провода на зажимах одной из обмоток взаимной индуктивности (т.е. измените направление тока в одной из катушек) и измерьте новое значение индуктивности системы катушек L'' ;

в) запишите данные опыта в табл. 2.1 и вычислите L' и L'' для первого и второго случаев;

г) вычислите взаимную индуктивность по формуле (2.5).

Измерение емкости и индуктивности с помощью моста по схеме на рис. 2.4

1. Ознакомьтесь со схемами мостов переменного тока для измерения емкости конденсаторов и индуктивности катушек (см. рис. 2.4).

2. Произведите измерение емкости и угла потерь конденсатора на промышленной частоте:

а) подключите к схеме моста для измерения C_x переменные сопротивления R_3 и R_0 . При включении R_0 обратите внимание на схему включения его в четвертое плечо моста;

б) поставьте ручку «Чувствительность» гальванометра в нулевое положение и включите его в диагональ моста. Подайте питание 220 В на осветитель гальванометра;

в) подготовьте схему моста для измерения C_x . Для этого переключатели $S1$ и $S2$ поставьте в положение 1 и переключатель $S3$ — в положение, соответствующее измеряемому конденсатору;

г) включите вилку питания моста в гнезда автотрансформатора на напряжение 6 В;

д) ознакомьтесь с работой гальванометра, его органами управления и настройкой в резонанс. Настройку гальванометра в резонанс производите перед выполнением п. 2 е, для чего совместно с преподавателем убедитесь в правильности его настройки;

е) поставьте ручку «Чувствительность» гальванометра в положение, при котором ширина световой полосы будет занимать 10...40 делений шкалы прибора;

ж) поочередно регулируя высокоомные декады переменных сопротивлений R_3 и R_0 , предварительно уравновесьте мост. При равновесии моста световая полоса на гальванометре должна занимать 1...3 деления;

з) повышая степенями чувствительность гальванометра до максимума, добейтесь регулировкой низкоомных декад переменных сопротивлений R_3 и R_0 полного (точного) равновесия моста;

и) по окончании работы отключите схему от источника питания автотрансформатора, а ручку «Чувствительность» гальванометра вновь поставьте в нулевое положение;

к) результаты измерения занесите в табл. 2.2. Вычислите емкость и угол потерь измеряемого конденсатора.

Таблица 2.2

№ п/п	f , Гц	C_0 , мкФ	R_0 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_x , Ом	L_x , Гн	C_x , мкФ	$\text{tg} \delta$

3. Произведите измерение емкости конденсатора и угла потерь на звуковой частоте (см. рис. 2.4):

а) ознакомьтесь с органами управления звукового генератора (ЗГ) и осциллографа;

б) включите в диагональ моста в качестве нуль-индикатора осциллограф;

в) переведите питание моста на ЗГ, при этом переключатель *S1* поставьте в положение 2. Установите ручку «Амплитуда выхода» ЗГ на нулевую отметку, ручки осциллографа «Ослабление» — в положение «1:1» и ручку «Вертикальное усиление» — в положение «0»;

г) включите генератор и осциллограф в сеть;

д) поставьте переключатель *S3* в положение, соответствующее измеряемому конденсатору;

е) медленно повышая чувствительность осциллографа и напряжение питания до максимума, добейтесь полного равновесия моста поочередным регулированием переменных сопротивлений R_0 и R_3 .

Равновесие моста, как и в случае моста с постоянной L , определяйте по уменьшению светящейся полосы на экране осциллографа;

ж) по окончании работы ручки управления осциллографом и генератором поставьте в исходные положения;

з) результаты измерений занесите в табл. 2.2. Вычислите емкость C_x и угол потерь δ_x измеряемого конденсатора.

4. Произведите измерение индуктивности L_x и добротности Q неизвестной катушки на промышленной частоте:

а) подготовьте схему моста измерений L_x . Для этого переключатель *S1* поставьте в положение 1, переключатель *S2* — в положение 2, а переключатель *S3* — в положение, соответствующее измеряемой индуктивности;

б) подключите к схеме моста переменные сопротивления и емкости R_4 и C_0 ;

в) включите в схему моста гальванометр;

г) подайте питание 220 В на осветитель гальванометра и питание 6 В с автотрансформатора на мост. При включении вилки питания моста ручка «Чувствительность» гальванометра должна стоять в нулевом положении;

д) выполняя последовательно пп. 2 е—и, добейтесь полного равновесия моста; при выполнении этих пунктов уравнива-

Таблица 2.3

№ п/п	f , Гц	C_0 , мкФ	R_0 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_x , Ом	L_x , Гн	Q

ние моста осуществляйте регулировкой переменных сопротивлений R_4 и емкостей C_0 ;

е) результаты измерений занесите в табл. 2.3 и вычислите индуктивность L_x и Q неизвестной катушки.

5. Произведите измерение L_x на звуковой частоте:

а) выполните пп. 3 а—г;

б) поставьте переключатель $S3$ в положение, соответствующее измеряемой индуктивности;

в) уравновесьте мост на звуковой частоте, для чего последовательно выполните п. 3 е. Уравновешивание моста осуществляйте регулировкой переменных сопротивлений R_0 и емкостей C_0 ;

г) результаты измерений занесите в табл. 2.3. Вычислите индуктивность L_x и Q неизвестной катушки.

Измерение сопротивлений с помощью универсального моста

1. Установите переключатель «Вид измерения» в положение C или L (см. рис. 2.6) и стрелку прибора на нуль поворотом ручки переменного резистора «Уст. нуля» (на схеме не показано).

2. Поставьте переключатель «Вид измерения» (на схеме не показано) в положение R . Соответственно в окошке моста появится цифра множителя и наименование единицы измерения.

3. Ручкой «Рег. напряжения» (переменное сопротивление R'_4 в составе R_4) установите стрелку прибора в интервале между 80 и 100 делениями шкалы прибора.

4. Переключатель $S1$ поверните так, чтобы в окне отсчетного устройства появилась цифра 1. Регулировкой R'_4 установите стрелку на шкале плавной регулировкой на деление 0,5.

5. Поворотом ручки переключателя $S1$ найдите положение, когда прибор дает минимальное показание.

6. Ручками, объединенными надписью «Отсчет» (переключателем $S2$ и переменным сопротивлением R'_4), уравновесьте мост, т. е. добейтесь наименьшего показания на указателе равновесия.

7. Произведите отсчет измеренной величины сопротивления. Измеренная величина сопротивления равна сумме отсчетов по диску переключателя и по шкале переменного резистора, умноженной на соответствующий множитель.

Измерение емкости с помощью универсального моста

1. Установите переключатель «Вид измерения» в положение C .

2. Поставьте переключатель $Q - \operatorname{tg} \delta$ в положение $\operatorname{tg} \delta$ (на схеме не показано).

3. Поворотом ручки переменного резистора «Уст. нуля» установите стрелку прибора на нуль.

4. Ручкой «Рег. напряжения» (переменное сопротивление R'_3 в составе R_3) поставьте стрелку прибора в интервале между 80 и 100 делениями шкалы прибора (см. рис. 2.7).

5. Переключателем $S1$ установите в окне отсчетного устройства цифру 1, а переключатель $S2$ поставьте в положение 0,002...0,005.

6. Поворотом ручки переключателя $S1$ найдите положение, когда стрелка прибора дает минимальное показание.

7. Ручками, объединенными надписью «Отсчет» (переключатель $S2$), а также ручкой переменного сопротивления R_4 отсчета тангенса угла уравновесьте мост, добейтесь наименьшего показания на указателе равновесия.

8. Произведите отсчет измеренной величины емкости и тангенса угла потерь. Измеренная величина емкости равна сумме отсчетов (по диску переключателя и шкале потенциометра), умноженной на соответствующий множитель.

Измеренную величину тангенса угла потерь отсчитывайте непосредственно по шкале «tgδ». При измерении малых тангенсов угла потерь (меньше 0,01) прибор обеспечивает точность измерения без использования сумматора для уравнивания моста.

При измерениях на частоте 100 Гц отсчет емкости дополнительно умножается на 10.

Измерение индуктивности с помощью универсального моста

1. Установите переключатель «Вид измерения» в положение L .

2. Установите переключатель « $Q - \text{tg}\delta$ » в положение Q для катушек с $Q < 30$ или в положение $\text{tg}\delta$ для катушек с $Q > 30$.

3. Поворотом ручки переменного сопротивления «Уст. нуля» установите стрелку прибора на нуль.

4. Ручкой «Рег. напряжения» (R'_4) поставьте стрелку прибора на шкале делений от 80 до 100 (см. рис. 2.8).

5. Переключателем $S1$ установите в окне отсчетного устройства цифру 1; переменным сопротивлением R'_4 поставьте на шкале плавной регулировки деление 0,5. Диск отсчета добротности установите примерно на шкале делений от 12 до 15.

6. Поворотом ручки переключателя $S1$ найдите положение, когда стрелка прибора дает минимальное показание.

7. Ручками, объединенными надписью «Отсчет» (переключателем $S2$), а также ручкой переменного сопротивления R'_4 отсчета добротности или тангенса угла потерь уравновесьте мост, т. е. добейтесь наименьшего показания на указателе равновесия.

Отсчет величины индуктивности равен сумме отсчета (по диску переключателя и шкале переменного сопротивления), умноженной на соответствующий множитель.

Отсчет добротности производите по шкале « Q » при $Q < 30$ или по шкале « $\text{tg}\delta$ » при $Q > 30$, тогда

$$Q = \frac{1}{\text{tg}\delta_x}.$$

При измерении сопротивлений и емкостей для повышения точности отсчета можно увеличить чувствительность прибора ручкой «Рег. напряжения». При измерении индуктивности катушек, имеющих ферромагнитные сердечники, повышать чувствительность не рекомендуется, так как при этом меняется индуктивность катушек.

Контрольные вопросы

1. Каково общее условие равновесия моста и в чем состоит его отличие от условия равновесия моста постоянного тока?
2. Чем отличаются в схемном отношении мосты для измерения индуктивности, емкости и других параметров электрических цепей?
3. Как осуществляется уравнивание мостов переменного тока и как изображается процесс уравнивания на топографической диаграмме?
4. Какие параметры электрической цепи позволяют измерять универсальный мост?
5. Какие измерительные приборы применяются в качестве нуль-индикаторов, каков их принцип действия?
6. Каково основное отличие частотно-независимых мостов от частотно-зависимых? Изобразите схемы этих мостов.
7. Какие существуют схемы замещения конденсатора с потерями и как составляется плечо сравнения?
8. В чем заключается особенность мостов с прямым отсчетом измеряемых величин?
9. Что такое сходимость моста?

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Ознакомление с компенсационным методом измерения электрических величин в цепях постоянного тока.

Основные сведения

Компенсационный метод основан на уравнивании (компенсации) неизвестной разности потенциалов падением напряжения на образцовом сопротивлении, по которому проходит известный ток. Применяя этот метод, необходимо установить рабочий ток $I_{\text{раб}}$, проходящий по образцовому сопротивлению, при помощи нормального элемента (НЭ).

Сущность компенсационного метода может быть пояснена по принципиальной схеме (рис. 3.1). Нормальный элемент и напряжение вспомогательной батареи (ВБ) включаются встречно так, что при регулировке сопротивления R на образцовом сопротивлении R_o создается падение напряжения, равное E_o , но противоположной полярности. В результате этого гальванометр Γ , включенный переключателем S в положение 1, покажет нуль. Если сопротивление R_o выбрано строго определенным и достаточно высокого класса точности, то в верхнем контуре будет протекать строго определенный рабочий ток. Так как НЭ проверяется с достаточно высокой точностью и его ЭДС известна при заданных температур-

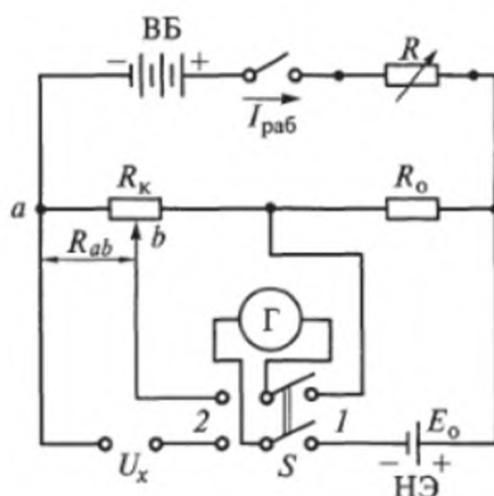


Рис. 3.1. Принципиальная схема компенсатора постоянного тока

ных условиях, то рабочий ток также может быть установлен точно, если гальванометр при этом будет иметь высокую чувствительность.

При нулевом токе в гальванометре справедливо выражение

$$E_0 = I_{\text{раб}} R_0,$$

откуда

$$I_{\text{раб}} = \frac{E_0}{R_0}.$$

В работе с компенсатором задают $I_{\text{раб}} = 0,0001$ А и, исходя из ЭДС E_0 , подбирают соответствующее значение R_0 .

Для измерения U_x переключатель гальванометра S ставят в положение 2 и, перемещая движок компенсационного резистора R_k , добиваются нуля на гальванометре. Так как при этом общее сопротивление в верхнем контуре остается неизменным, то и рабочий ток сохраняет ранее установленное значение. Перемещение движка на резисторе R_k позволяет на участке ab получить падение напряжения $U_{ab} = I_{\text{раб}} R_{ab}$, равное искомому U_x , но противоположное по знаку. Таким образом,

$$U_x = I_{\text{раб}} R_{ab}.$$

Потенциометр постоянного тока (рис. 3.2) предназначен для измерения неизвестных напряжений компенсационным методом. Он состоит из устройства для регулировки рабочего тока (резисторы $R1...R4$), устройства для компенсации неизвестного напряжения (резисторы $R5...R9$), защитного резистора $R10$, высокочувствительного гальванометра и коммутирующих цепей для ввода в потенциометр ЭДС НЭ или неизвестного напряжения.

На потенциометре можно скомпенсировать неизвестное напряжение не выше 1,2 В. Для расширения пределов измерений потенциометр снабжен прецизионным делителем напряжения (ДН). Устройство для регулировки рабочего тока потенциометра состоит из четырех декад: трех $R1...R3$ со ступенчатой регулировкой и одной $R4$ с плавной регулировкой. Устройство для компенсации ЭДС НЭ или неизвестного напряжения состоит из $R5$ и $R6$, включенных по схеме делителя и сдвоенных резисторов $R7...R9$. Перемещение движков $R5$ и $R6$ не может изменить рабочий ток, а применение сдвоенных резисторов $R7...R9$ позволяет находить необходимую для компенсации разность потенциалов путем перемещения их щеток. Если из схемы выключается часть какого-то сопротивления, то одновременно такое же сопротивление вводится в другое, парное с первым.

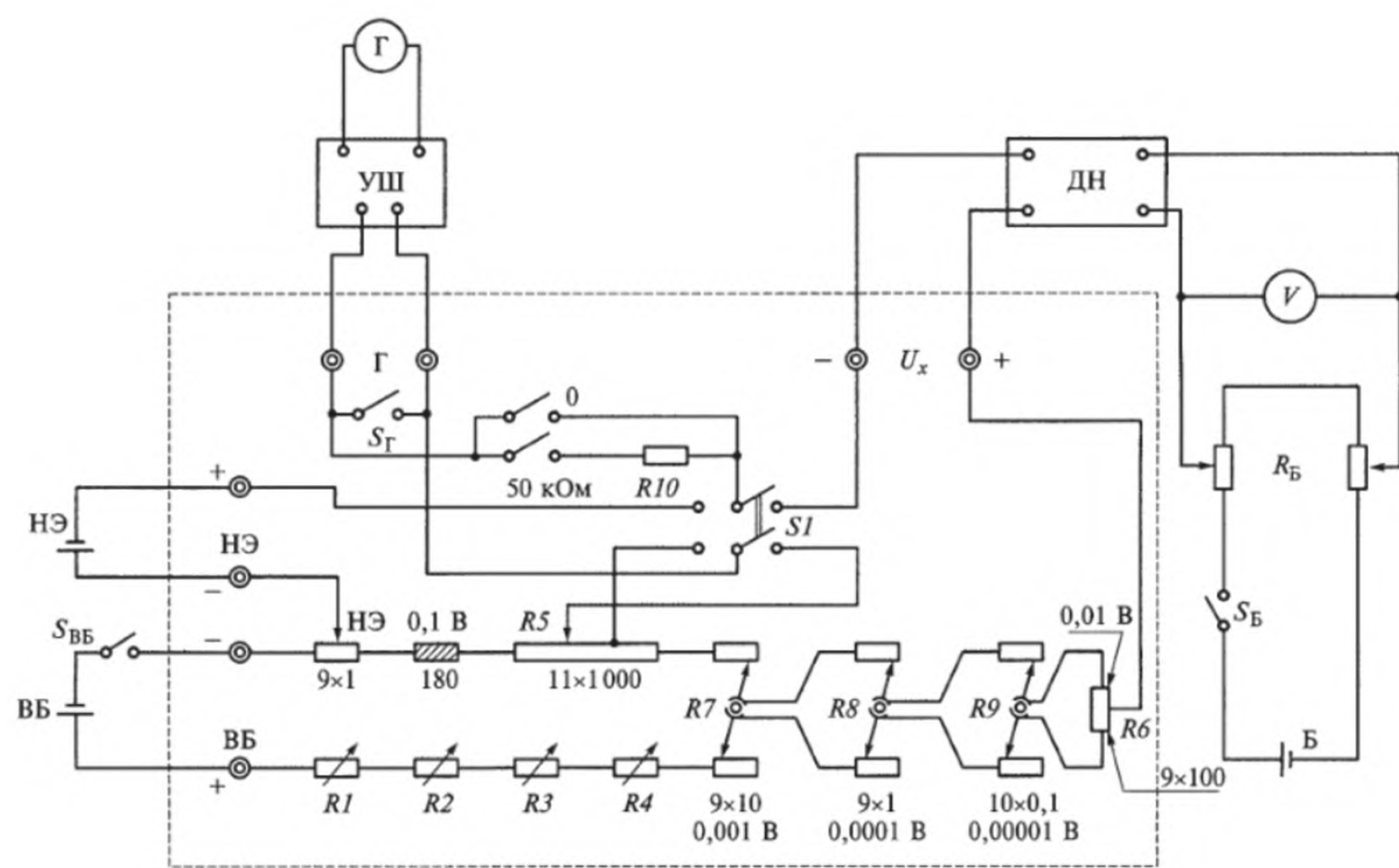


Рис. 3.2. Схема потенциометра — компенсатора постоянного тока типа ППТВ

Регулирующие резисторы, образующие двойные декады, включают в себя:

а) 11 ступеней по 0,1 В — декада I. Эта декада ($R5$) состоит из 11 резисторов по 1 000 Ом;

б) 9 ступеней по 0,01 В — декада II. Эта декада ($R6$) состоит из 9 резисторов по 100 Ом;

в) 9 ступеней по 0,001 В — декада III. Эта декада ($R7$) состоит из 9 сдвоенных резисторов по 10 Ом;

г) 9 ступеней по 0,0001 В — декада IV. Эта декада ($R8$) состоит из 9 сдвоенных резисторов по 1 Ом;

д) 10 ступеней по 0,00001 В — декада V. Эта декада ($R9$) состоит из 10 сдвоенных резисторов по 0,1 Ом.

В декаду I кроме 11 резисторов по 1 000 Ом введен резистор 180 Ом, который совместно с резисторами этой декады образует сопротивление 10 180 Ом, по величине численно равное ЭДС НЭ, умноженной на 10 000.

Декада в цепи НЭ (9 резисторов по 1 Ом) позволяет установить соответствие с последней цифрой номинала ЭДС НЭ и скомпенсировать температурную зависимость. При прохождении рабочего тока в 0,1 мА через эти резисторы падение напряжения на них уравнивает ЭДС НЭ. При помощи переключателя $S1$ гальванометр может быть включен либо в цепь НЭ, либо в цепь измеряемого напряжения U_x .

Потенциометр применяется главным образом для поверки на постоянном токе амперметров, вольтметров и ваттметров, а также для измерения сопротивлений. Под *поверкой* подразумевается ряд операций, имеющих целью установить соответствие измерительных приборов требованиям, предъявляемым к ним стандартами. Самой главной операцией поверки является определение погрешности и поправки прибора.

Поправкой ΔA называется разность, выраженная в единицах измеряемой величины:

$$\Delta A = A_d - A_n,$$

где A_d — действительное, или истинное, значение измеряемой величины; A_n — показание прибора.

Поправки прибора с несколькими пределами измерения определяются в делениях шкалы; для этого надо разделить ΔA на цену деления шкалы прибора.

Погрешность прибора выражается обычно в виде так называемой приведенной погрешности:

$$\delta = \frac{\Delta A_{\max}}{A_{\text{в.п}}},$$

где ΔA_{\max} — максимальная поправка; $A_{\text{в.п}}$ — верхний предел шкалы прибора.

Определение погрешности прибора при помощи потенциометра состоит из двух основных операций:

- 1) установления в потенциометре рабочего тока, равного 0,1 мА, путем компенсации ЭДС НЭ;
- 2) определения действительного значения измеряемой величины, соответствующей различным отметкам шкалы, путем компенсации падения напряжения на зажимах прибора.

Согласно стандарту по точности приборы подразделяются на классы: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,5; 2,5 и 4,0. Числа, обозначающие класс, указывают наибольшую приведенную погрешность, допустимую для данного класса прибора, выраженную в процентах.

Кроме погрешности и поправок прибора при поверке определяется вариация прибора, выраженная в процентах. *Вариацией показаний прибора* называется наибольшая разность между его показаниями, соответствующими одному и тому же действительному значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях и нескольких измерениях.

Методика выполнения работы

1. Соберите основную компенсационную схему (рис. 3.3) и вспомогательную (рис. 3.4).
2. Установите рабочий ток в основной компенсационной схеме 0,1 мА:

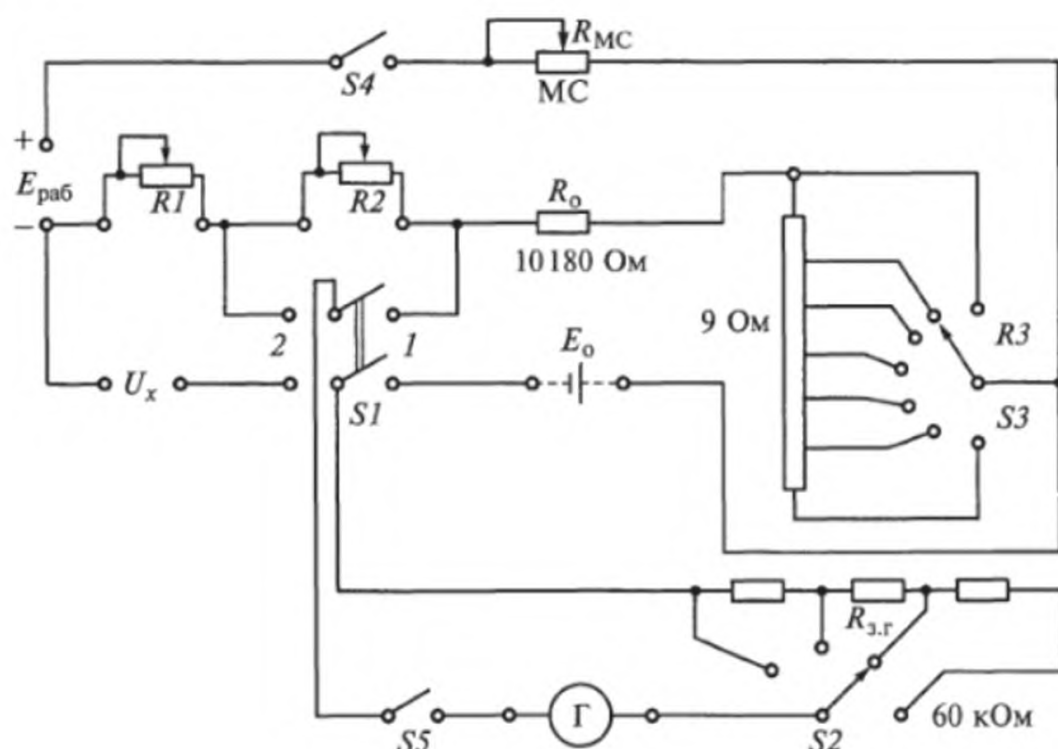


Рис. 3.3. Схема компенсационной установки

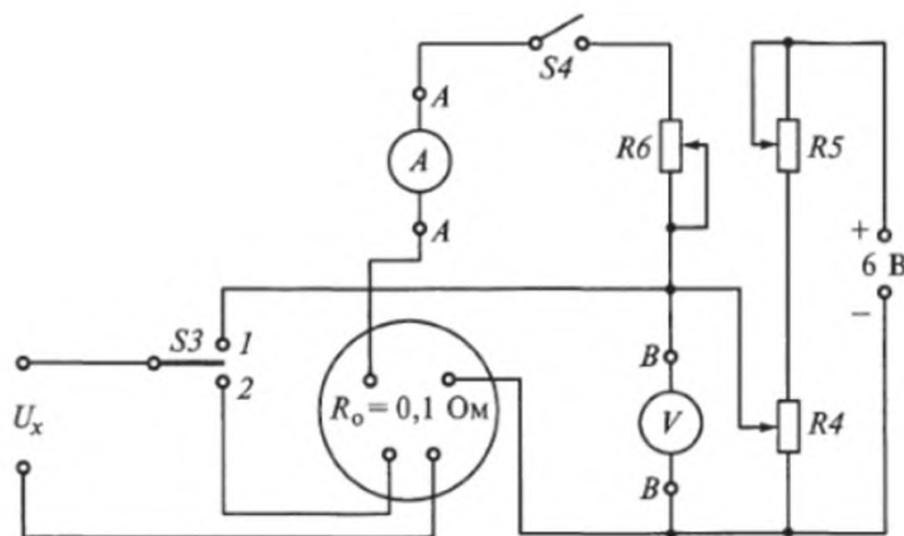


Рис. 3.4. Схема компенсационной установки для проверки амперметров и вольтметров

а) вычислите ЭДС НЭ для данной температуры t по формуле

$$E_t = E_{20} - 4 \cdot 10^{-5} (t - 20), \quad (3.1)$$

где E_{20} — ЭДС НЭ при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ (E_{20} обозначено на НЭ).

Установите с помощью переключателя $S1$ величину сопротивления R_3 такой, чтобы сумма сопротивлений $R_0 + R_3$ численно равнялась вычисленной E в вольтах, умноженной на 10 000;

б) установите переключатель $S1$ в положение 1 и с помощью выключателя $S4$ включите батарею $E_{\text{раб}}$;

в) поставьте переключатель $S2$ защитного сопротивления гальванометра $R_{\text{з.г}}$ на 60 кОм;

г) включите выключатель $S5$ и, изменяя сопротивление магазина $R_{\text{МС}}$ (МС), доведите ток в гальванометре Γ до минимума;

д) при разомкнутом выключателе $S5$ уменьшите величину защитного сопротивления. Замкните выключатель $S5$ и регулятором $R_{\text{МС}}$ снова доведите ток до минимума. Повторяя последовательно операции пп. 2 г и д, добейтесь компенсации при защитном сопротивлении $R_{\text{з.г}} = 0$.

3. Измерьте ЭДС НЭ:

а) подготовьте схему для измерения ЭДС (см. рис. 3.3), установив переключатель $S1$ в положение 2, а переключатель $S2$ вновь на защитное сопротивление 60 кОм;

б) замкните выключатель $S5$ и, изменяя сопротивление R_1 , добейтесь минимума тока в гальванометре. Для этого всякое изменение сопротивления R_1 компенсируйте равным изменением сопротивления R_2 . При разомкнутом выключателе $S5$ уменьшите величину защитного сопротивления. Изменив величины сопротивлений R_1 и R_2 , замкните выключатель $S5$ и снова добейтесь минимума тока.

Повторяя последовательно операции уравнивания, достигните полной компенсации при нулевом защитном сопротивлении;

в) запишите значение сопротивления R_1 и вычислите ЭДС НЭ.

4. Произведите поверку вольтметра компенсационным методом:

а) соедините зажимы U_x основной и вспомогательной схем, предварительно поставив переключатель $S2$ (см. рис. 3.3) на защитное сопротивление 60 кОм, а переключатель $S3$ (см. рис. 3.4) в положение 1. Движок переменного сопротивления R_4 переместите в нижнее положение;

б) проверьте установку стрелки вольтметра на нулевой отметке. При несоответствии с нулевой отметкой корректором установите стрелку вольтметра на нуль. Проверку производите при отключенном вольтметре;

в) подключите вольтметр к зажимам BB и установите с помощью реостата $R4$ стрелку прибора «Приблизительно» около максимальной отметки и дайте прогреться вольтметру в течение 5 мин;

г) проверьте рабочий ток в основной схеме. Для этого поставьте переключатель $S1$ в положение 1. При нажатии переключателя $S5$ и выключенном защитном сопротивлении стрелка гальванометра должна установиться на нулевой отметке. Если наблюдается отклонение, произведите регулировку рабочего тока с помощью переменного регулятора R_{MC} ;

д) переведите переключатель $S1$ (см. рис. 3.3) в положение 2 и регулировкой реостата $R5$ (см. рис. 3.4) установите стрелку вольтметра на максимальной отметке (точная регулировка). Поставьте переключатель $S2$ защитного сопротивления на 60 кОм;

е) скомпенсируйте напряжение на зажимах вольтметра по методике п. 3 б. Полученную величину сопротивления R_1 (см. рис. 3.3) запишите в протокол поверки вольтметра (табл. 3.1);

ж) произведите поверку вольтметра на оцифрованных делениях шкалы по указанию преподавателя. Результаты поверки занесите в табл. 3.1. После поверки выключите вольтметр из схемы;

з) обработайте результаты измерений. Вычислите поправку и погрешность вольтметра, его класс, а также постройте кривую поправок.

Таблица 3.1

№ п/п	Показания вольтметра		Сопротив- ление, R_1 , Ом	Действительное значение напряжения, В	Поправка, В	Погрешность, %
	дел	В				
1						
2						
3						

Таблица 3.2

№ п/п	Показания амперметра		Сопротивле- ние, Ом		Действительное значение тока, мА	Поправка, мА	Погреш- ность, %
	дел	мА	R_0	R_{01}			
1							
2							
3							

5. Произведите поверку амперметра:

а) вновь поставьте переключатель $S2$ (см. рис. 3.3) защитного сопротивления на 60 кОм, переключатель $S3$ (см. рис. 3.4) в положение 2, а движок реостата $R4$ переместите в нижнее положение;

б) включите амперметр к зажимам $A1$ вспомогательной схемы, движком реостата $R4$ установите стрелку амперметра приблизительно около максимальной отметки и дайте амперметру прогреться в течение 5 мин;

в) проверьте рабочий ток в основной схеме по п. 4 г;

г) переведите переключатель $S1$ в положение 2 и регулировкой реостатов $R4$ и $R6$ (см. рис. 3.4) добейтесь точной установки стрелки амперметра на максимальной отметке. Поставьте переключатель защитного сопротивления на 60 кОм;

д) скомпенсируйте падение напряжения на образцовом резисторе R_0 по методике п. 3 б. Полученную величину сопротивления R_1 запишите в протокол поверки амперметра (табл. 3.2);

е) произведите поверку амперметра на оцифрованных делениях или по указанию преподавателя;

ж) результаты поверки занесите в табл. 3.2;

з) обработайте результаты измерений. Вычислите поправку и погрешность амперметра, его класс, а также постройте кривую поправок.

Действительное значение показаний амперметра вычислите по следующей формуле:

$$I_d = \frac{U_0}{R_0} = I_{\text{раб}} \frac{R_{01}}{R_0},$$

где U_0 — падение напряжения на образцовом сопротивлении, В; R_0 — образцовое сопротивление, Ом; R_{01} — значение сопротивления R_1 в момент компенсации, Ом.

6. Для измерения сопротивления вольтметра соберите схему, приведенную на рис. 3.5. Соблюдайте полярность присоединения

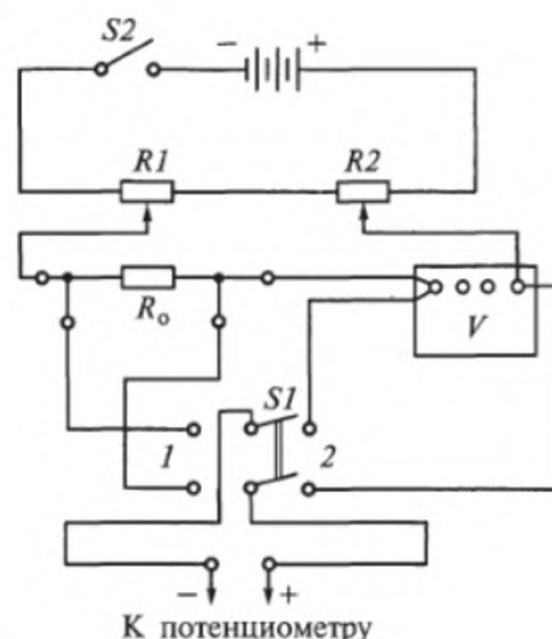


Рис. 3.5. Схема определения сопротивления вольтметра

проводов, идущих от переключателя к потенциометру, образцовому резистору R_0 и вольтметру. При измерении сопротивления на пределах 3...7,5 В выберите образцовое сопротивление 1 000 Ом и стрелку вольтметра установите на отметке 20 В. Измерение сопротивления в пределах 15...30 В производите с образцовым сопротивлением в 1 000 или в 10 000 Ом. В том и другом случае уменьшите силу тока, проходящего через вольтметр: при $R_0 = 1\,000$ Ом и пределе 15 В до 10 дел; в пределе 30 В — до пяти делений; при $R_0 = 10\,000$ Ом — до трех делений.

10. Измерение сопротивления производите в следующем порядке:

- а) включите питание схемы выключателем $S2$;
- б) переключатель $S1$ поставьте в положение 1 и скомпенсируйте падение напряжения на образцовом сопротивлении R_0 ;

Таблица 3.3

Предел измерения	Номер измерений	Образцовое сопротивление R_0 , Ом	Напряжение на образцовом сопротивлении U_0 , В	Напряжение вольтметра, U_V , В	Сопротивление вольтметра R_V , Ом
	1				
	2				
	3				
	Среднее				

- в) переключатель SI поставьте в положение 2 и скомпенсируйте падение напряжения на зажимах прибора;
- г) операции 10 б и 10 в повторите три раза;
- д) результаты запишите в табл. 3.3;
- е) переключите провода и повторите операции 10 б и 10 в три раза, записав результаты в табл. 3.3;
- ж) вычислите величину измеряемого сопротивления по формуле

$$R_x = R_0 \frac{U_V}{U_0}.$$

Контрольные вопросы

1. Каким образом осуществляется измерение электрических величин компенсационным методом?
2. Как устанавливается рабочий ток и в какой цепи он протекает?
3. На каких сопротивлениях осуществляется компенсация неизвестного напряжения на потенциометре?
4. Почему рабочий ток в потенциометре не изменяется в процессе компенсации? В чем сущность метода сдвоенных декад и каково их отличие от шунтирующих декад?
5. Можно ли производить поверку приборов, питая эти приборы и потенциометр от одного источника тока?
6. Как определяются погрешности и класс точности поверяемого прибора? Что такое вариация показаний?
7. От чего зависит точность компенсационного метода измерений?
8. Как производится измерение сопротивления вольтметра с помощью потенциометра?

Лабораторная работа № 4

ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ ПОТЕНЦИОМЕТРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы

Ознакомление с компенсационным методом измерения при помощи потенциометров переменного тока.

Основные сведения

Потенциометр переменного тока относится к группе векторных устройств и предназначен для измерения векторных величин: ЭДС, напряжения, тока, потока и т. п. В потенциометрах переменного тока используется (подобно потенциометрам постоянного тока) принцип компенсации (уравновешивания) неизвестного падения напряжения заведомо известным. Однако в цепи переменного тока имеют место векторные величины, поэтому для получения их полной компенсации необходимо соблюдение следующих условий:

- а) равенство модулей напряжений;
- б) равенство частот;
- в) противоположность фаз измеряемого и компенсирующего напряжений;
- г) одинаковая форма кривой измеряемого и компенсирующего напряжений.

О достижении компенсации судят по нуль-индикатору переменного тока, включенному в схему.

Прямоугольно-координатный потенциометр (рис. 4.1) состоит из двух реохордов, один из которых соединен с первичной обмоткой воздушного трансформатора (ВТ), а второй — с его вторичной обмоткой. Воздушный трансформатор позволяет получить 90-градусный сдвиг фаз между током, протекающим по реохорду PP первичной цепи, и током, протекающим по реохорду QQ вторичной цепи. Средние точки реохордов O_1 и O_2 соединены между собой и являются равнопотенциальными.

Смещение движков реохордов позволяет получить геометрическую сумму двух напряжений переменного тока U_a и U_b , имеющих сдвиг 90° . Эта сумма напряжений подается навстречу неизвестному напряжению U_x . Если сумма напряжений реохордов равна по модулю и противоположна по фазе U_x , то при прочих указанных выше условиях индикатор вибрационного гальванометра (ВГ) укажет нуль.

При помощи сопротивления R устанавливается ток в первичной цепи ВТ, обычно равный 0,5 А. Ток измеряется амперметром

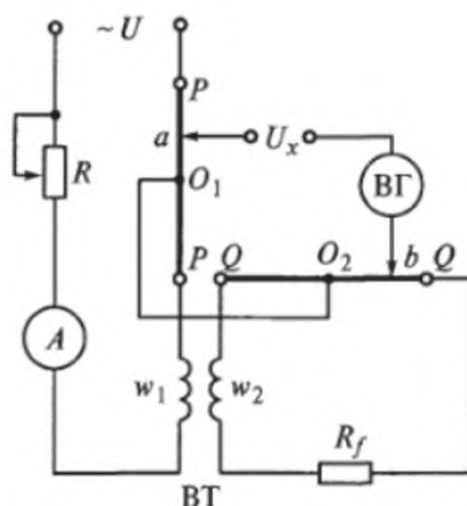


Рис. 4.1. Принципиальная схема прямоугольно-координатного компенсатора

А класса 0,1 или 0,2, так как им определяется точность измерения. Точность измерения на потенциометрах постоянного тока значительно выше, чем на потенциометрах переменного тока, так как значение рабочего тока в первом случае устанавливается по ЭДС НЭ с большей точностью, чем во втором случае по электроизмерительному прибору. Для обеспечения равенства частот и одинаковой формы кривой потенциометр и испытуемый объект питаются от одного источника переменного тока.

Пусть напряжение на первом реохорде изображается вектором OB (рис. 4.2), а напряжение на втором реохорде — вектором OD . Так как средние точки O_1 и O_2 имеют одинаковый потенциал, то эти векторы должны пересекаться в нулевой точке. Напряжение между точками O_1 и a первого реохорда изображается вектором U_a , а напряжение между точками O_2 и b второго реохорда — вектором U_b . Таким образом, векторная сумма двух напряжений на реохордах может быть расположена в любом из четырех квадрантов. Вектор измеряемого напряжения будет направлен в противоположном направлении. На рис. 4.2 показано положение вектора компенсирующего напряжения U'_k до компенсации U_x и после компенсации его U''_k .

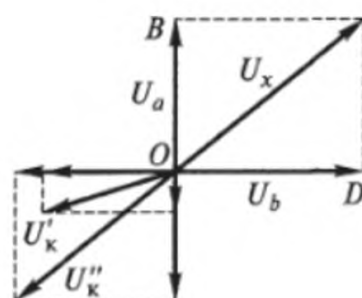


Рис. 4.2. Векторная диаграмма, поясняющая принцип компенсации

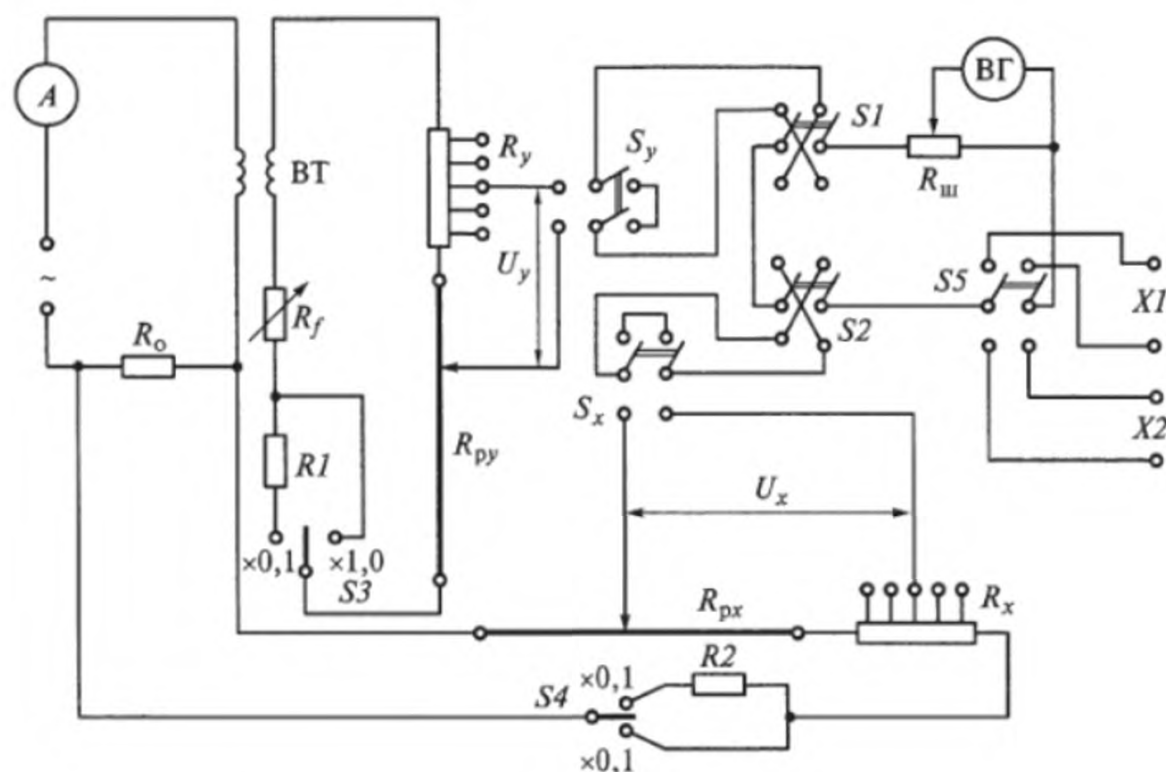


Рис. 4.3. Принципиальная схема конкретного компенсатора

В потенциометре переменного тока (рис. 4.3) измеряемая ЭДС или напряжение уравниваются двумя последовательно включенными регулируемым напряжениями U_x и U_y , сдвинутыми по фазе на 90° . Напряжение U_x совпадает по фазе с рабочим током потенциометра, а напряжение U_y сдвинуто по фазе на 90° .

Рабочий ток потенциометра, протекающий через шунт R_0 , создает падение напряжения, находящееся в фазе с рабочим током. Компенсирующее напряжение U_x возникает на 15 резисторах R_x и реохорде R_{px} , соединенных последовательно. В цепь вторичной обмотки ВТ, по первичной обмотке которого протекает рабочий ток, включены также 15 резисторов R_y и реохорд R_{py} , с которых снимается составляющая компенсирующего напряжения U_y , сдвинутая по фазе относительно U_x на 90° . Эта составляющая перпендикулярна вектору рабочего тока. С каждой ступени резисторов R_x и R_y в соответствии с выбранным пределом измерения ($\times 0,1$ или $\times 1,0$) снимается напряжение 0,01 или 0,1 В. Пределы измерения определяются положением переключателей $S3$ и $S4$. При этом соответственно выбранному пределу изменяется цена делений на реохордах.

Переменное сопротивление R_f позволяет установить ток вторичной цепи, соответствующий номинальной частоте, если частота, при которой производят измерение, отличается от 50 Гц. Каждый из переключателей $S1$ и $S2$ позволяет изменить по фазе составляющую компенсирующего напряжения (U_y или U_x соответственно) на 180° . Четыре различные комбинации положений пе-

реключателей $S1$ и $S2$ позволяют осуществить компенсацию в любом из четырех квадрантов. Переключатели S_x и S_y позволяют удалить одну из составляющих, если компенсируемое напряжение совпадает по фазе с той или иной координатной осью. Переключатель $S5$ позволяет включать в схему напряжение от объекта $X1$ или $X2$. Указателем равновесия служит ВГ, включенный через переменное сопротивление шунта $R_{ш}$. Потенциометр дополнительно укомплектован вспомогательными приборами. В схеме на рис. 4.4 показано их подключение к потенциометру.

При измерениях потенциометром цепь рабочего тока должна быть изолирована, так как при отсутствии изоляции обе цепи связаны между собой не только потенциальными проводами, но также имеют соединение по питающей цепи. Это может внести искажение в измерение и привести к порче потенциометра. Таким образом, необходимо изолировать измерительную схему от источника питания, что может быть достигнуто включением потенциометра через изолирующий трансформатор $T1$.

Первичная обмотка трансформатора рассчитана на напряжение 127 или 220 В. Вторичная обмотка трансформатора состоит из четырех секций с номинальным напряжением 3 В и одной секции с номинальным напряжением 24 В. Вторичная обмотка экранирована для устранения токов утечки.

Трансформатор $T2$ служит для изоляции объекта измерения от потенциометра. Необходимость этого трансформатора обуслови-

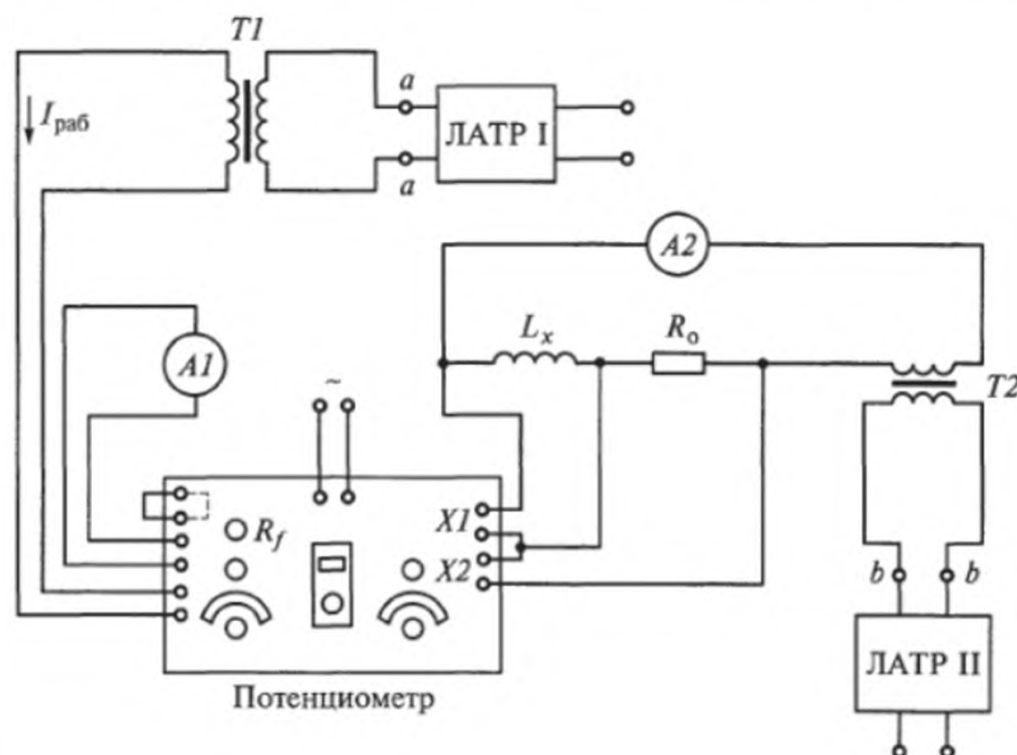


Рис. 4.4. Схема стенда для измерения векторов напряжений на L_x и R_0 при помощи прямоугольно-координатного компенсатора

вается тем, что горизонтальная составляющая компенсирующего напряжения снимается с реохорда, который гальванически связан с цепью рабочего тока.

