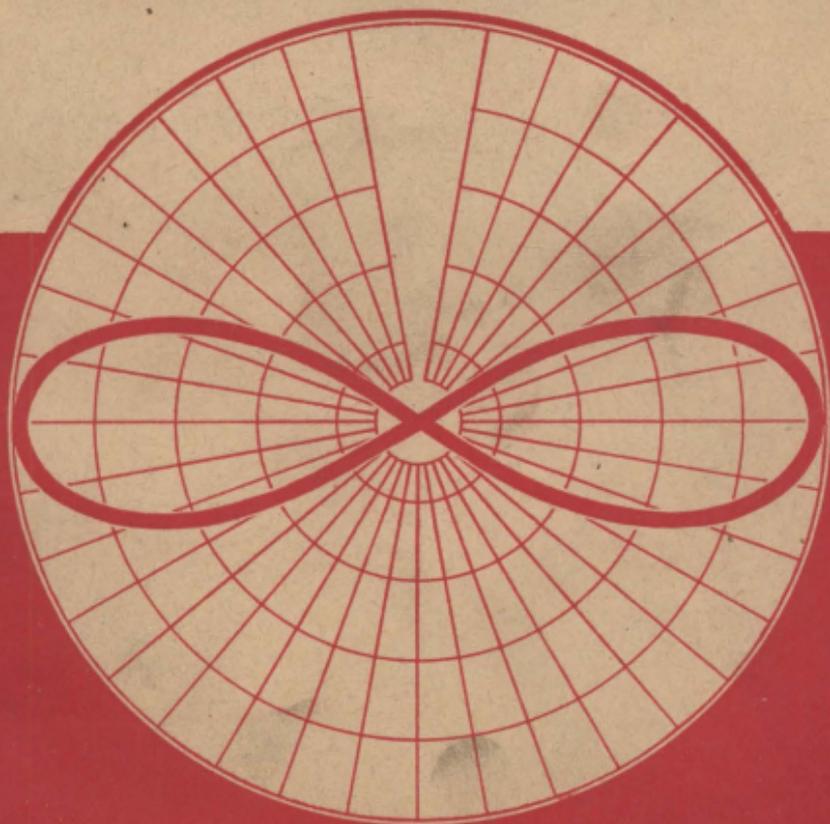


А.С.РАЙНУС

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ПО ОСНОВАМ
РАДИОТЕХНИКИ
И АНТЕННАМ



А. С. РАЙНУС

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ПО ОСНОВАМ
РАДИОТЕХНИКИ
И АНТЕННАМ

Допущено

Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для учащихся техникумов



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
Москва — 1973

6Ф2

P18

УДК 62.396(075)

Райнус А. С.

P18

Лабораторный практикум по основам радиотехники и антеннам. Учеб. пособие для средн. радиотехн. учеб. заведений. М., «Высшая школа», 1973. 168 с. с илл.

В книге рассмотрены лабораторные работы по практикумам специальностей «Радиоаппаратостроение» и «Радиолокационные устройства», а также дополнительные работы для факультативного проведения. В описание каждой работы включены краткие теоретические сведения и вопросы для самоконтроля. Приведены вопросы для составления карт программированного контроля готовности к лабораторным работам. Выполнению лабораторной работы предшествует расчетная часть.

Р $\frac{0341-286}{001(01)-73}$ 251-73

6Ф2

Рецензенты:

Преподаватель Кунцевского
радиотехникума Коган Л. Р.

Преподаватель Московского
радиоаппаратостроительного
техникума Краснянская Л. Н.

© Издательство «Высшая школа», 1973

Райнус Абель Соломонович
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ОСНОВАМ РАДИОТЕХНИКИ
И АНТЕННАМ

Редактор Г. А. Сорокина. Художественный редактор Т. М. Скворцова. Переплет художника Ю. В. Львова. Техн. редактор Э. М. Чижевский. Корректор З. Г. Карабанова

Сдано в набор 14/XI—72 г.

Формат 60×90/16

Изд. № ЭР-130

Объем 10,5 п. л.

Тираж 16 000 экз.

Цена 32 коп.

Подп. к печати 5/VI—73 г.

Уч.-изд. л. 9,63

Заказ 2005.

План выпуска литературы для вузов и техникумов издательства «Высшая школа» на 1973 г. Позиция № 251.

Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,

Издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 «Союзполиграфпрома»
при Государственном Комитете Совета Министров СССР,
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторные работы, представленные в данном руководстве, предусмотрены учебными программами техникумов для специальностей «Радиоаппаратостроение» и «Радиолокационные устройства». В дополнение к обязательным включены работы для факультативного проведения.

В описание каждой лабораторной работы включены краткие теоретические сведения и вопросы для самопроверки. В приложении приведены таблицы исходных данных для расчетов. Таблицы должны быть заполнены техникумом в соответствии с имеющейся аппаратурой. Предусмотрены места для градуировочных кривых, которые каждое учебное заведение должно построить в соответствии с параметрами своих макетов.

При составлении настоящего практикума учтен опыт работы ленинградских средних специальных и высших учебных заведений, а также пожелания, высказанные преподавателями техникумов МРП СССР при обсуждении брошюры автора: «Основы радиотехники». Методические указания по проведению лабораторных работ. Ленинград, 1967.

Практикум по лабораторным работам для средних специальных учебных заведений радиотехнического профиля издается впервые. Автор будет благодарен читателям, приславшим свои замечания по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Занятия в лаборатории являются одним из существенных элементов учебного процесса в среднем специальном учебном заведении.

В результате выполнения лабораторных работ учащиеся должны, с одной стороны, экспериментально подтвердить и закрепить основные положения теории, а с другой — приобрести некоторые практические навыки работы с радиотехническими цепями и измерительной аппаратурой, навыки рациональной постановки и проведения эксперимента, обработки полученных результатов. В процессе лабораторных занятий учащиеся должны научиться правильно оценивать полученные результаты, понимать причины расхождения теоретических и опытных зависимостей.

В условиях средних технических учебных заведений, где основной формой обучения является не лекция, а урок, лабораторные работы должны, как правило, проводиться фронтально, непосредственно после изучения данной темы на аудиторных занятиях. При этом на каждом рабочем месте выполнять работу должны не более двух-трех учащихся.

Ввиду того что курс «Радиотехнические измерения», согласно учебным планам, изучается значительно позднее курса «Основы радиотехники и антенны», перед проведением лабораторных работ необходимо ознакомить учащихся с основными характеристиками и правилами пользования измерительными приборами, применяемыми в этих работах, для чего предусматривается отдельное практическое занятие.

Желательно, чтобы при выполнении большинства обязательных лабораторных работ учащиеся пользовались одними и теми же измерительными приборами, с которыми они и знакомятся на практическом занятии.

Таковыми приборами могут служить, например, генератор Г4-42, ламповый вольтметр ВЗ-13 и осциллограф С1-5.

При выполнении работ по антенно-фидерным устройствам и некоторых факультативных работ учащиеся встретятся с измерительной аппаратурой или режимами ее работы, отличными от рассматриваемых на практическом занятии. С кратким описанием этих измерительных приборов и инструкцией по их эксплуатации учащиеся знакомятся непосредственно перед выполнением соответствующей работы по ее описанию.

В работах по изучению антенно-фидерных систем с целью максимального упрощения установки и большей наглядности в качестве индикатора используется чувствительный микроамперметр со световым отсчетом (например, типа М198/2). В случае отсутствия такого прибора или, если его чувствительность окажется недостаточной, можно использовать индикаторные приборы измерительных усилителей типа У2-4 (У2-1А, 28-ИМ). При этом источник колебаний СВЧ должен быть переведен в режим амплитудной модуляции, а измерительный усилитель (в режиме узкой полосы) настроен на модулирующую частоту.

Цель лабораторных работ в первую очередь закрепить и углубить полученные на уроках знания.

Чтобы убедиться в наличии этих знаний, перед началом работы необходимо проконтролировать знания на право допуска к выполнению работы. С этой целью наиболее целесообразно провести программированный опрос с применением контролирующей машины или безмашинным способом. Такой контроль позволяет охватить проверкой всех учащихся группы и сэкономить время.

В руководстве ко всем обязательным лабораторным работам приводятся примерные вопросы и ответы для составления карт программированного контроля. Преподаватели по своему усмотрению, исходя из возможностей контролируемых машин, которыми они располагают, могут выбрать подходящие вопросы и их комбинации и произвести кодирование ответов.

Перед выполнением лабораторных работ каждый учащийся обязан получить инструктаж по технике безопасности и расписаться о получении его в специальном журнале.

Содержание лабораторных работ должно соответствовать схеме: сначала — расчет, потом его экспериментальная проверка. Этот расчет желательно выполнить до проведения лабораторной работы, например, в виде очередного домашнего задания. С группами вечернего обучения бывает целесообразно расчетную часть некоторых работ выполнить на одном из предшествующих уроков.