Для точного измерения рабочего тока $I_{\text{раб}}$ используется электродинамический прибор — амперметр $A1$.

Аппарат для проверки трансформаторов тока (АТТ), так же как и потенциометр, предназначен для измерения комплексных величин: ЭДС, напряжения, тока и составляющих комплексного сопротивления, кроме того, с его помощью можно определить погрешности измерительных трансформаторов тока (рис. 4.5).

От других компенсационных устройств переменного тока АТТ отличается тем, что его конструкция содержит не только ВТ, но еще и трансформатор тока (ТТ). Кроме того, аппарат не требует установления рабочего тока. Включение исследуемого объекта производится так, что ток, протекающий по первичной обмотке образца, проходит и по первичным обмоткам ВТ и ТТ. Так как ток во вторичной цепи ВТ относительно первичного тока I_0 сдвинут на 90° , а во вторичной цепи ТТ сдвинут относительно того же первичного тока на 180° , то ток, протекающий по реохорду AB , на 90° сдвинут относительно тока, протекающего по реохорду CK .

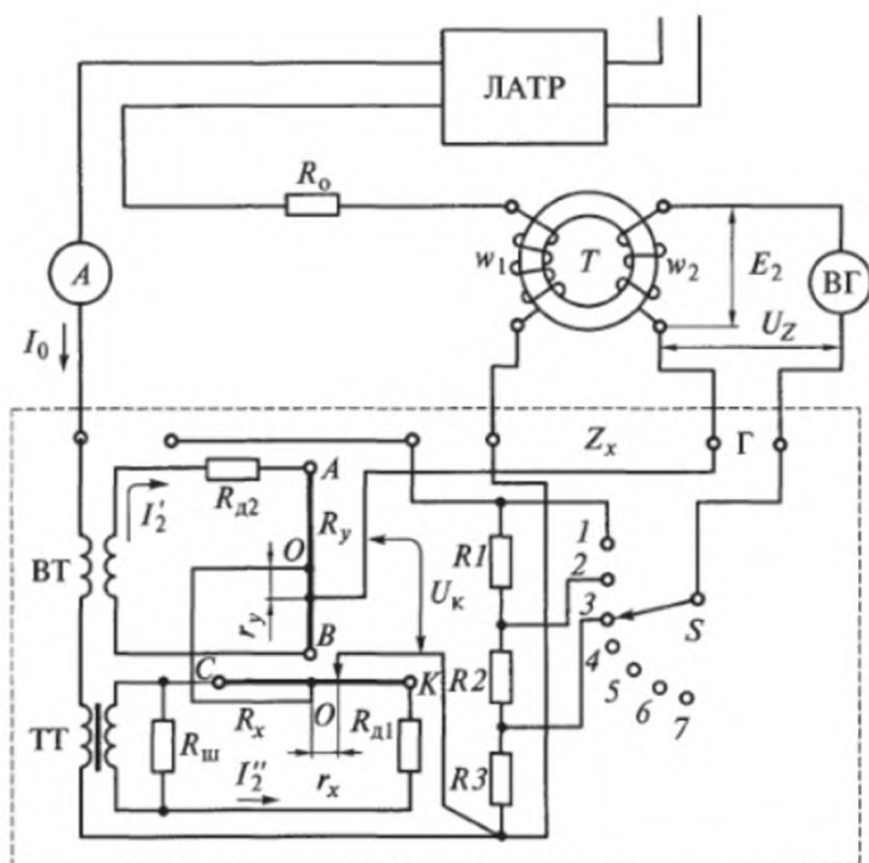


Рис. 4.5. Схема аппарата типа АТТ для исследования ферромагнитного тороида

Шунтирующее $R_{ш}$ и добавочные сопротивления $R_{д1}$, $R_{д2}$ на вторичных цепях трансформаторов позволяют уравнивать токи, протекающие по реохордам. Соединение средних точек O реохордов позволяет получить четыре векторных компоненты компенсирующего напряжения.

Шкалы реохордов проградуированы в омах. Отношение токов в реохордах к току первичной цепи (с учетом $I'_2 = I''_2$) имеет вид

$$I'_2/I_0 = I''_2/I_0 = 0,0025.$$

Это отношение с достаточной точностью сохраняется при изменении первичного тока от 0,1 до 6 А.

При полной компенсации перемещение движков по реохордам позволяет отметить их участки с сопротивлениями r_x и r_y , тогда, переходя к компонентам компенсирующего напряжения, можно записать:

$$U_x = 0,0025 I_0 r_x; \quad (4.1)$$

$$U_y = 0,0025 I_0 r_y.$$

Для определения квадранта, в котором находится вектор компенсирующего напряжения, шкала реохордов имеет знаки «+» и «-». Так как ток в реохорде $СК$ сдвинут относительно тока I'_2 на 180° , то напряжение U_x удобно отложить по оси действительных чисел. Тогда компенсирующее напряжение имеет вид

$$U_k = U_x + jU_y. \quad (4.2)$$

Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 (см. рис. 4.5) позволяют разделить измеряемое напряжение в такой мере, как это целесообразно для компенсации.

Действительная составляющая $U_x = U_k \cos \psi$ (ψ — угол между векторами U и I_0) положительна при изменении ψ от -90° до $+90^\circ$; мнимая составляющая $U_y = U_k \sin \psi$ положительна при изменении ψ от 0 до 180° .

Обычный метод измерения полного сопротивления, например с помощью потенциометра, состоит в том, что последовательно с измеряемой индуктивностью вводится образцовая катушка с известным сопротивлением и затем соответственно компенсируются напряжения на сопротивлении и индуктивности (см. рис. 4.3).

Измерение сопротивления Z_x на аппарате АТТ можно значительно упростить (рис. 4.6). Для этого необходимо включить это сопротивление последовательно с аппаратом и пропустить через

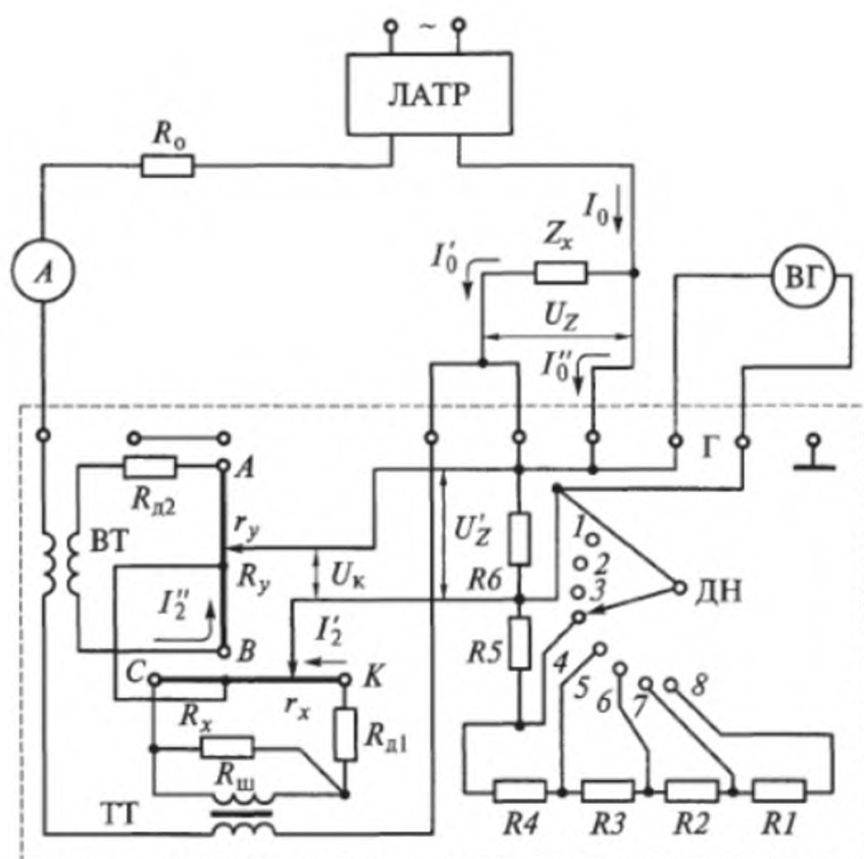


Рис. 4.6. Схема аппарата для исследования комплексного сопротивления Z

него первичный ток потенциометра I_0 . Параллельно сопротивлению Z_x включается ДН, поэтому компенсируется только часть напряжения U_Z , а именно U'_Z .

Сопротивление $R_{ДН}$ обычно подбирают так, чтобы ток I''_0 , отходящий в этот делитель, составлял бы не более 0,1% тока I_0 . Это условие будет выполнено, если $R_{ДН} \gg Z_x$. С учетом этого неравенства можно записать следующее уравнение:

$$U_Z = I_0 \frac{Z_x R_{ДН}}{Z_x + R_{ДН}} \frac{R_6}{R_{ДН}} \approx I_0 \frac{R_6}{R_{ДН}} Z_x,$$

где $R_{ДН} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$.

Подставив в это уравнение из формул (4.1) составляющие векторов компенсирующего напряжения, окончательно получим

$$Z_x = 0,0025 \frac{R_{ДН}}{R_6} (r_x + jr_y).$$

Методика выполнения работы

Методика измерений на потенциометре

1. Соберите схему соединений по рис. 4.4.
2. Ознакомьтесь с органами управления потенциометра, назначением измерительных приборов и других элементов этой схемы.
3. Подготовьте потенциометр к измерению:
 - а) ручку регулировки сопротивления R_f (см. рис. 4.3) установите в положение «Частота», на которой производится измерение;
 - б) ручки лабораторных автотрансформаторов ЛАТР-I и ЛАТР-II (см. рис. 4.4) должны находиться в положениях, обеспечивающих минимальное напряжение на выходных зажимах aa и bb ;
 - в) ручку «Чувствительность» ВГ (на схеме не показано) установите на минимальную чувствительность;
 - г) переключатели пределов измерения потенциометров $S3$ и $S4$ (см. рис. 4.3) поставьте в положения, соответствующие выбранному объекту измерения, а переключатели $S1$ и $S2$ квадрантов — в любое положение.
4. Произведите в присутствии преподавателя или лаборанта настройку ВГ, после чего проверьте положение ручки «Чувствительность» на нулевой отметке.
5. Включите освещение гальванометра и автотрансформаторы ЛАТР-I и ЛАТР-II. Установите с помощью ЛАТР-I, используя амперметр $A1$, рабочий ток, равный 500 мА (см. рис. 4.4).
6. Произведите измерение индуктивности неизвестной катушки с ферромагнитным сердечником при нескольких значениях тока в обмотке:
 - а) установите с помощью ЛАТР-II первое наименьшее значение тока в катушке L_x ;
 - б) установите переключатель $S5$ в положение $X1$ (см. рис. 4.3);
 - в) включив регулятор чувствительности ВГ на первую ступень, поочередным вращением рукояток переключателей и реохордов то одной, то другой оси добейтесь отсутствия размытия светового пятна гальванометра, постепенно увеличивая его чувствительность до максимального значения;
 - г) если уравновесить схему не удастся, но уменьшение светового пятна гальванометра наблюдается на подходе по одной из осей к нулю, то переведите переключатель знаков этой оси $S1$ или $S2$ на противоположный знак;
 - д) если на одной из осей отсчет будет лишь на шкале реохорда при пределе измерения « $\times 1$ », то переключатель пределов измерения этой оси $S3$ или $S4$ переведите в положение $\times 0,1$ и повторите уравнивание схемы;
 - е) результаты измерений занесите в табл. 4.1;

Таблица 4.1

№ п/п	Ток I_0 , А	Компенсация U_0			Компенсация U_Z			Расчетные величины							
		Квадрант	U_x , В	U_y , В	Квадрант	U_x , В	U_y , В	$I_0 = U_0/R_o$, А	U_0 , В	U_Z , В	U_R , В	U_L , В	$X_L = U_L/I_0$, Ом	$R = U_R/I_0$, Ом	$Q = X_L/R$

ж) установите переключатель $S5$ в положение $X2$ для подключения другого объекта;

з) повторите пп. б в, г, д и занесите результаты измерения в табл. 4.1.

7. В соответствии с методикой п. 6 произведите компенсацию напряжений на образцовом сопротивлении и индуктивности для других значений токов по указанию преподавателя. Результаты измерений занесите в табл. 4.1.

8. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений (рис. 4.7) и по этим диаграммам определите индуктивность катушки при различных токах. Постройте графическую зависимость $L_x = f(I)$.

Предположим, что переключатель ступенчатой регулировки оси X R_x установлен на 1,3; отсчет по реохорду той же оси $R_{px} = 0,054$; переключатель пределов измерения $S4$ установлен в положение 0,1; переключатель знаков $S2$ включен в сторону «+», тогда составляющая измеряемого напряжения по оси X , В,

$$U_x = 0,1(1,3 + 0,054) = 0,1354.$$

Если переключатель ступенчатой регулировки оси YR_y установлен на 0,8 отсчет по реохорду R_y на 0,089 переключатель пределов измерения $S3$

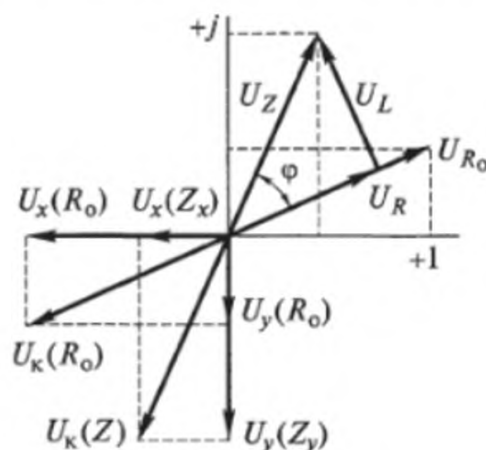


Рис. 4.7. Векторная диаграмма к схеме, представленной на рис. 4.5

установлен в положение $\times 1$, переключатель знаков $S1$ включен в сторону «+», тогда составляющая измеряемого напряжения по оси Y , В,

$$U_y = 1(0,8 + 0,089) = 0,889.$$

Таким образом модуль напряжения, В,

$$U = \sqrt{0,1354^2 + 0,889^2} = 0,892.$$

При этом вектор напряжения находится в первом квадранте координатной плоскости.

Методика измерений на аппарате АТТ

1. Произведите исследование тороидального образца стали:
 - а) соберите схему соединений согласно рис. 4.5;
 - б) поставьте ручку ЛАТР в положение, обеспечивающее наименьшее напряжение на зажимах «Нагрузка»;
 - в) ручку переключателя S на передней панели аппарата АТТ поставьте в любое положение «Измерения погрешности»;
 - г) поставьте ручку «Чувствительность» ВГ в нулевое положение;
 - д) ознакомьтесь с работой ВГ, его органами управления и методикой настройки в резонанс. Настройка гальванометра в резонанс в лаборатории электрических измерений производится лаборантом, поэтому перед началом работы совместно с преподавателем убедитесь в правильности настройки ВГ;
 - е) по указанию преподавателя внесите в протокол значения токов в первичной обмотке, при которых производится испытание образца;
 - ж) установите с помощью ЛАТР первое (наименьшее) значение тока в первичной обмотке испытуемого образца;
 - з) поставьте ручку «Чувствительность» ВГ в положение, при котором ширина световой полосы будет в пределах шкалы;
 - и) поочередно изменяя положение движков реохордов R_{px} и R_{py} , скомпенсируйте ЭДС E_2 на вторичной обмотке тороида, напряжением U_z добиваясь минимальной ширины световой полосы гальванометра;
 - к) увеличивая ступенями чувствительность гальванометра, добейтесь полной компенсации при максимальной чувствительности гальванометра; показания шкал реохордов при этом занесите в табл. 4.2;
 - л) произведите компенсацию ЭДС на вторичной обмотке тороида при других заданных значениях тока согласно пп. 1 з, и, к.
2. Рассчитайте согласно формулам (4.1) и (4.2) значения U_x , U_y и U_k . Определите графически составляющие тока холостого хода I_μ и I_a (намагничивающий ток и ток потерь) согласно рис. 4.8. Опре-

Таблица 4.2

№ п/п	Ток I_0 , А	Компенсация E_2			Расчетные величины							
		Квадрант	Z_x , Ом	Z_y , Ом	U_x , В	U_y , В	E_2 , В	I_a , А	I , А	B_m , Тл	H_m , э	$P_{ст}$, Вт

делите максимальное значение индукции B_m , напряженности H_m , потери в стали $P_{ст}$ по следующим формулам:

$$B_m = \frac{E_2}{4,44 f S w_2 \cdot 10^{-8}};$$

$$H_m = \frac{0,4\pi w_1 I_\mu \sqrt{2}}{l};$$

$$P_{ст} = E_1 I_0 \cos \psi = E_1 I_a,$$

где $E_2 = -U_k$.

Здесь $E_1 = E_2 w_1 / w_2$ — напряжение на первичной обмотке образца, В; w_1 , w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток; f — частота, Гц; S — площадь поперечного сечения тороида, см²; l — длина окружности тороида по среднему диаметру; I_0 — ток холостого хода, А; ψ — угол между векторами токов I_0 и I_μ :

$$\psi = \arctg \frac{I_\mu}{I_a}.$$

Согласно полученным результатам постройте кривые намагничивания и удельных потерь в стали в зависимости от индукции и напряженности магнитного поля.

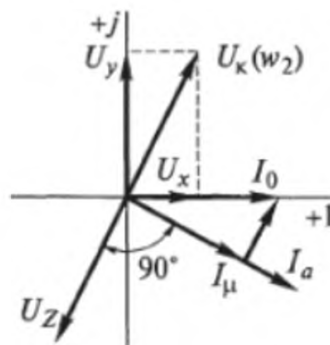


Рис. 4.8. Векторная диаграмма к схеме, представленной на рис. 4.6

При построении векторной диаграммы (см. рис. 4.8) обратите внимание на совпадение вектора тока I_0 и вектора горизонтальной составляющей U_x компенсирующего напряжения. Это совпадение объясняется тем, что ток в горизонтальном реохорде является частью вторичного тока ТТ.

Контрольные вопросы

1. Каким условиям должно удовлетворять компенсирующее напряжение?
2. Как устанавливается рабочий ток в компенсаторах переменного тока?
3. Каким образом достигается компенсация векторной величины в любом из четырех квадрантов?
4. Почему точность измерения при помощи компенсаторов переменного тока ниже, чем при помощи компенсаторов постоянного тока?
5. Какова роль ВТ?
6. Как сказывается изменение частоты на результатах измерения?

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы

Ознакомление с методикой управления электронным осциллографом (ЭО) и использованием его для некоторых измерительных целей.

Основные сведения

Классификация осциллографов

В настоящее время для анализа формы сигнала чаще всего используются осциллографы с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) — электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО). Осциллограф такого типа является одним из наиболее универсальных измерительных приборов, предназначенных для визуального наблюдения электрических сигналов и измерения их параметров. В настоящее время разработаны и используются различные типы ЭЛО: универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие, специальные.

Самыми распространенными являются *универсальные осциллографы*. Они позволяют исследовать широкий класс электрических сигналов с длительностью от единиц наносекунд до нескольких секунд в диапазоне от долей милливольт до сотен вольт. Полоса пропускания частот современных универсальных осциллографов составляет 300...400 МГц. Изображение сигнала на экране отображается практически одновременно с появлением сигнала на входе, поэтому такие приборы называются осциллографами реального времени. Часто универсальные осциллографы выполняют со сменными блоками, которые существенно расширяют их функциональные возможности.

Для исследования быстро протекающих процессов (например, нано- и пикосекундной длительности) применяются *скоростные осциллографы*, основным узлом которых служит специальная ЭЛТ бегущей волны. В скоростных осциллографах, как правило, предварительное усиление входного сигнала не производится и поэтому их чувствительность невелика. Эти приборы также являются осциллографами реального времени, которые дают возможность наблюдать и фотографировать как одиночные, так и периодические сигналы.

Повторяющиеся кратковременные процессы исследуются с помощью *стробоскопических осциллографов*. По принципу действия эти осциллографы относятся к приборам с преобразованием временного масштаба и отличаются высокой чувствительностью и широкой (до 25 ГГц) рабочей полосой частот.

Запоминающие осциллографы, в которых используются специальные ЭЛТ, обладают способностью сохранять и воспроизводить изображение сигнала в течение длительного времени после снятия сигнала со входа осциллографа. Основным назначением запоминающих осциллографов является исследование однократных и редко повторяющихся временных процессов. Запоминающие осциллографы имеют почти те же характеристики, что и универсальные, однако отличаются расширенными функциональными возможностями.

Специальные осциллографы оснащаются дополнительными блоками целевого назначения. К этой группе относятся и телевизионные осциллографы, позволяющие выделять видеосигнал заданной строки изображения, и цифровые осциллографы, дающие возможность не только наблюдать сигнал, но и передавать его в цифровом виде на компьютер для дальнейшей обработки. Специальные осциллографы снабжаются блоками измерения напряжений, токов и сопротивлений (мультиметрами), а также устройствами для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов.

По числу одновременно наблюдаемых на экране сигналов осциллографы подразделяются на *одноканальные* и *многоканальные*. Совмещение на экране изображений нескольких входных сигналов достигается или использованием специальной многолучевой трубки, или путем периодического переключения осциллографа на разные входы с помощью электронного коммутатора (ЭК).

Универсальным осциллографом называется измерительный прибор, в котором исследуемый электрический сигнал подается через канал вертикального отклонения на вертикально отклоняющую систему ЭЛТ, а горизонтальное отклонение электронного луча трубки осуществляется при помощи напряжения горизонтальной развертки.

Структура осциллографа

В осциллограф кроме ЭЛТ и каналов вертикального и горизонтального отклонений входят следующие функциональные блоки: устройство синхронизации и запуска развертки, канал модуляции луча, вспомогательные устройства и источник питания (рис. 5.1). В стеклянном баллоне ЭЛТ расположены подогревный катод К, модулятор (сетка) М, фокусирующий анод А1, ускоряющий

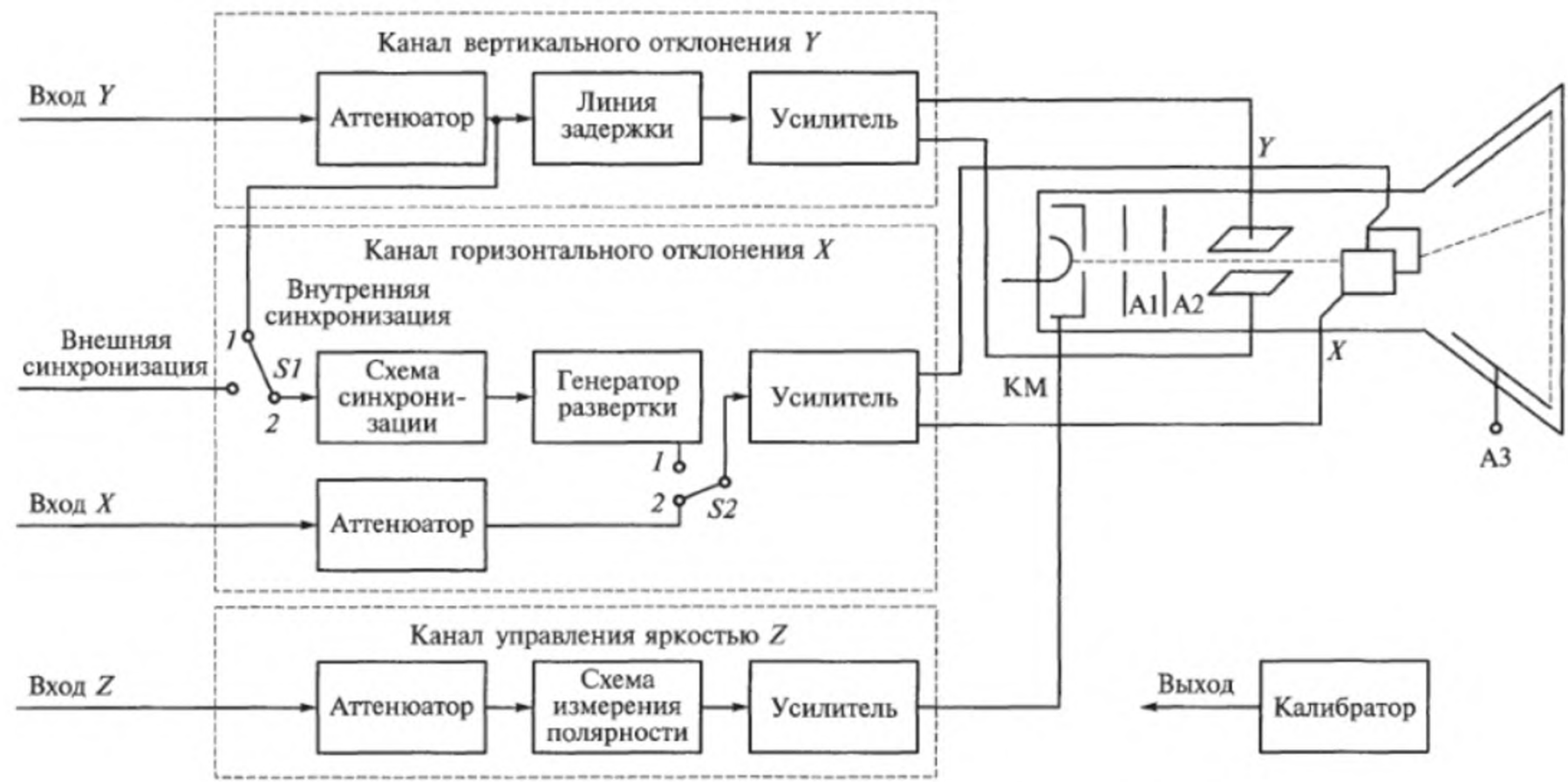


Рис. 5.1. Упрощенная структурная схема универсального осциллографа

анод А2, две пары взаимно-перпендикулярных отклоняющих пластин, где X — горизонтальные, а Y — вертикальные пластины.

Канал вертикального отклонения луча Y включает в себя аттенюатор, линию задержки и усилитель. Канал служит для подачи на пластины Y исследуемого сигнала $u_c(t)$, который подается на вход Y . Аттенюатор канала предназначен для ослабления сигнала $u_c(t)$ в определенное число раз. Линия задержки является регулируемой и обеспечивает подачу сигнала на пластины Y с задержкой относительно начала горизонтально развертывающего напряжения U_x . Усилитель обеспечивает получение амплитуды сигнала на пластинах y , достаточной для требуемого отклонения луча на экране даже малым исследуемым сигналом $u_c(t)$.

В свою очередь, усилитель Y канала вертикального отклонения включает в себя следующие звенья (на рис. 5.1 они не показаны): входной усилитель с изменяемым коэффициентом усиления K_{yc} , линию задержки и парафазный (с противофазными выходными сигналами) усилитель, обеспечивающий положение светового пятна в центре экрана при отсутствии исследуемых сигналов. В канал вертикального отклонения луча также может входить калибратор амплитуды. Сигнал от калибратора поступает на вход первого усилителя для установки заданного коэффициента усиления K_{ycl} . При этом цену деления (В/дел) масштабной сетки на экране осциллографа можно определить по формуле

$$m = \left| \frac{U_k}{K_{ycl} n_k} \right|,$$

где U_k — напряжение калибратора; K_{ycl} — коэффициент усиления при одном положении регулировки усилителя; n_k — число делений сетки, занятое изображением калибровочного сигнала.

Основными характеристиками канала вертикального отклонения являются верхняя граничная частота порядка 100 МГц и чувствительность

$$S_y = k_d K_{yc} S_{yc},$$

где k_d — коэффициент деления аттенюатора; S_{yc} — чувствительность усилителя.

При $k_d = 1$ чувствительность составляет около 1 мм/мВ.

Канал горизонтального отклонения луча X служит для создания горизонтально отклоняющего — *развертывающего* напряжения U_x с помощью напряжения генератора развертки и для передачи (через аттенюатор и усилитель) на пластины X исследуемого сигнала, подводимого к входу X осциллографа. Схема синхронизации

обеспечивает формирование сигнала синхронизации, поступающего на генератор развертки (для получения четкой неподвижной осциллограммы). Усилитель канала X усиливает и преобразует сигнал развертки U_p в U_x .

Канал горизонтального отклонения характеризуется чувствительностью и полосой пропускания частот, которые в два раза меньше, чем в канале вертикального отклонения. Основным блоком в канале является генератор развертки, который может работать как в непрерывном, так и в ждущем режиме.

К форме пилообразного напряжения генератора предъявляются следующие требования:

время обратного хода луча должно быть много меньше, чем время прямого хода $T_{обр} \ll T_{пр}$. В противном случае часть изображения сигнала будет отсутствовать;

для того чтобы изображение на экране было неподвижным, осциллограмма должна начинаться всегда с одной и той же точки экрана и фазы сигнала. Это достигается путем синхронизации напряжения развертки с напряжением сигнала, поэтому период развертки должен быть равен или кратен периоду исследуемого сигнала:

$$T_p = nT_c,$$

где $n = 1, 2, 3, 4$ и т.д.; T_c — период сигнала;

напряжение развертки при прямом ходе луча должно быть линейным, иначе луч будет двигаться по экрану с различной скоростью и нарушится равномерность временного масштаба по оси X . Это может привести к искажению сигнала.

Канал Z (канал управления яркостью) осциллографа служит для передачи со входа Z на управляющий вход ЭЛТ сигнала, который модулирует ток ее луча и, следовательно, яркость свечения люминофора. В состав этого канала входят: аттенюатор, схема изменения полярности и усилитель Z .

Калибратор предназначен для формирования периодических импульсных сигналов с известной амплитудой, длительностью и частотой для калибровки осциллографа. Таким образом обеспечиваются правильные измерения параметров исследуемого сигнала.

Виды разверток в осциллографе

Одним из узлов осциллографа является *электронно-лучевая трубка*, основными элементами которой служат две пары пластин. Пластины с помощью специальной развертки отклоняют луч в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Развертка имеет вид линии, которую чертит луч на экране при отсутствии исследуемого сигнала в результате действия только одного развертывающего напряжения. Если развертывающее на-

пряжение приложено к одной паре отклоняющих пластин (обычно к пластинам X), то развертку называют по форме развертывающего напряжения (например, линейной или синусоидальной). Если развертывающие напряжения приложены к отклоняющим пластинам X и Y трубки осциллографа одновременно, то название развертки дается по ее форме (например, круговая или эллиптическая).

Наиболее широко используется линейная развертка, создаваемая пилообразным напряжением U_p генератора развертки. Для обеспечения различных режимов работы осциллографа существуют несколько видов разверток. Рассмотрим некоторые из них.

Автоколебательная развертка представляет собой развертку, при которой генератор развертки периодически запускается при отсутствии сигнала запуска на его входе.

Ждущей разверткой называется развертка, при которой генератор развертки запускается только с помощью сигнала запуска.

Однократная развертка — это развертка, с помощью которой генератор развертки запускается только один раз с последующей блокировкой.

При подаче на горизонтально отклоняющие пластины напряжения U_x пилообразной формы (рис. 5.2) сфокусированный электронный луч под воздействием этого напряжения перемещается слева направо в интервале $T_{пр}$ ($0-1-2$ — длительность прямого

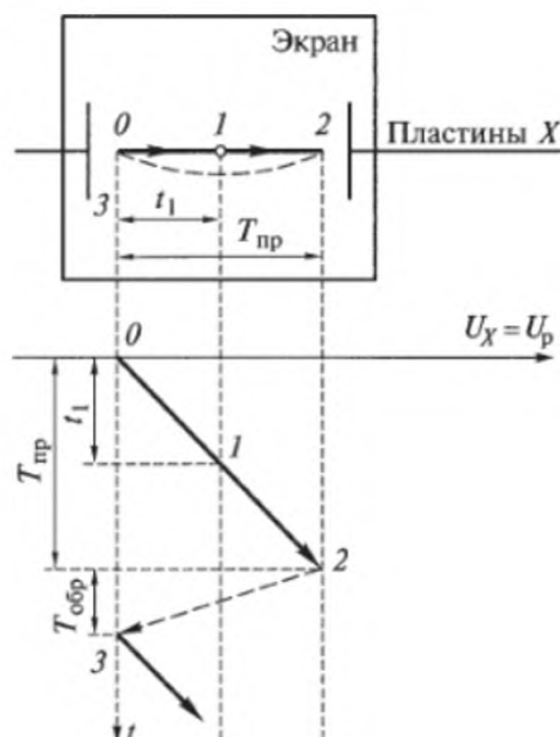


Рис. 5.2. Диаграмма, поясняющая создание временного масштаба по горизонтальной оси экрана:

$0-3$ — точки, показывающие длительность прямого и обратного хода луча

хода луча) и справа налево в интервале $T_{обр}$ (2—3 — длительность обратного хода луча). При этом скорость движения луча в обратном направлении много больше (обычно луч при этом гасится), чем в прямом.

С помощью напряжения развертки, подаваемого на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ (пластины X) осциллографа, на экране можно наблюдать исследуемый сигнал, поступающий на пластины Y и изменяющийся во времени, т.е. развернутый во времени.

Автоколебательная развертка применяется для исследования периодических сигналов, а также импульсных сигналов с небольшой скважностью

$$Q = \frac{T_c}{t_{и}},$$

где T_c — период сигнала; $t_{и}$ — длительность импульса.

Она также используется при внутренней синхронизации. В схеме на рис. 5.3, *а* показаны исследуемый сигнал U_c и развертывающее синхронное напряжение U_p , а в схеме на рис. 5.3, *б* — осциллограмма, наблюдаемая на экране.

Автоколебательная развертка не обеспечивает визуализацию непериодических сигналов и практически бесполезна при наблюдении периодических импульсных сигналов с большой скважностью Q (это связано с тем, что передний и задний фронты импульса почти сливаются). В этих случаях необходимо использовать ждущую развертку.

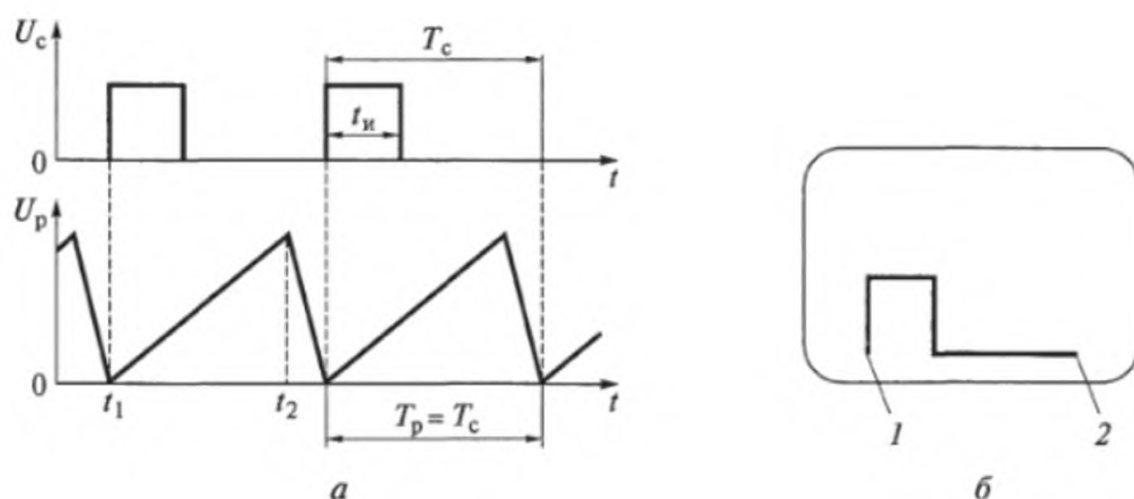


Рис. 5.3. Пример применения автоколебательной развертки:

а — схема; *б* — наблюдаемая осциллограмма на экране; 1 — начало развертки; 2 — конец развертки

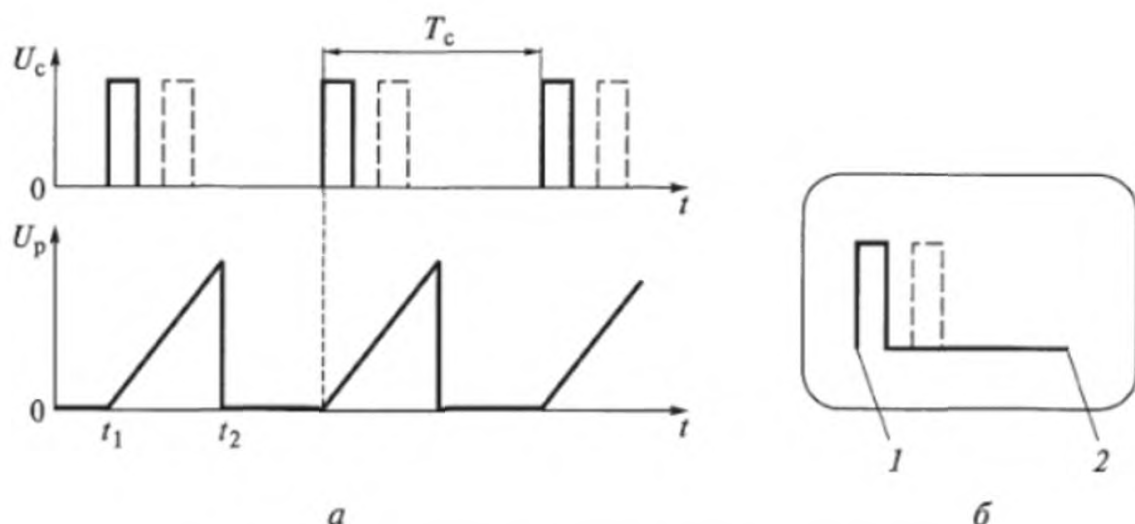


Рис. 5.4. Принцип действия ждущей развертки:

a — схема; *б* — наблюдаемая осциллограмма на экране; 1 — начало развертки; 2 — конец развертки

Схема принципа действия ждущей развертки и наблюдаемая осциллограмма на экране представлены на рис. 5.4. Здесь генератор развертки запускается при поступлении импульсов U_c . Если длительность развертки, равная $t_2 - t_1$, соизмерима с длительностью исследуемого импульса, то его изображение на экране отображается в полной мере. Для улучшения полноты отображения сигналов в осциллографах начало ждущей развертки несколько задерживается относительно фронта (переднего скачка) импульса U_c . Это особенно важно, если фронт импульса очень короткий. В этом случае он может не отобразиться на осциллограмме. Для наблюдения короткого фронта сигнала U_c его задерживают по времени в канале Y с помощью линии задержки (на рис. 5.4, *a* она изображена в виде штриховых импульсов U_c). Осциллограмма такой развертки также изображена штриховой линией на экране (см. рис. 5.4, *б*).

Однократная развертка применяется при фотографировании с экрана осциллографа неповторяющихся сигналов. В этом режиме генератор развертки запускается исследуемым сигналом только один раз.

Рассмотрим получение на экране ЭЛТ *круговой развертки*. Для этого на пластины Y надо подать синусоидальный сигнал

$$U_Y = U \sin(\omega t) = U \sin(2\pi t/T),$$

а на пластины X — аналогичный по форме сигнал, но задержанный по времени на четверть периода (по фазе на $\varphi = 90^\circ$), т. е. сигнал

$$U_X = U \sin[\omega(t - T/4)] = -U \cos(\omega t).$$

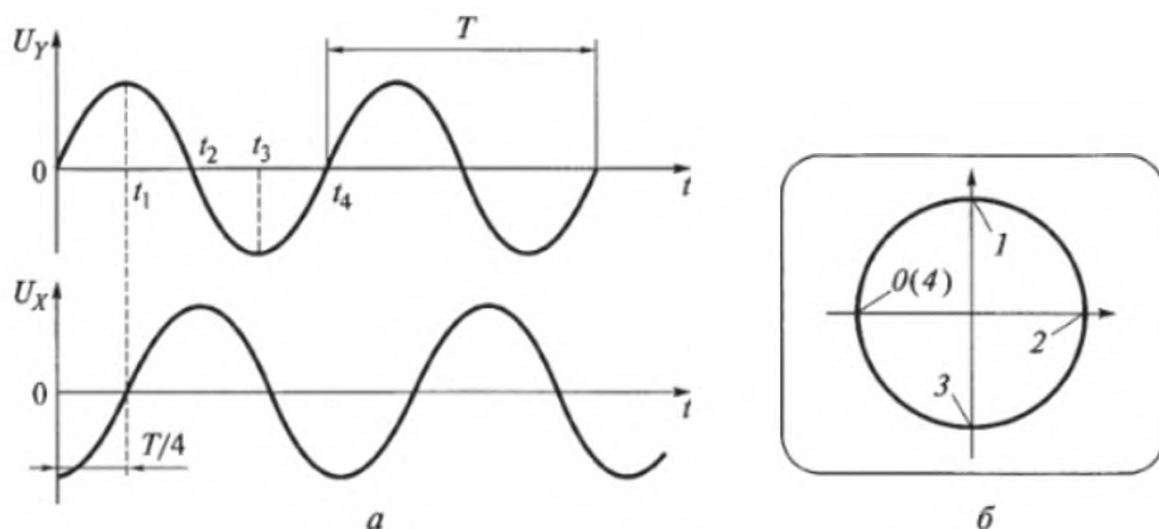


Рис. 5.5. Осциллограмма круговой развертки:

a — схема; *б* — вид на экране; 0—4 — точки на оси текущего времени

Схема осциллограммы круговой развертки представлена на рис. 5.5, *a*, а вид круговой развертки на экране осциллографа — на рис. 5.5, *б*.

Под действием напряжений развертки U_Y и U_X луч формирует на экране осциллографа окружность за время, равное периоду T . Положение луча на экране в момент времени $t = 0$ отмечено точкой 0, а в момент t_1 — точкой 1 и т. д. Если амплитуды сигналов U_Y и U_X не равны, то получается эллиптическая развертка, т. е. на экране будет сформирован эллипс. Например, при $U_Y < U_X$ большая ось эллипса располагается по горизонтали, а малая — по вертикали.

Электронно-лучевая трубка

Способ получения сфокусированного луча и процесс управления лучом можно пояснить с помощью схемы (рис. 5.6).

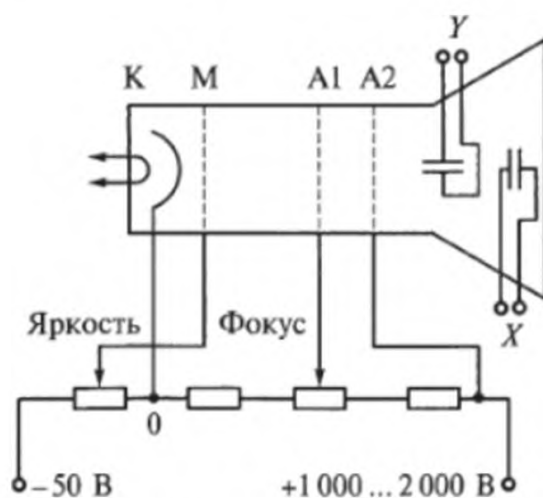


Рис. 5.6. Схема управления лучом ЭЛТ

Простейшая однолучевая трубка является вакуумным стеклянным баллоном, в котором расположены: подогревный катод К, модулятор (сетка) М, фокусирующий анод А1, ускоряющий анод А2, две пары взаимно-перпендикулярных отклоняющих пластин, где X — горизонтальные и Y — вертикальные пластины. Внутренняя поверхность дна баллона (экран) покрыта люминофором, светящимся под действием бомбардировки электронами. Совокупность электродов К, М, А1, А2 называется *электронной пушкой*, которая испускает узкий пучок электронов. Для этого на электроды подаются напряжения, примерные величины которых приведены на рис. 5.6.

Электронное облако, имеющееся около нагретого катода, под воздействием высокого потенциала анода А2 ускоряется и устремляется к экрану. Интенсивность электронного луча регулируется потенциалом сетки М, а его фокусировка — анодом А1.

Основными характеристиками ЭЛТ являются чувствительность, полоса пропускания частот, длительность послесвечения и площадь экрана.

Чувствительность трубки определяется по формуле

$$S_T = \frac{L_T}{U_T},$$

где L_T — отклонение луча на экране трубки под воздействием напряжения U_T , приложенного к паре отклоняющих пластин. Обычно чувствительность S_T составляет около 1 мм/В.

С увеличением частоты исследуемого сигнала чувствительность трубки падает. Верхняя граница полосы пропускания частот ЭЛТ устанавливается на уровне, где чувствительность составляет примерно 0,7 номинального значения. Для универсальных осциллографов широкого использования эта частота достигает 100 МГц.

В современных осциллографах часто применяются многолучевые трубки, в которых увеличено количество электродов. Более практичным оказывается использование однолучевого осциллографа в режиме поочередной подачи двух сигналов на отклоняющие пластины (двухканальные осциллографы). В этом случае за счет эффекта послесвечения трубки и свойств глаза на экране одновременно наблюдается изображение двух сигналов, хотя они подаются поочередно.

Одним из важных параметров ЭЛТ является площадь рабочей части экрана, в пределах которой искажения осциллограммы являются минимальными. Для улучшения использования площади экрана современные ЭЛТ имеют экран прямоугольной формы.

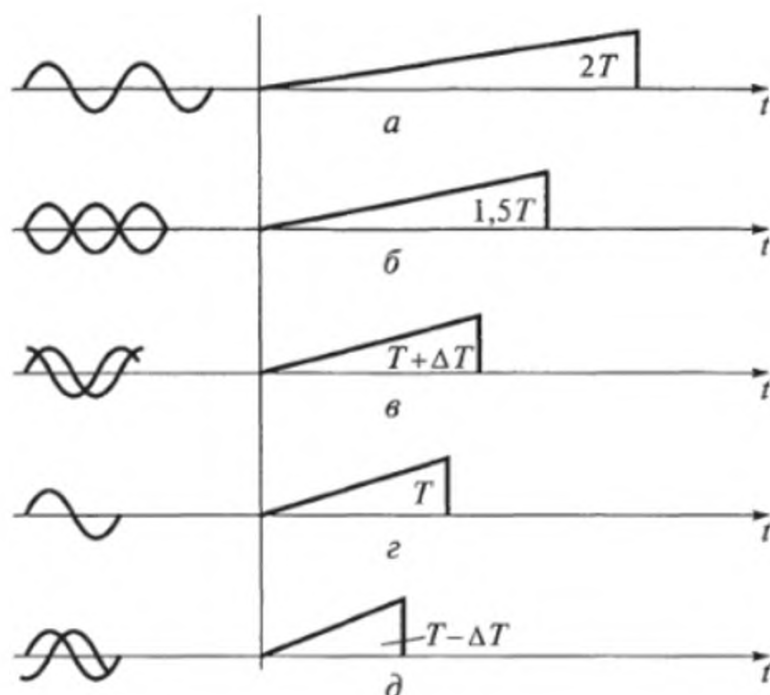


Рис. 5.7. Наблюдаемое на экране осциллографа синусоидальное напряжение при различных (а—д) частотах развертки

На рис. 5.7, а—д показано наблюдаемое на экране осциллографа синусоидальное напряжение с периодом T при различных периодах развертки.

Управление осциллографом

Питание от сети 220 В подается шнуром со штепсельной вилкой. Ручки регуляторов на лицевой панели устанавливают следующим образом: «Яркость» — в крайнее правое положение; «Фокус» — в среднее положение; «Усиление оси Y » — в нулевое положение, «Усиление оси X » — на деление 2—3, «Диапазон частот» — в положение 30—130, «Луч» и «Сеть» — в положение «Включено» (при этом загорается сигнальная лампа). Затем ждут 1—2 мин, после чего на экране должен появиться яркий штрих. Отсутствие штриха может быть вызвано отклонением его за пределы экрана; для приведения луча в область экрана необходимо действовать влево и вправо ручками Y и X . Яркость луча следует уменьшать, а фокусировку отрегулировать до получения тонкого штриха. Переключатель синхронизации поставить на черту «Сеть» или «Внутр.», а регулятор амплитуды синхронизации — на деления 3—4.

Если рассматриваемый сигнал, поданный на зажимы Y , изучают в функции времени, то ослабитель следует поставить в одно из трех положений в соответствии с величиной поданного на Y напряжения. Регулируя «Диапазон частоты» развертки и «Частоту плавно», добиваются полной остановки на экране изучаемой кривой.

Если изучают заданную величину не в функции времени, а в функции другой изменяющейся во времени величины, то переключатель «Диапазон частоты» следует поставить в положение «Выкл.», а на вход зажимов X необходимо подать второе напряжение, в функции которого изучают величину, поданную на зажимы Y . При этом на экране получаются фигуры Лиссажу.

Не следует допускать остановку луча на месте во избежание прожигания экрана.

Методика выполнения работы

1. Подготовьте осциллограф согласно изложенной выше инструкции, подав напряжение на зажимы Y от ЗГ; проследите при различной частоте развертки кривые, подобные тем, что показаны на рис. 5.7. Вид кривой занесите в табл. 5.1, и по ее виду установить соотношение периода развертки T_p с периодом напряжения T , поданного на вход Y осциллографа.

2. К зажимам Y , к которым подключен ЗГ, подключите многопредельный ламповый вольтметр (ЛВ); ручку «Диапазон частот» осциллографа поставьте в положение «Выкл.».

Измерьте напряжение при $f = \text{const}$ и отклонение луча по вертикали при крайнем правом положении ручки «Усиление» для одного из положений делителя (аттенюатора). Вычислите чувствительность осциллографа.

3. Для снятия амплитудно-частотной характеристики на зажимы Y подайте от генератора частоты постоянное по амплитуде напряжение при переменной частоте. Измерение на экране амплитуды A даст необходимую зависимость.

Результаты опыта занесите в табл. 5.2. Постройте график $A = \psi(f)$.

Таблица 5.1

Номер опыта	Вид кривой	Соотношение между T_p и T

Таблица 5.2

Номер опыта	Частота подаваемого напряжения, f , Гц	Показания катодного вольтметра, В	Длина штриха, мм	Амплитуда на экране, A , В

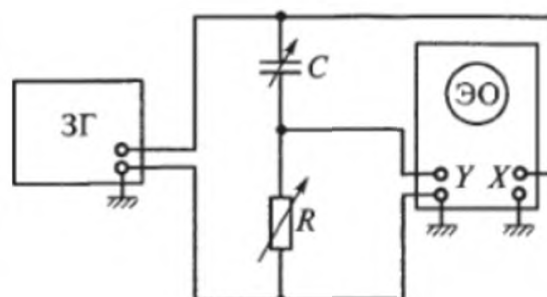


Рис. 5.8. Схема соединений для наблюдения эллипса

4. Для определения угла сдвига фаз соберите схему согласно рис. 5.8. Затем подайте в схему напряжение от ЗГ. При этом на экране появится эллипс или круг (рис. 5.9), по которым можно судить о фазовом соотношении между током и напряжением на нагрузке.

Для учета знака фазового угла при частотах ниже 25 Гц можно пользоваться направлением обхода луча на экране. Для углов от 0 до 180° (+φ) движение луча идет по часовой стрелке, а для углов от 180 до 360° (−φ) — против часовой стрелки:

$$|\varphi| = \arcsin \frac{A}{B},$$

или

$$|\varphi| = \arcsin \frac{C}{D},$$

где A , B , C и D — размеры, получаемые на экране осциллографа (рис. 5.10).

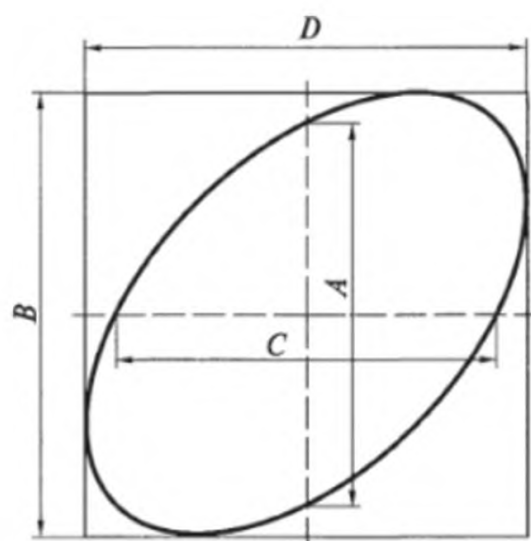


Рис. 5.9. Эллипс для определения фазового угла

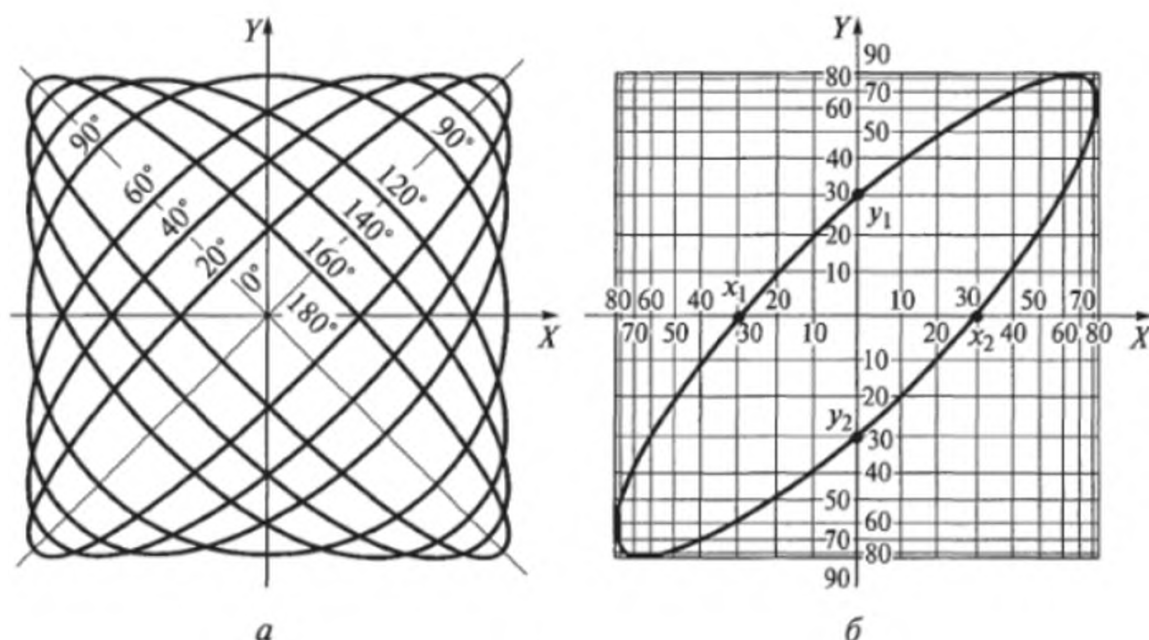


Рис. 5.10. Сетки для определения фазовых соотношений двух напряжений: *а* — определение по совпадению эллипсов; *б* — определение по пересечению координатных осей

Для определения фазовых соотношений используйте специально изготовленные сетки (см. рис. 5.10), которые накладывают на экран. При этом произведите регулировку усиления сначала по оси X , затем по оси Y до тех пор, пока при включении одного из напряжений ход луча по горизонтали, а затем по вертикали не окажется в пределах габаритных размеров квадрата, в который вписаны эллипсы. После этого, включая оба напряжения, заметьте совпадение полученной фигуры с одним из эллипсов, нанесенных на сетке (см. рис. 5.10, *а*), и отметьте фазовый угол. Для определения фазовых соотношений используйте сетку, изображенную на рис. 5.10, *б*.

Регулируя усиление по горизонтали и вертикали, проследите пересечение эллипса с координатными осями и отметьте обозначенные на них фазовые углы.

5. Для измерения частоты при помощи фигур Лиссажу на одни пластины подайте напряжение от образцового генератора частоты, а на другие — от испытуемого объекта или проверяемого ге-

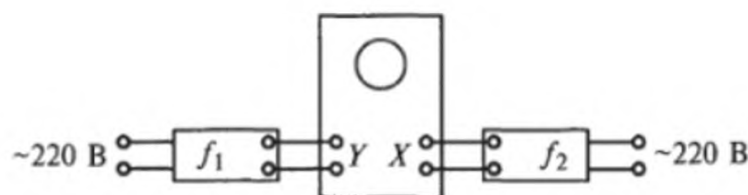


Рис. 5.11. Схема для определения частоты по фигурам Лиссажу

Отношение частот $f_X:f_Y$	Начальная фаза φ				
	0	45°	90°	135°	180°
1 : 1					
1 : 2					
1 : 3					
2 : 3					

Рис. 5.12. Фигуры для определения кратных частот и фазовых соотношений

нератора (рис. 5.11). Пользуясь рис. 5.12, определите по частоте образцового генератора неизвестную частоту.

При определении соотношения частот установите, сколько раз фигура касается горизонтальной линии описанного прямоугольника и сколько раз — вертикальной. Допустим, что в первом случае — n раз, а во втором — m раз. Тогда частоты f_Y и f_X , поданные на пластины X и Y , будут соотноситься следующим образом:

$$\frac{f_Y}{f_X} = \frac{n}{m}.$$

При другом методе определения частоты составьте контур из емкости и активного сопротивления и, регулируя усиление по осям X и Y , добейтесь на экране изображения окружности. Затем отключите проводник от зажима Y и между этим проводником и зажимом введите напряжение, частоту которого необходимо измерить.

По числу зубцов определите отношение исследуемой частоты к частоте напряжения, поданного на контур.

Если напряжение от генератора исследуемой частоты последовательно включается с напряжением образцового генератора ча-

стоты и зажимами Y осциллографа, то на экране ЭО можно наблюдать изменение мгновенного значения напряжения биения. Регулируя напряжение образцового генератора, на экране можно наблюдать узлы и пучности. По числу периодов между двумя узлами определите частоту «скольжения» $\omega_c = \omega_1 - \omega_2$, а по ней — неизвестную частоту.

Контрольные вопросы

1. Что такое непрерывная развертка?
2. Что представляет собой ждущая развертка и когда она применяется?
3. Что такое линия задержки и когда она применяется?
4. Как изобразится на экране ЭО синусоидальное напряжение, поданное на пластины Y , если частота развертки в пять раз меньше исследуемой (время обратного хода луча считать равным нулю)?
5. Какова должна быть частота непрерывной развертки для получения на экране четырех периодов, если частота исследуемого напряжения 400 Гц (временем обратного хода луча пренебречь)?
6. Как определить частоту непрерывной развертки, если необходимо получить на экране три периода исследуемого напряжения ($T = 10$ мкс)?
7. Каким образом изменится частота развертки, если сопротивление в контуре генератора развертки изменить в два раза (частота развертки пилообразного напряжения простейшего генератора $f = 500$ Гц)?
8. Как по эллипсу, полученному на экране ЭО, можно определить фазовые соотношения напряжений, подведенных к ЭО?
9. Каким образом определяют частоту на ЭО по замкнутым фигурам Лиссажу?
10. Как можно отличить знак угла при определении фазового соотношения по эллипсу?

Лабораторная работа № 6

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Цель работы

Исследование свойства ферромагнитного образца при помощи ЭО.

Основные сведения

Магнитные материалы отличаются от немагнитных высоким значением магнитной проницаемости и нелинейностью зависимости между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля. Вследствие этого магнитная проницаемость не постоянна, а зависит от величины напряженности магнитного поля.

Каждый магнитный материал характеризуется *петлей гистерезиса*, которая представляет собой зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля (рис. 6.1). По этой кривой определяются следующие параметры магнитного материала:

основная кривая намагничивания (кривая *ab*) — характеризует намагничивание полностью размагниченного материала;

индукция насыщения (B_m) — максимально возможная индукция для данного материала;

остаточная индукция (B_r) и *коэрцитивная сила* (H_c) — характеризуют свойства материала как постоянного магнита;

частичная петля гистерезиса (кривая *вг*) — определяет перемагничивание материала при одновременном воздействии постоянной H_0 и переменной H_{\sim} намагничивающих сил;

кривая размагничивания (кривая *де*);

статическая магнитная проницаемость — отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля в данной точке: $\mu = B/H$;

начальная магнитная проницаемость μ_0 — тангенс угла наклона основной кривой намагничивания при $H = 0$;

динамическая магнитная проницаемость μ_{\sim} — тангенс угла наклона частичной петли гистерезиса в данной точке.

Магнитные материалы подразделяются на мягкие и твердые. *Мягкими* называются материалы с узкой петлей гистерезиса (с малым значением коэрцитивной силы). Их используют для сердечников электрических машин и электромагнитов. *Жесткие* маг-

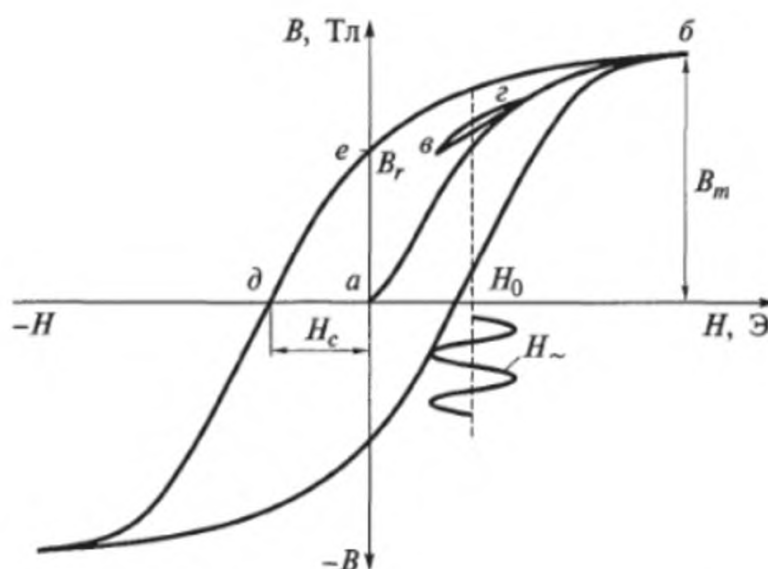


Рис. 6.1. Петля гистерезиса магнитных материалов

нитные материалы характеризуются широкой петлей гистерезиса и используются для постоянных магнитов.

Исследование магнитных свойств ферромагнетиков при помощи ЭО имеет большое практическое значение потому, что точные стандартные методы (ваттметровый и баллистический) требуют много времени и нуждаются в сложных и громоздких установках. Применение для этой цели ЭО дает значительную экономию времени, отличается своей наглядностью и не требует большого количества ферромагнитного материала (рис. 6.2).

Регулировка тока первичной цепи осуществляется от автотрансформатора, так как при этом обеспечивается синусоидальная форма напряжения, подведенного к первичной обмотке испытуемого образца. Регулировка тока при помощи реостатов обычно вызывает искажение формы напряжения, подведенного к первичной обмотке, так как падение напряжения на регулирующих

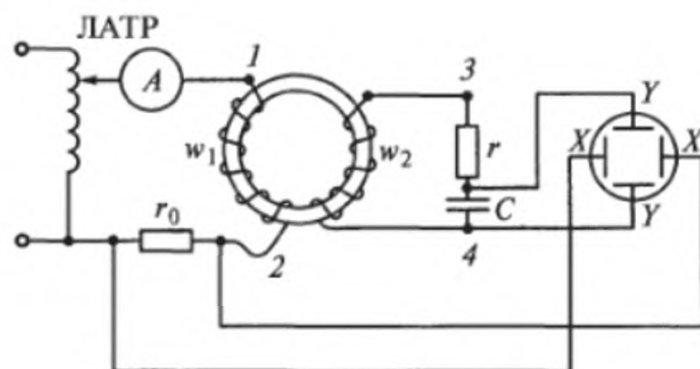


Рис. 6.2. Схема для исследования петли гистерезиса ферромагнитных материалов

ток сопротивления обычно бывает несинусоидальным. По этой же причине сопротивление r_0 берется достаточно малым.

Для получения напряжения, подаваемого на пластины YY , пропорционального магнитной индукции B , в схеме рис. 6.2 использован простейший интегрирующий контур rC . Применение сопротивления r_0 , не имеющего индуктивности, обеспечивает необходимое падение напряжения, подаваемого на пластины XX , и перемещение луча по горизонтали, пропорциональное мгновенным значениям напряженности поля H . Для вторичной цепи

$$-w_2 S_m \frac{dB}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + \frac{1}{C} \int i_2 dt,$$

где w_2 — число витков вторичной обмотки; S_m — площадь поперечного сечения магнитного образца.

При большом значении c и малом L_2

$$i_2 = -\frac{w_2 S_m}{r_2} \frac{dB}{dt}. \quad (6.1)$$

Подставляя формулу (6.1) в выражение $U_C = \frac{1}{C} \int i_2 dt$ и интегрируя, получаем напряжение на конденсаторе

$$U_C = -\frac{1}{Cr_2} w_2 S_m B.$$

Здесь $r_2 = r + r_{обм}$, где $r_{обм}$ — сопротивление обмотки, что близко к r .

Для тока в емкости

$$I = U_{вых} Y,$$

где $U_{вых}$ — выходное напряжение; Y — проводимость конденсатора, $Y = j\omega C$.

Напряжение на зажимах 3 и 4 (см. рис. 6.2):

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_{вых} + \dot{I}r; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_{вых} + \dot{U}_{вых} j\omega Cr = \dot{U}_{вых} (1 + j\omega Cr); \\ \dot{U}_2 / \dot{U}_{вых} &= 1 + j\omega Cr. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Из отношения (6.2) можно установить угол фазового искажения интегрирующего контура:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}} \right)}{\frac{1}{j} \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}} \right)}.$$

Так как в уравнении (6.2) $\operatorname{Re} = 1$, а $\operatorname{Im} = j\omega Cr$, то

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{r\omega C}. \quad (6.3)$$

Уменьшение фазового искажения при заданной частоте может быть достигнуто при больших значениях r и C . Из формулы (6.3) следует, что минимальные углы θ можно получить при большой емкости, тогда напряжение на емкости будет мало и необходимо ввести усилители.

В результате исследования ряда схем при частоте 50 Гц принят контур, который для большого числа случаев не нуждается в дополнительном усилении (рис. 6.3). Основная часть контура $r_1 C_1$ дополняется корректирующим контуром $r_2 C_2$. Путем изменения r_2 осуществляется корректирование угловой погрешности. Характер возможных фазовых искажений показан на рис. 6.4, а, б.

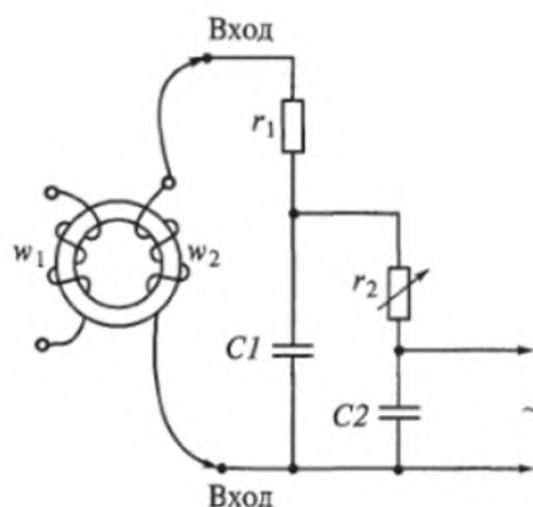


Рис. 6.3. Схема интегрирующего контура с возможностью исправления фазовых искажений

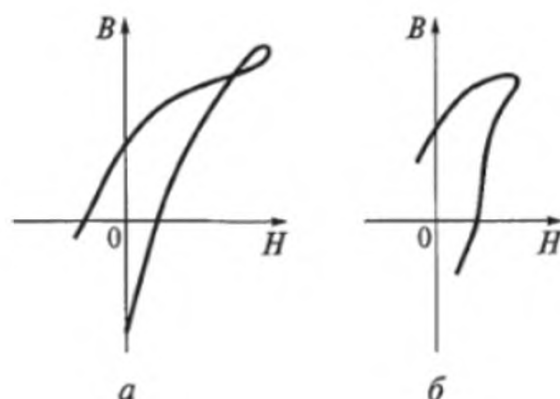


Рис. 6.4. Виды возможных фазовых искажений:

a — при малом значении r_2 ; *б* — при чрезмерно большом значении r_2

Рассматривая ЭДС вторичной обмотки, можно написать

$$-e_2 = \frac{w_2 S_M dB}{10^8 dt} = \frac{w_2 S_M dB dH}{10^8 dH dt},$$

где dB/dH — дифференциальная магнитная проницаемость, обозначаемая через μ_d .

Таким образом,

$$-e_2 = \frac{w_2 S_M}{10^8} \mu_d \frac{dH}{dt}. \quad (6.4)$$

Для относительно больших значений тока I_m и материала с прямоугольной петлей гистерезиса при синусоидальном изменении поля можно считать ωt малым:

$$H = H_m \sin \omega t \cong H_m \omega t = \left[(0,4\pi I_m w_1)/l_M \right] \omega t,$$

где H_m — нормальное значение напряженности поля; l_M — длина средней линии магнитной индукции в образце.

Производная по времени

$$\frac{dH}{dt} = \frac{0,4\pi I_m w_1}{l_M} \omega. \quad (6.5)$$

Подставляя условие (6.5) в выражение (6.4), получим

$$-e_2 = \frac{0,4\pi I_m w_1 w_2 S_M \omega}{10^8 l_M} \mu_d.$$

Таким образом, e_2 пропорциональна μ_d . Это позволяет наблюдать достаточное отклонение луча по вертикали при исследовании малых образцов, так как на пластины YU подается вся ЭДС e_2 .

Методика выполнения работы

1. Соберите установку по схеме рис. 6.5.
2. При установлении петли гистерезиса регулировкой с помощью МС r_2 исключите фазовое искажение.
3. Определите масштаб для H , пользуясь данными тороида и отклонением луча по горизонтали, Э/см:

$$m = \frac{H_m}{X},$$

где H_m — максимальное значение напряженности поля, Э; X — перемещение луча по горизонтали от центра экрана;

$$H_m = \frac{0,4\pi I_1 \sqrt{2} w_1}{l_m}.$$

Здесь I_1 — ток первичной обмотки образца; w_1 — число витков первичной обмотки образца; l_m — длина средней линии магнитопровода в образце.

Значение H_m занесите в табл. 6.1.

4. Определите масштаб для B , пользуясь показанием ЛВ и отклонением луча по вертикали, Тл:

$$B_m = \frac{e_2 \cdot 10^8}{4,44 f w_2 S_m},$$

где e_2 — ЭДС вторичной обмотки (действующее значение), определяемая по вольтметру, В; f — частота, Гц; w_2 — число витков вторичной обмотки; S_m — площадь сечения магнитного образца, см².

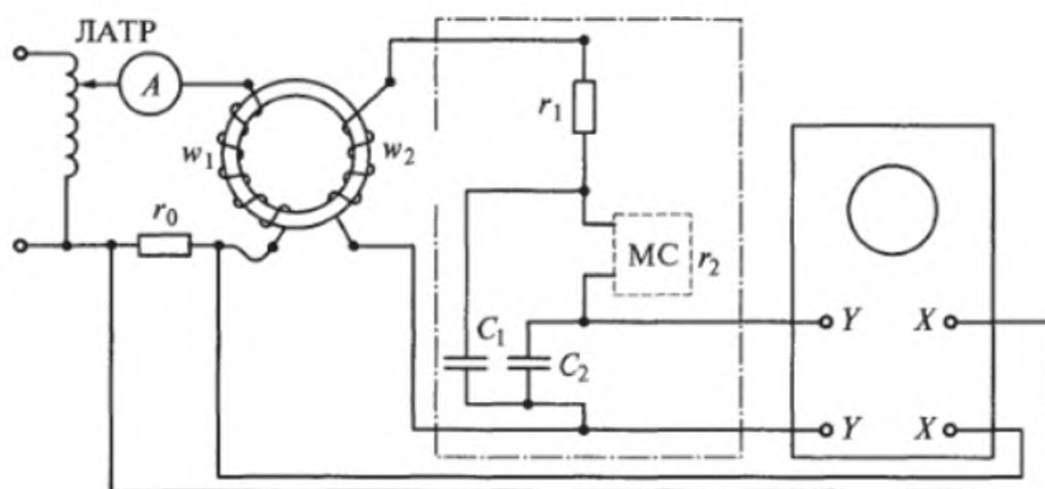


Рис. 6.5. Схема стенда для получения петли гистерезиса

Таблица 6.1

№ п/п	Результат наблюдений			Расчетные данные			
	Ток		Площадь петли, см ²	ЭДС, е ₂ , В	Магнитная индукция В _т , Тл	Напря- женность поля Н _т , Э	Потери на один цикл р, эрг/см ²
	дел	А					

Зная вертикальное перемещение луча от середины экрана, получите масштаб, Тл/см,

$$n = \frac{B_m}{y}.$$

Значение B_m запишите в табл. 6.1.

5. При различных значениях тока зафиксируйте на кальке гнездо петель гистерезиса, определите площадь каждой из них. По вершинам петель гистерезиса постройте кривую намагничивания. По полученным данным определите потери на 1 и 50 циклов. По данным табл. 6.1, пользуясь формулой потерь на один цикл, эрг/см²,

$$p = \frac{1}{4\pi} \oint H dB = \frac{Fnm}{4\pi},$$

постройте кривые: а) $B = f(H)$; б) $\mu = f(H)$; в) $P = f(H)$.

Потери на 1 кг испытуемого материала при частоте 50 Гц определяются по формуле

$$P = p \frac{f \cdot 10^{-4}}{\gamma},$$

где γ — плотность материала магнитопровода ($\gamma = 7,8$).

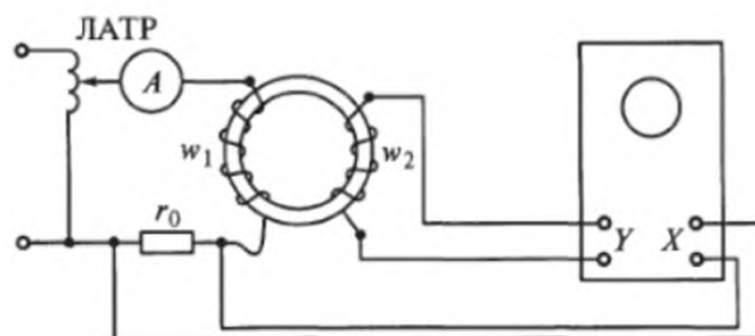
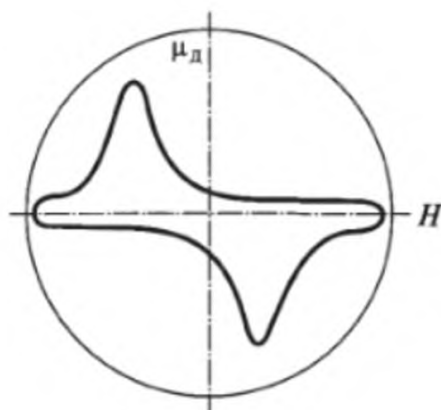


Рис. 6.6. Схема стенда для получения дифференциальной магнитной проницаемости

Рис. 6.7. Наблюдаемая на экране дифференциальная магнитная проницаемость



6. Соберите схему по рис. 6.6 для получения дифференциальной магнитной проницаемости в функции H . Для заданного значения тока выясните, при каком значении H наблюдается максимум μ_d .

Для ферромагнетиков с прямоугольной петлей гистерезиса примерная характеристика изображена на рис. 6.7.

Контрольные вопросы

1. Почему ток первичной цепи следует регулировать не реостатом, а ЛАТР?
2. Почему сопротивление r_0 в первичной цепи желательно брать малым?
3. Что может вызвать применение r_0 с наличием индуктивности?
4. При каких значениях r_1 и C_1 интегрирование будет точнее?
5. Что достигают применением второго контура $r_2 C_2$?
6. Как должны быть нанесены на тороид обмотки w_1 , w_2 и почему?
7. Какие искажения могут возникать на экране ЭО? Как и в каких случаях следует изменять сопротивление?
8. Почему при исследовании характеристик малых образцов удобно пользоваться наблюдением на экране ЭО дифференциальной магнитной проницаемости?
9. Как определяют потери в ферромагнетике по петле гистерезиса?

Лабораторная работа № 7

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Цель работы

Ознакомление с основными свойствами датчиков Холла, помещенных в магнитное поле, и с некоторыми возможностями их применения для измерительной техники.

Основные сведения

Датчик (преобразователь) Холла представляет собой полупроводниковую пластинку из материала с большой подвижностью электронов, в которой используется эффект Холла. Датчик Холла схематически изображен на рис. 7.1.

Возбуждающая ЭДС E_c создает ток I_c , и в полупроводниковой пластинке возникает внутреннее однородное магнитное поле. При этом носители положительного заряда перемещаются слева направо в плоскости пластинки. Благодаря однородности внутреннего магнитного поля и симметрии пластинки разность потенциалов между контактами 1 и 2 равна нулю, если пластина не находится во внешнем магнитном поле.

Если же датчик поместить в однородное внешнее магнитное поле, то все положительные носители заряда отклоняются от своего первоначального направления. Их траектория показана на рис. 7.1 сплошной линией.

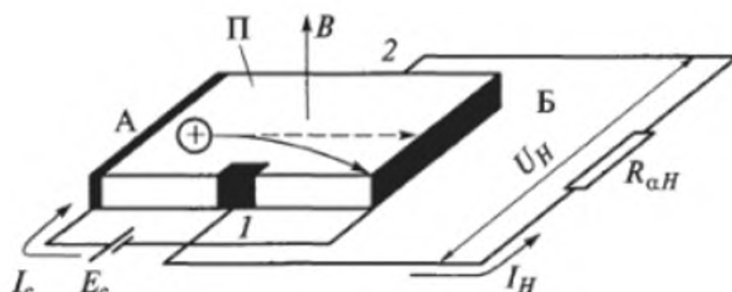


Рис. 7.1. Датчик Холла:

П — полупроводниковая пластинка; А, Б — контакты в цепи тока I_c ; 1, 2 — контакты в цепи Холла; $R_{аН}$ — внешнее сопротивление в цепи ЭДС Холла

Вследствие этого на разомкнутых контактах 1 и 2 возникает разность потенциалов, называемая ЭДС Холла. Ее значения зависят от тока I_c и магнитной индукции B :

$$U_{H0} = K_0 B I_c.$$

Зависимость между U_{H0} и I_c строго линейна, но из-за того, что $K_0 = f(B)$, зависимость U_{H0} от B нелинейна. Эта нелинейность несколько уменьшается, если к контактам 1 и 2 подключить сопротивление $R_{\alpha H}$, которое должно быть примерно в 2...4 раза больше внутреннего сопротивления пластинки между контактами 1 и 2 при отсутствии магнитного поля. Тогда между величинами U_H и B получается соотношение

$$U_H = K B I_c,$$

где K — чувствительность преобразователя Холла.

При этом зависимость $K = f(B)$ незначительна и результирующая погрешность измерения в однородном магнитном поле получается менее 1% номинального значения ЭДС Холла.

При этом предполагается, что ток I_c постоянен в процессе измерения.

Однако обеспечение этого условия сопряжено с известными трудностями, так как, во-первых, этот ток довольно велик (от 0,1 до 0,5 А) и, во-вторых, внутреннее сопротивление преобразователя Холла сильно зависит от магнитной индукции, поэтому источник тока либо должен иметь большое внутреннее сопротивление, что связано с большими потерями энергии, либо для этой цели необходимо применять электронный стабилизатор тока.

При токе 100 мА и магнитной индукции 1 Тл ЭДС Холла получается порядка 60 мВ.

Оптимальное значение внешнего сопротивления в цепи ЭДС составляет примерно 2 Ом. При этих данных обеспечивается ток I_H примерно 20 мА, поэтому для измерения ЭДС Холла может быть применен магнитоэлектрический прибор сравнительно низкой чувствительности. Существенное преимущество преобразователя Холла по сравнению с приборами с измерительной катушкой — это его очень малые размеры. Можно изготовить преобразователь Холла с полупроводниковой пластинкой размерами 2×1 мм.

Для измерений электрической мощности используют схемы на основе различных множительных устройств. Одним из них может служить датчик Холла, предназначенный для измерения магнитной индукции.

Материалом пластинки чаще всего служат кремний, арсенид индия или антимонид индия.

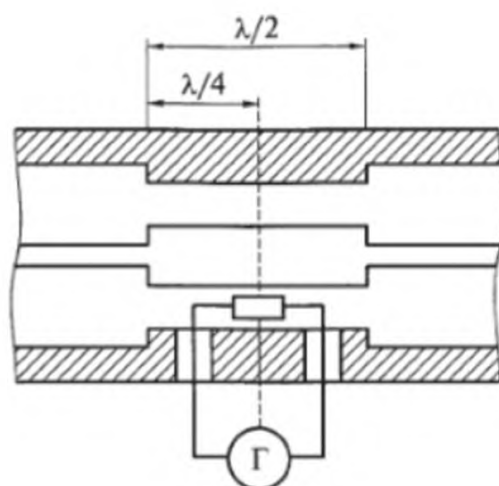


Рис. 7.2. Схема расположения кристалла полупроводника в коаксиальной линии:

λ — длина волны

Если пластинку Холла поместить в поле электромагнита постоянного тока, ток обмотки которого I_e измеряется, то магнитная индукция B поля этого электромагнита оказывается пропорциональной I_e , а напряжение Холла будет пропорционально произведению двух токов. Так как I_e пропорционален напряжению обмотки электромагнита U_e , а ток I_{ct} также может быть измеряемой величиной, то датчик Холла позволяет измерять и мощность.

В радиотехнических системах существует два варианта измерителей мощности: для коаксиальной линии (рис. 7.2) и волноводной (рис. 7.3).

Для повышения чувствительности необходимо увеличить количество полупроводниковых элементов и располагают их в местах наибольшей интенсивности электромагнитного поля. В коаксиальной линии полупроводниковые элементы можно располагать радиально.

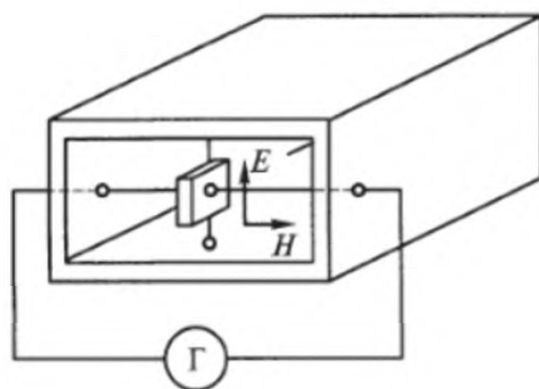


Рис. 7.3. Схема расположения кристалла полупроводника в волноводной линии:

H — направление магнитного поля; E — направление электрического поля

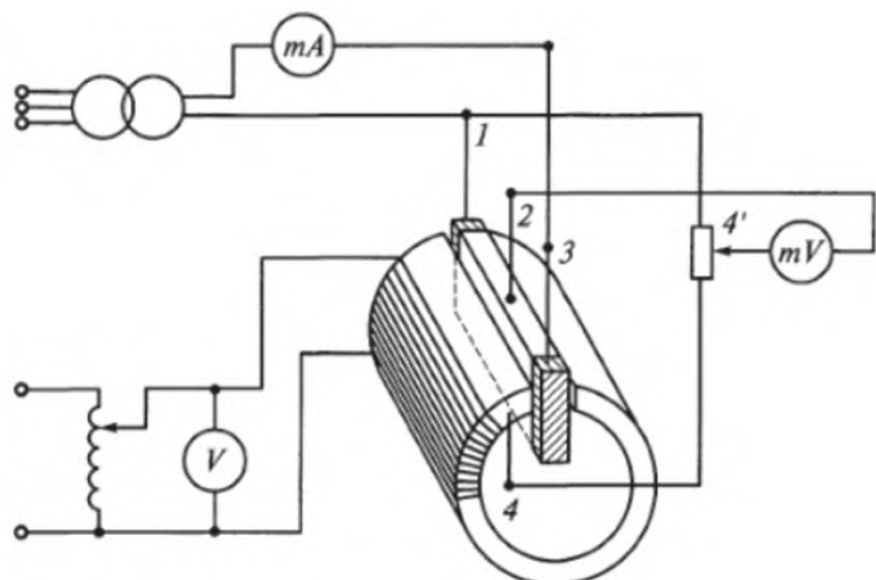


Рис. 7.4. Схема экспериментального исследования датчика

Изменяя поперечные размеры линии и размещая полупроводниковый элемент как можно ближе к центральному проводнику, где магнитное поле наиболее сильное, можно увеличить чувствительность измерителя мощности, выполненного на коаксиальной линии (см. рис. 7.2).

Если полупроводниковые элементы расположить вдоль широкой стороны волновода или сузить часть волновода, то можно увеличить чувствительность измерителя мощности в волноводной линии.

Чтобы скомпенсировать неоднородности, вносимые в коаксиальный и волноводный тракты полупроводниковыми элементами, используются согласующие штыри, диафрагмы и другие трансформирующие устройства.

Преимущество измерителей мощности с использованием эффекта Холла в полупроводниках заключается в отсутствии погрешности, связанной с рассогласованием нагрузки, и в малой инерционности.

Магнитоэлектрический прибор (рис. 7.4) реагирует на среднее значение ЭДС Холла.

На рис. 7.5, а показано изменение мгновенных значений тока, протекающего по пластинке, и мгновенное значение напряженности магнитного поля, в котором находится пластинка. Угол φ определяется положением ручки фазорегулятора ФР. Произведение двух синусоид определяют ЭДС Холла, мгновенное значение которой показано на рис. 7.5, б. Реактивная энергия, соответствующая заштрихованной части синусоиды, не может воздействовать на подвижную систему прибора, так как она раскачивает систему в разные стороны.

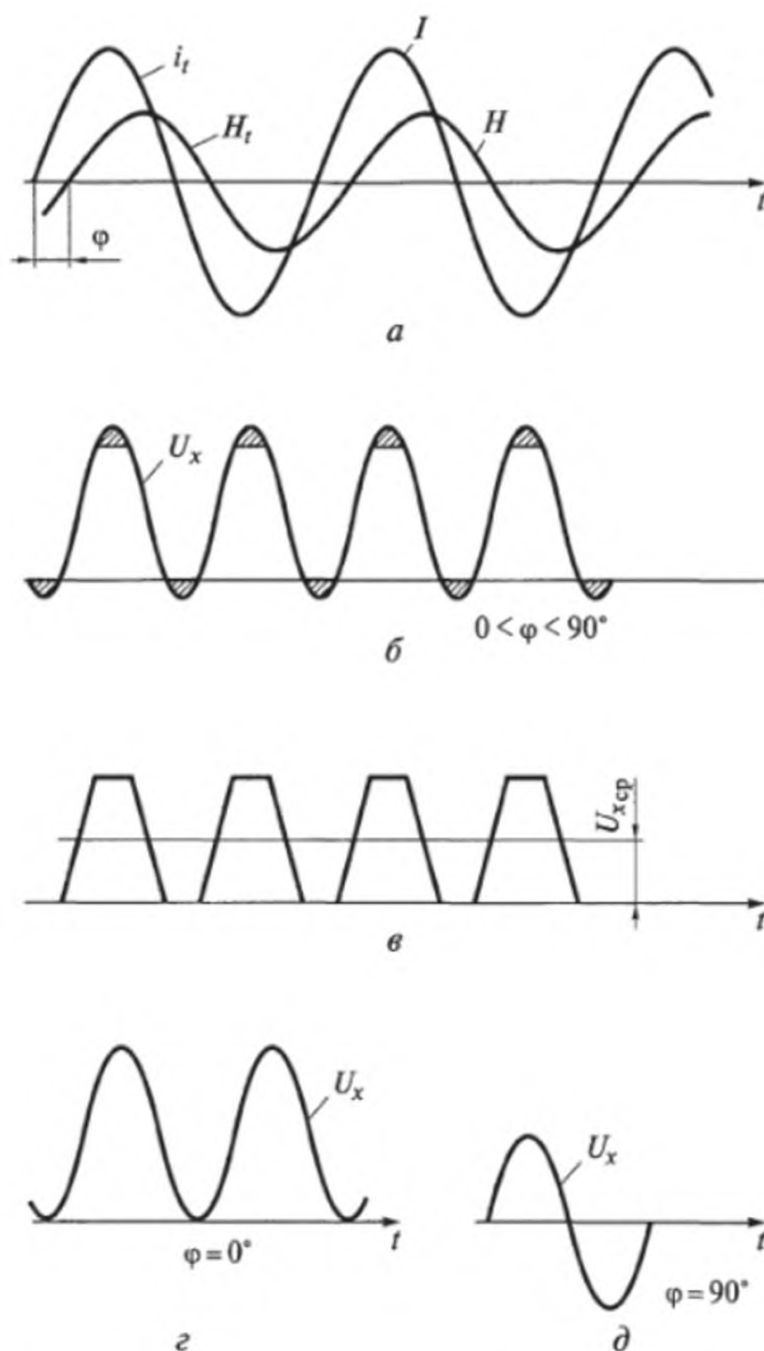


Рис. 7.5. Графики средних значений напряжений Холла при различных фазовых соотношениях между H_t и i_t :

a — мгновенные значения H_t и i_t ; b — мгновенное значение произведения $H_t i_t$; c — энергия активной мощности; z, d — мгновенные значения мощности при $\varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$ соответственно

Таким образом, воздействие на прибор будет осуществляться в соответствии с площадью трапеций (рис. 7.5, c), а само среднее значение, вызывающее поворот стрелки прибора, составит U_{xcp} .

На рис. 7.5, z и d показаны два крайних случая, определяемых поворотом ручки фазорегулятора: $\varphi = 0$ (наибольшее отклонение указателя) и $\varphi = 90^\circ$ (наименьшее отклонение указателя).

Все промежуточные фазовые соотношения вызывают отклонения на угол

$$\alpha_{\text{пр}} = KIH \cos \varphi,$$

где K — коэффициент, зависящий от материала и размеров пластинки; I — амплитудное значение переменного тока, протекающего по пластинке; H — амплитудное значение напряженности переменного магнитного поля; φ — угол сдвига фаз между I и H .

На рис. 7.6, а показана упрощенная схема применения датчика Холла для измерения активной мощности. Предполагается, что поле H , создаваемое током нагрузки, находится в фазе с этим током, а ток, протекающий по датчику, — в фазе с напряжением U . Прибор реагирует на $\alpha_{\text{пр}}$.

Поле H создается катушкой индуктивности со сталью (рис. 7.6, б), и таким образом поток относительно напряжения сдвинут на 90° , а ток нагрузки обтекает датчик. Отклонение стрелки прибора отмечает

$$\alpha_{\text{пр}} = KU I \sin \varphi.$$

Эффект Холла может быть использован для квадратичного детектирования.

В тех случаях, когда ток, протекающий по пластинке датчика, и магнитное поле, пронизывающее пластинку, по фазе не имеют сдвига, ЭДС Холла

$$U_x = CR_x I_0^2,$$

если $H = CI_0$.

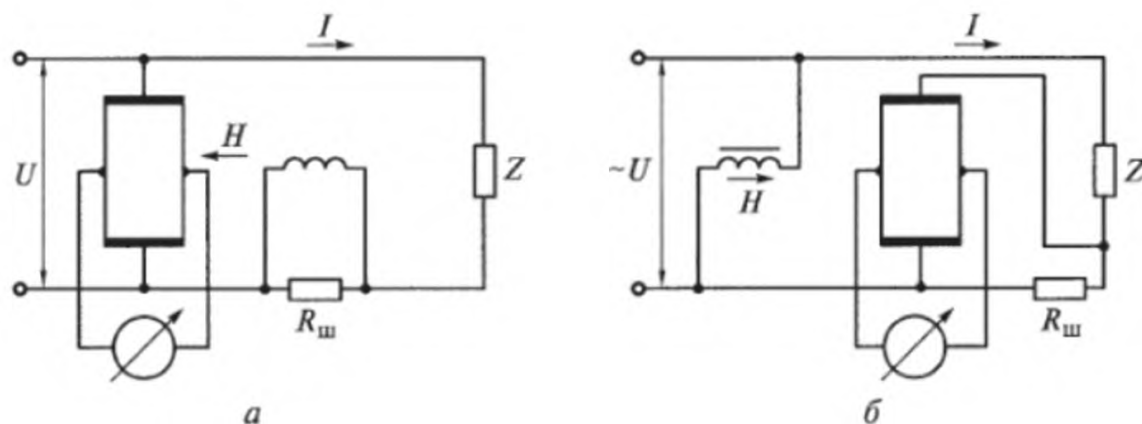


Рис. 7.6. Схемы измерения мощности:

а — активной; б — реактивной

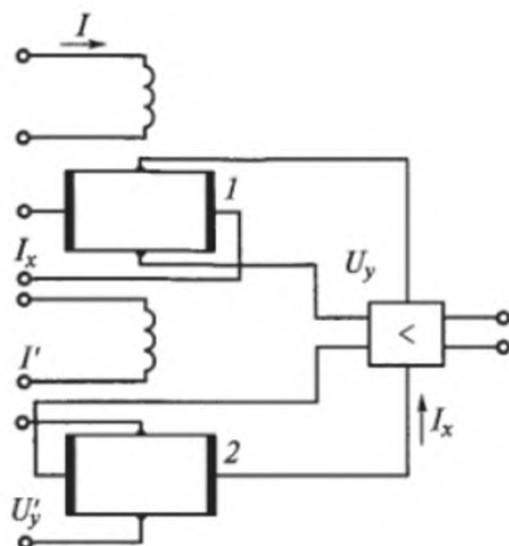


Рис. 7.7. Схема перемножения трех величин

Для тока, изменяющегося с частотой ω , можно записать:

$$U_x = CRI_0^2 \sin^2 \omega t = CR \frac{I_{0m}^2}{2} - CR \frac{I_{0m}^2}{2} \cos 2\omega t.$$

Такое напряжение, контролируемое магнитоэлектрическим прибором, дает отклонение

$$\alpha_{пр} \equiv CRI_0^2,$$

так как переменная составляющая в показаниях магнитоэлектрического измерителя не учитывается.

На рис. 7.7 изображена схема перемножения трех величин, предварительно преобразованных в токи: I , I' и I_x . Электродвижущая сила Холла датчика 1 пропорциональна току I_x , умноженному на I :

$$U_x = C_1 I \cdot I_x.$$

Электродвижущая сила Холла датчика 2 пропорциональна усиленному напряжению U_y и току I' , который создает поле для второго датчика.

Тогда выходное напряжение

$$U'_y = C_2 I' U_x.$$

После подстановки U_x получим

$$U'_y = C_3 I \cdot I_x I'.$$

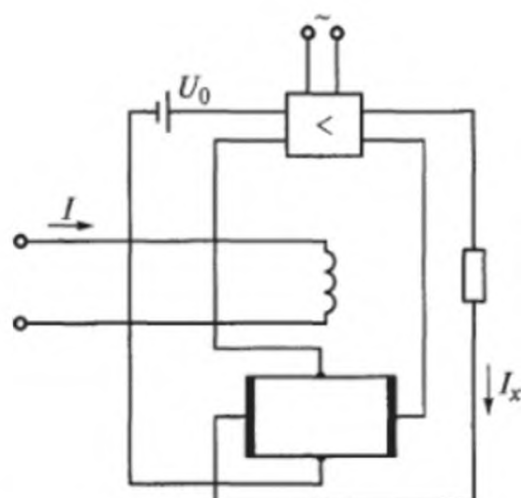


Рис. 7.8. Схема получения ЭДС, обратной заданному значению тока

В схеме на рис. 7.8, позволяющей получать значение ЭДС Холла, обратной заданному значению тока,

$$U_x = U_0 = I \cdot I_x C = \text{const.}$$

Если ток в обмотке электромагнита будет меняться, то

$$I_x = \frac{C}{I}.$$

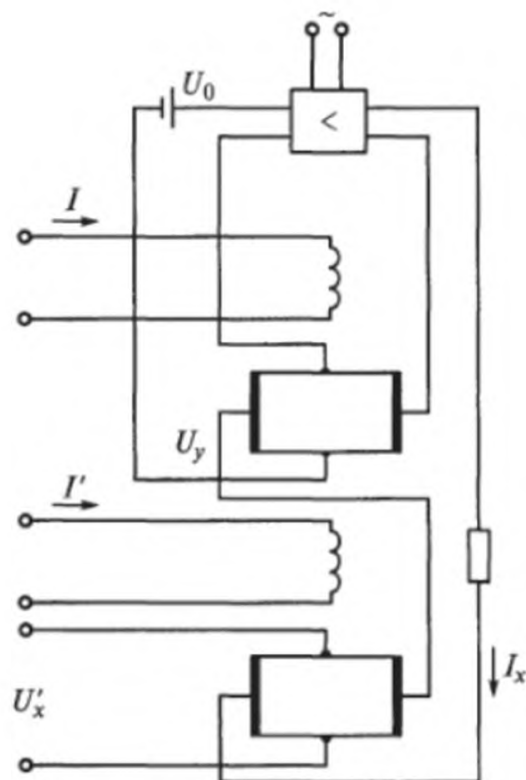


Рис. 7.9. Схема получения частного двух величин

Для получения частного двух величин I_1/I может быть использована схема, показанная на рис. 7.9. Эта схема состоит из элемента, выполненного по схеме, представленной на рис. 7.8, позволяющего получить обратную величину в виде тока $I_x = \frac{C_1}{I}$, и второго элемента перемножения.