Выполнение каждой лабораторной работы состоит из трех этапов: подготовки, выполнения экспериментальной части и обработки полученных результатов.

1. Подготовка к работе заключается в предварительном ознакомлении с ее описанием и повторении основных вопросов теории.

В описании каждой работы приводятся краткие сведения из теории и указываются вопросы для самопроверки. В случае затруднений учащийся может обратиться к указанным страницам учебников для более подробного изучения материала.

Учащийся должен заранее продумать методику снятия экспериментальных зависимостей, обращая внимание на то, каким

образом будет изменяться и регистрироваться исходная величина и как будет отсчитываться исследуемая величина. При этом характер ожидаемой зависимости должен быть уже ясен.

При подготовке к каждой работе необходимо выполнить расчетную часть работы по исходным данным, взятым из приложения I соответственно номеру своей бригады. Таблицы в приложении оставлены незаполненными, чтобы каждое учебное заведение имело возможность подставить в них исходные данные, соответствующие лабораторному оборудованию.

В процессе подготовки к работе учащиеся должны подготовить форму для отчета по работе, поместив туда принципиальные схемы исследуемых установок, результаты предварительных расчетов, таблицы для записи экспериментальных данных. Подготовить миллиметровую бумагу для построения графиков.

2. Выполнение экспериментальной части проводится на рабочем месте, соответствующем номеру бригады. Прежде всего следует ознакомиться с состоянием рабочего места, наличием измерительной аппаратуры, соединительных проводов и т. п.

Исследуемая схема собирается по данным предварительного расчета. После проверки схемы преподавателем или лаборантом, можно приступить к проведению исследований.

Включив измерительные приборы и установив рекомендуемый режим работы, следует предварительно, не записывая показаний, проследить исследуемую зависимость и убедиться в соответствии ее теоретическим положениям. При этом удобно заметить пределы изменения и характерные точки регистрируемой и исходных величин, что позволит выбрать удобные масштабы будущих графиков, наметить пределы измерения и интервалы между точками отсчета.

Число отсчетов, необходимых для правильного воспроизведения исследуемой зависимости, учащиеся определяют самостоятельно. В тех местах, где исследуемая величина резко изменяется или ее изменениям соответствуют особые точки (максимум, минимум, перегиб и т. п.), надо брать точки отсчета более часто, чем на участках монотонного изменения функции.

По мере приобретения у учащихся навыков в выполнении экспериментальной части, необходимо стремиться к тому, чтобы исследуемые зависимости сразу же воспроизводились в виде графиков, без заполнения таблиц.

3. Обработка результатов эксперимента проводится по возможности непосредственно на рабочем месте, в часы, отведенные на выполнение лабораторной работы.

Итогом работы является отчет, который составляется каждым учащимся на стандартных листах писчей бумаги размером 203×288 мм с оставлением полей шириной 40 мм.

Титульный лист отчета составляется по следующему образцу:

.....
(наименование техникума)

лаборатория : .
 группа
 учащийся
 бригада №

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ № . . .

.....
(наименование лабораторной работы)

Составлен « » 19 г.

Принят « » 19 г.

.....
подпись преподавателя

Отчет должен содержать: 1) принципиальную схему лабораторной установки, 2) предварительные расчеты, 3) графики экспериментальных и расчетных зависимостей, 4) расчеты по данным эксперимента, 5) краткие выводы по работе. Дополнительные требования к отчету указаны в описании каждой работы.

Принципиальные схемы выполняются в соответствии с требованиями ЕСКД.

Все приводимые расчеты сопровождаются объяснениями и формулами.

Графики вычерчиваются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в отчет. На каждом графике строятся только те зависимости, которые предусмотрены соответствующим пунктом описания. Особое внимание следует обратить на рациональный выбор масштабов по осям координат.

Графики экспериментальных зависимостей следует выполнять так, чтобы на них были ясно видны точки снятых отсчетов. Поскольку получаемые отсчетные точки имеют некоторый разброс, то кривые следует проводить между ними, сообразуясь с физическими закономерностями.

В кратких выводах даются:

1. Объяснение влияния изменяемых элементов схемы.
2. Оценка полученных зависимостей.
3. Критическое сопоставление результатов эксперимента и теоретических положений, объяснение расхождения между ними (в случае его наличия).