Полученный ток I_x пропускается через второй датчик, который пронизывается потоком от заданного тока I . Тогда выходная ЭДС Холла на втором датчике

$$U'_x = C_2 \frac{I_1}{I}.$$

Рассмотренные схемы показывают, что преобразователи, работающие на принципах эффекта Холла, могут быть использованы не только для измерения различных физических величин, но и для проведения с ними математических операций умножения.

Методика выполнения работы

1. Соберите схему по рис. 7.4.
2. Включите переменный ток и при вынутом из воздушного зазора электромагнита датчике отметьте отсутствие неэквипотенциальных выводов Холла. При наличии неэквипотенциальности выводов Холла регулировкой движка реостата R добейтесь нуля на милливольтметре.
3. Установите напряжение на ЛАТР около 30 В; вращая ручку фазорегулятора, через каждые 20...30 делений отметьте показания милливольтметра и запишите в табл. 7.1. Повторите эти измерения при других значениях напряжения.
4. Постройте семейство кривых ЭДС Холла в функции $U_x = f(\varphi)$ фазового соотношения между потоком, пронизывающим датчик, и током на входе датчика, беря за параметр напряжение на обмотке электромагнита.

Таблица 7.1

Напряжение на электромагните, В	Деления на лимбе фазорегулятора, °												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
30													
60													
90													
120													

Контрольные вопросы

1. От чего зависит ЭДС Холла?
2. Что такое коэффициент передачи?
3. Что такое вольтовая чувствительность датчика Холла?
4. Что такое коэффициент использования датчика Холла?
5. Что такое неэквивпотенциальность датчика Холла?
6. Каким образом устраняют неэквивпотенциальность выводов Холла?
7. На какое значение реагирует магнитоэлектрический прибор, включенный на выводы Холла, при переменном магнитном поле и переменном токе, протекающем через датчик?
8. Какую роль играет фазорегулятор в схеме исследования эффекта Холла?
9. Какова разница между взаимодействием токонесущего проводника, помещенного в магнитном поле, и эффектом Холла?
10. Почему эффект Холла сильнее проявляется в полупроводниках, чем в проводниках?
11. Какие соотношения геометрических размеров рекомендуются для датчиков Холла?
12. Каким образом влияет форма полупроводника, помещенного в магнитное поле, на изменение его сопротивления?

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ДОБРОТНОСТИ

Цель работы

Ознакомление с резонансным методом измерения параметров электрических цепей и измерителями добротности (Q -метрами).

Основные сведения

Резонансный метод измерения добротности и других параметров электрических цепей основан на возникновении в последовательном контуре резонанса напряжений и определении отношения напряжения на конденсаторе U_C к ЭДС, действующей в этом контуре. Добротность характеризуется увеличением напряжения на емкости контура в Q раз по сравнению с ЭДС, вводимой в контур, и определяется отношением

$$Q = \omega L / R,$$

где ω — круговая частота; L — индуктивность; R — активное сопротивление.

Для пояснения этого метода и принципа работы Q -метра рассмотрим основной элемент этого прибора — последовательный контур (рис. 8.1). При настройке контура в резонанс с помощью конденсатора имеет место следующее соотношение:

$$\left| \frac{U_C}{E} \right| = \sqrt{1 + Q^2};$$

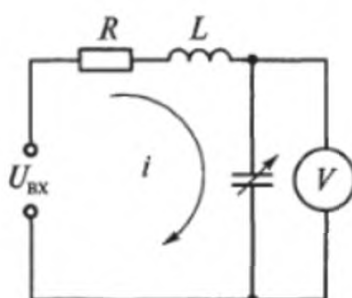


Рис. 8.1. Контур последовательного резонанса

$$\left| \frac{U_C}{E} \right| = Q, \text{ если } Q \gg 1,$$

из которого непосредственно можно определить искомую добротность катушки. Если требуется измерить индуктивность катушки, то последняя определяется из формулы

$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C_0}, \quad (8.1)$$

где C_0 — величина образцовой емкости Q -метра.

При постоянстве входного напряжения $U_{вх}$ вольтметр, измеряющий напряжение U_C , может быть непосредственно проградуирован в единицах добротности.

Приведенное выше равенство справедливо, если:

- 1) переменный конденсатор контура не имеет потерь;
- 2) измеритель напряжения U_C имеет бесконечно большое входное сопротивление.

Поскольку такие условия не реализуемы, то отношение U_C/E будет функцией не только добротности измеряемой катушки индуктивности, но и добротности конденсатора с учетом шунтирующего действия входного сопротивления измерителя напряжения, поэтому справедливо следующее отношение:

$$\frac{Q_C}{E} = Q_k \sqrt{\left(\frac{Q_L Q_C}{Q_L + Q_C} \right)^2 + 1},$$

где Q_k — добротность контура; Q_L — добротность катушки индуктивности; Q_C — добротность конденсатора.

Стремление уменьшить шунтирующее действие входного сопротивления измерителя U_C накладывает определенное требование на величину его входного сопротивления. Так, например, требование, чтобы погрешность, вносимая измерителем, не превышала 1 %, влечет за собой условие

$$R_{вх} \geq \frac{99 Q_k}{\omega C_0}.$$

Отношение U_C/E , равное добротности контура, будет тождественно добротности измеряемой катушки при условии $Q_C \gg Q_k$. От того, в какой степени удовлетворяются указанные условия, и будет зависеть величина погрешности измерения добротности катушки. Приведенные выше соотношения справедливы на относи-

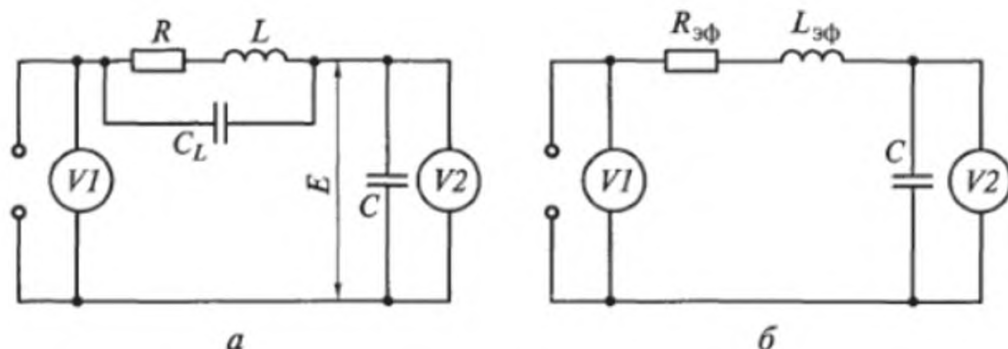


Рис. 8.2. Контур Q -метра с учетом межвитковой емкости катушки:
 а — действительная схема; б — эквивалентная схема

тельно низких частотах, поэтому в низкочастотном Q -метре наивысшая частота составляет 100 кГц.

Измерение индуктивности и добротности контурных катушек и колебательных контуров радиотехнических устройств необходимо производить на рабочих частотах, т. е. порядка 15...250 МГц. На таких частотах в сильной степени проявляется поверхностный эффект и, как следствие, резкое увеличение активного сопротивления. Кроме того, на этих частотах необходимо учитывать межвитковую емкость катушки. Принципиальная схема основного элемента последовательного контура (рис. 8.2, а), применяемого в таких случаях (т. е. в высокочастотных измерителях добротности), и ее эквивалента (рис. 8.2, б) будет несколько отличаться от ранее рассмотренной.

Исходя из этих схем и учитывая, что контур настроен в резонанс, можно записать следующие соотношения:

$$\frac{U_C}{E} = \frac{1}{\omega C_0 R_{эф}} = \frac{\omega L_{эф}}{R_{эф}} = Q_{эф},$$

где $R_{эф}$, $L_{эф}$, $Q_{эф}$ — эффективные значения сопротивления, индуктивности и добротности соответственно с учетом параметров конденсатора C_L .

Величину истинной добротности Q можно рассчитать по формулам:

$$Q = \frac{Q_{эф}}{1 - \omega^2 C_c}; \quad Q = Q_{эф} \frac{C_0 + C_c}{C_0},$$

где C_c — собственная емкость катушки индуктивности.

Низкочастотный Q -метр (рис. 8.3) состоит из задающего генератора напряжения 5, питающего измерительный контур, непосредственно измерительного контура 3 и двух вольтметров — вход-

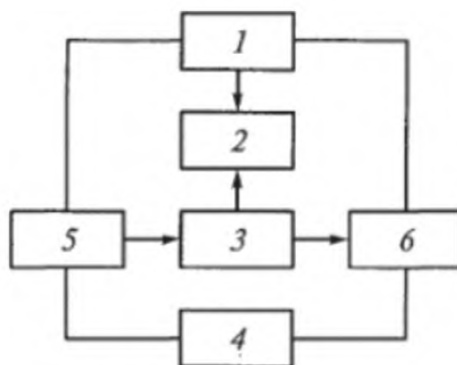


Рис. 8.3. Схема низкочастотного измерителя добротности:

1 — цепь калибровки; 2 — входной ламповый вольтметр; 3 — измерительный контур; 4 — источник питания; 5 — задающий генератор; 6 — выходной ламповый вольтметр

ного лампового 2 (ЛВ-1) и выходного лампового 6 (ЛВ-2) — измерителя выходного напряжения. В его состав также входят цепь калибровки 1 и источник питания 4.

Высокочастотный Q -метр, как и низкочастотный, состоит из тех же узлов и цепей. Однако у этого прибора цепи калибровки выполнены несколько иначе и вольтметр ЛВ-2 имеет 30 МОм.

Методика выполнения работы

Методика выполнения работы на низкочастотном измерителе

1. Подготовьте измеритель к работе:

- а) переключатель «Шкала Q » установите на предел 300;
- б) ручку «Установка входного напряжения» выведите в крайнее левое положение;
- в) ручками «Множитель частоты» и «кГц» установите по шкале генератора частоту 1 кГц;
- г) включите вилку сетевого шнура прибора в сеть;
- д) включите тумблер «220 В»;
- е) дайте прибору прогреться в течение 10 мин;
- ж) после прогрева прибора переключатель «Шкала Q » установите в положение «Калибровка», после чего на частоте 1 кГц откалибруйте измерители. Стрелка прибора Q должна иметь отклонение на полную шкалу; стрелку прибора «Индикатор входного напряжения» установите на риске 50 мВ. Калибровку производите потенциометрами «Калибр измерений», расположенными на передней панели слева от стрелочных приборов.

2. Произведите измерение индуктивности L_x и добротности Q_x на различных частотах по указанию преподавателя:

а) ручку переключателя «Шкала Q » установите в положение 3. Все три ручки декад магазина емкостей выведите в положение 0. Ручкой «кГц» установите по шкале прибора нижнюю граничную частоту. Ручкой «Установка входного напряжения» установите амплитуду сигнала 50 мВ;

б) подключите измеряемую катушку к клеммам прибора в соответствии с гравировкой. Низкопотенциальный вывод катушки подсоедините к нижней клемме. Если при этом стрелка прибора Q уходит за пределы шкалы, то установите ручку «Шкала Q » в положения 10 или 30. После этого настройте контур в резонанс;

в) ручку первой декады (ближайшей к клеммам) выведите в положение 1. Если при этом стрелка прибора Q отклоняется в сторону возрастания, то поставьте декаду в положение 2 и т.д. Введение емкостей первой декады производите до тех пор, пока не достигните максимального отклонения стрелки прибора Q . После этого введите емкости второй декады, а затем третьей (слева направо);

г) вращением ручки «Емкость, пикофард» достигните дополнительно плавной подстройки контура в резонанс. Отсчет добротности произведите по стрелочному прибору Q . Шкалу прибора укажите положением ручки переключателя «Шкала Q », при котором было достигнуто максимальное отклонение стрелки. Показание магазина емкостей запишите в табл. 8.1.

При настройке контура в резонанс амплитуду входного сигнала поддерживайте на делении 50 мВ. При невыполнении этого условия можно получить неправильные показания прибора. При настройке последовательного контура в резонанс его сопротивление становится чисто активным и шунтирует сопротивление связи. Вследствие этого возрастает нагрузка вторичной цепи согласующего трансформатора и напряжение, вводимое в контур, несколько падает. Это особенно заметно при измерении катушек с высокой добротностью. В таких случаях после настройки контура в резонанс ручкой «Установка входного напряжения» установите стрелку входного прибора на делении 50 мВ и после этого снимите отсчет;

д) при измерении малых добротностей на шкалах 3 и 10 исключите погрешность, обусловленную самим принципом Q -мет-

Таблица 8.1

Частота f , кГц	Емкость C , пФ	Индуктивность L , мГн	Добротность Q

ра. Определите истинную добротность катушек на этих шкалах по формуле

$$Q_{\text{ист}} = \sqrt{Q_{\text{от}}^2 - 1},$$

где $Q_{\text{от}}$ — добротность, отсчитываемая по прибору.

На шкалах 30, 100, 300 такого поправочного расчета не требуется. После проведения измерения отсоедините катушку.

3. Произведите измерения на других частотах:

а) ручку «Установка входного напряжения» выведите в крайнее левое положение;

б) ручкой «кГц» установите другую частоту, затем входной сигнал на риску 50 мВ;

в) произведите настройку прибора в резонанс в соответствии с методикой пп. 2 в, д;

г) результаты измерений занесите в табл. 8.1; определите индуктивность катушки по формуле (8.1);

д) постройте графики зависимостей L_x и Q_x от частоты f .

4. По окончании работы с прибором:

а) отсоедините измерительную катушку от клемм прибора;

б) ручку «Шкала Q » установите на шкалу 300;

в) вращением влево до упора ручки «Установка входного напряжения» снимите входной сигнал;

г) ручки декад магазина выведите в нулевые положения;

д) поставьте тумблер «220 В» в положение «Выключено» (при этом сигнальная лампа погаснет);

е) выключите вилку питания из сети.

Методика выполнения работы на высокочастотном измерителе

1. Подготовьте измеритель к работе:

а) включите прибор в сеть; при этом поставьте выключатель сети в положение «Выключено», а ручку установки уровня — в крайнее левое положение. Переключателем «Диапазоны» и ручкой «Частота» установите частоту, соответствующую измеряемой катушке;

б) включите выключатель сети; при этом должна загореться сигнальная лампочка. После десятиминутного прогрева установите переключатель диапазонов добротности в промежуточное положение.

2. Измерьте добротность катушки:

а) подсоедините измеряемую катушку к клеммам L_x . Установите ручкой «Уст. нуля» нуль на выходном вольтметре ЛВ-2. Ручкой

«Уст. нуля» установите нуль входного вольтметра уровня (вольтметр ЛВ-1). Верните переключатель «Диапазоны» в требуемое положение;

б) ручкой «Уст. множ.» установите стрелку прибора вольтметра уровня на нужный множитель. Вращая ручку «Емкость», настройте контур в резонанс по максимуму отклонения вольтметра ЛВ-2 (Q -вольтметра). Измеряемая добротность равна частному от деления показаний вольтметра и вольтметра уровня. Переходя на другую шкалу, при измерении добротности проверьте нуль Q -вольтметра и в случае необходимости установите его.

3. Измерьте индуктивность катушки L_x :

а) измеряемую катушку подключите к клеммам L_x , настройте контур в резонанс, по методике п. 2 отсчитайте значение емкости конденсатора C_0 ;

б) вычислите индуктивность по следующей формуле, мкГн:

$$L_x = \frac{2,53 \cdot 10^{10}}{f^2 C_0},$$

где f — частота, кГц; C_0 — емкость, пФ.

Результат измерения будет тем точнее, чем меньше собственная емкость C_c катушки. Для получения более точного результата вычисление индуктивности катушки следует производить по формуле

$$L_x = \frac{2,53 \cdot 10^{10}}{f^2 (C_0 + C_c)}. \quad (8.2)$$

Вычисление индуктивности по формуле (8.2) производите после измерения собственной емкости катушки по методике п. 5.

4. Определите добротность катушки методом расстройки частоты, который заключается в измерении полосы пропускания контура на уровне $0,5 Q$ и использует зависимость полосы пропускания контура от его добротности:

а) подключите измеряемую катушку к клеммам L_x ;

б) настройте контур в резонанс с помощью конденсатора измерительного блока и измерьте с помощью частотомера частоту f . Заметив значение добротности Q , добейтесь показания прибора $0,5 Q$ с помощью ручки плавной расстройки частоты;

в) измерьте частотомером частоту f_1 , затем расстройте контур в противоположную от резонанса сторону и измерьте частоту f_2 . Добротность контура определите по формуле

$$Q = \frac{f}{f_2 - f_1} \sqrt{3} = \frac{f}{2\Delta f} \sqrt{3}.$$

Методом расстройки частоты определите истинное значение добротности.

5. Измерьте собственную емкость катушки:

а) присоедините катушку к клеммам L_x , произведите настройку в резонанс с помощью ручки «Изменение частоты» генератора при емкости $C_0 = C_1$ измерительного конденсатора, лежащей вблизи минимальных значений;

б) понизьте частоту генератора в k раз относительно первого значения f_1 частоты генератора, т. е.

$$k = \frac{f_1}{f_2},$$

где f_2 — второе пониженное значение частоты;

в) произведите настройку в резонанс на частоте f_2 изменением емкости измерительного конденсатора; запишите новое значение емкости измерительного конденсатора;

г) собственную емкость определите по формуле

$$C_c = \frac{C_2 - k^2 C_1}{k^2 - 1}.$$

Измерение будет тем достовернее, чем больше будет k . Напри-

мер, можно брать $k = 2$, тогда $C_c = \frac{C_2 - 4C_1}{3}$.

6. Измерьте L_x , Q_x и C_0 катушки в экране:

а) введите катушку в экран и закрепите его на корпусе катушки;

б) измерьте индуктивность L_x и добротность Q_x по методике пп. 2 и 3;

в) определите собственную емкость катушки по методике п. 5;

г) вычислите влияние экрана на L_x , Q_x и C_c . Определите степень влияния экрана на эти величины по сравнению с ранее измеренными.

7. Измерьте емкость:

а) подключите измеряемую емкость на зажимы C_x , а на зажимы L_x из имеющегося набора катушек включите образцовую катушку индуктивности L_0 по указанию преподавателя;

б) настройте контур с помощью образцового конденсатора Q -метра в резонанс. Запишите значение емкости образцового конденсатора C_2 ;

в) отключите от зажимов Q -метра измеряемый конденсатор и вновь настройте контур в резонанс. Запишите значение емкости образцового конденсатора C_1 ;

г) определите значение измеряемой емкости по формуле

$$C_x = C_2 - C_1.$$

Контрольные вопросы

1. Какой метод измерения положен в основу работы Q -метра?
2. Почему шкалу вольтметра, измеряющего напряжение на конденсаторе, можно непосредственно проградуировать в единицах добротности?
3. Какие требования предъявляются к Q -вольтметру?
4. Какое напряжение устанавливается по входному вольтметру — индикатору входного напряжения?
5. В чем заключается основное различие между низкочастотным и высокочастотным Q -метрами?
6. Какие факторы влияют на точность измерения добротности катушки индуктивности?
7. Каким образом производится измерение добротности методом расстройки частоты?
8. Как измеряют собственную емкость катушки индуктивности?

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы

Получение данных для построения на фазовой плоскости векторов входного и выходного напряжений четырехполюсника при постоянстве амплитуды, но при изменяющейся частоте входного напряжения.

Основные сведения

Для исследования процессов, возникающих в сложных системах автоматики, важно узнать поведение отдельных элементов при переходных режимах. Такие вопросы выясняются теоретически и экспериментально. Теоретические методы исследования излагаются в специальных курсах. Экспериментальное исследование проводится построением на фазовой плоскости векторов выходного напряжения относительно вектора входного напряжения, частота которого изменяется. Из построения годографа вектора выходного напряжения выясняют поведение данного элемента в общей системе автоматики.

Теория автоматического регулирования располагает критериями (например, критерий Найквиста), на основании которых появляется возможность оценивать характер регулирования (устойчивость системы). Подробно такие вопросы излагаются в специальных курсах по автоматике.

Для исследования амплитудно-фазовых частотных характеристик необходимо менять частоту, начиная с инфранизких частот до 100 Гц включительно. В некоторых системах желательно изменять частоту с 10^{-4} Гц. Получение таких частот весьма затруднительно. В лабораторных условиях диапазон регулировки ограничен от долей герца до 100 и несколько выше. Рассмотрим несколько методов, наиболее доступных для практического осуществления.

Метод с использованием *электронного осциллографа*, позволяющего производить исследование с долей герца, состоит в том, что в качестве источника частоты применяется генератор, позволяющий регулировать частоту подаваемого сигнала (рис. 9.1). На экране осциллографа по эллипсу определяют фазовое соотношение (см. лабораторную работу № 6), а по электронному ЛВ измеряют напряжение на входе и выходе звена. Устанавливая каждый

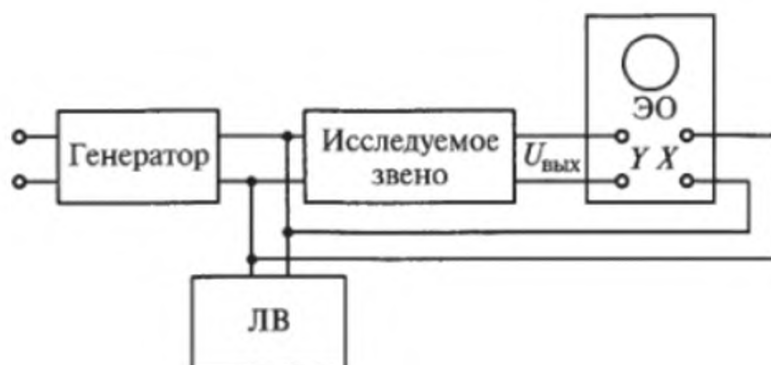


Рис. 9.1. Схема исследования звена автоматики при помощи электронного осциллографа

раз новое значение частоты, входное напряжение поддерживают неизменным. Модуль вектора выходного напряжения определяют по вольтметру, а при построении вектора выходного напряжения по направлению оси действительных чисел откладывают входное напряжение, от которого и отмеривают угол сдвига выходного напряжения, определяемый по ЭО.

Метод с использованием *электро*механического выпрямителя и *магнито*электрического прибора (МЭП) состоит в измерении среднего значения выходного напряжения (рис. 9.2). Так как амплитудное значение вектора выходного напряжения измеряется электронным вольтметром ЛВ-2, то имеется возможность построить вектор выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ относительно входного $U_{\text{вх}}$.

Так как частота при исследовании снижается до инфранизких областей, то начиная с частоты $f = 25$ Гц наблюдение за отклонением колеблющейся стрелки прибора становится затруднитель-

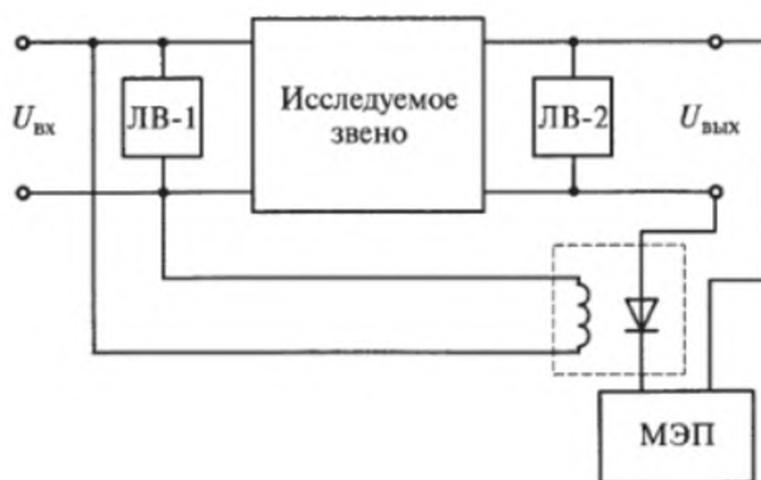


Рис. 9.2. Схема исследования звена автоматики при помощи электро-механического выпрямительного устройства



Рис. 9.3. Блок-схема фазочувствительного вольтметра



Рис. 9.4. Структурная схема фазочувствительного вольтметра

ным, поэтому в качестве измерителя может быть применен флюксметр, работающий в режиме переусиления.

Метод с использованием *электродинамической системы* состоит в том, что входное напряжение подается на неподвижную обмотку, а выходное — на подвижную. Принципиально возможно для этих целей использовать электродинамический логометрический фазометр.

Метод с использованием *фазочувствительного вольтметра* позволяет измерять составляющие вектора первой гармоники на выходе исследуемого объекта по отношению к вектору входного напряжения. В сочетании с ЗГ этим вольтметром можно исследовать амплитудно-фазовые частотные характеристики с пределами изменения напряжения от 15 мВ до 15 В в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц. Диапазон инфранизких частот отсутствует, что ограничивает его применение при исследовании элементов автоматики. Точность измерения угла $\pm 5^\circ$. Гармоники ослабляются не менее чем до 40 дБ (т.е. в 100 раз).

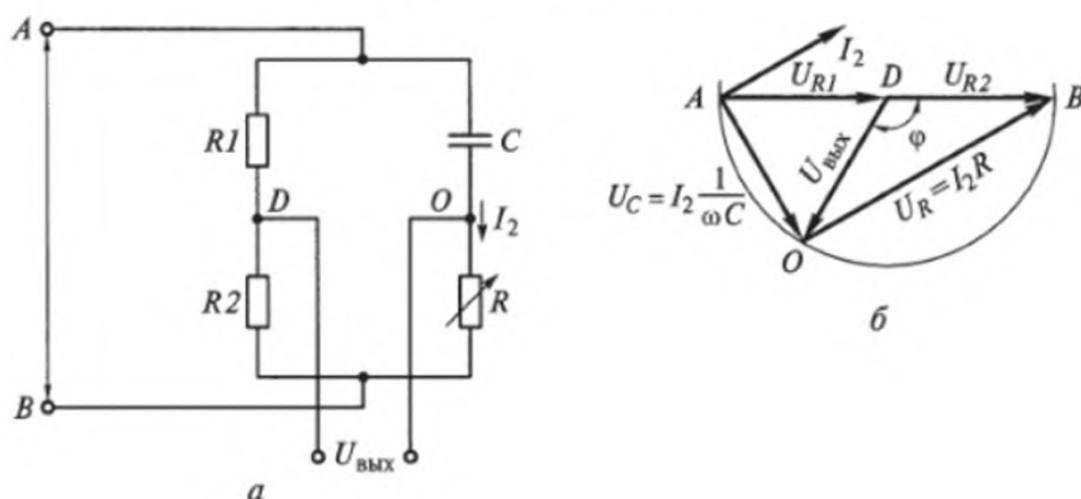


Рис. 9.5. Схема и векторная диаграмма фазовращателя параметрического типа:

a — схема фазовращателя; *б* — векторная диаграмма

Блочная схема вольтметра дана на рис. 9.3, структурная — на рис. 9.4. Не считая элементов усилительных трактов, вольтметр имеет три основных элемента: фазовращатель и два индикатора [один для реальной (действительной) части комплекса U_d и второй для его мнимой части U_{mn}]. Индикаторы представляют собой МЭП с нулем посередине шкалы. Каждый индикатор работает от двух термопреобразователей.

Фазовращатель (рис. 9.5) параметрического типа позволяет получить поворот вектора на 90° . При изменении частоты каждый раз регулируется сопротивление R (рис. 9.5, а) для получения сдвига выходного напряжения на 90° относительно входного.

Векторная диаграмма (рис. 9.5, б) поясняет поворот вектора выходного напряжения U_{OD} относительно U_{AB} . Каждый индикатор включен по схеме суммарно-разностных термопреобразователей. Такой принцип находит применение в термоваттметрах (в литературе он известен как теорема Бауха).

Методика выполнения работы

1. Тумблер «Калибр» — «Изм.» установите в положение «Калибр».
2. Переключатель «Шкала» поставьте на 15 В.
3. Регулятор калибровки напряжения установите в среднее положение.
4. Переключатель калибровки напряжения поставьте в положение 20 В (положение регулятора и переключателя калибровки частоты произвольное).
5. Шнуром питания подключите прибор к сети 220 В.
6. Установите тумблер «Вкл.» — «Выкл.» в положение «Вкл.». При этом должна загореться сигнальная лампочка.
7. Дайте прибору прогреться 30 мин.
8. Экранированным кабелем гнездо «Эталон» соедините с исследуемым четырехполюсником.
9. Подайте на вход исследуемого четырехполюсника напряжение звуковой частоты от источника синусоидального напряжения.
10. Установите переключатель калибровки частоты в положение, соответствующее частоте источника.
11. Переведите переключатель калибровки напряжения поочередно в положения, соответствующие меньшим напряжениям, до максимально возможного приближения стрелки индикатора действительных величин к красной черте.
12. Регулятором калибровки напряжения установите стрелку индикатора действительных величин точно на красную черту.
13. Регулятором калибровки частоты установите стрелку мнимых величин на нуль.

Таблица 9.1

Частота входного сигнала f , Гц	Напряже- ние вход- ного сиг- нала $U_{\text{вх}}$, В	Показания индикаторов				Тангенс угла сдви- га фаз $\text{tg}\gamma/\varphi$
		Действительная составляющая $\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$		Мнимая составляющая $\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$		
		—	+	+	—	

14. Переведите тумблер «Калибр» — «Изм.» в положение «Изм.».

15. Устанавливая последовательно переключатель «Шкала» на меньшие пределы, получите наиболее точный отсчет.

16. По левому индикатору произведите отсчет действительной, а по правому — отсчет мнимой составляющей вектора измеряемого напряжения.

17. Полученные данные занесите в табл. 9.1 и постройте векторную диаграмму.

Контрольные вопросы

1. Почему затруднено пользование обычным магнитоэлектрическим прибором в схеме на рис. 9.2 с выпрямителем?

2. Какие трудности появляются при исследовании амплитудно-частотной характеристики ЭО в схеме на рис. 9.1?

3. Каковы основные элементы схемы измерения амплитудно-частотных характеристик фазочувствительным вольтметром и их назначение?

4. Какую роль играет фазовращатель, применяемый в схеме фазочувствительного вольтметра?

5. Почему в схеме фазочувствительного вольтметра применен параметрический фазовращатель?

6. Почему в схеме фазовращателя на рис. 9.5, а сопротивление R приходится изменять?

7. Какие существуют способы исследования и получения амплитудно-фазовых частотных характеристик?

Лабораторная работа № 10

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ОСЦИЛЛОГРАФОВ СО ЖДУЩЕЙ РАЗВЕРТКОЙ И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы

Ознакомление с методикой управления ЭО со ждущей разверткой и использованием их для определения фазовых соотношений двух напряжений, мощности, длительности импульсов, их амплитуды, длительности фронтов, скважности и др.

Основные сведения

Современные осциллографы представляют собой сложные электронные приборы, позволяющие производить качественную и количественную оценку исследуемого явления. В отличие от ЭО, работающих обычно в режиме непрерывной развертки, в данной лабораторной работе используются осциллографы, которые могут работать в режиме ждущей развертки (рис. 10.1).

Отличие ждущей развертки от непрерывной состоит в том, что напряжение развертки подается для перемещения луча по горизонтали только на время прохождения исследуемого импульса и прекращается после окончания импульса; это соответствует перемещению луча по горизонтали за счет одиночного пилообразного



Рис. 10.1. Структурная схема осциллографа, работающего в режиме ждущей развертки

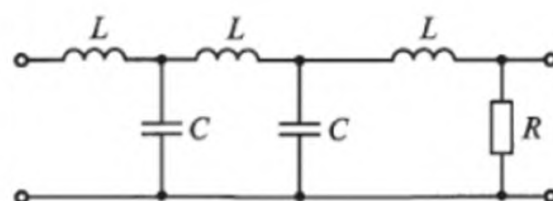


Рис. 10.2. Схема линии задержки

импульса развертки. Запуск генератора развертки обычно производится от напряжения исследуемого процесса, но он может производиться и от внешнего источника.

Напряжение исследуемого импульса подается на пластины с некоторым запаздыванием относительно момента появления развертывающего напряжения. Это достигается применением линии задержки (рис. 10.2), выходное напряжение которой несколько запаздывает относительно напряжения, поданного на ее вход, т.е. того напряжения, которым осуществляется запуск генератора развертки. Введение линии задержки позволяет наблюдать передний фронт импульса без искажений. Линия задержки состоит из нескольких звеньев, составленных из сосредоточенных L и C , заменяющих реальную линию задержки (коаксиальный кабель). Линия задержки характеризуется верхней границей частот $f_{гр}$, пропускаемых ею без искажений. Для осциллографа желательно, чтобы $f_{гр}$ была как можно выше. Для этого необходимо подбирать величины L и C достаточно малыми.

Для определения длительностей самого импульса, переднего и заднего его фронтов, скважности и частоты следования импульсов (рис. 10.3) такие осциллографы снабжены генераторами меток или калибраторами длительности, выдающими на экран метки определенной длительности.

Длительность импульсов определяется на уровне 0,5 от амплитуды, а длительность переднего фронта импульса — от 0,1 до 0,9 от амплитуды. В этом же диапазоне (от 0,1 до 0,9) рассматри-

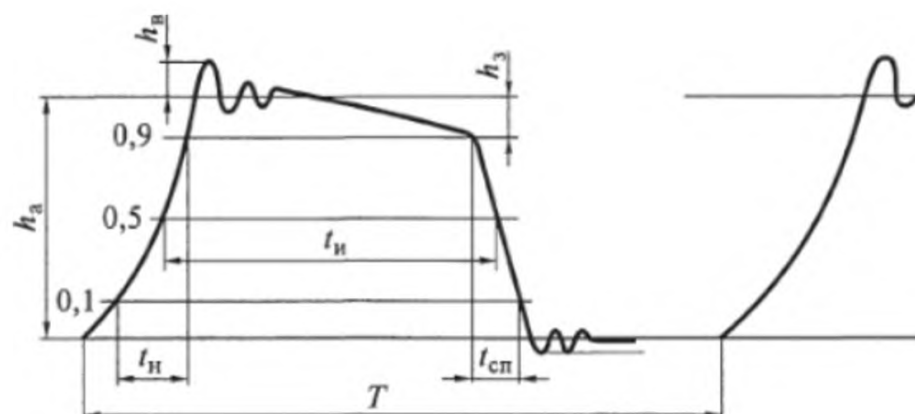


Рис. 10.3. Параметры, характеризующие форму импульса

вается и длительность заднего фронта. Число калибрационных меток позволяет оценить все промежутки, показанные на рис. 10.3.

Исследуемый импульс характеризует следующие параметры:

h_a — амплитуда импульса (без учета выброса);

h_b — выброс, кратковременный по отношению к длительности импульса, т. е. подъем фронта, превышающий амплитуду импульса;

t_n — время нарастания в интервале от 0,1 до 0,9 амплитудного значения;

$t_{сп}$ — время спада в интервале от 0,9 до 0,1 амплитудного значения;

$t_{и}$ — время между началом и концом импульса, отсчитываемое обычно на уровне 0,5 амплитуды (но в некоторых случаях на уровне 0,7);

$\frac{h_3}{h_a} 100\%$ — завал вершины импульса, выраженный в процентах.

За одну калибрационную метку принимается темный промежуток и светлая черта (рис. 10.4).

Осциллографы со ждущей разверткой находят широкое применение. С их помощью можно наблюдать и измерять периодические и непериодические импульсные процессы, длительность импульсов, их амплитуду и периодичность.

Основными параметрами, характеризующими работу электронного осциллографа, являются частотная характеристика и его чувствительность.

Частотная характеристика показывает, в пределах какой полосы частот воспроизведение формы исследуемых сигналов будет происходить с минимальными искажениями, а под полосой ча-

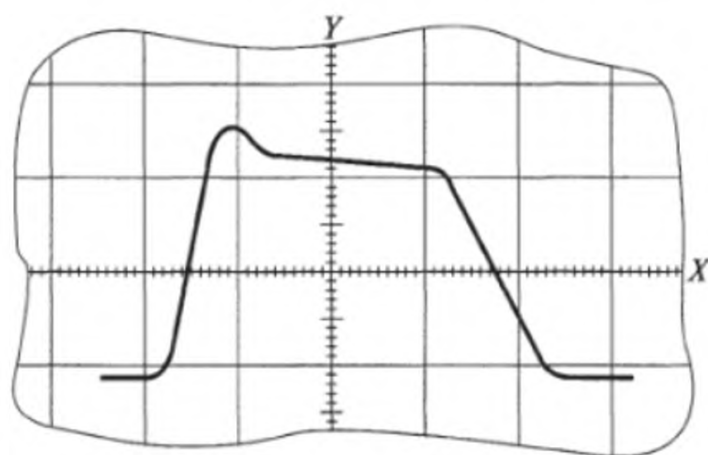


Рис. 10.4. Определение параметров импульса на сетке экрана электронного осциллографа

стот или полосой пропускания усилителя подразумевается диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления изменяется не более чем в 1,4 раза или на 3 дБ.

Чувствительностью трубки по напряжению называется смещение электронного луча на экране при изменении на 1 В напряжения, приложенного к управляющим электродам.

Двухканальные осциллографы имеют два идентичных канала вертикального отклонения (вход Y_1 и вход Y_2) и ЭК, который может поочередно подавать выходные сигналы каналов на одни и те же пластины Y .

В зависимости от управления работой ЭК можно реализовать следующие основные режимы работы осциллографа:

одноканальный — на экране виден один сигнал, подаваемый на вход Y_1 или на вход Y_2 ;

поочередный — на экране видны одновременно оба сигнала за счет переключения электронного переключателя во время каждого обратного хода развертки.

На основе двухканального принципа построения создаются многоканальные осциллографы с числом каналов до восьми.

Двухлучевые осциллографы имеют два канала Y и специальную двухлучевую ЭЛТ, в состав которой входят две электронные независимые пушки и две системы отклоняющих пластин. Горизонтальная развертка электронных лучей — общая (от генератора развертки), а вертикальная — каждая от «своего» канала Y . Это дает возможность наблюдения на экране осциллограммы двух сигналов (без их периодического прерывания, как в двухканальных). Такие осциллографы намного сложнее и значительно дороже двухканальных.

Осциллографы этого типа используются для наблюдения двух изменяющихся во времени процессов. Для этого применяют быстродействующие переключатели (контактные электромеханические или электронные бесконтактные), которые позволяют подавать на вход осциллографа поочередно напряжения от исследуемых электрических процессов по принципу временного разделения каналов.

Электромеханические устройства ограничены в своем применении, так как они работают только на частоте не выше 200 Гц, требуют кропотливой настройки контактов и имеют ограниченный срок работы. Бесконтактные переключающие устройства выполняются на полупроводниках и лишены недостатков, которыми обладают электромеханические переключающие устройства.

Принцип работы переключающего устройства, выполненного на полупроводниковых транзисторах типа П-14 (рис. 10.5, а), состоит в том, что напряжение, поданное на вход устройства, не может создавать падение напряжения на сопротивле-

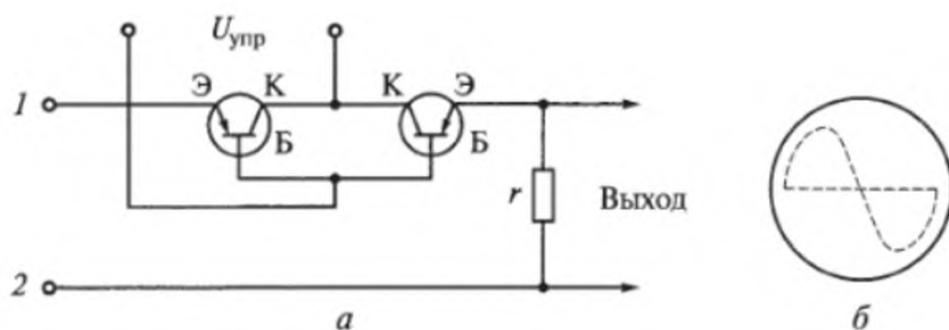


Рис. 10.5. Ключ на транзисторах:

a — принципиальная схема; *б* — изображение синусоиды на экране ЭО

нии r до тех пор, пока управляющее напряжение не откроет транзисторы.

В случае когда в цепь база — коллектор транзистора подано управляющее напряжение, которое открывает триоды (минус на базу), то входное напряжение, подведенное к клеммам 1 и 2, практически полностью оказывается приложенным к сопротивлению r (значительно больше сопротивлений открытых триодов и внутреннего сопротивления источника). При запирающей полярности управляющего напряжения $U_{упр}$ выходное напряжение равно нулю, так как сопротивление закрытых триодов значительно больше сопротивления r . Рассмотренная схема выполняет функции ключа.

Если в качестве $U_{упр}$ использовать напряжение от ЗГ с частотой,

большой, чем частота исследуемого сигнала $\left| \frac{f_{ЗГ}}{f_c} > 5 \dots 10 \right|$, то происходит модуляция входного сигнала, а напряжение, снимаемое с сопротивления r , наблюдается на ЭО в виде прерывистой кривой (рис. 10.5, б). Если частота $U_{упр}$ значительно превышает частоту

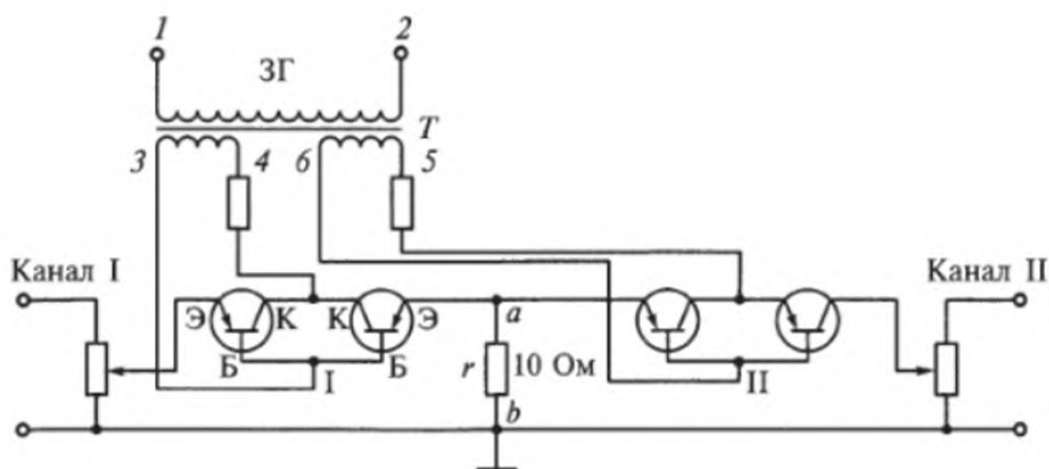


Рис. 10.6. Схема коммутатора для наблюдения двух процессов, изменяющихся во времени

исследуемого сигнала, то наблюдаемое на осциллографе выходное напряжение практически сливается в непрерывную кривую.

Схема ЭК состоит из двух ключевых схем, аналогичных рассмотренной выше, которые работают на общую нагрузку r (рис. 10.6). Управляющее напряжение от ЗГ со вторичных обмоток разделительного трансформатора T поступает на ключевые схемы. Так как управляющие напряжения ключей находятся в противофазе, то на выходное сопротивление r поочередно поступают сигналы, поданные на I и II каналы и, следовательно, на экране осциллографа будут наблюдаться одновременно два исследуемых процесса в виде пунктирных кривых.

Наблюдение двух процессов, изображаемых двумя кривыми с общей осью абсцисс, не всегда удобно, поэтому желательно иметь возможность смещать по экрану одну кривую относительно другой в вертикальном направлении. Для этой цели показанная на рис. 10.6 схема может быть усовершенствована введением последовательно с управляющим напряжением регулируемого постоянного напряжения.

Методика выполнения работы

Подготовительные операции

1. Соберите схему по рис. 10.7 и перед включением в сеть осциллографа и генератора импульсов (ГИ) ручки регуляторов установите в следующие положения:

а) на генераторе ручки «Амплитуда импульса» установите в крайнее левое положение, все остальные тумблеры — в положение «Выкл.»;

б) на осциллографе переключатель «Род работ» поставьте в положение «Ждущая»; «Аттен. У» — в положение «1:1»; «Усил. У» — в крайнее левое положение; переключатель «Аттен. синхрон.» —

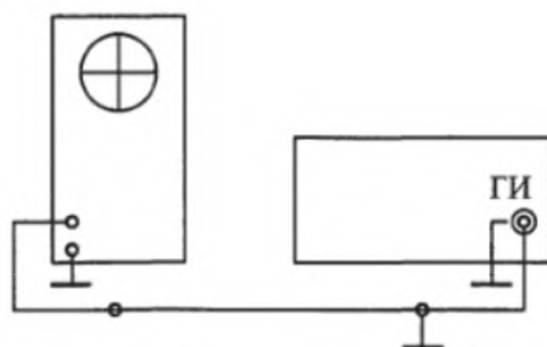


Рис. 10.7. Схема соединения генератора с осциллографом

Таблица 10.1

Частота следования импульса, Гц	Длительность импульса, мкс	Полярность импульса	Действительное значение длительности импульса, мкс	Действительное значение амплитуды импульса, В	Относительная погрешность по длительности, %	Относительная погрешность по амплитуде, %

в положение «Внутр.»; ручку «Синхрон.» — в крайнее правое положение. После этого тумблеры «Сеть» на осциллографе и генераторе поставьте в положение «Вкл.»; прогрейте приборы в течение 3...5 мин, затем приступите к измерениям.

2. Подайте на вход осциллографа импульс. Длительность, частота следования, амплитуда и полярность импульса задаются преподавателем. Установку соответствующей амплитуды на генераторе производите следующим образом: ручкой «Вольты» шкалу установите на нужную отметку, включите тумблер «Измерение» и правую ручку «Амплитуда импульса» вращайте до тех пор, пока не загорится неоновая лампочка лицевой панели прибора.

3. Получите на экране осциллографа путем изменения длительности развертки (ручки «Длит. разв.») одиночный импульс и произведите измерение его длительности и амплитуды (см. рис. 10.3), результаты запишите в табл. 10.1.

Измерение длительности импульса

1. Включите на осциллографе генератор калибрационных меток, ставя ручку «Калибр. дл.» в положения: 1; 100; 10; 1 или 0,1 мкс в соответствии с измеряемой длительностью и подсчитайте видимые метки на импульсе.

2. Зная длительность метки и их число, подсчитайте длительность импульса $t_{\text{и}}$ и определите относительную погрешность исследуемого импульса по длительности.

3. Отключите генератор меток на осциллографе (ручка «Калибр. дл.» в положение Z).

Измерение амплитуды импульса

1. Измерьте амплитуду импульса с помощью вольтметра и осциллографа:

а) импульс с выхода генератора подайте на зажимы «Потенциал» осциллографа;

б) переключатель «Аттен. У» поставьте в положение «Потенциал»;

в) переключатель полярности установите в положение, соответствующее полярности подаваемого импульса;

г) переключатель «Шкала» переведите на наибольший предел (500 В);

д) генератор меток отключите (положение Z).

2. На экране получите две точки — вершину и основание. Нижнюю точку заметьте на экране с помощью приложенной к осциллографу сетки и произведите измерение амплитуды, совмещая верхнюю точку с нижней отметкой, вращая ручку «Потенциал».

3. Произведите отсчет напряжения по вольтметру осциллографа. В случае надобности измените предел вольтметра. Определите относительную погрешность измерения напряжения.

Измерение частоты следования и скважности импульса

1. Изменяя длительность развертки осциллографа вращением ручки «Длит. разв.», получите на экране 2...4 импульса.

2. Включите генератор калибрационных меток и получите на развертке видимые калибрационные метки между двумя соседними импульсами (с помощью ручки «Калибр. дл.»). Подсчитав число калибрационных меток, уложившихся от начала одного импульса до начала следующего, и умножив его на длительность калибрационной метки, получите период следования импульсов T . Зная период, определите частоту следования и относительную погрешность измеряемой частоты следования.

3. Определите скважность Q как отношение периода следования импульсов к длительности импульса:

$$Q = \frac{T}{t_{\text{и}}}.$$

Скважность может лежать в пределах от нескольких единиц до сотен тысяч.

Измерение длительности переднего и заднего фронтов импульса

1. Соберите схему по рис. 10.8, т.е. выходной импульс с генератора на вход осциллографа через интегрирующий контур (ИК).

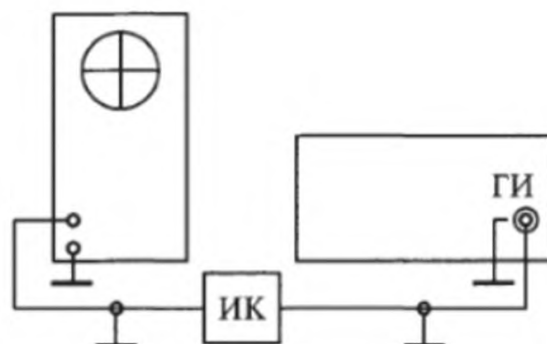


Рис. 10.8. Схема соединения генератора с осциллографом через интегрирующий контур

2. Получите на экране осциллографа одиночный импульс путем изменения длительности развертки осциллографа. Длительность, частота следования и амплитуда импульса задаются преподавателем. Включите в осциллографе генератор калибровочных меток так, чтобы на импульсе были ясно видны эти метки.

3. Произведите измерение длительности переднего и заднего фронтов (см. рис. 10.3). Зная число калибровочных меток и их длительность, определите длительность переднего и заднего фронтов.

Наблюдение на экране электронного осциллографа двух кривых

1. Соберите схему по рис. 10.9.

2. Проследите при различных значениях тока I изображения двух процессов на экране и зарисуйте их на кальке (при $I = \text{const}$).

3. По полученным кривым установите фазовое соотношение между током и ЭДС.

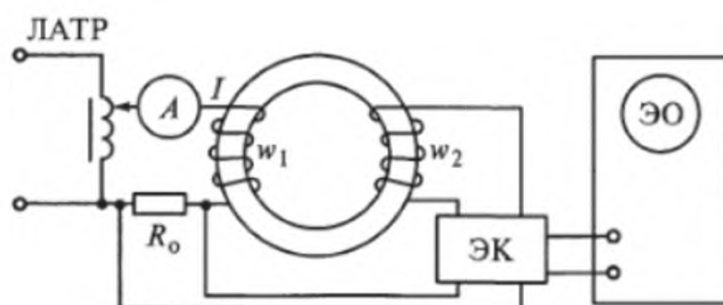


Рис. 10.9. Схема для наблюдения на экране ЭО двух кривых

Контрольные вопросы

1. Что такое ждущая развертка?
2. Каково назначение линии задержки?
3. Как измеряется время нарастания импульса?
4. Каким образом определяется время спада импульса?
5. Что такое скважность?
6. Каково назначение меток?
7. Как работает схема ключа?
8. Каким образом можно рассматривать две кривые на однолучевом ЭО?
9. Как можно осуществить по вертикали смещение одной кривой, наблюдаемой на ЭО, относительно другой?

Лабораторная работа № 11

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛАМПОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы

Ознакомление с принципом действия и характеристиками ЛВ, проведение его градуировок.

Основные сведения

По своему принципу действия электронно-ламповый вольтметр представляет собой прибор выпрямительной системы. Он состоит из двух основных элементов: выпрямительной схемы с фильтром низкой частоты и стрелочного прибора магнитоэлектрической системы.

Большинство электронно-ламповых вольтметров работает по мостовой балансной схеме (рис. 11.1).

Схема работает следующим образом: лампы Л1 и Л2 выбирают одинаковыми, а сопротивления R_1 и R_2 равными. Если измеря-

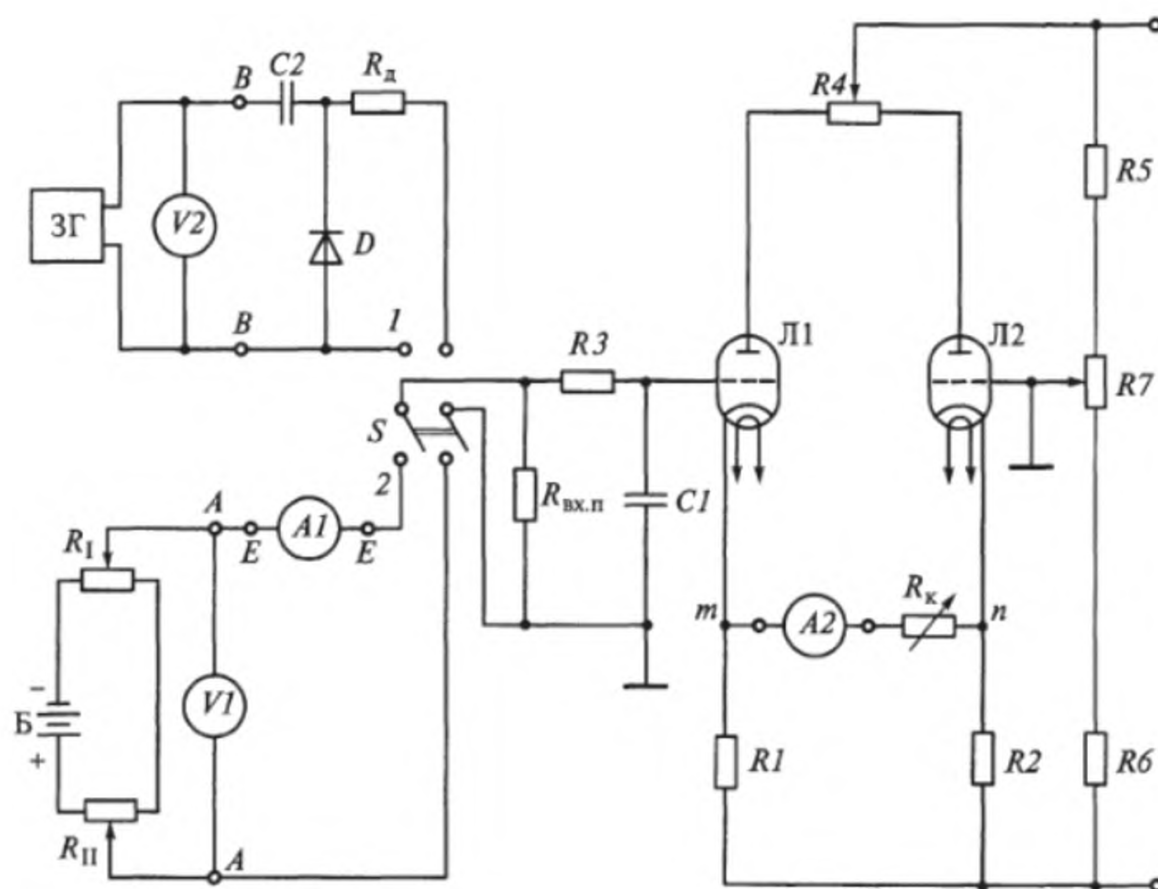


Рис. 11.1. Принципиальная схема электронно-лампового вольтметра

емое напряжение U_x равно нулю, то через Л1 и Л2 протекают равные токи и потенциалы точек m и n будут одинаковыми; индикатор при этом покажет отсутствие тока. Если к зажимам АА подвести некоторое напряжение U_x минусом на сетку, то внутреннее сопротивление лампы Л1 возрастет, ток через лампу Л1, а следовательно, и падение напряжения на $R1$ уменьшится и потенциал точки m станет ниже потенциала точки n . При этом через индикатор А2 потечет ток. По отклонению стрелки индикатора можно судить о напряжении U_x .

Так как лампы Л1 и Л2 могут быть не вполне идентичными, то в схему вольтметра вводится переменный резистор $R4$, с помощью которого при замкнутых накоротко входных зажимах АА устанавливают нуль индикатора. Резисторы $R1$, $R2$ и сопротивления ламп $R_{Л1}$, $R_{Л2}$ образуют мост, в котором внутреннее сопротивление второй лампы $R_{Л2}$ и резисторы $R1$ и $R2$ постоянны, а внутреннее сопротивление первой лампы $R_{Л1}$ — переменное, изменяющееся в зависимости от напряжения, подведенного к сетке первой лампы. Резисторы $R1$ и $R2$ выбираются одного порядка с сопротивлениями $R_{Л1}$ и $R_{Л2}$.

Напряжение на анодах должно быть таким, чтобы лампа Л1 полностью запиралась при напряжении на входе (т.е. на управляющей сетке первой лампы), превышающем примерно в 1,5 раза номинальное значение измеренного напряжения U_x .

Для защиты от положительных напряжений, т.е. от ошибочного включения плюса на сетку лампы Л1, вводится ограничительное сопротивление R_3 порядка 1...3 МОм, которое значительно больше сопротивления участка сетка — катод, следовательно, при этом напряжение U_x будет почти целиком падать на сопротивлении резистора $R3$. Таким образом, и для такой полярности индикатор не будет подвергаться перегрузкам.

Кроме защиты резистор $R3$ выполняет еще две функции:

1) при переходе с одного предела на другой обеспечивает лучшее совпадение шкал;

2) вместе с конденсатором $C1$ образует фильтр, который необходим при измерении ЛВ напряжений переменного тока. Сопротивление $R_{вх.п}$ является входным сопротивлением лампового вольтметра на постоянном токе.

Старение ламп или их замена приводит к необходимости регулировки в цепи индикатора, которая осуществляется с помощью компенсационного сопротивления R_k , включенного последовательно с индикатором. С помощью этого сопротивления регулируется предельное значение тока прибора. Чувствительность прибора определяется коэффициентом усиления усилителя по току:

$$K = \frac{I_{п.и}}{I_{п.л.в}}, \quad (11.1)$$

где $I_{п.и}$ — предельный ток индикатора, т.е. ток, отклоняющий подвижную систему индикатора на максимальный угол отклонения; $I_{п.л.в}$ — предельный ток во входной цепи ЛВ (определяется амперметром AI) при наибольшем измеряемом напряжении на данном пределе измерения $U_{п.л.в}$.

Входное сопротивление ЛВ по постоянному току

$$R_{вх.п} = \frac{U_{п.л.в}}{I_{п.л.в}}.$$

Для измерения напряжения переменного тока на вход вольтметра включается выпрямитель, преобразующий переменный ток в постоянный. Это выпрямленное напряжение измеряется ламповым вольтметром. Измерение напряжения переменного тока также производится по схеме рис. 11.1. Входные клеммы для переменного напряжения обозначены $ВВ$. При измерениях на переменном токе переключатель S устанавливается в положение I .

При измерении переменного напряжения схема работает следующим образом. Во время протекания положительной полуволны конденсатор $C2$ заряжается через диод D до амплитудного значения измеряемого напряжения переменного тока. Во время действия отрицательной полуволны конденсатор $C2$ разряжается через внутреннее сопротивление источника тока.

Поскольку обратное сопротивление диода много больше прямого, то падение напряжения на обратном сопротивлении вентиля окажется близким к амплитудному значению измеряемого напряжения.

Это напряжение измеряется ЛВ постоянного тока. Иногда сопротивление R_d не ставят, в этом случае прибор имеет две шкалы: одну для постоянного, другую для переменного тока.

Резистор $R3$ и конденсатор $C1$ при измерении на переменном токе образуют фильтр, который служит для сглаживания пульсаций от переменной составляющей выпрямленного напряжения. Максимальное напряжение, которое можно подводить ко входу ЛВ, составляет примерно от 0,4 до 0,5 величины обратного напряжения диода.

Величину емкости C_1 выбирают таким образом, чтобы постоянная времени в цепи разряда $\tau_p = CR_{обр}$ была намного больше, чем период самой низкой измеряемой частоты:

$$C = \frac{10^4}{fR_{обр}},$$

где f — нижняя частота, кГц; $R_{обр}$ — обратное сопротивление диода, МОм.

Методика выполнения работы

1. Подготовьте ЛВ к работе:

а) соберите схему в соответствии с рис. 11.1, не подключая на входы схемы AA и BB источников входного напряжения;

б) переключатель S поставьте в положение 2, реостат R_4 — в среднее положение, реостат R_k — в положение максимального сопротивления;

в) включите общий рубильник питания схемы. Прогрейте прибор в течение 3 мин;

г) закоротите входные зажимы AA и с помощью реостата R_4 установите стрелку индикатора на нуль. При последующей работе периодически проверяйте установку нуля;

д) определите ток во входной цепи ЛВ по микроамперметру $A1$, который снабжен выносным шунтом; шунт выполнен в отдельном корпусе. С обратной стороны корпуса выносного шунта указана схема его включения в цепь. Пользуясь этой схемой, включите микроамперметр с шунтом в схему, при этом переключатель микроамперметра установите на риску «Нар. шунт» (наружный шунт);

е) убедитесь, что переключатель питания освещения установлен на 220 В, после чего включите питание освещения в сеть;

ж) установите световой указатель на нуль, пользуясь ручкой на правой боковой стороне корпуса микроамперметра. При последующей работе периодически проверьте эту установку;

з) ручку переключателя на выносном шунте установите в позицию ∞ ;

и) разомкните входные зажимы AA и подключите к ним согласно схеме на рис. 11.1 вольтметр VI , реостаты R_I и R_{II} и источник напряжения постоянного тока, соблюдая указанную полярность;

к) с помощью реостатов R_I и R_{II} подайте небольшое напряжение $U_{вх}$ на ЛВ и убедитесь, что стрелка индикатора (амперметр $A2$) отклоняется вправо. Если стрелка индикатора отклоняется влево от нуля, то поменяйте местами токоподводящие провода индикатора.

2. Измерьте $I_{п.л.в.}$:

а) с помощью R_I и R_{II} установите на вольтметре VI напряжение $U_{п.л.в.}$, на измерение которого рассчитан ЛВ. (Это напряжение задается преподавателем в зависимости от варианта, который выполняет студент.);

б) изменением сопротивления R_k переведите стрелку индикатора (т.е. амперметра $A2$) на последнее деление шкалы, что соответствует току $I_{п.и.}$;

в) ручку переключателя на выносном шунте амперметра $A2$ установите на предел, при котором световой указатель не выходит за пределы шкалы. Запишите показания прибора, что соот-

ветствует $I_{п.л.в.}$. После этого амперметр вместе с выносным шунтом отключите от схемы, при этом клеммы EE соедините между собой. Все дальнейшие измерения производите без амперметра.

3. Вычислите следующие величины:

а) коэффициент усиления по току K по формуле (11.1):

$$K = \frac{I_{п.и.}}{I_{п.л.в.}};$$

б) входное сопротивление ЛВ $R_{вх.л.в.}$ по формуле

$$R_{вх.л.в.} = \frac{U_{п.л.в.}}{I_{п.л.в.}}.$$

4. Проградуируйте ЛВ по напряжению постоянного тока:

а) переключатель S поставьте в положение 2, к входным клеммам AA присоедините реостаты R_I и R_{II} , батарею B и вольтметр VI согласно схеме на рис. 11.1. Амперметр $A1$ должен быть отключен, и клеммы EE соединены между собой;

б) при $U_{вх} = 0$ с помощью резистора R_4 установите на индикаторе (амперметре $A2$) нуль; установите $U_{вх\ max}$ на вольтметре VI с помощью R_I и R_{II} . Затем с помощью R_k переведите стрелку индикатора амперметра $A2$ на верхний предел, т.е. на α_{max} ;

в) установите $U_{вх} = 0$ на вольтметре VI и, если нужно, снова с помощью R_4 подрегулируйте нуль на амперметре $A2$;

г) установите соответствующие напряжения на VI и запишите показания $A2$ (в делениях индикатора α_i шкалы) в табл. 11.1;

д) по данным табл. 11.1 постройте график $\alpha_i = f(U_{пост})$;

е) введите полностью сопротивление R_k .

5. Проградуируйте ЛВ по напряжению переменного тока:

а) переключатель S поставьте в положение 1. К клеммам BB подсоедините $3Г$ и подключите ЛВ согласно схеме (рис. 11.1);

б) при $U_{вх} = 0$, используя R_4 , установите нуль на $A2$. Согласно таблице переменного тока установите $U_{вх\ max}$ на ЛВ с помощью ручки выходного напряжения $3Г$.

Затем с помощью R_k переведите стрелку на верхний предел, т.е. на α_{max} . После этого установите $U_{вх} = 0$ на ЛВ и, если нужно, снова с помощью R_4 подрегулируйте нуль на $A2$;

Таблица 11.1

$U_{пост}, В$										
$\alpha_i, дел$										

Таблица 11.2

$U_{\text{пер}}, \text{ В}$										
$\alpha_{\text{и}}, \text{ дел}$										

в) установите напряжение на ЛВ и запишите соответствующие показания $A2$ (в делениях шкалы) в табл. 11.2;

г) по данным табл. 11.2 постройте график $\alpha_{\text{и}} = f(U_{\text{пер}})$;

д) перед выключением схемы сопротивление R_k введите полностью. Выключите схему.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных частей состоит ЛВ?
2. Какая схема используется в ЛВ?
3. Каков принцип действия ЛВ?
4. Какие функции выполняет сопротивление R_3 в схеме ЛВ?
5. Как вычисляют коэффициент усиления усилителя по току?
6. Каким образом определяют входное сопротивление ЛВ по постоянному току?
7. Какие функции выполняет сопротивление R_d ?
8. Каково назначение фильтра $R_3 C_1$ и как выбираются его параметры?
9. Как проверяется градуировка шкалы ЛВ?

Лабораторная работа № 12

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-СЧЕТНОГО ЧАСТОТОМЕРА И ОСЦИЛЛОГРАФА И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОВ

Цель работы

Изучение принципов действия электронно-счетного частотомера (ЭСЧ) и универсального осциллографа, функциональные схемы, назначение органов управления; приобретение навыков работы с аппаратурой при измерении частоты исследуемых радиосигналов.

Основные сведения

Электронно-счетный частотомер

Электронно-счетный метод измерения частоты основан на счете числа периодов измеряемого сигнала U_x за образцовый интервал времени T_0 (рис. 12.1).

Электронно-счетный частотомер имеет высокую точность измерений (погрешность $\delta = (\pm 0,01 \dots 0,005 \%)$), широкий диапазон частот (от 10 Гц до 3,5 МГц), возможность автоматического управления процессом измерения, цифровую форму отсчета. Также частотомеры применяют для измерения частоты f_x периодических радиосигналов, периодов T или других интервалов времени t , длительности импульсов t_n , а также отношения частот f_1/f_2 и интервалов времени t_1/t_2 .

Источником образцовых частот (образцовых интервалов времени T_0) ЭСЧ служит кварцевый генератор, вырабатывающий сигналы с $f_0 = 1$ МГц (рис. 12.2). Последовательно с кварцевым генератором включены декадные делители частоты, на выходах которых создаются сигналы образцовых частот от 100 кГц до 0,1 Гц.

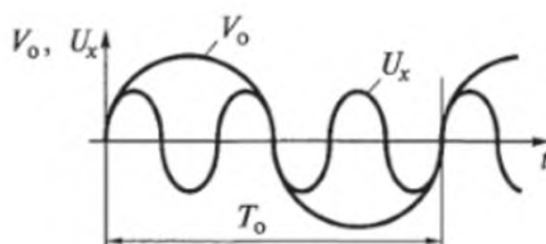


Рис. 12.1. Электронно-счетный метод измерения частоты

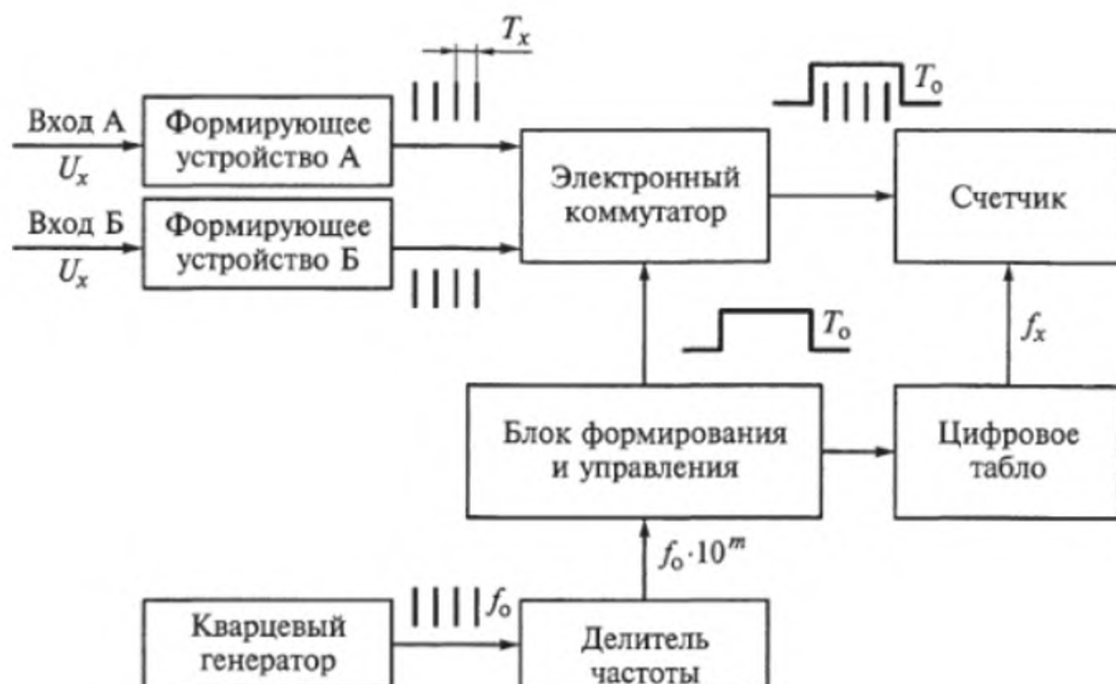


Рис. 12.2. Структурная схема ЭСЧ

Этим частотам соответствуют образцовые интервалы времени T_0 , равные 1, 10, 100 мкс, ... , 10 с.

На входы А и Б подается измеряемый сигнал U_x любой формы. В формирующих устройствах А или Б этот сигнал усиливается и преобразуется в остroконечные импульсы. За каждый период измеряемого сигнала U_x образуется один импульс, т. е. частота следования импульсов пропорциональна частоте f_x .

Блок формирования и управления вырабатывает строб — импульсы T_0 прямоугольной формы. Строб-импульсы открывают на время T_0 электронный коммутатор формирующих устройств А и Б и на счетчик импульсов поступает определенное число импульсов измеряемого сигнала U_x . Результаты счета отображаются на цифровом табло. При $T_0 = 1$ с число счетных импульсов равно измеряемой частоте f_x . В случае изменения длительности интервала T_0 запятая для получения прямого счета переносится автоматически.

Для измерения интервала времени T_x или длительности импульса t_i необходимо использовать оба входа и оба формирующих устройства. Одно формирующее устройство формирует опорный импульс, а другое интервальный. Промежуток между этими импульсами заполняется сигналами образцовой частоты кварцевого генератора f_0 .

Точность измерений, проводимых с помощью ЭСЧ, зависит от стабильности работы всех входящих в его состав блоков: формирующихся устройств А и Б, электронного коммутатора, счетчика, делителя частоты, блока формирования и управления.

Погрешности измерения электронно-счетного частотомера

При прямом измерении f_x наиболее характерны две составляющие погрешности: погрешность меры и погрешность сравнения.

Погрешность меры определяется нестабильностью частоты напряжения кварцевого генератора. Эта составляющая погрешности достаточно мала ($\Delta f_0 = \pm 510$ Гц/сут) и может приниматься во внимание лишь при измерении очень высоких частот.

Погрешность сравнения определяется в основном погрешностью дискретности. За единицу дискретности принимается частота кварцевого генератора f_0 , которая не зависит от измеряемой частоты f_x .

Погрешность дискретности обусловлена тем, что фронт и срез строб-импульса T_0 не синхронизируется с моментами появления импульсов, сформированных из измеряемого сигнала U_x с частотой $f_x = 1/T$. Погрешность наиболее ощутима при измерении малых частот. Поясним сказанное на примерах.

Измеряемая частота периодического сигнала U_x преобразуется в последовательность импульсов с периодом T_x (рис. 12.3).

Число импульсов

$$N_x = \frac{T_0}{T_x} = T_0 f_x \quad (12.1)$$

при одном и том же интервале T_0 может отличаться на один импульс (на рис. 12.3, а $N'_x = 9$, рис. 12.3, б $N''_x = 10$).

Абсолютная погрешность дискретности измерения частоты f_x

$$\Delta f_x = \pm \left(\frac{N'_x}{T_0} - \frac{N''_x}{T_0} \right) = \pm \frac{\Delta N_x}{T_0} = \pm \frac{1}{T_0}, \quad (12.2)$$

где N'_x/T_0 и N''_x/T_0 — средние значения частот за интервал T_0 .

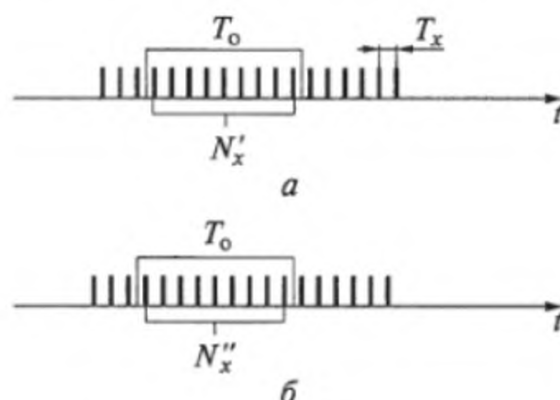


Рис. 12.3. Схема определения погрешности дискретности:

а — число импульсов $N'_x = 9$; б — $N''_x = 10$

Относительная погрешность дискретности измерения частоты δf_x определяется как отношение

$$\delta f_x = \pm \frac{\Delta f_x}{f_x}. \quad (12.3)$$

Из равенства (12.1) следует, что

$$f_x = \frac{N_x}{T_o}. \quad (12.4)$$

После подстановки формул (12.2), (12.4) в (12.3) получим

$$\delta f_x = \pm \frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\frac{1/T_o}{N_x/T_o} \right) = \pm \frac{1}{N_x}.$$

Оценим погрешности измерения частотомером ЧЗ-32 частоты $f_x = 10$ Гц (нижний предел измерения частоты) при $T_o = 1$ с:
абсолютная погрешность, Гц:

$$\Delta f_x = \pm \frac{1}{T_o} = \pm 1;$$

относительная погрешность, %:

$$\delta f_x = \pm \frac{1}{N_x} 100\% = \pm \frac{1}{10} 100\% = \pm 10.$$

Уменьшение погрешности дискретности измерения частоты возможно:

за счет увеличения T_o (в современных ЭСЧ $T_{o \max} = 10$ с);

умножения частоты измеряемого сигнала x (необходим специальный блок умножения частоты);

выполнения многократных измерений и усреднения их результатов;

измерения периода сигнала T_x и вычисления измеряемой частоты $f_x = 1/T_x$ (косвенное измерение f_x).

Для той же измеряемой частоты $f_x = 10$ Гц увеличение T_o до 10 с приведет к уменьшению абсолютной погрешности, Гц:

$$\Delta f_x = \pm \frac{1}{T_o} = \pm \frac{1}{10} = \pm 0,1.$$

Для измерения периода T_x его заполняют импульсами стандартной частоты f_o и оценивают погрешность дискретности из-

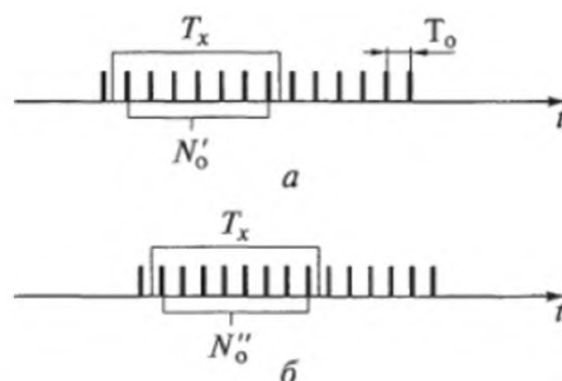


Рис. 12.4. Погрешность дискретности измерения периода T_x :

a — число импульсов $N'_0 = 7$; $б$ — $N''_0 = 8$

мерения периода T_x (рис. 12.4). В этом случае так же, как показано на рис. 12.3 число импульсов N'_0 , заполняющих период T_x , может отличаться на единицу. На рис. 12.4, a $N'_0 = 7$, а на рис. 12.4, $б$ $N''_0 = 8$.

Абсолютная погрешность дискретности измерения частоты f_0 по аналогии с формулой (12.2) оценивается разностью

$$\Delta f_0 = \pm \left(\frac{N'_0}{T_x} - \frac{N''_0}{T_x} \right) = \pm \frac{\Delta N_0}{T_x} = \pm \frac{1}{T_x}.$$

При малых погрешностях измерения периода можно считать, что относительная погрешность измерения частоты равна относительной погрешности измерения периода, т.е. $\delta f_x = \delta T$.

Тогда

$$\delta f_0 = \frac{\Delta f_0}{f_0} = \pm \frac{T_0}{T_x} = \pm \delta T. \quad (12.5)$$

В частотомере ЧЗ-32 $f_0 = 1$ МГц, а $T_0 = 10^{-6}$ с. Если $T_x = 10^{-1}$ с, то согласно отношению (12.5) получим, %:

$$\delta T = \pm \frac{T_0}{T_x} 100\% = \pm \frac{10^{-6}}{10^{-1}} \cdot 100\% = \pm 0,001.$$

Таким образом, косвенное измерение частоты (через период T_x) позволяет значительно уменьшить погрешность по сравнению с прямым измерением частоты f_x . Как было показано выше, прямое измерение частоты $f_x = 10$ Гц осуществляется с относительной погрешностью $\delta f_x = \pm 10\%$, а измерение той же частоты через период с относительной погрешностью $\Delta f_x = \delta T_0 = \pm 0,001\%$.

Использование осциллографа в качестве измерителя частоты

Наиболее часто осциллограф применяется для измерения электрического напряжения с визуальным отображением информации на экране. Исследуемое напряжение в осциллографе представляется функцией времени $U_x = \varphi(t)$ в прямоугольной системе координат.

Две пары пластин ЭЛТ X и Y отклоняют электронный луч в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (рис. 12.5). По горизонтальной оси луч отклоняется пропорционально времени, а по вертикальной — пропорционально исследуемому напряжению. За время действия линейно изменяющегося напряжения луч вычерчивает на экране ЭЛТ кривую сигнала U_x , называемую *осциллограммой*.

Однолучевой осциллограф имеет каналы управления: вертикального, горизонтального отклонения и изменения яркости луча.

Осциллограф можно использовать для измерения частоты в диапазоне от 10 Гц до 10...20 МГц методами круговой или спиральной разверток, яркостных отметок, фигур Лиссажу. Наиболее простым из перечисленных является метод измерения f_x по фигурам Лиссажу, который иногда называют методом осциллографического сравнения частот. Частотный диапазон измерения при этом ограничивается десятками и сотнями герц. Процесс измерения основан на сравнении частоты f_x с известной образцовой частотой f_0 , воспроизводимой мерой — генератором сигналов. Генератор



Рис. 12.5. Структурная схема однолучевого осциллографа

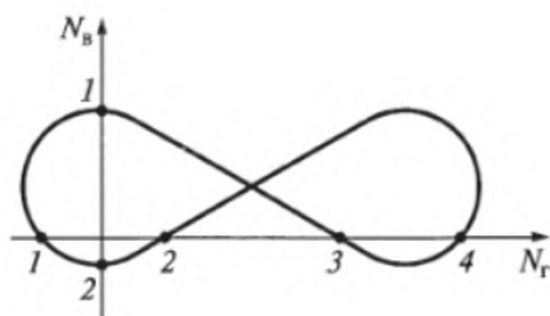


Рис. 12.6. Фигура Лиссажу на экране ЭЛТ

линейного (обычно пилообразного) напряжения в этом случае выключается, а на пластины Y и X подаются гармонические напряжения U_x и U_o . Эти напряжения усиливаются усилителями $УсX$ и $УсY$ (см. рис. 12.5). Усилитель $УсZ$ предназначен для усиления и регулировки яркости сигнала.

Для получения неподвижной фигуры Лиссажу на экране ЭЛТ необходимо регулировать частоту f_o . Неподвижность фигуры наблюдается при следующем условии:

$$\frac{f_x}{f_o} = \frac{m}{n}, \quad (12.6)$$

где m и n — целые числа.

Отношение (12.6) называют кратностью частот.

Кратность частот оценивается следующим образом. Проводят мысленно через фигуру Лиссажу на экране ЭЛТ горизонтальную N_r и вертикальную N_b координатные оси (рис. 12.6) таким образом, чтобы они не проходили через точки пересечения фигуры Лиссажу и на горизонтальной, и на вертикальной осях.

В случае неподвижной фигуры справедливо равенство

$$n_r f_o = n_b f_x,$$

где n_r , n_b — число точек пересечения на горизонтальной и вертикальной осях соответственно.

Для изображенной на рис. 12.6 фигуры Лиссажу $n_r = 4$, а $n_b = 2$. Так как

$$f_x = \frac{n_r}{n_b} f_o,$$

то

$$f_x = \frac{4}{2} f_o = 2 f_o.$$

Если точного равенства частот f_x и f_o достичь нельзя ($f_x \neq f_o \neq \text{const}$), то фигура Лиссажу непрерывно вращается и появляется погрешность сравнения $\Delta f_{\text{ср}}$, т. е.

$$f_x = f_o \pm \Delta f_{\text{ср}}.$$

Погрешность $\Delta f_{\text{ср}}$ можно вычислить опытным путем. Для этого следует определить число P периодов вращения фигуры за известный интервал времени Δt . Частота численно равна погрешности сравнения:

$$\Delta f_{\text{ср}} = \frac{P}{\Delta t}.$$

Для установления знака погрешности сравнения применяют следующее правило: если с увеличением частоты f_o частота вращения фигуры увеличивается ($f_o > f_x$), то величину $\Delta f_{\text{ср}}$ необходимо брать со знаком «-», и наоборот.

Использование осциллографа в качестве измерителя частоты, кроме низкого частотного диапазона, ограничено по причине значительных суммарных погрешностей измерения (относительная погрешность измерения только самого осциллографа составляет не менее 3...5 %).

Методика выполнения работы

1. Изучите технические характеристики частотомера, генераторов сигналов и осциллографа по описаниям и инструкциям, имеющимся на рабочем месте лабораторной работы. С разрешения преподавателя или лаборанта включите и прогрейте измерительную аппаратуру.

2. Проверьте работоспособность частотомера по тестовой таблице, приведенной в техническом описании.

3. Произведите измерение частоты f_x генератора сигналов с помощью частотомера. Последовательность выполнения измерений приведена в техническом описании. Результаты измерений запишите в табл. 12.1. (При проведении лабораторной работы могут быть использованы любые типы частотомеров, генераторов и осциллографов.)

По результатам вычислений постройте графики зависимостей

$$\Delta f_x = \varphi(f_x); df_x = \varphi(f_x).$$

Таблица 12.1

№ измерения	Частота генератора f_x , кГц	Результат измерения, $f_{эсч}$, кГц	Погрешность измерения	
			абсолютная, $\Delta f_x = \pm(f_x - f_{эсч})$	относительная, $\delta f_x = \pm \frac{\Delta f_x}{f_{эсч}} 100\%$
1	20			
2	40			
3	60			
4	80			
5	150			
6	200			

4. Выполните измерения периодов колебаний T_x генератора с помощью частотомера. Последовательность выполнения измерений приведена в техническом описании. Результаты запишите в табл. 12.2.

По данным расчетов табл. 12.2 оцените зависимость погрешностей $\Delta f_x = \delta(f_x)$ от измеряемой частоты f_x .

5. Измерьте частоту f_x методом сравнения (метод фигур Лиссажу). С помощью генераторов сигналов последовательно установите отношение частот f_x/f_0 : 1/1; 1/2; 1/3; 2/3. Изобразите в отчете вид фигур Лиссажу для указанных отношений частот и по заданию преподавателя вычислите результат $f_x = f_0 \pm \Delta f_{ср}$.

Таблица 12.2

№ измерения	Частота генератора f_x , кГц	$T_{эсч}$, 10^{-6} с	$f_{эсч} = 1/T_{эсч}$, кГц	Погрешность измерения	
				абсолютная, $\Delta f_x = \pm(f_x - f_{эсч})$, кГц	относительная, $\delta f_x = \pm \frac{\Delta f_x}{f_{эсч}} 100\%$
1	20				
2	40				
3	60				
4	80				
5	150				
6	200				

Контрольные вопросы

1. Каковы принципы измерения частоты электронно-счетным методом? Назовите достоинства и недостатки метода.
2. Какие причины возникновения погрешностей измерений при использовании в качестве измерителя ЭСЧ вы знаете?
3. Какие существуют способы уменьшения погрешности измерения ЭСЧ?
4. Как можно использовать осциллограф для измерения частоты?
5. Каким образом работает функциональная схема одноканального осциллографа при измерении частоты?
6. С помощью какого способа достигается получение неподвижной фигуры Лиссажу?
7. В чем состоит суть методики оценки погрешности сравнения $\Delta f_{\text{ср}}$ и правила определения ее знака?

Лабораторная работа № 13

ИЗУЧЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы

Изучение принципа действий, схем и конструктивных особенностей ЦИП и преобразователей, применяемых для измерения параметров радиотехнических устройств, цепей и сигналов в широком диапазоне радиочастот.

Основные сведения

Основы построения цифровых измерительных приборов

В современной радиоэлектронике ЦИП и преобразователи используют главным образом для точных измерений электрических величин. По принципу действия цифровые приборы отличаются от аналоговых тем, что в них обязательно автоматически выполняются операции квантования измеряемой величины по уровню, дискретизации его по времени и кодирования информации. Перспективным направлением развития цифровых измерителей является применение микропроцессоров, которые обеспечивают управление процессом измерения, самодиагностику, калибровку по заданной программе, а также первичную обработку результатов измерения.

Цифровые измерительные приборы — наиболее быстро развивающийся вид современных средств измерений. Широкое распространение ЦИП обусловлено их высокими точностными характеристиками, быстродействием и чувствительностью, возможностью автоматизации процесса измерения на основе микропроцессорной техники.

В ЦИП происходит преобразование аналогового сигнала $x(t)$ в дискретный выходной сигнал. Под *дискретным* понимают сигналы, значение которых выражено числом импульсов или расположением этих импульсов на временной оси.

Систему правил для предоставления информации с помощью дискретных сигналов называют *кодом*.

Конструктивно ЦИП состоит из предварительного и аналогово-цифрового преобразователей (АЦП), декадного счетчика, дешифратора (преобразователя кода) и цифрового индикатора (рис. 13.1).



Рис. 13.1. Структурная схема ЦИП

Предварительный преобразователь преобразует любую измеряемую величину в пропорциональное U_x напряжение или соответствующий временной интервал.

Аналогово-цифровой преобразователь производит преобразование напряжения U_x или интервала Δt_x в дискретный сигнал измерительной информации. Процесс преобразования включает в себя операции дискретизации, квантования и цифрового кодирования.

Под *дискретизацией* понимают такую операцию, в результате которой аналоговая входная величина $x(t)$ (рис. 13.2, а) сохраняет свои значения лишь при определенных моментах времени, называемых моментами дискретизации (t_1, t_2, \dots, t_8) (рис. 13.2, б). Интервал времени Δt между двумя последовательными моментами дискретизации называют шагом дискретизации.

Под *квантованием* понимают операцию замены истинных мгновенных значений измеряемой величины $x(t)$ ближайшими фиксированными величинами из известной совокупности дискретных величин, называемых уровнями квантования (x_1, x_2, \dots, x_8) (рис. 13.2, в). Разность Δx между двумя уровнями называют интервалом квантования.

В соответствии с теоремой В.А. Котельникова динамический процесс конечной длительности T , имеющий ограниченный спектр частот F , определяется измерением его значений $n = 2FT$. Шаг дискретизации Δt процесса при этом определяется из следующего отношения:

$$\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{1}{2F}.$$

Операция квантования сопровождается появлением случайных погрешностей округления. Квантованные значения x_i преобразовывают в пропорциональное число импульсов N_i — унитарный код (рис. 13.2, г), а затем в двоично-десятичный код (например, 4-3-1-1 или 8-4-2-1).

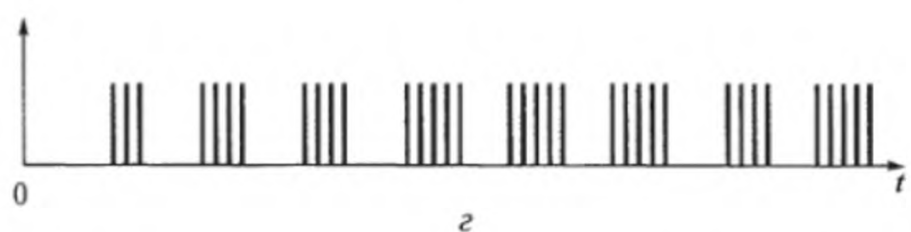
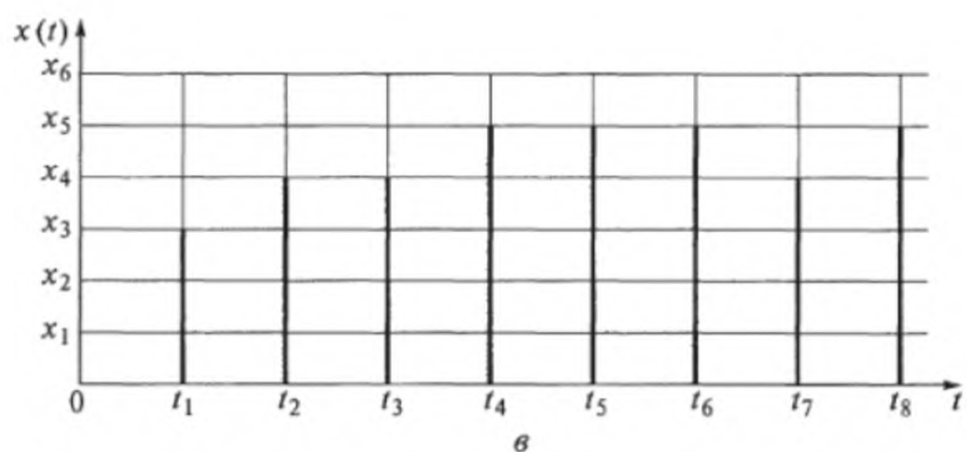
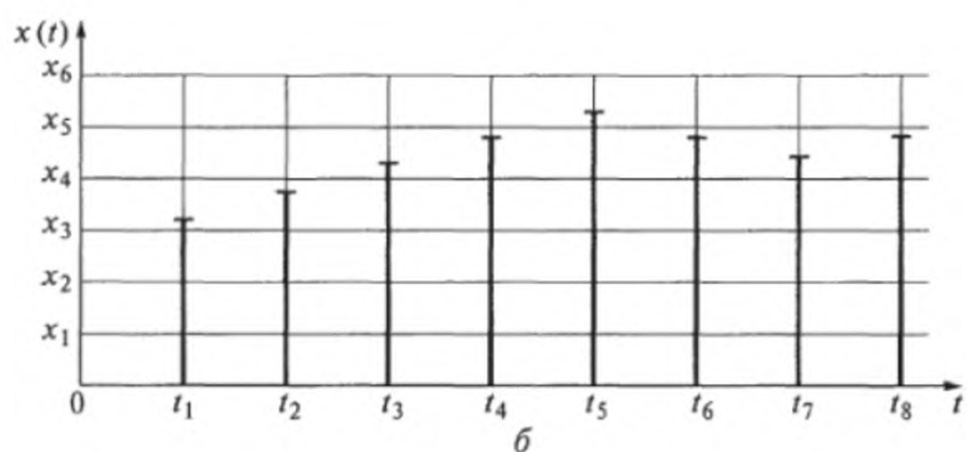
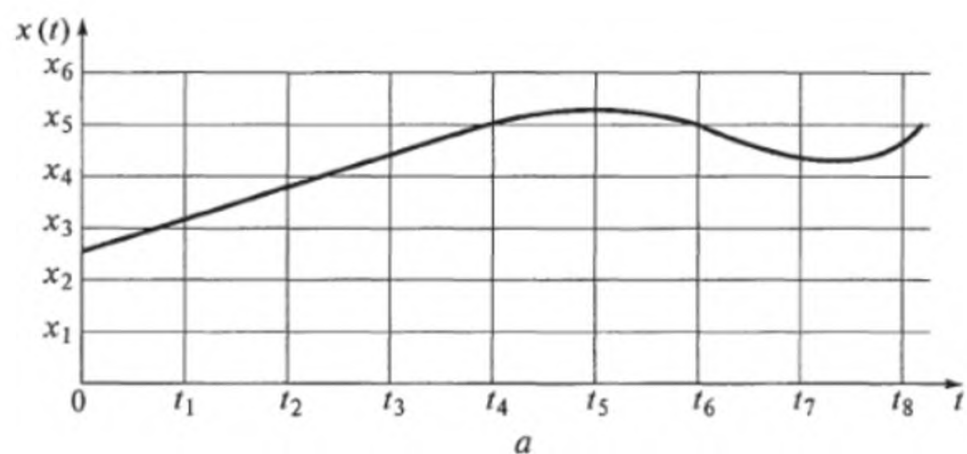


Рис. 13.2. Принцип дискретизации и квантования:

a — аналоговая входная величина; *б* — моменты дискретизации; *в* — уровни квантования; *г* — унитарный код

Цифровое кодирование используют для преобразования квантованных значений x_i в пропорциональное число импульсов.

Декадный счетчик осуществляет преобразование унитарного кода в двоично-десятичный. Основными элементами счетчика служат триггерные ячейки. Каждый декадный счетчик состоит из двух-четырех триггерных ячеек, объединенных прямыми и обратными связями так, что в ячейке можно записывать в двоичном коде десятичные числа в пределах 0...9 (код 4-3-1-1) или 0...10 (код 8-4-2-1). Например, при использовании кода 4-3-1-1 десятичное число 87 в декадном счетчике будет записано следующим образом:

1 1 1 0	1 1 0 0
декада	декада
десяток	единиц

То же число 87 в коде 8-4-2-1 в декадном счетчике записывается следующим образом:

1 0 0 0	0 1 1 1
декада	декада
десяток	единиц

Современные ЦИП содержат от 3 до 9 декадных счетчиков целых и дробных величин.

Дешифратор выполняется на микросхемах и осуществляет преобразование измерительной информации на выходе декадных счетчиков в сигнал цифровых индикаторов (переход от двоично-десятичной системы измерения к десятичной).