Отчет представляется преподавателю в конце лабораторной работы или на ближайшем занятии. Разрешение на выполнение следующей работы может быть получено только при сдаче отчета за предыдущую. Сдается отчет каждым учащимся в отдель-

ности и сопровождается ответами на вопросы преподавателя. Учащийся должен получить по каждой работе зачет, проставляемый на отчете и в журнале группы. После выполнения всех лабораторных работ учащийся обязан сшить все отчеты и сдать их преподавателю.

Зачет по всему курсу выставляется при условии получения зачетов и сдачи преподавателю отчетов по всем лабораторным работам, предусмотренным программой. Отчеты по лабораторным работам должны храниться в течение года, после чего они уничтожаются.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

Ознакомление с измерительной аппаратурой, используемой при лабораторных работах

Краткие сведения об используемой аппаратуре

Для исследования какой-либо радиотехнической цепи необходимо располагать измерительными приборами, позволяющими изучать процессы, происходящие в цепи. При этом обычно на вход цепи воздействуют заданным электрическим сигналом и оценивают эффект этого воздействия на выходе цепи.

Таким образом, в первую очередь необходимы специальные генераторы, позволяющие создавать требуемые для исследования сигналы. Для получения гармонических колебаний высокой частоты и модулированных ВЧ-колебаний служат так называемые генераторы стандартных сигналов (ГСС).

Для количественной оценки напряжения на выходе радиотехнических цепей, как правило, используются ламповые вольтметры. Для того чтобы по возможности уменьшить влияние вольтметра на режим работы исследуемой цепи, его входное сопротивление должно быть наибольшим, а входная емкость наименьшей. Для уменьшения вносимых в схему реактивностей вольтметры снабжаются обычно выносной головкой (пробником). И при измерениях на высоких частотах, когда особенно нежелательно внесение в схему паразитных емкостей, рекомендуется подключать вольтметр к цепи непосредственно с помощью пробника.

Для визуального наблюдения сигнала в интересующих нас точках исследуемой цепи используют электронные осциллографы. Чтобы подключение осциллографа не нарушило режим работы цепи, желательно иметь входное сопротивление его наибольшим, а входную емкость наименьшей. Если это требование не удается соблюдать, то необходимо при анализе результатов внести поправку на влияние входных параметров осциллографа.

Ниже дается краткое описание основных типов приборов, используемых при проведении лабораторных работ.

Генератор стандартных сигналов Г4-42

Этот прибор предназначен для создания стандартных амплитудно-модулированных сигналов, т. е. сигналов, калиброванных по частоте, амплитуде и глубине модуляции.

Однако режим получения амплитудно-модулированных сигналов в обязательных лабораторных работах не используется. (С ним студенты встретятся лишь в факультативных работах.) Поэтому рассмотрим только получение высокочастотного синусоидального сигнала, калиброванного по частоте и амплитуде.

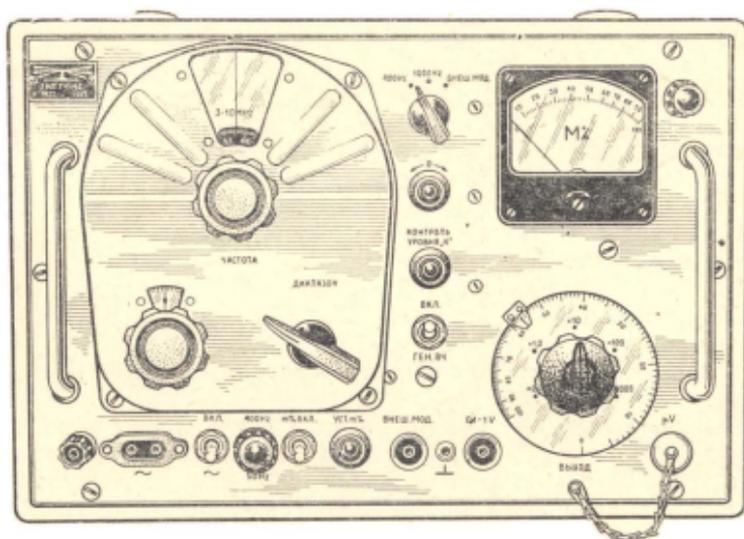


Рис. 0.1

При получении этого сигнала придется оперировать следующими органами управления на передней панели генератора (рис. 0.1):

1. Ручка «Частота» служит для установки заданной частоты в пределах поддиапазона.

2. Ручка верньера — для более точной установки частоты в пределах поддиапазона. На ручке верньера имеется нониусная шкала.

3. Ручкой «Диапазон» переключают поддиапазоны, граничные частоты которых обозначены в окне на передней панели.

4. Ручкой переключателя рода работ переключают приборы или в режим амплитудной модуляции (400 Hz, 1000 Hz), или в режим непрерывной генерации (в положении «Внеш. мод»).

5. Ручкой «←0→» устанавливают на нуль стрелочный прибор.

6. Ручкой «Контроль уровня K » устанавливают уровень выходного сигнала на риск « K » стрелочного прибора.

7. Ручка « $m\%$ вкл.» в нижнем положении включает стрелочный прибор на измерение выходного напряжения генератора.

8. Ручки «Выход» выполняют следующее:

а) ручка, несущая на себе прозрачный лимб, разделенный на 100 делений, изменяет степень уменьшения выходного напряжения с помощью плавного аттенюатора;

б) ручка, расположенная в центре первой, изменяет уровень выходного напряжения, снимаемого с гнезда « μV », с помощью ступенчатого аттенюатора.

9. Гнездо «0,1—1V» соединяет генератор с исследуемой схемой.

10. Тумблер «Вкл.» предназначен для включения и выключения прибора.

11. Индикаторная лампочка является индикатором включения прибора в сеть.

12. Тумблером «Ген. ВЧ» включают и выключают генератор высокой частоты.

13. Тумблер «400 Hz, 50 Hz», закрытый колпачком, служит для переключения сетевого напряжения при питании прибора от сети с частотой 50 и 400 гц.

Установка заданного сигнала производится в следующем порядке:

Выключатель питания поставить в положение «Вкл.». При этом должна загореться индикаторная лампочка. Дать прибору прогреться 3—5 мин. Для получения на выходе немодулированного синусоидального напряжения переключатель рода работ установить в положение «Внеш. мод», а тумблер « $m\%$ вкл.» поставить в нижнее положение. Ручкой установки нуля установить стрелку измерительного прибора на передней панели на нуль.

Включить генератор высокой частоты, поставив тумблер «Ген. ВЧ.» в положение «Вкл.».

Переключателем «Диапазон» установить нужный поддиапазон частот. Весь частотный диапазон генератора от 12 кгц до 10 Мгц перекрывается шестью поддиапазонами. Граничные частоты каждого поддиапазона можно прочитать на шторке под обрамлением передней панели. При переключении поддиапазонов переключатель необходимо доводить до фиксированных положений. Индикатором правильного положения переключателя

является наличие показаний измерительного прибора на передней панели.

Установить нужную частоту в пределах поддиапазона с помощью ручки «Частота» и более плавно отрегулировать ее ручкой верньера (с нониусной шкалой). При этом погрешность установки частоты прибора обеспечивается не более $\pm 1\%$. При отсчете частоты, для уменьшения ошибки из-за параллакса, глаз наблюдателя должен располагаться по перпендикуляру к шкале прибора. Контролировать это положение можно по совпадению вертикальных рисок, нанесенных на стекле, расположенном перед шкалой с внутренней и внешней стороны.

Для более точного отсчета частоты между делениями основной шкалы служит нониусная шкала, цена деления которой устанавливается для каждого участка поддиапазонов отдельно. Цену деления нониуса в килогерцах можно определить как отношение разности двух ближайших значений частот (в килогерцах) по основной шкале к разности соответствующих цифр делений нониусной шкалы.

Например, при переходе с частоты 90 кгц на соседнее деление, соответствующее частоте 90,5 кгц, нониусная шкала переместилась с деления «80» на деление «60». Таким образом, на этом участке поддиапазона цена деления нониусной шкалы равна $\frac{90,5 - 90}{80 - 60} = 0,025 \text{ кгц} = 25 \text{ цц}$.

Для снятия напряжения сигнала в лабораторных работах используется гнездо «01—IV». С этого гнезда можно снимать напряжение, регулируемое от 0,1 до 1 в. Дополнительное уменьшение выходного напряжения может быть произведено с помощью выносного делителя на конце кабеля. При этом с зажима «X1» делителя снимается все напряжение, а с зажима «X0,1» — одна десятая часть его.

При установке ручкой «Контроль уровня К» стрелки измерительного прибора на риску «К», а лимб плавного аттенюатора на цифру 100 — выходное напряжение на гнезде «0,1—IV» составит 1 в. При перемещении лимба аттенюатора