Коммутатор состоит из транзисторов $p-n-p$, работающих в ключевом режиме. Для высвечивания нужной информации (цифры индикатора) положительное напряжение с дешифратора поступает на базу транзистора. Сопротивление в коллекторной цепи транзистора резко уменьшается и между анодом и одним из фигурных катодов (в виде цифр от 0 до 9) лампы появляется разность потенциалов, достаточная для ее зажигания.

Цифровой индикатор состоит из газоразрядных ламп или цифробуквенных индикаторов на основе светоизлучающих диодов.

Методы преобразования напряжения в цифровой код

Технические характеристики ЦИП зависят от метода преобразования, параметров элементной базы, конструкции, технологии изготовления и других факторов. Метод преобразования и элемент-

ная база являются основой для получения ЦИП с требуемыми характеристиками.

Для преобразования напряжения (тока) в цифровой код наиболее часто используются методы: временного, частотного преобразования и с промежуточным преобразованием напряжения в фазу.

Вольтметр для измерения мгновенных значений напряжения

Метод временного преобразования применяется в вольтметрах, предназначенных для измерения мгновенных и средних значений напряжений.

В момент нажатия на кнопку «ПУСК» (момент t_0) генератор периода измерения вырабатывает импульс 7 для установки счетчика в нулевое состояние (рис. 13.3). Одновременно импульс 1 запускает генератор линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения U_n , с которого оно подается на устройства сравнения УС1 и УС2.

Пилообразное напряжение изменяется в пределах от U_{\max} до U_{\min} (рис. 13.4). При равенстве $U_x = U_n$ (момент t_1) на выходе УС1

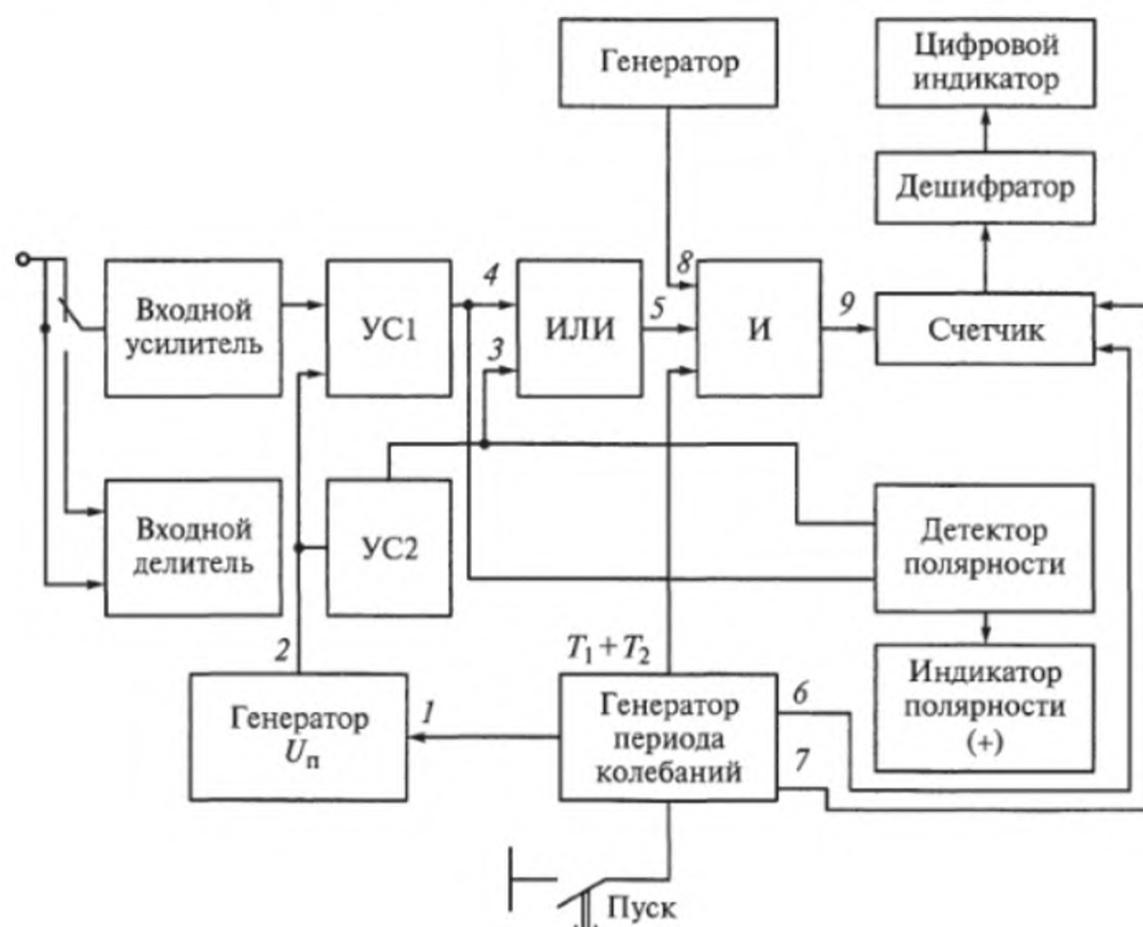


Рис. 13.3. Структурная схема цифрового вольтметра

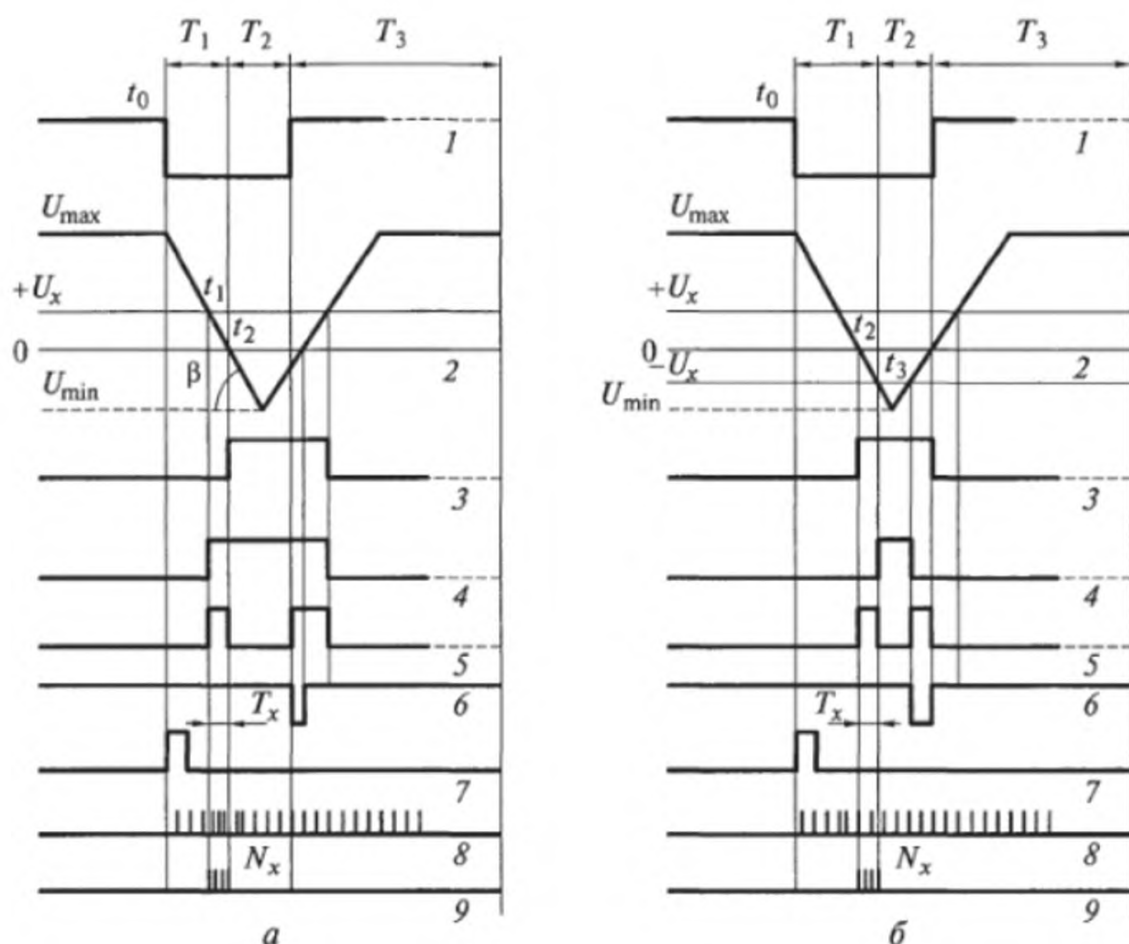


Рис. 13.4. Временные диаграммы для измерения напряжений:
 а — положительных; б — отрицательных

появляется импульс 4. В момент прохождения напряжения U_n через ноль (момент t_2) срабатывает УС2 и вырабатывает импульс 3. Импульсы 3 и 4 подаются на схему ИЛИ, на выходе которой формируется пропорциональный U_x интервал $T_x = t_2 - t_1$ при положительном напряжении $+U_x$ (рис. 13.4, а) и $T_x = t_3 - t_2$ (рис. 13.4, б) в случае отрицательного значения $-U_x$.

Импульс 5 длительностью T_x поступает на схему И, на два других входа которой подаются сигналы с генераторов опорной частоты $f_{оп}$ (8) и периода измерения (I). На выходе схемы И сигнал 9 появляется только при наличии трех сигналов на ее входе. Схема И пропускает серию сигналов, число которых

$$N_x \equiv T_x \equiv U_x.$$

Между числом импульсов N_x и измеряемым напряжением U_x имеется следующая зависимость:

$$N_x = \frac{T_x}{T_{оп}} = \frac{f_{оп}}{K_1} K_2 U_x,$$

где $f_{\text{оп}}$, $T_{\text{оп}}$ — частота и период генератора опорной частоты соответственно; K_1 — коэффициент скорости изменения линейного напряжения («крутизна пины»), В/с:

$$K_1 = \operatorname{tg} \beta = \frac{dU_{\text{п}}}{dt} = U.$$

Здесь β — угол наклона импульса I (см. рис. 13.4, а); K_2 — коэффициент преобразования U_x во входном делителе.

Подбором $f_{\text{оп}}$ и K_1 добиваются того, чтобы число импульсов N_x точно соответствовало величине U_x . Например, если $U_x = 1 \text{ В} = 1000 \text{ мВ}$, то выбирают $N_x = 1000$ импульсов.

Полярность измеряемого напряжения определяется с помощью детектора полярности: при $+U_x$ первым срабатывает УС1, а затем УС2. При $-U_x$ — наоборот. Сигнал детектора полярности поступает на индикатор полярности.

Возврат генератора $U_{\text{п}}$ в исходное состояние и подготовка схемы к очередному измерению осуществляются импульсом b после истечения времени прямого хода луча ($T_1 + T_2$).

Погрешность метода зависит от нестабильности $U_{\text{п}}$ и погрешности, обусловленной нестабильностью срабатывания УС1 и УС2. Численное значение относительной погрешности измерения находится в следующих пределах, %:

$$\delta = \pm(0,10 \dots 0,05).$$

Основной недостаток метода временного преобразования — невозможность подавления помех питающего напряжения. Для устранения этого недостатка на входе ЦИП включают фильтры, что приводит к значительному увеличению времени измерения.

Вольтметр для измерения среднего значения напряжения

Для измерения с помощью цифровых вольтметров среднего значения U_x используют метод двойного интегрирования, который предусматривает первое интегрирование в течение заданного времени $T_{\text{инт}}$ (заряд конденсатора C интегратора измеряемым напряжением U_x на рис. 13.5).

По истечении времени $T_{\text{инт}}$ к интегратору подключается источник опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ с противоположной по отношению к U_x полярностью. Происходит разряд конденсатора C до нулевого значения выходного напряжения $U_{\text{инт}}$ — второе интегрирование в течении времени T_x (рис. 13.6).



Рис. 13.5. Функциональная схема цифрового вольтметра для измерения среднего значения напряжения

При первом интегрировании в случае $U_x = \text{const}$ напряжение на выходе интегратора

$$U_1(t) = \frac{1}{RC} \int_0^{T_{\text{инт}}} U_x dt = \frac{T_{\text{инт}}}{RC} U_x,$$

где RC — постоянная времени интегрирования.

В случае второго интегрирования опорное напряжение $U_{\text{оп}}$, имеющее противоположную по отношению к U_x полярность, интегрируется в течение времени T_x :

$$U_2(t) = \frac{U_x}{RC} T_{\text{инт}} - \frac{1}{RC} \int_0^{T_x} U_{\text{оп}} dt = \frac{U_x}{RC} T_{\text{инт}} - \frac{U_{\text{оп}}}{RC} T_x = 0.$$

Из этого следует, что

$$T_x = \frac{U_x}{U_{\text{оп}}} T_{\text{инт}}.$$

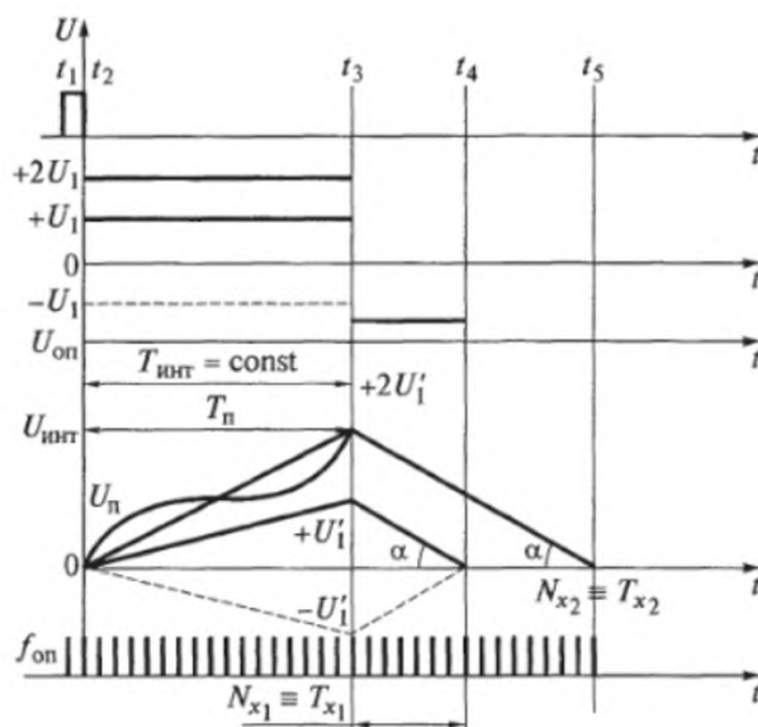


Рис. 13.6. Изменение напряжения на выходе интегратора

При преобразовании T_x в эквивалентное число импульсов путем заполнения его импульсами опорной частоты $f_{оп}$ число импульсов

$$N_x = \frac{T_x}{T_{оп}} = T_x f_{оп}.$$

Следовательно,

$$N_x = \frac{U_x}{U_{оп}} T_{инт} f_{оп}.$$

Если емкость счетчика составляет N импульсов, то за время $T_{инт}$ он может заполниться импульсами опорной частоты:

$$T_{инт} = \frac{N}{f_{оп}}.$$

Тогда

$$N_x = \frac{U_x}{U_{оп}} N = K U_x,$$

где $K = \frac{N}{U_{оп}}$.

Стабильность $U_{оп}$ обеспечивается с высокой точностью.

После нажатия в момент t_1 кнопки «Запуск» на счетчик и в запоминающее устройство ЗУ подается сигнал, устанавливающий

их в исходное состояние (см. рис. 13.5). В момент t_2 устройство управления размыкает ключ К2 и замыкает ключ К1 в положение 1 (в случае измерения напряжения $+U_x$).

Ключ К1 находится в положении 1 в течение времени $T_{\text{инт}}$. При этом напряжение на выходе интегратора $U_{\text{инт}}$ возрастает до значения $+U_1$ (первое интегрирование, см. рис. 13.6).

Интервал $T_{\text{инт}}$ формируется четырехдекадным счетчиком, в котором счет идет до 10^4 импульсов. После того как в счетчике зафиксируется 9 999 импульсов, следующий десятичный импульс возвращает его в исходное состояние и с четвертой декады счетчика на устройство управления подается сигнал переполнения, по которому ключ К1 устанавливается в положение 2.

На вход интегратора через ключ К3 подключается отрицательное напряжение $U_{\text{оп}}$. Начинается процесс второго интегрирования. Напряжение на обкладках конденсатора C уменьшается. Момент $U_{\text{инт}} = 0$ (момент t_4) фиксируется устройством сравнения, с выхода которого поступает импульс в устройство управления. С верхнего входа логической схемы И снимается сигнал и импульсы с генератора $f_{\text{оп}}$ перестают поступать на счетчик.

Число импульсов N_x в интервале $T_x = t_4 - t_3$, пропорциональное U_x , фиксируется в ЗУ и отображается на цифровом индикаторе.

На рис. 13.6 показано такое изменение напряжения на выходе интегратора, когда измеряемое напряжение равно $+2U_1$, напряжение U_n и временные диаграммы при изменении отрицательных сигналов составляют $-U_x$ (пунктирные линии). При равенстве периодов помехи T_n и $T_{\text{инт}}$ напряжение U_n не оказывает влияния на величины $+U_1$ и $+2U_2$ и соответственно на результаты измерений.

Цифровые вольтметры, конструктивно выполненные на методе двойного интегрирования, имеют относительную погрешность измерения, %:

$$\delta = \pm(0,020 \dots 0,005).$$

Для подавления помех с частотой сети 50 или 400 Гц интервал интегрирования $T_{\text{инт}}$ выбирается кратным периоду сетевой помехи:

$$T_{\text{инт}} = nT_n,$$

где $n = 1, 2, \dots, K$.

Поддержание этого равенства в цифровых вольтметрах осуществляется автоподстройкой частоты.

Вольтметр с преобразованием напряжения в частоту

Метод частотного преобразования используется в большой группе вольтметров и АЦП (В7-18, В7-25 и др.). Цифровые измерительные

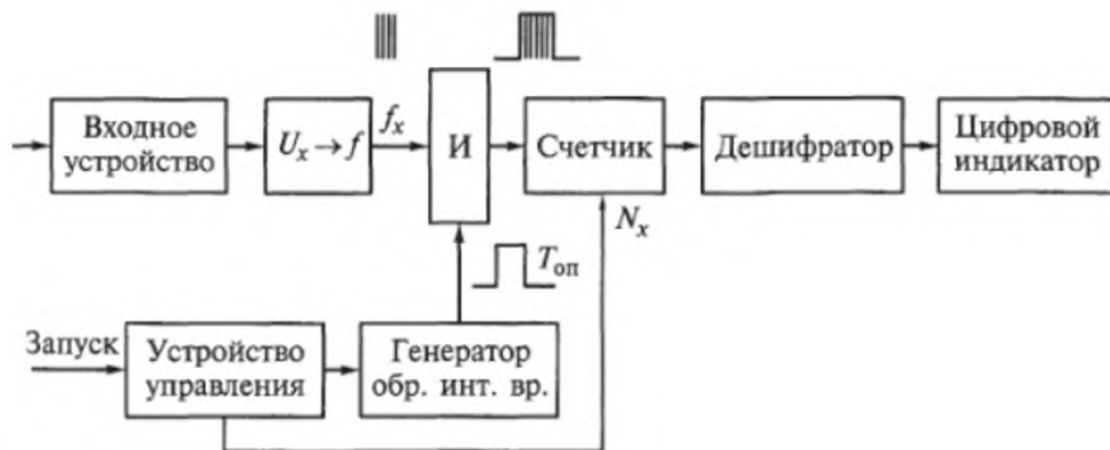


Рис. 13.7. Структурная схема цифрового вольтметра с преобразованием напряжения в частоту

приборы, сконструированные на основе этого метода, имеют относительную погрешность измерения (преобразования), %:

$$\delta = \pm(0,100 \dots 0,005).$$

Они обеспечивают высокое подавление помех и высокую чувствительность (0,1 ... 1,0 мкВ).

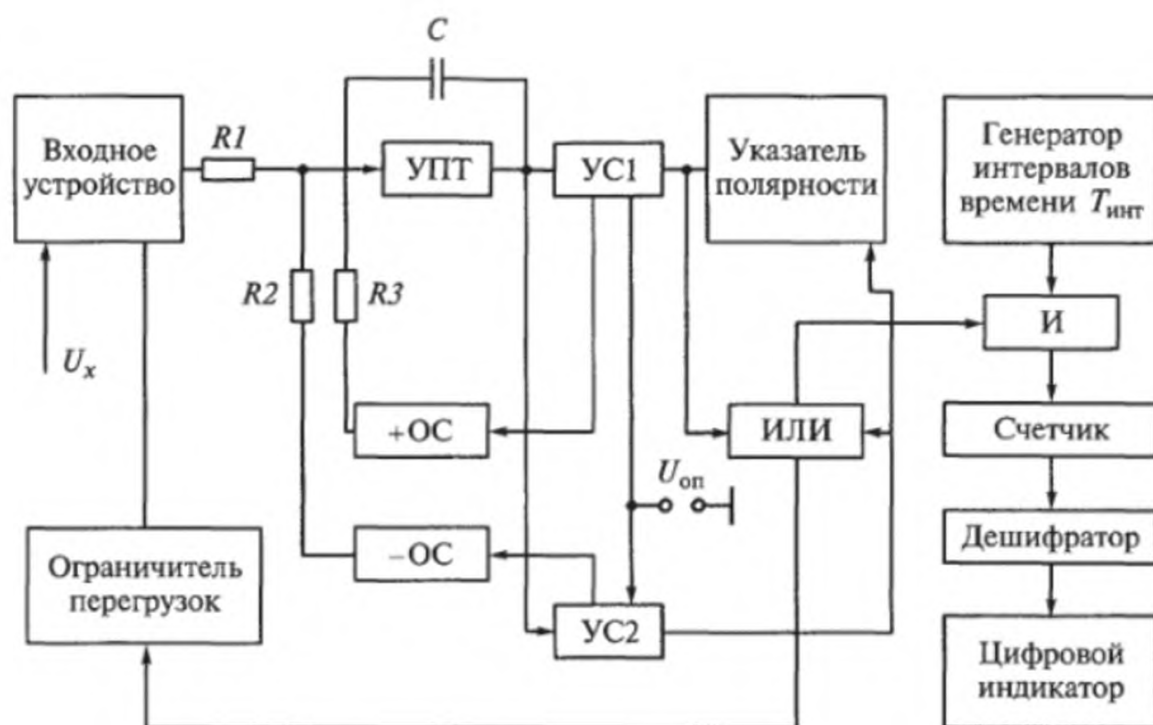
В функциональной схеме цифрового вольтметра с преобразованием напряжения в частоту ($U_x \rightarrow f$) (рис. 13.7) по сигналу «Запуск» устройство управления устанавливает счетчик в исходное состояние и запускает генератор образцовых интервалов времени T_0 с кварцевой стабилизацией частоты.

Измеряемое напряжение через входное устройство подается на преобразователь $U_x \rightarrow f$, выходная частота которого пропорциональна U_x ($U_x \propto f$), и на один из входов логической схемы И поступает сигнал T_0 длительностью 1 с. Число импульсов N_x с частотой f_x , прошедших через схему И, фиксируются счетчиком и после дешифрования отображаются на цифровом индикаторе, т. е.

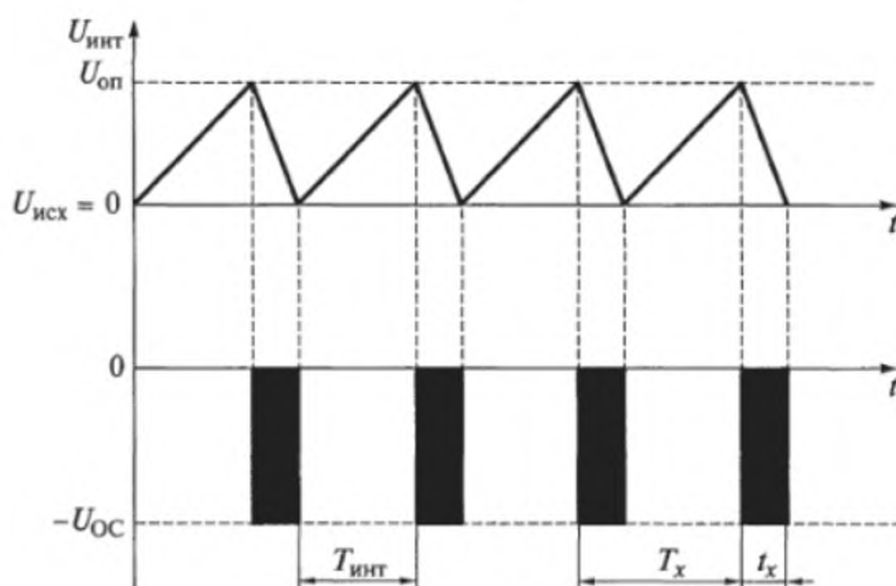
$$N_x = T_0 f_x = K_1 K_2 T_0 U_x.$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты преобразования входного устройства и преобразователя.

В функциональной схеме цифрового вольтметра с преобразователем $U_x \rightarrow f$ с импульсной обратной связью (ОС) (рис. 13.8, а) напряжение U_x через резистор R_I подается на вход интегратора [усилитель постоянного тока (УПТ) с отрицательной ОС], и конденсатор C за время $T_{\text{инт}}$ заряжается до заданного значения опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ (рис. 13.8, б). При $U_{\text{инт}} = U_{\text{оп}}$ срабатывает одно из УС и включается преобразователь с обратной связью («–ОС» в случае измерения $+U_x$ и «+ОС» — при измерении отрицательного U_x) и счетчик N_x .



a



б

Рис. 13.8. Функциональная схема цифрового вольтметра с преобразователем напряжения в частоту с импульсной обратной связью:

a — схема вольтметра; *б* — преобразование напряжения в частоту

Преобразователи ОС подключают в течение времени (строго фиксированного) t_{OC} на вход интегратора постоянный импульс с амплитудой U_{OC} , под действием которого конденсатор C разряжается до напряжения $U_{исх} = 0$.

Для процессов заряда и разряда конденсатора с УПТ при $K_1 = 1$ можно записать:

$$\frac{1}{R_1 C} \int_0^{T_{\text{инт}}} U_x dt = U_{\text{оп}} = \int_0^{t_{\text{ос}}} \left(\frac{1}{R_2 C} U_{\text{ос}} - \frac{1}{R_1 C} U_x \right) dt,$$

где $R_1 C$ и $R_2 C$ — постоянные времени.

Как видно из формулы, процессы заряда и разряда конденсатора C зависят от ряда параметров схемы, с помощью которой подаются сигналы от входного устройства и устройств ОС на интегратор. Варьируя величины сопротивлений R_1 и R_2 в цепях ОС, можно получить различные значения постоянных времени $R_1 C$ и $R_2 C$ и таким образом изменять параметры сигнала $U_{\text{оп}}$ (см. рис. 13.8), а именно T_x , T_u и $t_{\text{ос}}$.

Так как $U_{\text{ос}} = \text{const}$, то

$$\begin{aligned} \frac{T_{\text{инт}}}{R_1 C} U_x &= U_{\text{оп}} = \frac{t_{\text{ос}}}{R_2 C} U_{\text{ос}} - \frac{t_{\text{ос}}}{R_1 C} U_x; \\ \frac{T_{\text{инт}} + t_{\text{ос}}}{R_1 C} U_x &= \frac{T_x}{R_1 C} U_x - \frac{t_{\text{ос}}}{R_2 C} U_{\text{ос}}; \\ f_x &= \frac{1}{T_x} = \frac{R_2 C}{R_1 C} \frac{U_x}{U_{\text{ос}} t_{\text{ос}}} = K U_x, \end{aligned} \quad (13.1)$$

где $K = \frac{R_2}{R_1 U_{\text{ос}} t_{\text{ос}}}$.

Как видно из формулы (13.1), параметры преобразователя $U_x \rightarrow f$ не зависят от C и $U_{\text{оп}}$, а зависят лишь от отношения R_1/R_2 . Произведение $U_{\text{ос}} t_{\text{ос}} = \text{const}$ называют вольт-секундной площадью.

Таким образом, при малых значениях измеряемых U_x происходят медленные заряды конденсатора УПТ до постоянного значения $U_{\text{оп}}$ и соответственно редкие его разряды (частота f_x мала). В случае больших значений U_x конденсатор УПТ быстрее заряжается и чаще разряжается (большая частота f_x). Тем самым обеспечивается преобразование $U_x \rightarrow f_x$.

Вольтметр с промежуточным преобразованием частоты в фазу

В фазовращающее устройство (ФВУ) схемы вольтметра на основе метода с промежуточным преобразованием частоты в фазу одновременно поступают два напряжения: измеряемое U_x и опорное $U_{\text{оп}}$. Разность фаз между U_x и $U_{\text{оп}}$ преобразуется в ФВУ в пропорциональное напряжение $U_{\text{ф}}$. Влияние помех на $U_{\text{ф}}$ оказывается при этом минимальным.

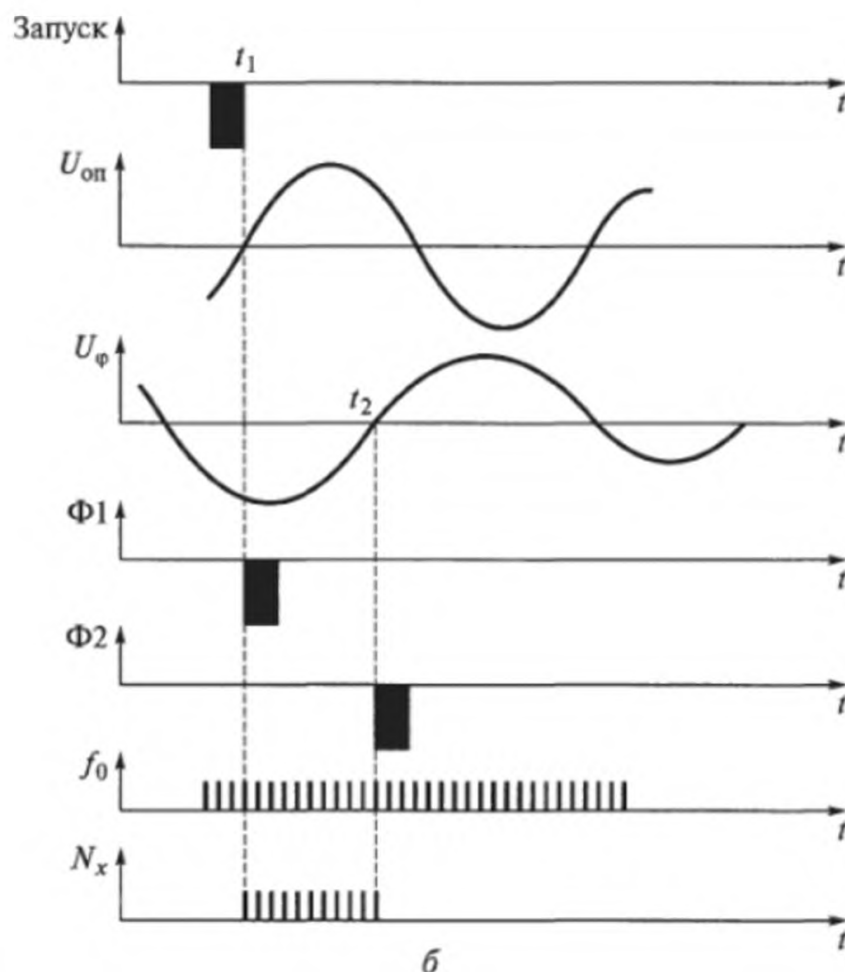
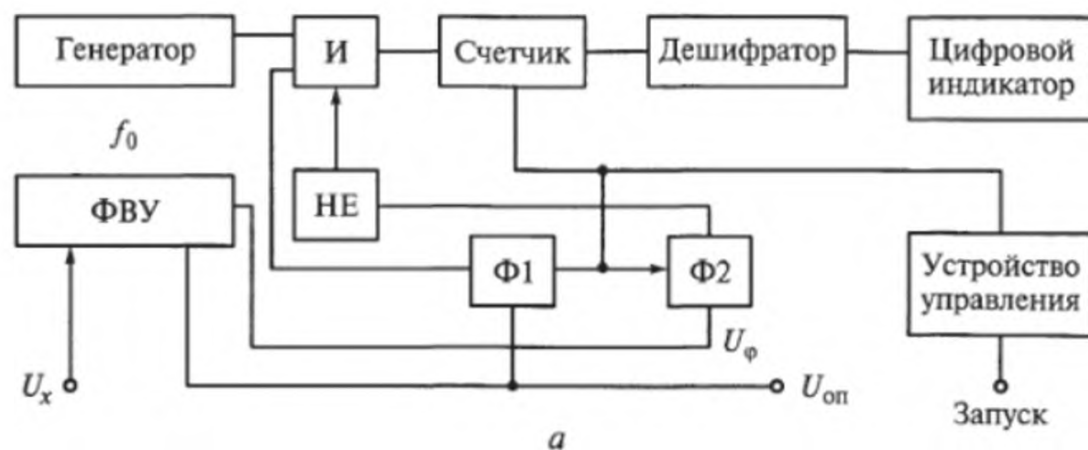


Рис. 13.9. Структурная схема цифрового вольтметра с промежуточным преобразованием частоты в фазу:

a — схема вольтметра; *б* — схема преобразования

По сигналу «Запуск» устройство управления устанавливает счетчик в исходное состояние и включает в синхронную работу формирователи $\Phi 1$ и $\Phi 2$. В момент прохождения напряжений $U_{оп}$ и $U_{ф}$ через нулевые значения формирователи $\Phi 1$ и $\Phi 2$ вырабатывают импульсы, которые подаются на логический элемент И в момент времени t_1 (рис. 13.9, б). Включается счетчик импульсов генератора f_0 (напряжение $U_{оп}$ проходит нулевое значение).

Логический элемент И имеет три входа. До момента t_1 на двух входах элемента И сигналы от генератора f_0 и формирователя Ф1 уже имеются (на выходе Ф2 установлен логический элемент НЕ).

При прохождении нулевого значения напряжением U_{Φ} в момент t_2 на выходе формирователя Ф2 вырабатывается второй импульс и счетчик выключается. Измеряемое напряжение U_x отображается на цифровом индикаторе.

Методика выполнения работы

1. Изучите теоретические основы построения цифровых вольтметров и методы преобразования напряжения в цифровой код.

В лабораторной работе используются:

источник постоянного тока Б5-47;

вольтметр универсальный цифровой типа В7-18;

аналоговый вольтметр универсальный В7-26;

цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) (макет).

(Источник постоянного тока типа Б5-47 запрещается включать в сеть, если переключатели U и I на передней панели установлены в положение 000. Вместо 000 переключатели U и I должны быть установлены на любые другие цифры.)

2. Включите питание вольтметра В7-18 и источник постоянного тока Б5-47 и прогрейте их в течение 10...15 мин.

3. Изменяя напряжение источника постоянного тока $U_{Б5}$, произведите измерения с помощью цифрового вольтметра напряжения $U_{В7}$. Результаты измерений запишите в табл. 13.1.

По полученным и расчетным данным постройте графики поправок:

$$\Delta P_i = f(-\Delta U_i);$$

$$\Delta P_i = \psi(U_{Б5}),$$

а также графики относительных погрешностей напряжения и частоты:

$$\delta_i = f(\Delta U_{Б5}) \text{ и } \gamma_i = f(U_{Б5}).$$

При вычислении относительных погрешностей $\gamma_i = \frac{\Delta U_i}{U_{нм}} 100\%$

величину номинального напряжения $U_{нм}$ принимайте равной 100 В (предел измерения напряжения на вольтметре В7-18 установлен при $U_{нм} = 100$ В).

Таблица 13.1

$U_{B5}, \text{ В}$	1	3	5	10	15	20	25
$U_{B7}, \text{ В}$							
$\Delta U_i = U_{iB5} - U_{iB7}$							
$\delta_i = \frac{\Delta U_i}{U_{iB7}} 100 \%$							
$\gamma_i = \frac{\Delta U_i}{U_{\text{нм}}} 100 \%$							

4. Включите питание вольтметра В7-26 и макета ЦАП. Диапазон измерения аналогового вольтметра В7-26 установите равным 1 В.

5. Поочередно включая переключатели макета ЦАП, соответствующие напряжениям двоичного кода $2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^7 \text{ В}$, запишите показания вольтметра В7-26 в табл. 13.2. Чтобы измерить напряжения $U = 1,28 \text{ В}$, $U = 2,56 \text{ В}$ и т.д., диапазон измерений вольтметра В7-26 переключите на 10 В.

По данным табл. 13.2 вычислите следующие значения:

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=0}^7 U_{iB7} - \sum_{i=0}^7 U_{ip};$$

$$\delta_{\Sigma} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\sum_{i=0}^7 U_{ip}} 100 \%.$$

6. По результатам проведенных измерений и вычислений абсолютных и относительных погрешностей, выполненных на основании табл. 13.1 и 13.2, сделайте выводы о точности цифровых методов измерений, а также о целесообразности применения тех или иных методов для измерения напряжений в различных диапазонах напряжений и частот.

Таблица 13.2

Разряды ЦАП	2^0	2^1	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6	2^7
U_{ip} (расчетное), В	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64	1,28	2,56	5,12
U_{iB7} (измеренное), В								
$U_i = U_{iB7} - U_{ip}$								
$\delta U_i = \pm \frac{\Delta U_i}{U_{ip}} 100 \%$								

Контрольные вопросы

1. Каковы основные операции, выполняемые с помощью АЦП?
2. В чем состоит принцип действия декадного счетчика?
3. Какова суть метода временного преобразования?
4. Можно ли уменьшить погрешность дискретности и влияние помех питающего напряжения в вольтметре $U_x \rightarrow f_x$?
5. Что означает выражение $3^{1/2}$ ($4^{1/2}$, $5^{1/2}$ и т.д.) разряда дисплея цифрового вольтметра?
6. Что понимают под дискретизацией величины?
7. В чем суть операции квантования измеряемой величины?
8. Как осуществляется операция цифрового кодирования измеряемой величины? Какие при этом возникают погрешности?
9. Каким образом работает схема вольтметра для измерения среднего значения напряжения?

Лабораторная работа 14

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы

Изучение влияния емкости и активного сопротивления колебательного контура на параметры затухающих колебаний.

Основные сведения

Реальный колебательный контур состоит из конденсатора C , катушки индуктивности L и резистора R (рис. 14.1). Если зарядить конденсатор, а затем предоставить ему возможность разряжаться через катушку и резистор, то в контуре возникнут затухающие электромагнитные колебания. При этом в катушке будет возникать

ЭДС самоиндукции $e_c = -L \frac{dI}{dt}$, которая по закону Ома для

замкнутой цепи равна сумме напряжений на конденсаторе $U_C = \frac{q}{C}$ и резисторе $U_R = IR$. Следовательно,

$$-L \frac{dI}{dt} = IR + \frac{q}{C}, \quad (14.1)$$

где q — заряд на обкладках конденсатора.

Так как $I = \frac{dq}{dt}$, то выражение (14.1) можно преобразовать:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{CL} = 0.$$

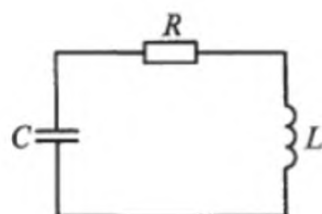


Рис. 14.1. Схема колебательного контура

Введя замену $\frac{R}{L} = 2\beta$, $\frac{1}{CL} = \omega_0^2$, запишем:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (14.2)$$

Выражение (14.2) является дифференциальным уравнением затухающих электромагнитных колебаний, где β — коэффициент затухания, ω_0 — круговая частота собственных колебаний контура.

Период собственных колебаний контура T_0 определяется формулой Томсона:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Решение уравнения (14.2) зависит от знака разности $\omega_0^2 - \beta^2 = \omega^2$, где ω — круговая частота затухающих колебаний. Если $\omega^2 > 0$, то ω — действительное число и решением уравнения (14.2) является выражение

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (14.3)$$

где q_0 — максимальный заряд на обкладках конденсатора; φ_0 — начальная фаза.

Функция $q = \pm q_0 e^{-\beta t}$ представляет собой закон изменения амплитуды. На рис. 14.2 график этой функции изображен пунктиром. Если $\omega^2 < 0$, то колебаний нет и разряд конденсатора будет аperiodическим.

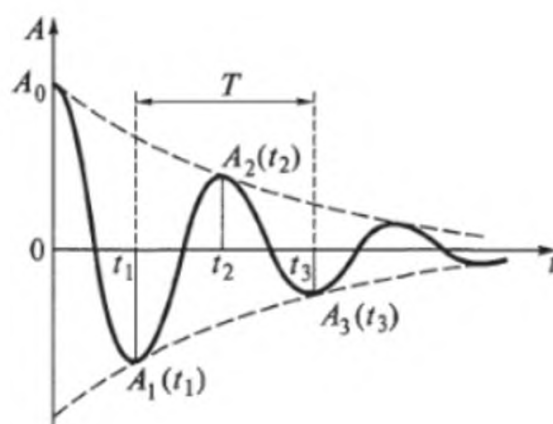


Рис. 14.2. График затухающих колебаний

Из уравнения (14.3) можно получить законы изменения напряжения и силы тока в контуре:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0) = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0);$$

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_0 e^{-\beta t} [\beta \cos(\omega t + \varphi_0) + \omega \sin(\omega t + \varphi_0)].$$

Так как $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где T — период затухающих колебаний, то

$$\omega_0^2 - \beta^2 = \frac{4\pi^2}{T^2}, \quad \omega_0^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2. \text{ Имеем:}$$

$$\frac{1}{LC} = \frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2;$$

$$C = \frac{1}{L \left(\frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2 \right)}. \quad (14.4)$$

Кроме коэффициента затухания для характеристики затухающих колебаний используют логарифмический декремент затухания λ . Его определяют как натуральный логарифм отношения двух последовательных амплитуд, соответствующих моментам времени, отличающимся на период:

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}, \quad (14.5)$$

где A — амплитуда, или

$$\lambda = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{\beta T} = \beta T.$$

Здесь A_0 — начальная амплитуда.

Отсюда

$$\beta = \frac{\lambda}{T}. \quad (14.6)$$

Подставив выражения (14.5) и (14.6) в формулу (14.4), получим

$$C = \frac{T^2}{L \left[4\pi^2 + \left(\ln \frac{A(t)}{A(t+T)} \right)^2 \right]}.$$

Методика выполнения работы

Установка состоит из катушки индуктивности L , конденсаторов $C1$ и $C2$ и резисторов $R1$ и $R2$ (рис. 14.3). Переключателем $S1$ можно включать в колебательный контур поочередно конденсаторы $C1$ и $C2$, а переключателем $S2$ — резисторы $R1$ и $R2$. Данная установка позволяет получить четыре колебательных контура с различными параметрами.

На конденсатор подается пилообразное напряжение с генератора развертки ЭО. Выходной сигнал снимается с катушки индуктивности и подается на вход Y осциллографа (на рис. 14.3 не показано). На экране осциллографа получается график затухающих электромагнитных колебаний.

1. Установив переключатели $S1$ и $S2$ в положение 1, получите колебательный контур LC_1R_1 .

2. Включите осциллограф и добейтесь на экране устойчивой картины затухающих колебаний. Полученную кривую зарисуйте на миллиметровой бумаге.

3. Измерив на выходе контура начальную амплитуду A_0 и частоту f_0 подаваемого на вход осциллографа напряжения $U_{\text{вых}}$, определите масштабы для кривых, получаемых по оси X , с/мм:

$$k_X = T/x,$$

где $T = 1/f_0$; x — число миллиметров между T_1 и T_3 на графике; по оси Y , В/мм:

$$k_Y = U_0/y_0,$$

где y_0 — число миллиметров, соответствующее $U_0 = U_{\text{вых max}}$ на графике.

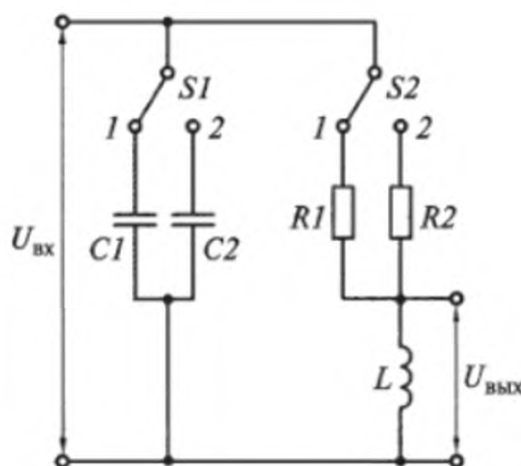


Рис. 14.3. Схема установки для получения колебательных контуров с различными параметрами

Таблица 14.1

Кон- тур	x , мм	k_x , с/мм	T , с	y , мм	k_y , В/мм	$A(t)$, мм	$A(t + T)$, мм	λ	β , с ⁻¹	C_{ϕ} (факти- ческое)	C_p (расчет- ное)

4. По полученному графику определите период колебаний T (см. рис. 14.2).

5. Измерив величину нескольких пар последовательных амплитуд $A(t)$ и $A(t + T)$, определите для каждой пары логарифмический декремент затухания λ , коэффициент затухания β и емкость C конденсатора [см. формулы (14.5), (14.6) и (14.4)].

6. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 14.1.

7. Изменяя положение переключателей $S1$ и $S2$, проведите аналогичные измерения и вычисления для колебательных контуров LC_1R_2 , LC_2R_1 и LC_2R_2 .

8. Вычислите значения емкостей конденсаторов C_{p1} и C_{p2} и найдите погрешности ΔC_1 и ΔC_2 измерения емкости конденсаторов. Фактические значения емкостей конденсаторов $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ возьмите по данным схемы собранного контура.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний от уравнения незатухающих колебаний?

2. Что называется коэффициентом затухания и логарифмическим декрементом затухания? Как они связаны?

3. Как определяют величину емкости конденсатора в колебательном контуре?

4. Какие элементы содержит контур, в котором возникают незатухающие колебания?

5. По какой формуле определяется период собственных колебаний в контуре?

6. По какой причине электромагнитные колебания в реальном колебательном контуре являются затухающими?

7. От чего зависит коэффициент затухания в колебательном контуре?

8. По какой формуле определяют частоту затухающих колебаний?

Лабораторная работа № 15

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы

Изучение цепей переменного тока с активным, емкостным и индуктивным сопротивлениями и измерение их параметров.

Основные сведения

Переменным током называется ток, изменяющийся со временем. В данной лабораторной работе рассматривается ток, зависящий от времени по гармоническому закону:

$$I = I_0 \sin \omega t.$$

В цепи, содержащей резистор R , сопротивление резистора называется *активным*, так как оно обуславливает необратимую потерю электрической энергии — переход ее во внутреннюю (рис. 15.1). Сила тока и напряжение на активном сопротивлении изменяются в одной фазе (рис. 15.2).

Гармонически изменяющиеся величины можно представить векторной диаграммы. За начало отсчета выбирают горизонтальную ось, вдоль которой откладывают вектор, изображающий амплитудное значение силы тока I_0 . Угол между векторами \vec{I}_0 и \vec{U}_0 (амплитудное значение напряжения) называется *фазовым*. В том случае, когда цепь обладает активным сопротивлением, вектор

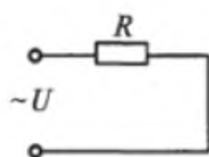


Рис. 15.1. Цепь с активным сопротивлением

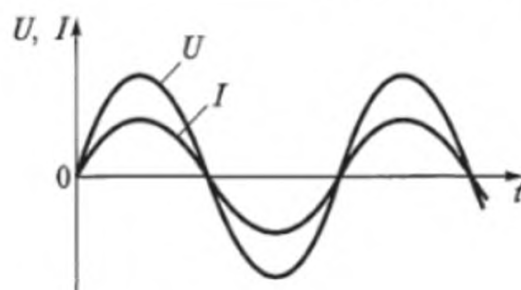


Рис. 15.2. График переменного тока и напряжения на активном сопротивлении

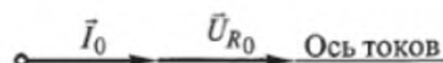


Рис. 15.3. Векторы тока и напряжения на активном сопротивлении

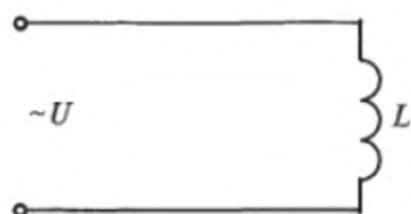


Рис. 15.4. Цепь с катушкой индуктивности

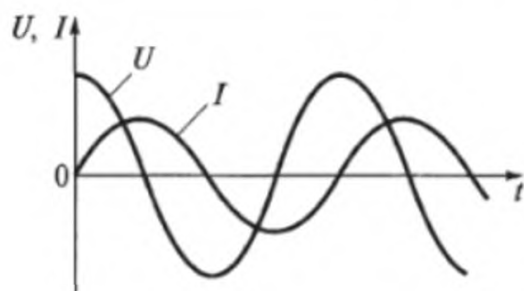


Рис. 15.5. Графики тока и напряжения в цепи с катушкой индуктивности

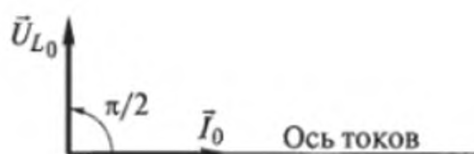


Рис. 15.6. Векторная диаграмма тока и напряжения в цепи с катушкой индуктивности

$\vec{U}_{R_0} = \vec{I}_0 R$, изображающий напряжение на резисторе, также направлен вдоль горизонтальной оси, так как сдвиг фаз между силой тока и напряжением отсутствует (рис. 15.3).

В цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности L с ничтожно малым активным сопротивлением (рис. 15.4), напряжение опережает силу тока по фазе на $\pi/2$ (рис. 15.5). Электродвижущая сила самоиндукции препятствует изменению силы тока в цепи, поэтому колебания силы тока отстают от колебаний напряжения.

Величина $U_{L_0} = I_0 \omega L$ представляет собой амплитудное значение напряжения на катушке, а величина $\omega L = X_L$ — индуктивное сопротивление, где ω — круговая частота переменного тока (рис. 15.6). На индуктивном сопротивлении нет потери энергии. Такое сопротивление называется *реактивным*.

В цепи переменного тока с конденсатором емкостью C (рис. 15.7) колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi/2$ (рис. 15.8). Полученные результаты можно представить в виде векторной диаграммы (рис. 15.9). Здесь вектор, изображающий напряжение, повернут относительно вектора тока на угол $\pi/2$ в отрицательном направлении (по часовой стрелке).

На основании закона Ома $\frac{U_{C_0}}{I_0}$ является сопротивлением участка цепи, в данном случае

$$\frac{U_{C_0}}{I_0} = \frac{1}{\omega C},$$

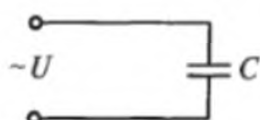


Рис. 15.7. Цепь с конденсатором

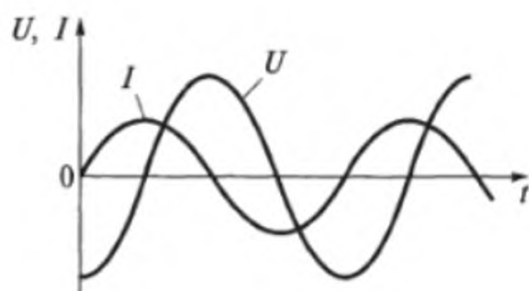


Рис. 15.8. График тока и напряжения в цепи с конденсатором

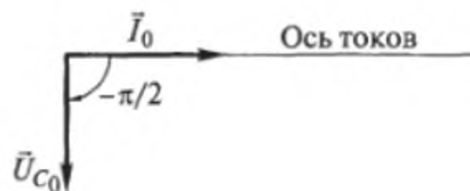


Рис. 15.9. Векторная диаграмма тока и напряжения в цепи с конденсатором

где $X_C = \frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление. Оно зависит от емкости конденсатора и частоты переменного тока. Емкостное сопротивление, так же как и индуктивное, является реактивным, так как на нем нет потери энергии.

Реальные цепи переменного тока, как правило, содержат все виды сопротивлений. Рассмотрим цепь из последовательного соединения резистора R , катушки L и конденсатора C (рис. 15.10).

Если сила тока в цепи изменяется по закону $I = I_0 \sin \omega t$, то напряжение

$$U = U_0 \sin \omega t + \varphi,$$

где φ — сдвиг фаз между силой тока и напряжением.

Для определения сдвига фаз и полного сопротивления цепи (импеданса) удобно воспользоваться векторной диаграммой.

Пусть \vec{U}_{R_0} , \vec{U}_{L_0} , \vec{U}_{C_0} — векторы амплитудных значений напряжений на резисторе, катушке индуктивности и конденсаторе со-

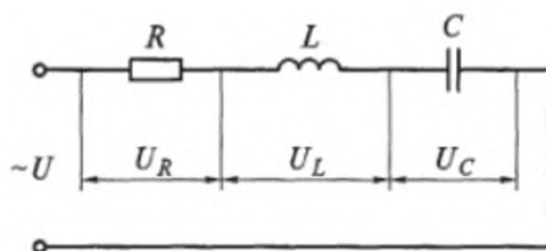


Рис. 15.10. Схема реальной цепи с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора

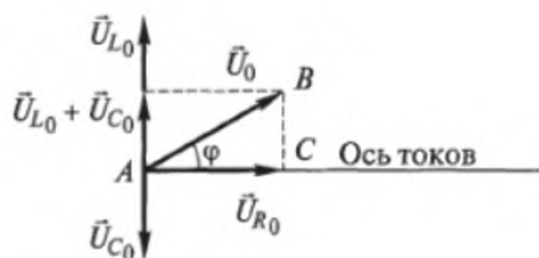


Рис. 15.11. Векторная диаграмма напряжений для цепи с резистором, катушкой индуктивности и конденсатором при $\bar{U}_L > \bar{U}_C$

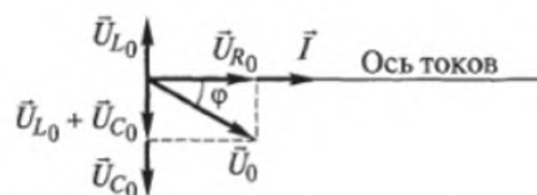


Рис. 15.12. Векторная диаграмма напряжений цепи с R, L, C , при $\bar{U}_C > \bar{U}_L$

ответственно (рис. 15.11). Для нахождения результирующего напряжения нужно сложить все три вектора напряжений. Так как \vec{U}_{L_0} и \vec{U}_{C_0} направлены по одной прямой, то их сумма — это вектор, направленный в сторону большего вектора, а модуль равен разности модулей складываемых векторов. Вектор $(\vec{U}_{L_0} + \vec{U}_{C_0})$ складывают по правилу параллелограмма с вектором \vec{U}_{R_0} и получают результирующий вектор

$$\vec{U}_0 = \vec{U}_{R_0} + (\vec{U}_{L_0} + \vec{U}_{C_0}).$$

Учитывая, что $\vec{U}_{R_0} = I_0 R$, $\vec{U}_{L_0} = I_0 X_L$, $\vec{U}_{C_0} = I_0 X_C$ из треугольника ABC получаем

$$I_0^2 R_{\Pi}^2 = I_0^2 R^2 + I_0^2 (X_L - X_C)^2.$$

Если обозначить через Z полное сопротивление цепи, то

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Сдвиг фаз можно определить из следующей формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (15.1)$$

Из выражения (15.1) видно, что если $X_L > X_C$, то $\varphi > 0$ и результирующее напряжение опережает силу тока на угол φ . Если $X_L < X_C$, то $\varphi < 0$ и результирующее напряжение в цепи отстает от

силы тока на угол φ , а векторная диаграмма имеет вид, изображенный на рис. 15.12.

Закон Ома для данной цепи имеет следующий вид:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (15.2)$$

Большинство электроизмерительных приборов измеряют не амплитудные, а эффективные значения напряжений и токов, имеющие следующую связь с амплитудными:

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

Подставив эти соотношения в формулу (15.2), получим

$$I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

Методика выполнения работы

Установка для выполнения работы представляет собой панель, на которой смонтирована электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности L , конденсатора C , резистора R и амперметра (рис. 15.13). Напряжение подается с регулятора напряжения РН и измеряется вольтметром. Параллельно конденсатору включен ключ S . При замыкании ключа ток через конденсатор не идет и полное сопротивление цепи складывается из активного сопротивления и индуктивного сопротивления катушки.

1. Замкните ключ S и, подав в цепь напряжение U , измерьте силу тока I_1 .

2. Разомкните ключ и измерьте силу тока I_2 .

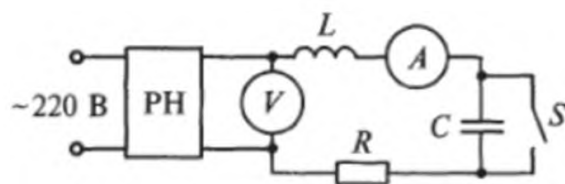


Рис. 15.13. Схема установки для выполнения работы

3. Вычислите:

а) индуктивное сопротивление цепи

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{U}{I_1}\right)^2 - R^2};$$

б) индуктивность катушки

$$L = \frac{X_L}{\omega},$$

где ω — круговая частота, с^{-1} ,

$$\omega = 2\pi f,$$

где f — частота питающего напряжения;

в) емкостное сопротивление

$$X_C = X_L \pm \sqrt{\left(\frac{U}{I_2}\right)^2 - R^2};$$

г) емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{\left(\frac{U}{I_1}\right)^2 - R^2} \pm \sqrt{\left(\frac{U}{I_2}\right)^2 - R^2}}.$$

4. Прделайте аналогичные измерения и вычисления при нескольких значениях напряжения.

5. Вычислите \bar{L} и \bar{C} .

6. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 15.1.

7. Найдите погрешности ΔL и ΔC измерения индуктивности и емкости.

Таблица 15.1

$U, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$X_L, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	$\bar{L}, \text{Гн}$	$X_C, \text{Ом}$	$C, \text{Ф}$	$\bar{C}, \text{Ф}$

8. Постройте векторную диаграмму для цепи, содержащей резистор R и катушку индуктивности L :

а) взяв из табл. 15.1 одно из значений тока I_1 , найдите амплитудные значения напряжений на резисторе и катушке индуктивности:

$$U_{R_0} = \sqrt{2}I_1R; \quad U_{L_0} = \sqrt{2}I_1X_L;$$

б) постройте векторную диаграмму, найдите вектор результирующего напряжения и сдвиг фаз φ между силой тока и напряжением:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}.$$

9. Аналогично постройте векторную диаграмму и вычислите сдвиг фаз между силой тока и напряжением для цепи, содержащей резистор R , катушку индуктивности L и конденсатор C .

Контрольные вопросы

1. Что называется активным сопротивлением цепи, индуктивным сопротивлением цепи переменного тока?

2. По какой формуле определяется индуктивное сопротивление цепи?

3. Как определяется емкостное сопротивление цепи переменного тока?

4. По какой формуле находят полное сопротивление цепи переменного тока, состоящей из последовательно соединенных конденсатора, катушки индуктивности и резистора?

5. Как строятся векторные диаграммы токов и напряжений для цепей переменного тока, содержащих различные элементы (конденсатор, катушку индуктивности, резистор)?

6. Каким образом работает схема установки, применяемая в данной лабораторной работе?

7. По какой формуле определяется индуктивное сопротивление?

8. Какой вид имеет векторная диаграмма цепи переменного тока, содержащей конденсатор и резистор?

9. По какой формуле определяется сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности, резистор и конденсатор?

10. В какой вид энергии переходит энергия электрического тока в активном сопротивлении?

Лабораторная работа № 16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

Цель работы

Исследование прохождения прямоугольных импульсов через линейные цепи.

Основные сведения

Электрическим импульсом называется кратковременное изменение напряжения или силы тока. Основными параметрами импульсного сигнала являются амплитуда U_{\max} , длительность импульса $t_{\text{и}}$, крутизна фронта $S_{\text{ф}}$, крутизна среза $S_{\text{ср}}$, длительность фронта $\tau_{\text{ф}}$ и длительность среза $\tau_{\text{ср}}$. Эти параметры определяют по графику конкретного импульса, как показано на рис. 16.1. Так, например, крутизна фронта определяется следующим образом:

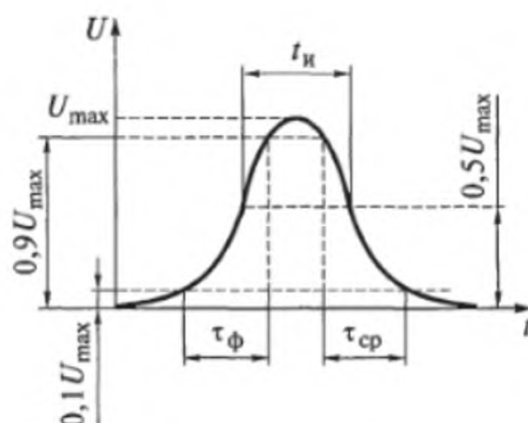


Рис. 16.1. Параметры электрического импульса

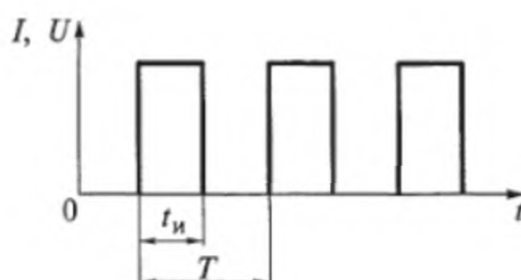


Рис. 16.2. Параметры импульсного тока

$$S_{\phi} = \frac{0,9U_{\max} - 0,1U_{\max}}{\tau_{\phi}} = \frac{0,8U_{\max}}{\tau_{\phi}}. \quad (16.1)$$

Импульсным током называются повторяющиеся импульсы (рис. 16.2). Основными параметрами импульсного тока являются период повторения импульсов T , частота повторения импульсов f , скважность

$$Q = \frac{T}{t_{\text{и}}} \quad (16.2)$$

и коэффициент заполнения

$$k = \frac{1}{Q} = \frac{t_{\text{и}}}{T}. \quad (16.3)$$

При прохождении импульсного сигнала через линейные цепи происходит изменение его формы и параметров. *Линейными* называются электрические цепи, в которых между силой тока и напряжением существует линейная зависимость, т. е. такие цепи, для которых справедлив закон Ома.

Рассмотрим прохождение прямоугольного импульсного сигнала через RC -цепь, состоящую из последовательно соединенных конденсатора емкостью C и резистора сопротивлением R (рис. 16.3). Характеристикой такой цепи является *постоянная времени цепи* $\tau = RC$.

На вход цепи подаются прямоугольные импульсы с амплитудой $U_{\max} = U_{\text{вх}}$ и длительностью $t_{\text{и}}$. Для последовательной цепи

$$U_{\text{вх}} = U_C + U_R, \quad (16.4)$$

где U_C — напряжение на конденсаторе; U_R — напряжение на резисторе.

Так как конденсатор не может зарядиться мгновенно, то в момент времени t_1 поступления импульса $U_C = 0$, а $U_R = U_{\text{вх}}$ (рис. 16.4). Постепенно конденсатор начинает заряжаться и напряжение на нем возрастает по экспоненциальному закону, а напряжение на резисторе убывает. Если $\tau \ll t_{\text{и}}$, то конденсатор успевает зарядиться в момент времени t_2 еще до окончания импульса. Напряжение на резисторе при этом становится равным нулю. В мо-

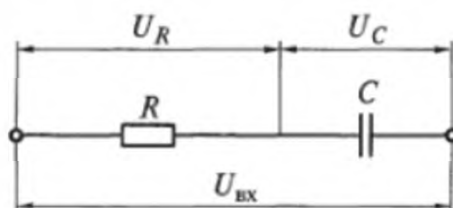


Рис. 16.3. Схема RC -цепи

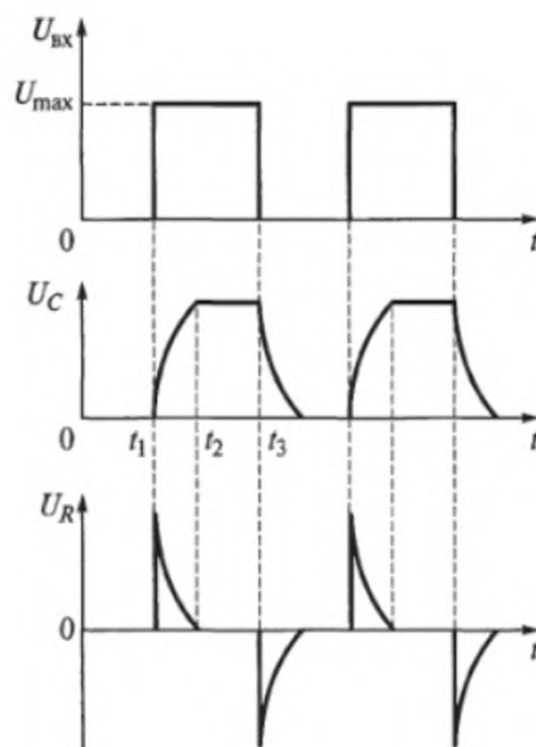


Рис. 16.4. Кривые изменения напряжений на элементах RC -цепи

мент t_3 окончания импульса $U_{\text{вх}} = 0$, следовательно, $U_R = -U_C$ [см. формулу (16.4)], а затем конденсатор разряжается и напряжения U_R и U_C убывают до нуля по экспоненциальному закону.

Форма выходных импульсов RC -цепи существенно зависит от соотношения длительности импульса и постоянной времени цепи.

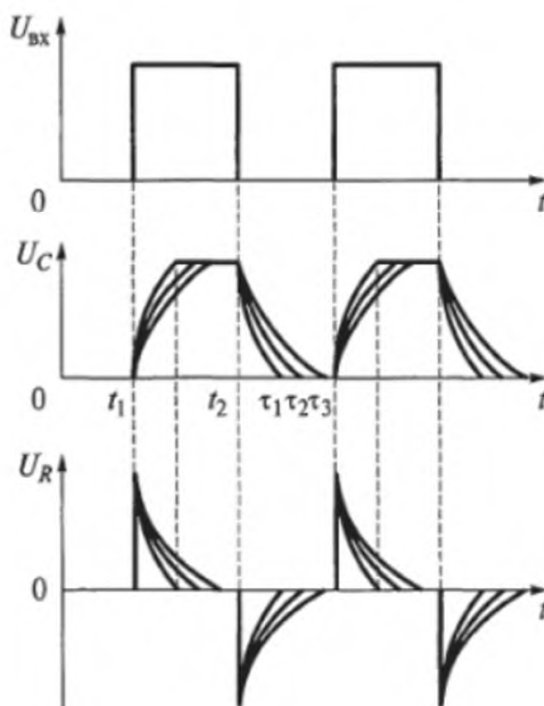


Рис. 16.5. Кривые изменения напряжений на R и C при разных значениях τ

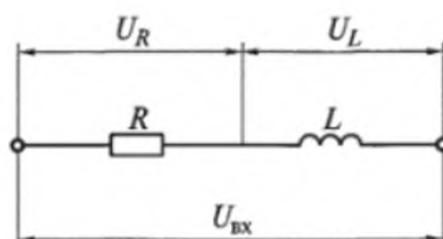


Рис. 16.6. Схема RL -цепи

На рис. 16.5 изображены кривые изменения напряжения на резисторе и конденсаторе при различных значениях τ ($\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$) при постоянной длительности входного импульса.

Рассмотрим прохождение прямоугольного импульса через линейную цепь, состоящую из последовательно соединенных катушки индуктивности L и резистора R (рис. 16.6). Постоянная времени такой цепи $\tau = L/R$. Для последовательной цепи

$$U_{\text{вх}} = U_L + U_R, \quad (16.5)$$

где U_L — напряжение на катушке; U_R — напряжение на резисторе.

При поступлении прямоугольного импульса на вход цепи в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая по закону Ленца возникновению тока в цепи. В момент времени t_1 (рис. 16.7) тока в цепи нет, $U_R = IR = 0$ и $U_L = U_{\text{вх}}$. Затем в цепи появляется ток, напряжение на резисторе растет, а напряжение на катушке уменьшается.

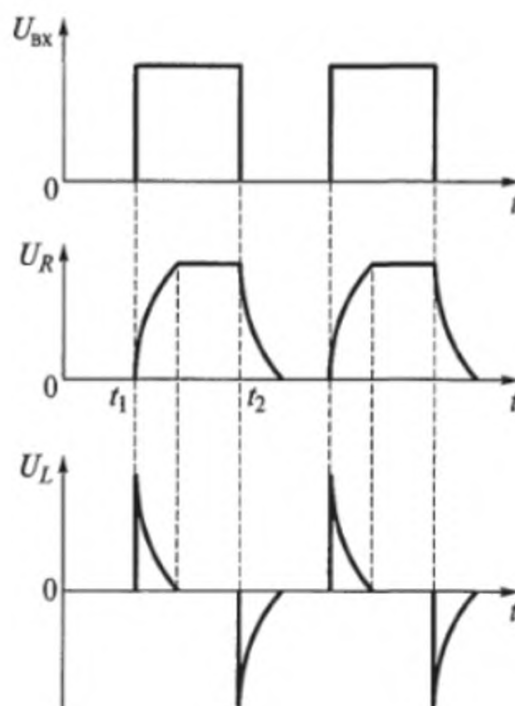


Рис. 16.7. Кривые изменения напряжений на элементах RL -цепи

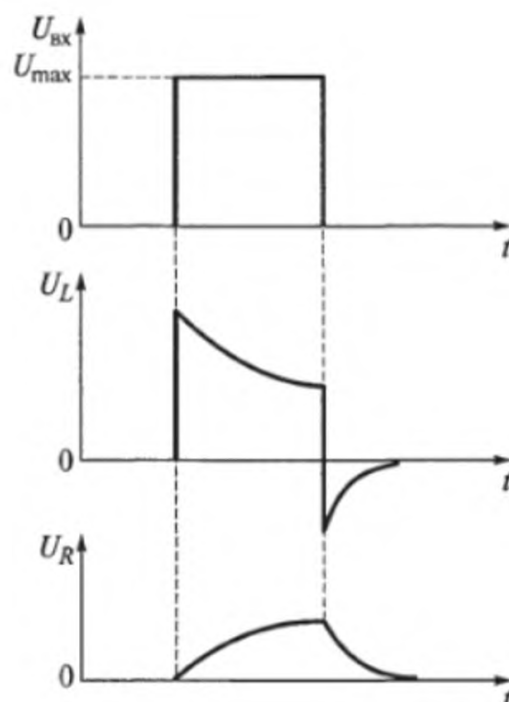


Рис. 16.8. Кривые изменения напряжений на R и L при $\tau \gg t_n$

Если постоянная времени τ цепи меньше длительности импульса t_n , то сила тока в цепи достигает максимального значения и остается постоянной до окончания импульса. При этом $U_R = U_{вх}$, $U_L = 0$. В момент окончания импульса входное напряжение очень быстро уменьшается до нуля. При этом в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая этому изменению, поэтому сила тока в цепи, а следовательно, и напряжение на резисторе уменьшаются до нуля постепенно. При этом $U_L = -U_R$ [см. формулу (16.5)].

На рис. 16.8 изображены кривые изменения напряжения на катушке индуктивности и резисторе при $\tau \gg t_n$.

Методика выполнения работы

Экспериментальная установка состоит из катушки индуктивности L , конденсатора C , двух наборов резисторов $R1...R5$ и $R5...R10$ и генератора G прямоугольных импульсов (рис. 16.9).

Напряжение на генератор прямоугольных импульсов подается от блока питания. Входной сигнал с генератора можно с помощью переключателя $S1$ поочередно подавать на вход RC - или RL -цепей.

Ступенчатые переключатели $S2$ и $S3$ позволяют включать соответственно в RC - и RL -цепи различные резисторы. Входной сигнал и выходные сигналы с элементов установки наблюдаются на ЭО.

1. Исследуйте прохождение прямоугольных импульсов через RC -цепь:

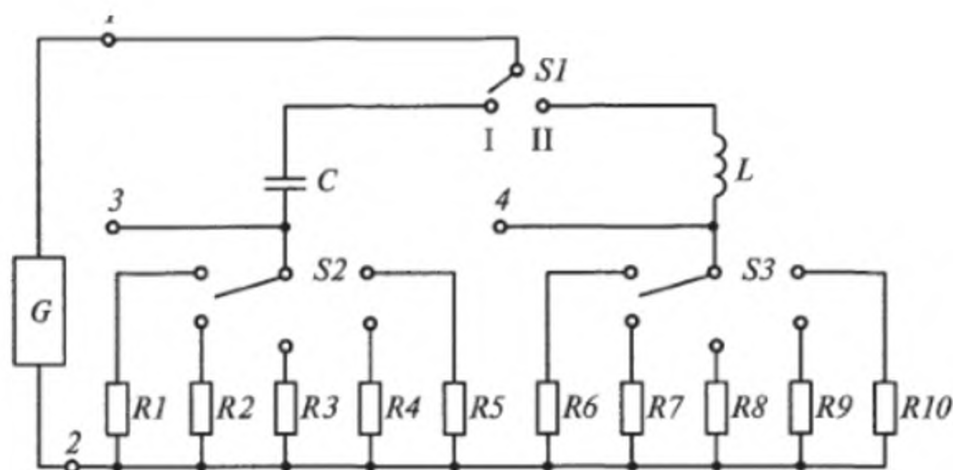


Рис. 16.9. Принципиальная схема установки для проведения работы

а) включите блок питания, генератор и осциллограф (см. рис. 16.9);
 б) подключите вход осциллографа ко входу экспериментальной установки (клеммы 1 и 2) и зарисуйте осциллограмму входных импульсов;

в) поставьте переключатель $S1$ в положение I;

г) подключая поочередно с помощью переключателя $S2$ резисторы $R1...R5$, получите осциллограммы напряжений с резисторов (вход осциллографа соединен с клеммами 2 и 3) и конденсатора C (вход осциллографа соединен с клеммами 1 и 3); полученные осциллограммы зарисуйте;

д) вычислите для каждой осциллограммы отношение длительности импульсов $t_{и}$ к постоянной времени цепи $\tau = RC$. Значения $R1...R5$, C указаны на установке.

2. Исследуйте прохождение импульсов через RL -цепь:

а) поставьте переключатель $S1$ в положение II, при котором исследуется RL -цепь;

б) подключая поочередно при помощи переключателя $S3$ резисторы $R6...R10$, получите осциллограммы напряжений с резисторов (вход осциллографа соединен с клеммами 2 и 4) и катушки L (вход осциллографа подсоединен к клеммам 1 и 4); полученные осциллограммы зарисуйте.

3. Определите параметры импульсного сигнала и импульсного тока:

а) вычислите для каждой осциллограммы:

длительность импульса $t_{и}$;

амплитуду U_{max} ;

крутизну фронта [см. формулу (16.1)];

период T и частоту f повторения импульсов;

скважность Q [см. формулу (16.2)];

коэффициент заполнения k [см. формулу (16.3)];

б) полученные значения нанесите в табл. 16.1.

Таблица 16.1

$t_{и}, c$	U_{max}, B	$S_{\phi}, B/C$	T, c	f, c^{-1}	Q	k

4. По результатам проведенных исследований сделайте выводы о том, как изменяются параметры импульсов при прохождении импульсного тока через различные виды электрических цепей и сравните полученные данные с изложенными в теоретической части работы.

Контрольные вопросы

1. Что называется импульсом? Какими параметрами он характеризуется?
2. Что называется импульсным током? Какими параметрами он характеризуется?
3. Что называется линейными цепями?
4. Как изменяется форма прямоугольного импульса при прохождении RC -цепи?
5. Как изменяется форма прямоугольного импульса при прохождении RL -цепи?
6. Какими параметрами характеризуется электрический импульс?
7. По какой формуле определяется постоянная времени RC -цепи?
8. Какой формулой определяется скважность следования импульсов?
9. Какой единицей СИ определяется постоянная времени?
10. Какую форму имеет сигнал, снимаемый с конденсатора RC -цепи, при подаче на ее вход прямоугольного импульса?

Лабораторная работа № 17
ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ИСКАЖЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ
УСИЛИТЕЛЯХ

Цель работы

Исследование нелинейных и линейных искажений сигналов усилителем, изучение влияния частотной характеристики усилителя на искажение электрических сигналов.

Основные сведения

Усилитель является одним из главных структурных элементов электронных устройств, предназначенных для получения и регистрации параметров объектов. Необходимость его включения в эти устройства обусловлена тем, что электрические сигналы, возникающие в устройствах съема (биопотенциалы на электродах, электрический ток и напряжение на датчиках), обычно очень малы.

Электронными усилителями называются технические устройства, которые увеличивают электрический сигнал за счет энергии постороннего источника. На вход усилителя подается входной сигнал x , а с его выхода снимается усиленный выходной сигнал y . Способность усилителя увеличивать подаваемый сигнал количественно оценивается коэффициентом усиления.

Коэффициентом усиления k усилителя называется величина, равная отношению приращения Δy выходного сигнала к вызвавшему его приращению входного сигнала Δx :

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Если на вход усилителя подается гармонический сигнал, то коэффициент усиления определяется по формуле

$$k = \frac{y_m}{x_m},$$

где y_m и x_m — амплитуды выходного и входного сигналов.

Основное требование, предъявляемое к усилителям, — отсутствие в них искажений, т. е. совпадение формы выходного и входного сигналов. В зависимости от причин, приводящих к их возникновению, различают нелинейные и линейные искажения.

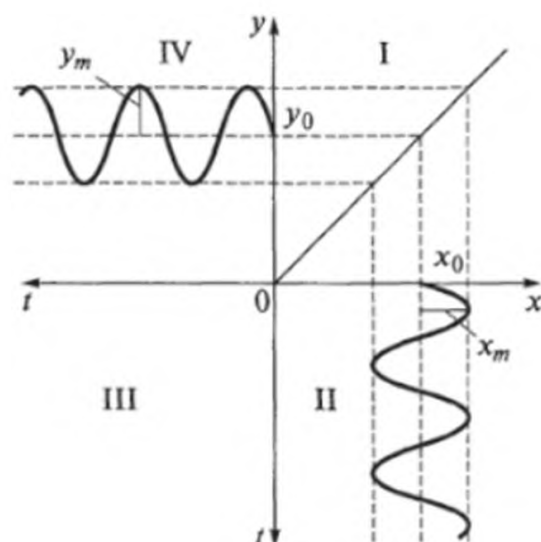


Рис. 17.1. Графики гармонических сигналов на входе и выходе усилителя

Зависимость амплитуды y_m выходного сигнала от амплитуды x_m входного сигнала называется *амплитудной характеристикой усилителя*: $y_m = f(x_m)$. Если коэффициент усиления не зависит от амплитуды входного сигнала ($k = \text{const}$), то $y_m = k x_m$ и амплитудная характеристика усилителя — прямая линия. В этом случае при подаче на вход гармонического сигнала $x = x_0 + x_m \sin \omega t$ на выходе усилителя образуется также гармонический сигнал $y = y_0 + y_m \sin \omega t$ (рис. 17.1).

На практике коэффициент усиления принимает различные значения при различных величинах входного сигнала и линейная зависимость $y = kx$ выполняется только в ограниченной области входного напряжения. Если входной гармонический сигнал выходит за границы линейного участка амплитудной характеристики (рис. 17.2), то форма выходного сигнала будет отличаться от формы входного, т. е. возникнут искажения, которые называются *нелинейными*, или *амплитудными*.

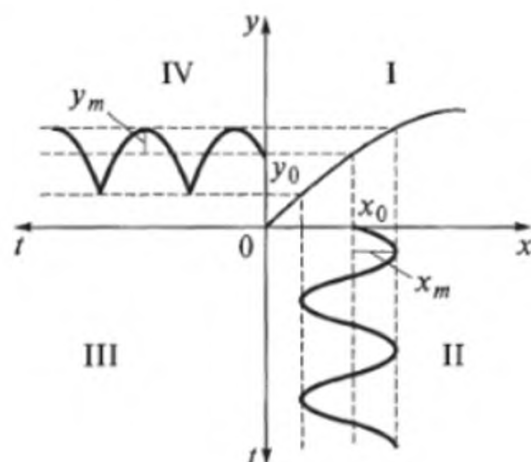


Рис. 17.2. Графики гармонических сигналов усилителя при наличии амплитудных искажений

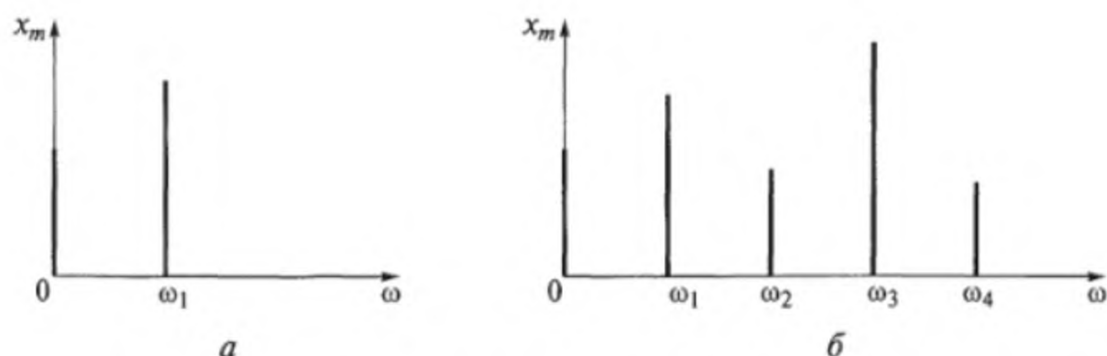


Рис. 17.3. Гармонические спектры сигналов усилителя:

a — входного; *б* — выходного

При нелинейных искажениях выходной сигнал является периодическим, но не гармоническим. Такой сигнал может быть представлен в виде суммы гармонических колебаний:

$$y = y_0 + y_{m1} \sin \omega_1 t + y_{m2} \sin \omega_2 t + \dots,$$

где y_{m1} и ω_1 — амплитуда и круговая частота основной гармоники; y_{m2} и ω_2 — амплитуды и круговые частоты других гармоник.

В результате нелинейных искажений гармонический спектр выходного сигнала (рис. 17.3, *б*) отличается от гармонического спектра входного сигнала (рис. 17.3, *а*). Степень искажения оценивается *коэффициентом нелинейных искажений*

$$\gamma = \frac{\sqrt{y_{m2}^2 + y_{m3}^2 + \dots}}{y_{m1}}. \quad (17.1)$$

Для предупреждения возникновения нелинейных искажений необходимо, чтобы входной сигнал не выходил за границы линейной части амплитудной характеристики усилителя.

Так как в усилителях используются конденсаторы и катушки индуктивности, сопротивления которых зависят от частоты (см. Лабораторную работу № 15), то и коэффициент усиления усилителей зависит от частоты.

Частотная характеристика усилителя — это зависимость коэффициента усиления k от частоты f или круговой частоты ω сигнала (рис. 17.4).

Если на вход усилителя подается периодический, но не гармонический сигнал, который содержит несколько гармоник с различными частотами f_1, f_2, \dots , то вследствие зависимости коэффициента усиления от частоты, амплитуды x_{m1}, x_{m2}, \dots гармоник могут быть усилены в различной степени. В этом случае форма выходного сигнала будет отличаться от формы входного сигнала, т. е. возникают линейные искажения.

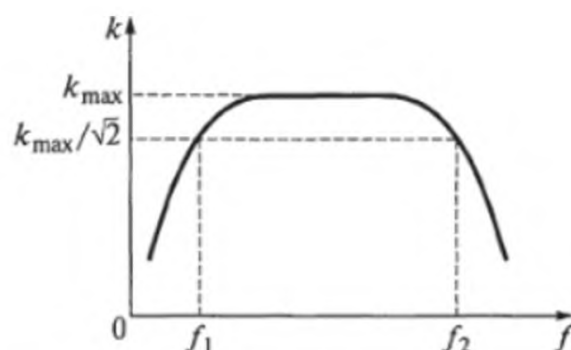


Рис. 17.4. Частотная характеристика усилителя

Линейными (частотными) искажениями называются искажения, которые возникают при усилении периодического, но не гармонического сигнала вследствие того, что коэффициент усиления усилителя зависит от частоты.

Принято считать, что уменьшение коэффициента усиления до величины $k_{\max}/\sqrt{2}$ не приводит к искажению сигнала. Диапазон частот $f_1 - f_2$ на частотной характеристике усилителя, в котором коэффициент усиления изменяется незначительно, называется *полосой пропускания усилителя*. Для предупреждения возникновения линейных искажений необходимо, чтобы частоты всех гармоник входного сигнала находились в пределах полосы пропускания усилителя.

Особенно большое значение имеет предупреждение искажений сигналов в приборах, предназначенных для регистрации биопотенциалов (электрокардиограф, электроэнцефалограф и др.). Биопотенциалы сравнительно медленно изменяются со временем, поэтому в этих приборах используются усилители, полоса пропускания которых лежит в области низких частот.

На рис. 17.5, а изображена электрокардиограмма; на рис. 17.5, б — ее гармонический спектр, а на рис. 17.5, в — частотная характеристика усилительного каскада электрокардиографа.

Амплитуда биопотенциалов A сравнительно мала, поэтому при их снятии, усилении и записи могут появляться дополнительные сигналы приборного или биологического происхождения — помехи. В этом случае может оказаться невозможной регистрация таких потенциалов, особенно если помехи их превосходят.

Одним из способов уменьшения влияния помех является их усреднение. В основе этого метода лежат два фактора:

1) биопотенциал может многократно повторяться, по крайней мере, в течение некоторого интервала времени, например повторение циклов электрокардиограммы;

2) помеха (приборного или биологического происхождения) случайна, она может быть как положительной, так и отрицательной относительно некоторого уровня. При многократном повто-

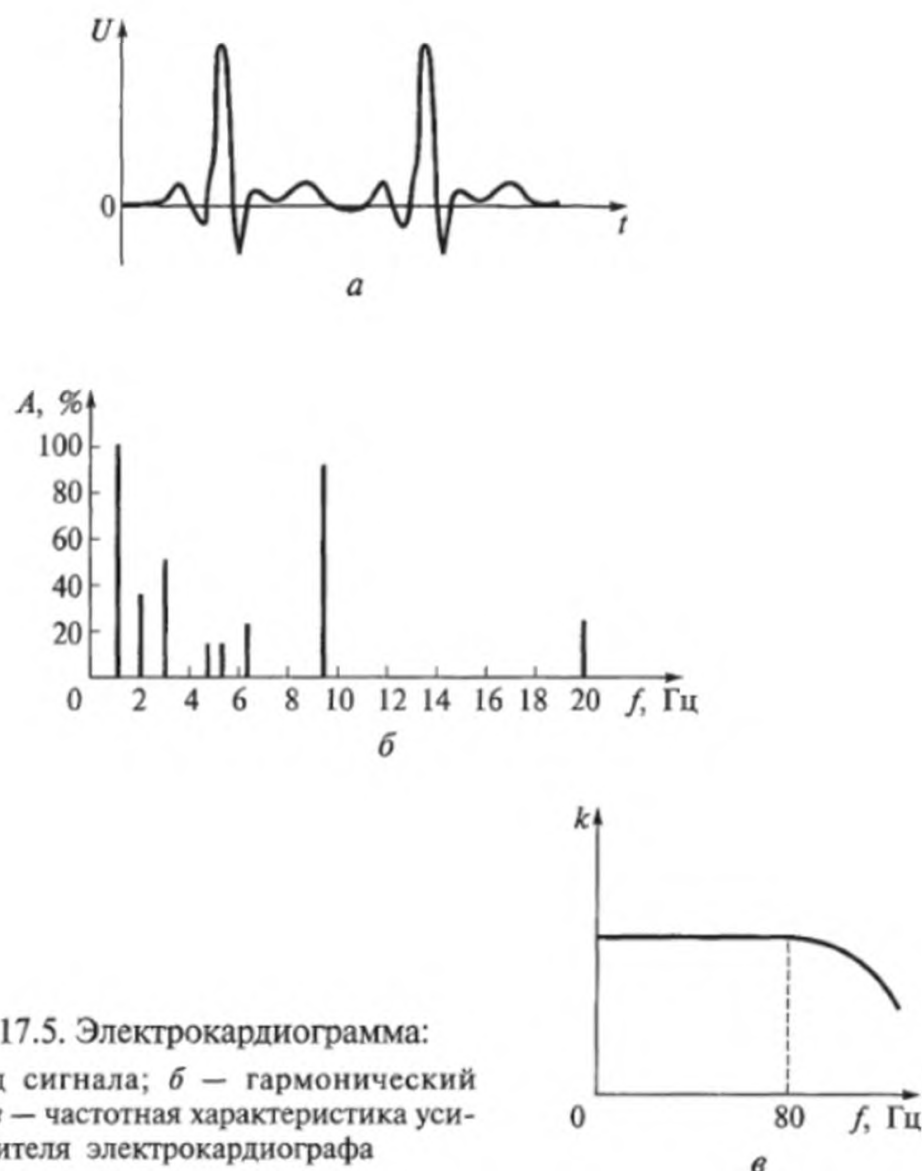


Рис. 17.5. Электрокардиограмма:
a — вид сигнала; *б* — гармонический спектр; *в* — частотная характеристика усилителя электрокардиографа

рении полезного сигнала суммирование помех приводит к нулевому результату, т. е. отклонение суммарной помехи от нуля будет маловероятным.

Методика выполнения работы

1. Исследуйте амплитудные искажения гармонического сигнала:
 а) ознакомьтесь с расположением информации на экране (см. рис. 17.1, 17.2).

Экран разделен на четыре поля, которым присвоены номера: правое верхнее I, левое верхнее II, левое нижнее III и правое нижнее IV. В поле IV изображен график временной зависимости входного сигнала: по горизонтальной оси — входная величина $x = x_0 + x_m \sin \omega t$; ось времени t направлена вниз. В поле I изображена амплитудная характеристика усилителя. В поле III изображен график временной зависимости выходного сигнала y (ось времени

Таблица 17.1

Номер опыта	Значение параметра						
	x_0	x_m	y_0	y_{m1}	y_{m2}	y_{m3}	γ
1							
2							
3							
4							
5							

направлена справа налево), а также гармонический спектр выходного сигнала.

По виду этого спектра можно судить о наличии амплитудных искажений в усилителе, так как в этом случае в спектре кроме постоянной составляющей и основной гармоники содержатся дополнительные гармоники (см. рис. 17.3, б);

б) задайте такие значения параметров x_0 и x_m входного сигнала, чтобы выходной сигнал был искаженным, и определите по его гармоническому спектру амплитуды постоянной составляющей y_0 , основной y_{m1} и дополнительных y_{m2} , y_{m3} гармоник;

в) вычислите коэффициент нелинейных искажений γ [см. формулу (17.1)];

г) проделайте действия пп. 1 б, в при других значениях x_0 и x_m ;

д) повторите опыт пять раз. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 17.1;

е) изменяя значения параметров x_0 и x_m , определите границы x_1 и x_2 линейной части амплитудной характеристики.

2. Проиллюстрируйте устранение влияния помехи на полезный сигнал:

а) сравните форму выходного сигнала (поле II) с входным (полезным) сигналом (поле IV) при его однократном прохождении через усилитель;

б) запуская многократное повторение входного сигнала (20, 50 и 100 раз), наблюдайте изменение вида выходного сигнала;

в) сделайте вывод о влиянии числа повторений на устранение помехи.

Контрольные вопросы

1. Что такое электронный усилитель?
2. Дайте определение коэффициента усиления усилителя.
3. Что называется амплитудной характеристикой усилителя?

4. Объясните механизм образования амплитудных искажений.
5. Что называется частотной характеристикой усилителя?
6. Объясните механизм образования частотных искажений.
7. В чем заключается метод «усреднения помехи»?
8. Для чего предназначены электронные усилители?
9. Чему равен коэффициент усиления?
10. Какая зависимость является амплитудной характеристикой усилителя?
11. В каком случае возникают амплитудные искажения?
12. Какое значение имеет коэффициент усиления усилителя на диапазоне частот, называемом «полоса пропускания»?

Лабораторная работа № 18

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель работы

Ознакомление с некоторыми видами датчиков неэлектрических величин и изучение принципа их работы на моделях.

Основные сведения

Современные исследования, разработка новых приборов и аппаратов требуют измерения многочисленных физических величин. При этом большинство из них являются неэлектрическими, т.е. механическими, тепловыми, акустическими, оптическими и т.п.

В настоящее время широко применяют электрические методы измерения неэлектрических величин. Их основными преимуществами являются исключительно высокая чувствительность и малая инерционность электрической аппаратуры; возможность проводить измерения на расстоянии; удобство регистрации и обработки данных измерения на ЭВМ.

Структурная схема электрического измерения неэлектрических величин состоит из трех основных частей: 1) первичного преобразователя неэлектрической величины в электрическую — датчика; 2) усилителя электрических сигналов; 3) регистрирующего устройства. Все эти узлы могут размещаться отдельно друг от друга и соединяться кабелем или другой линией связи.

Датчиком называется устройство, преобразующее измеряемую или контролируемую величину в сигнал, удобный для передачи и регистрации.

Усилителем называется устройство, которое увеличивает сигнал датчика за счет постороннего источника энергии (см. Лабораторную работу № 17).

Регистрирующее устройство используется в случае необходимости автоматического документирования информации, получаемой от датчика (усилителя), и представляет собой самописец, фиксирующий информацию на бумагу, магнитную ленту или другие носители информации, обычно в функции времени.

Преобразуемая величина x называется *входной*, а измеряемый сигнал — *выходной величиной*. Функциональная зависимость выходной величины y от входной x описывается аналитическим

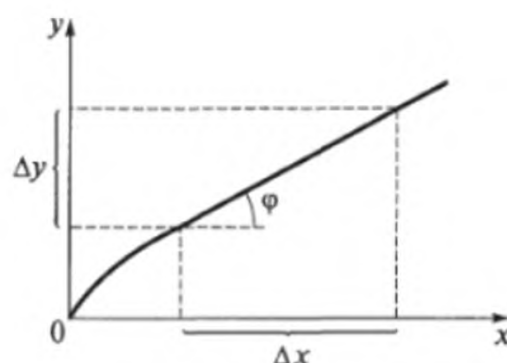


Рис. 18.1. Характеристика датчика

выражением или графиком и называется *характеристикой датчика*. Обычно стремятся иметь датчик с линейной характеристикой

$$y = kx.$$

Величина $\Delta y / \Delta x$ является *чувствительностью датчика* (рис. 18.1).

Максимальное значение входной величины, которая может быть воспринято датчиком без искажения и повреждения датчика, представляет собой *предел измерений датчика*. Минимальное изменение входной величины, которое можно обнаружить датчиком, называется *порогом чувствительности*.

Датчики подразделяются на два класса: генераторные и параметрические. *Генераторными* называют такие датчики, которые под воздействием входного сигнала генерируют напряжение или ток (например, индукционные датчики, пьезоэлектрические, фотоэлектрические и т. п.). К *параметрическим* относятся датчики, в которых под воздействием входного сигнала изменяется какой-либо параметр (например, тензометрические датчики, емкостные, индуктивные, реостатные и т. п.). Рассмотрим некоторые типы датчиков.

Реостатный датчик. В качестве реостатного датчика используется реостат, движок которого перемещается в зависимости от значения измеряемой величины. Входной величиной реостатного датчика является перемещение движка, а выходной — активное сопротивление.

Тензодатчик. В основе его работы лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации.

Характеристикой тензоматериала является коэффициент относительной тензочувствительности

$$k_{от} = \frac{\epsilon_R}{\epsilon_l}, \quad (18.1)$$

где $\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R_0}$ — относительное изменение сопротивления проводника; $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$ — относительное удлинение проводника. По закону Гука

$$\varepsilon_l = \frac{\sigma}{E},$$

где σ — механическое напряжение в образце; E — модуль Юнга для данного материала;

$$\sigma = \frac{P}{S}.$$

Здесь P — нагрузка; S — площадь поперечного сечения образца. Подставляя выражение для ε_l в формулу (18.1), получаем

$$k_{от} = \frac{\varepsilon_R E}{\sigma} = \frac{\Delta R S E}{R_0 P}. \quad (18.2)$$

Основным требованием к материалу тензодатчика является возможно большее значение коэффициента относительной тензочувствительности.

Наиболее широкое распространение в настоящее время находят проволочные тензодатчики (рис. 18.2). На полоску бумаги или тонкую пленку наклеивают зигзагообразно тонкую проволоку. К ее концам присоединяют выводные проводники. Сверху датчики покрывают тонким слоем лака, а иногда закрывают бумагой или фетром. Такой датчик, будучи наклеенным на испытываемую деталь, воспринимает деформацию ее поверхностного слоя. Входной величиной наклеиваемого датчика является деформация поверхностного слоя детали, а выходной — изменение сопротивления датчика.

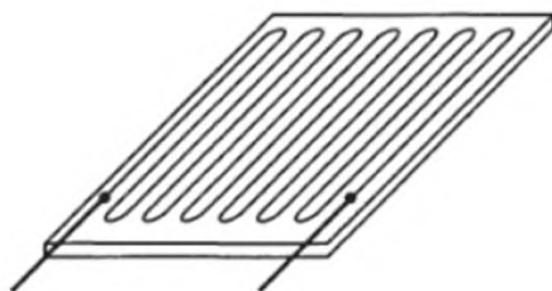


Рис. 18.2. Общий вид тензодатчика

Емкостный датчик. Примером такого датчика служит конденсатор переменной емкости. Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды; S — площадь обкладок; d — расстояние между обкладками.

Измеряемая величина у этих датчиков может быть функцией d , S , ϵ . В последнем случае датчик применяют для анализа состава вещества. Однако в большинстве случаев использования емкостных датчиков их входной величиной является перемещение обкладок относительно друг друга.

Индуктивный датчик. Наиболее распространен датчик с малым воздушным зазором δ , изменяющимся под действием силы F (рис. 18.3, а). В результате становятся иными индуктивность катушки и полное сопротивление Z цепи. Таким образом возникает функциональная зависимость между F и Z :

$$Z = f(F).$$

На рис. 18.3, б изображен датчик, представляющий собой катушку 1, внутри которой перемещается стальной сердечник 2. Индуктивность L катушки, а следовательно, и ее полное сопротивление Z являются функциями перемещения l сердечника:

$$Z = f(l).$$

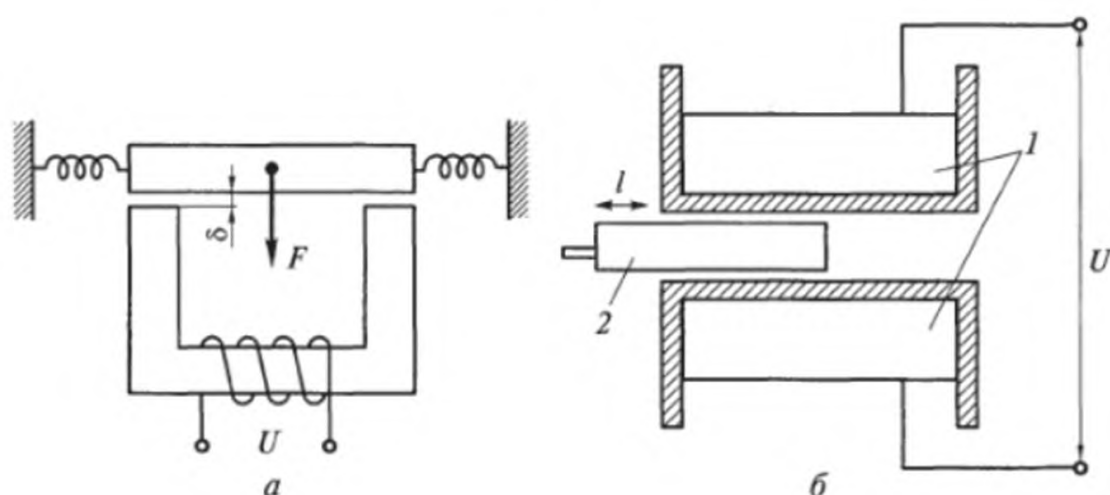


Рис. 18.3. Схемы индуктивных датчиков:

а — с малым воздушным зазором; б — с большим перемещением сердечника; 1 — катушка; 2 — стальной сердечник

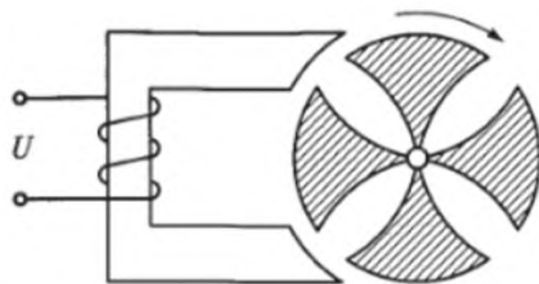


Рис. 18.4. Схема индукционного датчика для измерения скорости потока

Пьезоэлектрический датчик. Принцип его действия основан на пьезоэлектрическом эффекте — явлении поляризации кристаллических диэлектриков при деформации. Входной величиной в этих датчиках может быть давление, механическое напряжение, перемещение, а выходной — электрическое напряжение.

Индукционный датчик. Принцип его работы заключается в наведении ЭДС индукции при относительном перемещении катушки и постоянного магнита. У индукционных датчиков входной величиной является скорость механического перемещения, поэтому их используют только в приборах, предназначенных для измерения скоростей, это, например, крыльчатый датчик (рис. 18.4).

Датчик представляет собой двухканальный расходомер воздуха с малоинерционной крыльчаткой. Крыльчатки датчиков установлены в проходящих потоках воздуха. Крыльчатка изготавливается из магнитного материала и намагничена. При вращении крыльчатки периодически меняется магнитный поток, пронизывающий катушку, в результате в ней возникает ЭДС индукции e , зависящая от скорости вращения. Скорость вращения крыльчатки датчика пропорциональна расходу V воздуха.

Таким образом,

$$e = f(V).$$

Некоторые другие виды датчиков, например *температурные* (термопары, термисторы) и *фотозлектрические* (фотоэлементы), рассмотрены в других лабораторных работах.

Методика выполнения работы

Измерения коэффициента относительной тензочувствительности проводятся на модели тензодатчика, изготовленной из константановой проволоки 1, укрепленной на каркасе 3 ро-

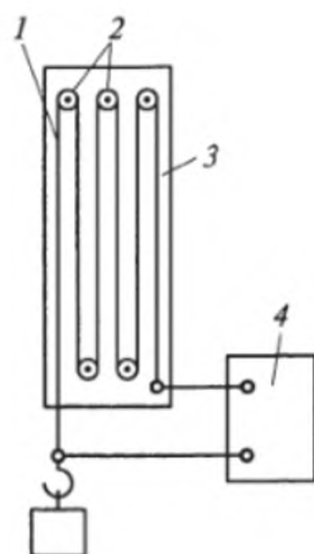


Рис. 18.5. Модель тензодатчика:

1 — константановая проволока; 2 — ролики; 3 — каркас; 4 — измерительный мост постоянного тока

ликами 2 (рис. 18.5). При подвешивании грузов проволока растягивается и ее сопротивление изменяется. Измерение сопротивления производится с помощью измерительного моста постоянного тока 4.

Индуктивный датчик представляет собой катушку 2 с перемещающимся сердечником 1 (рис. 18.6). При перемещении сердечника индуктивность катушки изменяется, о чем можно судить по изменению силы тока в катушке. График зависимости силы тока I от перемещения l сердечника является характеристикой датчика. Питание катушки производится от сети через понижающий трансформатор.

1. Определите коэффициент относительной тензочувствительности датчика:

а) измерьте с помощью моста постоянного тока начальное сопротивление R_0 модели тензодатчика;

б) определите сопротивление R датчика, последовательно нагружая его грузами массой m ;

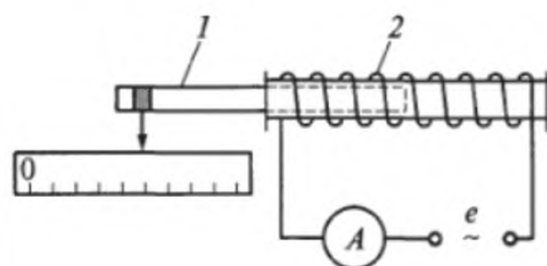


Рис. 18.6. Модель индуктивного датчика:

1 — сердечник; 2 — катушка

Таблица 18.1

R_0 , Ом	m , кг	R , Ом	d , мм	$k_{от}$	$\bar{k}_{от}$

Таблица 18.2

l , см	0	1	2	...
I , А				

- в) измерьте микрометром диаметр d проволоки;
 г) рассчитайте коэффициент относительной тензочувствительности датчика при каждой нагрузке. Учитывая, что

$$P = mg; \Delta R = R - R_0; S = \frac{\pi D^2}{4},$$

из формулы (18.2) вычислите коэффициент

$$k_{от} = \frac{(R - R_0)E\pi d^2}{4R_0mg};$$

- д) результаты измерений и вычислений занесите в табл. 18.1;
 е) вычислите $\bar{k}_{от}$ и найдите погрешность $\Delta k_{от}$ измерения коэффициента относительной тензочувствительности датчика.

2. Снимите характеристики индуктивного датчика:

- а) включите трансформатор в сеть и установите сердечник датчика так, чтобы его указатель совпадал с нулевым делением шкалы. Запишите показание I миллиамперметра;

- б) вдвигая сердечник в катушку, снимите показания миллиамперметра через каждый сантиметр перемещения l сердечника;

- в) результаты измерений занесите в табл. 18.2;

- г) постройте график $I = f(l)$ зависимости силы тока в катушке от перемещения сердечника;

- д) определите по графику чувствительность датчика $Z = \frac{\Delta I}{\Delta l}$.

Контрольные вопросы

1. Что называется датчиком? Перечислите основные характеристики датчиков.

2. Каковы устройство и принцип действия некоторых видов датчиков?

3. Что называется коэффициентом тензочувствительности?
4. Как коэффициент тензочувствительности определяется в данной лабораторной работе?
5. Что называется параметрическими и генераторными датчиками?
6. Чему равна величина, называемая порогом чувствительности?
7. Какие из известных вам датчиков являются параметрическими, а какие — генераторными?
8. По какой формуле определяется чувствительность датчика?
9. Если характеристика линейная, то как изменяется его чувствительность при увеличении входной величины?
10. В каких единицах измеряется чувствительность реостатного датчика?

Лабораторная работа № 19

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Цель работы

Изучение статистических методов обработки опытных данных, вычисление числовых характеристик статистического распределения, графическое представление распределения.

Основные сведения

Результат измерения какой-либо величины зависит от многих факторов, влияние которых заранее учесть невозможно. Значения, полученные в результате прямых измерений какого-либо параметра, являются случайными. Если число измерений одного и того же параметра велико, то в распределении его значений обнаруживаются некоторые закономерности. Использование методов математической статистики для обработки результатов измерений позволяет установить эти закономерности.

Статистической совокупностью называется совокупность объектов, характеризующаяся наличием некоторого общего признака. Наиболее полная совокупность, которая включает в себя все объекты, обладающие данным признаком, является *генеральной совокупностью*.

Провести изучение (измерение) всей генеральной совокупности, как правило, не представляется возможным, поэтому для исследования берут часть ее объектов, которые образуют *выборочную совокупность*, или *выборку*. В зависимости от числа объектов (*объема выборки*) n различают *большую* ($n \geq 30$) и *малую* ($n \leq 30$) выборки.

Наблюдаемые значения членов выборки называются *вариантами*. При проведении большого числа измерений значения измеряемой величины повторяются, поэтому число вариантов $k \leq n$. Число m_i наблюдений варианты x_i называется частотой данной варианты.

Относительной частотой P_i^* называется величина, равная отношению частоты m_i данной варианты к общему числу n значений измеряемой величины:

$$P_i^* = \frac{m_i}{n}. \quad (19.1)$$

Данные, получаемые при проведении экспериментов, представляют в виде *статистических рядов*. Значения величины X в

Таблица 19.1

X	x_1	x_2	...	x_i	...	x_k
m	m_1	m_2	...	m_i	...	m_k
P^*	P_1^*	P_2^*	...	P_i^*	...	P_k^*

выборке, записанные в последовательности измерений, составляют *простой статистический ряд*. Располагая полученные значения в последовательности их возрастания (или убывания), получают *ранжированный ряд*:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n.$$

Точечное (дискретное) статистическое распределение (вариационный ряд) — это статистическое распределение, состоящее из вариантов и соответствующих им частот и относительных частот (табл. 19.1).

Для составления *интервального (непрерывного) статистического распределения* весь диапазон значений величины X делят на равные по величине интервалы $x_{i-1} \dots x_i$ и указывают m_i — сумму частот вариантов, попавших в каждый интервал, и P^* — сумму относительных частот (табл. 19.2).

Ширина интервала $\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}$, где x_{\max} и x_{\min} — наибольшее и наименьшее значения измеряемой величины соответственно; N — число интервалов, определяемое по формуле

$$N = 3,3 \lg n + 1. \quad (19.2)$$

Графически статистическое распределение изображают в виде полигона частот и гистограммы. Для построения *полигона частот* (графика вариационного ряда) по оси абсцисс откладывают варианты x , а по оси ординат — значения частот m или относительных частот P^* , полученные точки соединяют ломаной линией (рис. 19.1).

Гистограмму строят по данным интервального статистического распределения. Она представляет собой совокупность смежных

Таблица 19.2

$x_{i-1} - x_i$	1	2	3	...	n
m_i					
P_i^*					

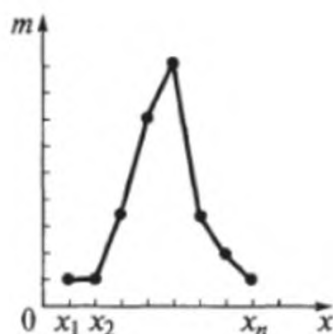


Рис. 19.1. Полигон частот величины x

прямоугольников, основанием которых является отрезок оси абсцисс, равный ширине интервала Δx , а высота равна отношению P^* для каждого интервала к Δx (рис. 19.2).

Числовыми характеристиками распределения для выборки являются выборочная средняя, медиана, мода, выборочная дисперсия, выборочное среднее квадратическое отклонение.

Выборочная средняя $\bar{x}_в$ — это величина, равная среднему арифметическому значению вариант статистического ряда:

$$\bar{x}_в = \sum_{i=1}^k x_i P_i^*,$$

или

$$\bar{x}_в = x_1 P_1^* + x_2 P_2^* + \dots + x_k P_k^* = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_k m_k}{n}.$$

Медиана Me — это такое значение случайной величины, которое делит ранжированный статистический ряд пополам (по числу членов). Таким образом, вероятность P того, что значение случайной величины меньше медианы, равна вероятности того, что значение случайной величины больше медианы:

$$P(x < Me) = P(x > Me) = 0,5.$$

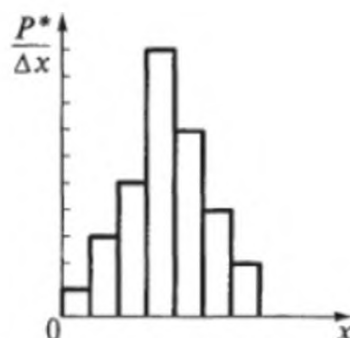


Рис. 19.2. Гистограмма величины x

Мода M_o равна варианту, который соответствует наибольшая частота.

Выборочная дисперсия характеризует рассеяние вариантов вокруг выборочной средней:

$$D_B = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_B)^2 P_i^*.$$

Выборочное среднее квадратическое отклонение σ_B равно корню квадратному из выборочной дисперсии:

$$\sigma_B = \sqrt{D_B}.$$

Методика выполнения работы

Экспериментальная установка состоит из измерительного прибора, предназначенного для измерения сопротивлений, и набора резисторов. Случайной величиной является активное сопротивление резисторов. Технология изготовления этих резисторов такова, что отклонения их сопротивлений в большую или меньшую сторону от среднего значения равновероятны.

Для удобства измерения резисторы R_1, R_2, \dots, R_n смонтированы на специальной панели (рис. 19.3). Одни концы их соединены общим проводом и подключены к ИП. При измерении переключается только один провод, что упрощает работу.

1. Измерьте сопротивления x_i 100 резисторов.
2. Результаты измерений запишите в табл. 19.3 (простой статистический ряд).
3. Составьте вариационный ряд (табл. 19.4).
4. Составьте интервальный ряд (табл. 19.5):
 - а) разбейте диапазон значений x на N равных интервалов с границами $x_{i\min}$ и $x_{i\max}$. Число интервалов N определите по формуле (19.2);

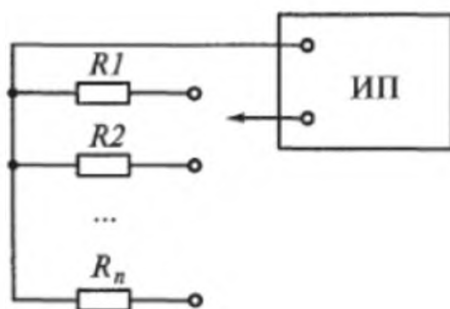


Рис. 19.3. Схема экспериментальной установки

Таблица 19.3

i	1	2	3	...	100
x_i , Ом					

Таблица 19.4

x , Ом						
m						
P^*						

Таблица 19.5

$x_{i \min} \dots x_{i \max}$, Ом	\bar{x}_i , Ом	m_i	P_i^*	$\frac{P_i^*}{\Delta x_i}$, Ом ⁻¹

- б) рассчитайте $\bar{x}_i = \frac{x_{i \min} + x_{i \max}}{2}$ для каждого интервала;
 в) подсчитайте частоту m_i для каждого интервала;
 г) по формуле (19.1) определите относительные частоты, соответствующие каждому интервалу;

д) найдите значения $\frac{P_i^*}{\Delta x_i}$ для каждого интервала.

5. По данным точечного вариационного ряда постройте полигон частот.

6. По данным интервального ряда постройте гистограмму.

7. Определите:

а) выборочную среднюю $\bar{x}_в = \sum_{i=1}^N \bar{x}_i P_i^*$;

б) медиану;

в) моду;

г) выборочную дисперсию $D_в = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_в)^2 P_i^*$;

д) выборочное среднее квадратическое отклонение.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные задачи математической статистики?
2. Что представляют собой генеральная и выборочная совокупности?

3. Какие бывают виды статистических рядов?
4. Какими формулами определяются числовые характеристики статистического распределения?
5. По каким основным этапам проводится построение полигона частот и гистограммы?
6. Что содержит в себе генеральная совокупность?
7. Какой зависимостью связаны выборочная совокупность n и число вариантов в ней, равное k ?
8. На какое количество интервалов следует разбить выборку, содержащую 60 объектов, для построения гистограммы?
9. По какой формуле определяется выборочная средняя величина?
10. Чему равна площадь каждого прямоугольника из составляющих гистограмму?

Лабораторная работа № 20

ИЗУЧЕНИЕ НОРМАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Цель работы

Изучение нормального закона распределения случайной величины.

Основные сведения

В теории вероятностей изучают случайные события и величины. *Случайной величиной* называется такая величина, значения которой зависят от стечения случайных обстоятельств, в частности результат измерений какого-либо параметра. Степень возможности получения значения случайной величины характеризуется вероятностью данного значения.

Пусть в n опытах измеряемая величина m раз приняла некоторое значение x , тогда отношение m к n называется *относительной частотой* P^* этого значения:

$$\frac{m}{n} = P^*.$$

При небольшом числе опытов относительная частота значений в значительной мере имеет случайный характер и может заметно изменяться от одной группы опытов к другой. Однако при увеличении числа опытов она все более теряет свой случайный характер и приближается к некоторой постоянной величине — статистической вероятности события.

Статистической вероятностью P события называют предел, к которому стремится его относительная частота при неограниченном увеличении числа измерений:

$$P = \lim_{n \rightarrow \infty} P^*.$$

Практически за вероятность принимают относительную частоту значения при большом числе испытаний. Различают дискретные и непрерывные случайные величины.

Дискретная величина принимает счетное множество значений, а *непрерывная* — любые значения внутри некоторого интервала.

Случайная величина считается заданной, если указано ее распределение. Для дискретной величины *распределение* — это совокупность значений x данной величины и соответствующих им вероятностей P .

При задании закона распределения непрерывной величины используют две функции: плотность вероятности и функцию распределения случайной величины.

Плотность вероятности $f(x)$ равна отношению dP — вероятности того, что значение случайной величины находится в интервале от x до $x + dx$, к величине dx этого интервала:

$$f(x) = \frac{dP}{dx}. \quad (20.1)$$

Для определения вероятности попадания значения случайной величины в некоторый интервал (ab) необходимо проинтегрировать выражение (20.1) в соответствующих пределах:

$$P(a < x < b) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

Функция распределения $F(x)$ случайной величины равна вероятности того, что случайная величина X принимает значения, меньшие x :

$$F(x) = P(-\infty < X < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

Существует множество законов распределения случайных величин. Одним из наиболее распространенных и общих является нормальный закон распределения, характеризующийся тем, что для него среднее арифметическое значение случайной величины является также и наиболее вероятным. Плотность вероятности для нормального закона распределения определяется по следующей формуле:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; a — математическое ожидание случайной величины.

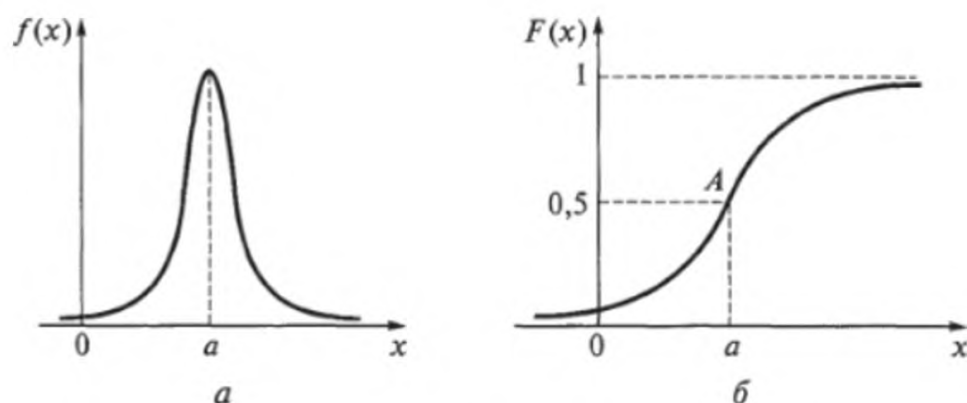


Рис. 20.1. Нормальный закон распределения:

a — график плотности вероятности $f(x)$; b — график функции распределения $F(x)$

График плотности вероятности $f(x)$ (рис. 20.1, a) симметричен относительно прямой $x = a$, так как отклонения случайной величины вправо и влево от a равновероятны. При $x \rightarrow \pm \infty$ кривая асимптотически приближается к оси абсцисс. Максимальное значение плотности вероятности принимает при $x = a$.

График функции распределения $F(x)$ (рис. 20.1, b) симметричен относительно точки $A(a; 0,5)$. При $x \rightarrow -\infty$ функция $F(x) \rightarrow 0$; при $x \rightarrow +\infty$ функция $F(x) \rightarrow 1$.

Методика выполнения работы

Для выполнения данной лабораторной работы используют установки и экспериментальные данные Лабораторной работы № 19. Нормальный закон распределения можно записать в следующем виде:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x}_B)^2}{2\sigma_B^2}}.$$

(Значения \bar{x}_B и σ_B вычислены в Лабораторной работе № 19.)

Для построения графика эту функцию можно представить в виде

$$f(\bar{x}_i) = \frac{f_0(z_i)}{\sigma_B},$$

где

$$z_i = \frac{|\bar{x}_i - x_B|}{\sigma_B}.$$

Значения функции $f_0(z_i)$ приведены в Прил. 4.

1. Измерьте сопротивления x_i 100 резисторов.

2. Результаты измерений запишите в табл. 20.1 (простой статистический ряд).

3. Составьте интервальный ряд (табл. 20.2):

а) разбейте диапазон значений \bar{x}_B на 7...9 равных интервалов с границами $x_{i\min}$ и $x_{i\max}$;

б) рассчитайте $\bar{x}_i = \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2}$ для каждого интервала;

в) подсчитайте число m_i значений сопротивлений, попавших в каждый интервал;

г) по формуле $P_i^* = \frac{m_i}{100}$ определите относительные частоты, соответствующие каждому интервалу.

(Вместо выполнения пп. 1...3 можно воспользоваться табл. 19.3 и 19.5.)

4. Найдите значения функции $f(x)$, для чего сделайте следующие вычисления:

а) вычислите значения z_i для каждого интервала: $z_i = \frac{|\bar{x}_i - \bar{x}_B|}{\sigma_B}$;

б) найдите по таблице Прил. 4 значения функции $f_0(z_i)$;

Таблица 20.1

i	1	2	3	...	100
x_i , Ом					

Таблица 20.2

$x_{i\min} \dots x_{i\max}$, Ом	\bar{x}_i , Ом	m_i	P_i^*	$\frac{P_i^*}{\Delta x_i}$, Ом ⁻¹

Таблица 20.3

$x_{i\min} \dots x_{i\max}$, Ом	\bar{x}_i , Ом	z_i	$f_0(z_i)$	$f(\bar{x}_i)$, Ом ⁻¹

Таблица 20.4

$x_{i\min}$, Ом					
$F(x_{i\min})$					

в) вычислите значения функции $f(\bar{x}_i) = \frac{f_0(z_i)}{\sigma_{\text{в}}}$;

г) результаты вычислений запишите в табл. 20.3.

5. Постройте график плотности вероятности $f(x)$. Максимум кривой соответствует $x_i = \bar{x}_{\text{в}}$. Для нахождения ординаты этой точки следует определить по таблице Прил. 4 значение функции $f_0(z_i)$ при $x_i = \bar{x}_{\text{в}}$, т.е. $f_0(0)$, и вычислите $f(0)$.

6. Определите значения функции $F(x)$. Для этого в табл. 20.2 найдите значения функции в каждом интервале и вычислите соответствующие им значения $F(x_{i\min}) = P(x < x_{i\min})$. Результаты запишите в табл. 20.4.

7. Постройте график функции распределения $F(x)$.

Контрольные вопросы

1. Что называется статистической вероятностью события?
2. Какие имеются способы задания распределения случайной величины?
3. Как выглядит функция плотности вероятности, соответствующая нормальному закону распределения случайной величины?
4. Какие основные особенности нормального закона распределения случайной величины вы знаете?
5. Как зависит форма кривой распределения от дисперсии случайной величины?
6. Что указывает функция распределения непрерывной случайной величины?
7. Как изменяется график нормального закона распределения при увеличении математического ожидания?
8. Чему равна площадь фигуры, ограниченной графиком функции распределения и осью абсцисс?
9. Как изменяется график нормального закона распределения при увеличении среднего квадратичного отклонения?

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Правила выполнения работ в лаборатории

1. Каждый студент обязан соблюдать правила распорядка, установленные в лаборатории.
2. Работы в лаборатории выполняются бригадами из двух-трех человек.
3. Студенты должны проводить работы в строгом соответствии с календарным планом, который выдается старостам групп и вывешивается в лаборатории.
4. Каждый член бригады должен заранее подготовиться к выполнению работы, занести в рабочую тетрадь (или в бланк для отчета) схему соединений приборов и вспомогательной аппаратуры и заготовить таблицы по данной в описании форме.
5. Перед началом работы студенты подвергаются краткому опросу по содержанию работы. Студенты, недостаточно подготовившиеся к выполнению работы, к лабораторным занятиям не допускаются или допускаются условно (по указанию преподавателя).
6. Бригады, приступающие к работе, получают у лаборанта набор необходимых для сборки схемы проводов и другие приспособления, не находящиеся на рабочих столах (инструменты, аккумуляторы, переносные приборы и т. п.). Каждому студенту выдается бланк для отчета.
7. Каждая работа выполняется только на определенном столе, на предназначенных для этой работы приборах и аппаратуре, которые размещены в наиболее удобных для сборки схемы местах. Переставлять приборы с одного места на другое и брать приборы с других столов без особого разрешения преподавателя воспрещается.
8. Перед сборкой схемы студент должен ознакомиться с применяемыми в данной работе приборами и записать в бланк отчета их технические характеристики.
9. Бригада может приступить к сборке схемы только после просмотра преподавателем схемы, зарисованной в рабочей тетради студента.
10. Вначале следует собирать последовательную цепь с включением в нее приборов и аппаратуры (амперметры, токовые цепи ваттметров и счетчиков, реостаты для регулировки тока и т. п.), а затем уже присоединять параллельные ответвления, вольтметры и параллельные цепи ваттметров. Не следует применять длинные провода там, где можно воспользоваться более короткими, однако провода не должны быть туго натянуты.
11. Сборка схемы производится при разомкнутых ключах и рубильниках. Присоединение собранной схемы к источникам питания может

быть произведено только после проверки ее преподавателем и с его разрешения.

12. Всекие изменения в схеме, находящейся под напряжением, запрещены. Схема в случае необходимости изменения в процессе работы должна быть отключена от источника питания. Вторичное включение схемы производится только с разрешения преподавателя.

13. Оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением, запрещается.

14. В случае неисправности прибора или вспомогательной аппаратуры необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю и ни в коем случае не пытаться самостоятельно их исправить. За приборы, пришедшие в неисправность по вине студента, материальную ответственность несет виновный.

15. При выполнении работы следует придерживаться методики, указанной в описании данной работы, и соблюдать следующие основные меры предосторожности:

а) движки реостатов должны быть поставлены в такое положение, чтобы опыт начался с самых малых значений тока и напряжения;

б) не подавать на схему напряжения или ток без проверки схемы самими студентами и руководителем;

в) разборка схемы должна начинаться непременно с отключения проводов от источника питания.

16. Отчеты по зеркальной шкале приборов должны производиться с погрешностью меньшей 0,1 деления шкалы. Все показания прибора следует выражать числами с одинаковым нижним разрядом, соответствующим погрешности отсчета по шкале, например записи 5,35; 6,40 и 7,00 А показывают, что отчеты показаний прибора производились с погрешностью 0,01 А.

17. По окончании работы каждый студент должен представить преподавателю протокольные записи в рабочей тетради или отчетном бланке для просмотра и проверки правильности полученных результатов и отметки о выполнении работы. При отсутствии подписи руководителя в рабочей тетради или на бланке работа считается невыполненной. До проверки преподавателем результатов работы схема не должна разбираться.

18. По окончании работы провода должны быть сданы лаборанту, а приборы и аппаратура приведены в надлежащий порядок.

19. Студент должен представить к следующему очередному занятию письменный отчет по предшествующей работе, выполненный по установленной форме, на особом бланке идти в личной рабочей тетради. Студент, не представивший отчета, не допускается к очередной работе.

Ведение протокольных записей

Все результаты наблюдений по мере их получения заносятся в форме таблиц в индивидуальные рабочие тетради (или в отчетные бланки). По окончании работы они подписываются руководителем и в дальнейшем никаким исправлениям и переписке не подвергаются. Оформленные таким образом данные наблюдений называются протокольной записью. Все

данные должны быть записаны в таком виде, в каком они наблюдаются глазом, например показания многопредельного вольтметра или амперметра записываются не в вольтах и амперах, а в делениях шкалы. Перевод данных в вольты и амперы производится после окончания работы при обработке данных наблюдения.

Протокольная запись является основой всей работы. Она производится в таблицах указанной формы, что значительно экономит время, облегчает разбор записей и обеспечивает полноту, четкость и правильность протокола.

Подписанная руководителем протокольная запись является единственным документом, подтверждающим активное участие студента в работе, и поэтому она обязательно представляется при сдаче работы. Протокольная запись на листах бумаги не допускается.

Составление отчета

Отчет по работе выполняется чернилами на специальном бланке. На первой странице бланка приводятся:

- а) наименование лаборатории;
- б) дата выполнения работы;
- в) фамилия, имя, отчество студента;
- г) наименование группы;
- д) номер и название работы;
- е) цель работы;
- ж) основное содержание работы (задание).

На второй странице бланка приводятся:

а) все расчетные формулы, которыми приходится пользоваться при обработке результатов наблюдения;

б) схемы соединений, соответствующие выполнению отдельных пунктов задания, выполненные с помощью линейки и угольника. На схемах должны быть обозначены все измерительные приборы и аппаратура с использованием стандартных обозначений;

в) перечень приборов и образцовых мер, показания и значения которых входят в расчетные формулы и от которых зависит результат измерения. Вспомогательная аппаратура и приборы (реостаты, трансформаторы, источники тока, выключатели) не указываются.

Каждый прибор и мера характеризуются: наименованием завода-изготовителя, заводским номером, системой, пределом измерения, значением меры, числом делений шкалы.

На третьей странице должны быть заготовлены формы таблиц. В эти таблицы во время работы заносятся карандашом данные наблюдений по мере их получения. Если протокольные записи ведутся в рабочей тетради, то при составлении отчета они переписываются в соответствующие таблицы, а подлинные записи прилагаются к отчету. Для величин, приводимых в таблицах, должны быть указаны единицы измерения.

На четвертой странице бланка приводятся необходимые векторные диаграммы и кривые (графическое изображение функций), построенные в прямоугольных координатах на клетчатой или миллиметровой бу-

маге, вклеиваемой в отчет, или на сетке, помещенной на четвертой странице бланка.

Ноль каждой оси координат должен находиться в точке пересечения осей, а масштабы осей координат должны быть выбраны так, чтобы наибольшее значение каждой координаты составляло от 10 до 15 см, если в описании не указаны специальные масштабы.

Число единиц в 1 см масштаба должно быть одним из следующих:

$$1 \cdot 10^n; \quad 2 \cdot 10^n; \quad 5 \cdot 10^n,$$

где n — целое положительное или отрицательное число.

Другие масштабы не допускаются.

На осях координат отмечаются только числовые значения масштабов. Ни в коем случае не следует отмечать на осях значения измеренных величин. Независимые переменные откладываются на горизонтальной оси, зависимые — на вертикальной. Измеренные значения наносятся в виде точек или небольших кружков, центром которых является наносимая точка.

Плавные кривые, изображающие математическую или экспериментально установленную зависимость между двумя величинами, например

$$B = f(H);$$

$$\frac{P}{V} = \alpha f + \beta f^2,$$

должны быть плавно проведены через возможно большее число точек.

Кривые, которые не выражают никакого закона, например кривая поправок к вольтметру, строятся в виде ломаной линии. Отрезки этой ломаной линии дают возможность найти поправки для промежуточных точек путем графической интерполяции.

На каждой кривой должно быть ясно указано, какие характеристики, для какого прибора или опыта и при каких условиях изображаются данной кривой.

Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

Наименование	Условное обозначение
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем (выпрямительный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с неизолированным термопреобразователем (термоэлектрический прибор)	
Ток постоянный	
Ток переменный (однофазный)	
Ток постоянный и переменный	
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)	
Прибор применять при вертикальном положении шкалы	





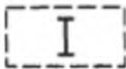

Наименование	Условное обозначение
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	
Класс точности прибора, например 1,5	1,5  
Напряжение испытательное, например, 2 кВ	
Прибор защищен от влияния внешнего магнитного поля (1-я категория защищенности)	
Прибор защищен от влияния внешнего электрического поля (1-я категория защищенности)	
Внимание! Смотри указания в инструкции по эксплуатации прибора	

Таблица П. 3.1

Основные единицы СИ

Величина	Символ	Наименование	Обозначение	Размерность
Длина	l	Метр	м	L
Масса	m	Килограмм	кг	M
Время	t	Секунда	с	T
Сила электрического тока	I	Ампер	А	I
Температура	T, θ	Кельвин	К	θ
Сила света	I_v	Кандела	кд	J

Таблица П. 3.2

Производные единицы электрических величин

Величина	Символ	Наименование	Обозначение единицы	Размерность
Количество электричества	Q	Кулон	Кл	TI
Электрический момент диполя	p	Кулон-метр	Кл · м	LTI
Поляризуемость	P	Кулон на квадратный метр	Кл/м ²	$L^{-2}TI$
Диэлектрическая проницаемость вакуума	ϵ_0	Фарад на метр	Ф/м	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$
Напряженность электрического поля	E	Вольт на метр	В/м	$LMT^{-3}I^{-1}$
Поток электрического смещения	ψ, Φ_e	Кулон	Кл	TI
Плотность потока электрического смещения	D	Кулон на квадратный метр	Кл/м ²	$L^{-2}TI$
Электрический потенциал	V	Вольт	В	$L^2MT^{-3}I^{-1}$
Емкость	C	Фарад	Ф	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$
Сопротивление	R	Ом	Ом	$L^2MT^{-3}I^{-2}$

Величина	Символ	Наименование	Обозначение единицы	Размерность
Удельное сопротивление	ρ	Ом-метр	Ом · м	$L^3 M T^{-3} I^{-2}$
Проводимость	G	Сименс	См	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$
Удельная проводимость	γ	Сименс на метр	См/м	$L^{-3} M^{-1} T^3 I^2$
Плотность тока	I	Ампер на квадратный метр	А/м ²	$L^{-2} I$
Плотность электрической энергии	u_e	Джоуль на кубический метр	Дж/м ³	$ML^{-1} T^{-2}$
Реактивное сопротивление	X	Ом	Ом	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$
Импеданс	Z	Ом	Ом	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$
Адмитанс (полная проводимость)	Y	Сименс	См	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$
Электрическая мощность	P	Ватт	Вт	$ML^2 T^{-3}$
Электрическая энергия	W, U	Джоуль	Дж	$ML^2 T^{-2}$
Характеристическое сопротивление	Z_0	Ом	Ом	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$
Угол потерь	δ	Рад	рад	—

Таблица П. 3.3

Производные единицы магнитных величин

Величина	Символ	Наименование	Обозначение единицы	Размерность
Магнитный скалярный потенциал	U_m	Ампер	А	I
Напряженность магнитного поля	H	Ампер на метр	А/м	$L^{-1} I$
Магнитный поток	Φ	Вебер	Вб	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$
Магнитная индукция	B	Тесла	Тл	$M T^{-2} I^{-1}$

Величина	Символ	Наименование	Обозначение единицы	Размерность
Магнитный векторный потенциал	A	Вебер на метр	Вб/м	$LMT^{-2}I^{-1}$
Магнитодвижущая сила	A	Ампер-виток	А · в	I
Магнитная восприимчивость	χ_m	—	—	—
Магнитная проницаемость	M	Генри на метр	Г/м	$LMT^{-2}I^{-2}$
Магнитная постоянная	μ_0	Генри на метр	Г/м	$LMT^{-2}I^{-2}$
Относительная магнитная проницаемость	μ_r	—	—	—
Магнитный момент диполя	m	Ампер-квадратный метр	А · м ²	L^2I
Индуктивность	L	Генри	Г	$L^2MT^{-2}I^{-2}$
Взаимная индуктивность	M	Генри	Г	$L^2MT^{-2}I^{-2}$
Магнитное сопротивление	R	Ампер на вебер	А/Вб	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$
Магнитная проводимость	P	Вебер на ампер	Вб/А	$L^2MT^{-2}I^{-2}$
Намагниченность	J	Ампер на метр	А/м	$L^{-1}I$
Число витков	N, n	—	—	—
Коэффициент потерь на гистерезис	k_r	—	—	—
Коэффициент вихревых токов	k_v	—	—	—

Значение функции $f_0(z_i)$

z_i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	z_i
0,0	0,3989	0,3989	0,3989	0,3988	0,3986	0,3984	0,3982	0,3980	0,3977	0,3973	0,0
0,1	3 970	3 965	3 961	3 956	3 951	3 945	3 939	3 932	3 925	3 818	0,1
0,2	3 910	3 902	3 894	3 885	3 876	3 967	3 857	3 847	3 836	3 825	0,2
0,3	3 814	3 602	3 790	3 778	3 765	3 753	3 739	3 726	3 712	3 697	0,3
0,4	3 683	3 668	3 653	3 637	3 621	3 605	3 589	3 572	3 555	3 538	0,4
0,5	3 521	3 503	3 485	3 467	3 448	3 429	3 410	3 391	3 372	3 353	0,5
0,6	3 332	3 312	3 292	3 271	3 251	3 230	3 209	3 187	3 166	3 144	0,6
0,7	2 897	2 874	2 850	2 827	2 803	2 780	2 756	2 732	2 709	2 685	0,7
0,8	3 123	3 101	3 079	3 056	3 034	3 011	2 989	2 966	2 943	2 920	0,8
0,9	2 661	2 637	2 613	2 589	2 565	2 541	2 516	2 492	2 468	2 488	0,9
1,0	0,2420	0,2396	0,2371	0,2347	0,2323	0,2299	0,2275	0,2251	0,2227	0,2203	1,0
1,1	2 179	2 155	2 131	2 107	2 083	2 059	2 036	2 012	1 989	1 965	1,1

z_i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	z_i
1,2	1 942	1 919	1 895	1 872	1 849	1 826	1 804	1 781	1 758	1 736	1,2
1,3	1 724	1 691	1 669	1 647	1 626	1 604	1 582	1 561	1 535	1 518	1,3
1,4	1 497	1 476	1 456	1 435	1 415	1 394	1 374	1 354	1 334	1 315	1,4
1,5	0,1295	0,1276	0,1257	0,1238	0,1219	0,1200	0,1182	0,1163	0,1145	0,1127	1,5
1,6	1 109	1 092	1 074	1 057	1 040	1 023	1 006	0 989	0 973	0 957	1,6
1,7	0 940	0 925	0 909	0 893	0 878	0 863	0 848	0 833	0 818	0 804	1,7
1,8	0 790	0 775	0 761	0 748	0 734	0 721	0 707	0 694	0 681	0 669	1,8
1,9	0 656	0 644	0 632	0 620	0 608	0 596	0 584	0 573	0 562	0 551	1,9
2,0	0,0540	0,0529	0,0519	0,0508	0,0498	0,0488	0,0478	0,0468	0,0459	0,0449	2,0
2,1	0 440	0 431	0 422	0 413	0 404	0 396	0 388	0 379	0 371	0 363	2,1
2,2	0 355	0 347	0 339	0 332	0 325	0 317	0 310	0 303	0 296	0 290	2,2
2,3	0 283	0 277	0 270	0 264	0 258	0 252	0 246	0 241	0 235	0 229	2,3
2,4	0 224	0 219	0 213	0 208	0 203	0 1898	0 194	0 189	0 184	0 180	2,4

Окончание прил. 4

z_i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	z_i
2,6	0 137	0 132	0 129	0 126	0 122	0 119	0 116	0 113	0 110	0 107	2,6
2,7	0 104	0 101	0 099	0 096	0 093	0 091	0 088	0 086	0 084	0 081	2,7
2,8	0 079	0 077	0 075	0 073	0 071	0 069	0 067	0 065	0 063	0 061	2,8
2,9	0 060	0 058	0 056	0 055	9 953	0 051	0 050	0 048	0 047	0 046	2,9
3,0	0,0044	0,0043	0,0042	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036	0,0035	0,0034	3,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
2. ГОСТ 8.057—80. ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения.
3. ГОСТ 8.417—2002. ГСИ. Единицы величин.
4. ГОСТ 8.566—2011. ГСИ. Межгосударственная система данных о физических константах и свойствах веществ и материалов. Основные положения.
5. Аналоговые электроизмерительные приборы: Учеб. пособие / Е. Г. Бишард, Е. А. Киселева, Г. П. Лебедев и др. — М.: Высш. шк., 1991.
6. Гаврилова, А. Н. Электротехнические измерения. Задачи и упражнения: Учебник для ссузов / А. Н. Гаврилова, Е. Ф. Сысоева и др. — М.: КноРус, 2011.
7. Дубина, И. Н. Электротехнические измерения / И. Н. Дубина. — М.: КноРус, 2012.
8. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие / Н. Н. Евстихеев, Я. А. Купершмидт, В. Ф. Популовский и др.; Под ред. Н. Н. Евстихеева. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник / В. И. Нефедов, В. И. Хахин, Е. В. Федорова и др.; Под ред. В. И. Нефедова. — М.: Высш. шк., 2001.
10. Мерцалова, А. И. Электротехнические измерения. Практикум (СПО) / А. И. Мерцалова. — М.: КноРус, 2013.
11. Назаров, С. В. Электротехнические измерения. Задачи и упражнения (СПО): Учеб. пособие / С. В. Назаров, Л. П. Гудыно, А. А. Кириченко. — М.: КноРус, 2013.
12. Панфилов, В. А. Электрические измерения: Учебник для сред. проф. образования. — М.: Издательский центр «Академия», 2004.
13. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений: Учебник для вузов / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко, — 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2004.
14. Тартаковский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учебник / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. — М.: Высш. шк., 2001.

15. *Хромоин, П. К.* Электротехнические измерения: Учеб. пособие / П. К. Хромоин. — М.: Форум, 2013.
16. *Хрусталева, З. А.* Электротехнические измерения: Учебник / З. А. Хрусталева. — М.: КноРус, 2012.
17. *Хрусталева, З. А.* Электротехнические измерения: Практикум: Учеб. пособие / З. А. Хрусталева. — М.: КноРус, 2013.
18. *Хрусталева, З. А.* Электротехнические измерения. Задачи и упражнения: Учеб. пособие / З. А. Хрусталева. — М.: КноРус, 2013.
19. *Шишмарёв, В. Ю.* Измерительная техника: Учебник для студ. сред. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — 6-е изд, стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2014.
20. *Шишмарёв, В. Ю.* Средства измерений: Учебник для студ. сред. проф. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарёв. — 6-е изд., испр. — М.: Издательский центр «Академия», 2013.
21. *Шишмарёв, В. Ю.* Технические измерения и приборы: Учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — 2-е изд., испр. — М.: Издательский центр «Академия», 2012.
22. *Шишмарёв, В. Ю.* Электрорадиоизмерения: Учебник для сред. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв, В. И. Шанин. — 3-е изд. стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2011.
23. *Шишмарёв, В. Ю.* Электрорадиоизмерения. Практикум: Учеб. пособи для студ. сред. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — 3-е изд. стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2011.
24. *Шишмарёв, В. Ю.* Электротехнические измерения: Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — 2-е изд. стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2014.

**НОВЫЕ ИЗДАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ»
И СМЕЖНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ**

1. *Волегов, А. С.* Метрология и измерительная техника: электронные средства измерений электрических величин: Учеб. пособие для вузов / А. С. Волегов, Д. С. Незнахин, Е. А. Степанова. — М.: Издательство Юрайт, 2018.
2. *Жуков, В. К.* Метрология. Теория измерений: Учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / В. К. Жуков. — М.: Издательство Юрайт, 2018.
3. *Латышенко, К. П.* Метрология и измерительная техника. Лабораторный практикум: Учеб. пособие для вузов / К. П. Латышенко, С. А. Гарелина. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.
4. Метрология. Теория измерений: Учебник и практикум для академического бакалавриата / В. А. Мещеряков, Е. А. Бадеева, Е. В. Шалобаев; Под общ. ред. Т. И. Мурашкиной. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

Наши книги можно приобрести:

Учебным заведениям и библиотекам:

в отделе по работе с вузами

тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

Частным лицам:

список магазинов смотрите на сайте urait.ru

в разделе «Частным лицам»

Магазинам и корпоративным клиентам:

в отделе продаж

тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

Отзывы об издании присылайте в редакцию

e-mail: gred@urait.ru

Новые издания и дополнительные материалы доступны
на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Практическое издание

Шишмарёв Владимир Юрьевич

ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ. ПРАКТИКУМ

Практическое пособие для СПО

Формат 60×90 1/16.

Гарнитура «Charter». Печать цифровая.

Усл. печ. л. 14,63

ООО «Издательство Юрайт»

111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.

Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru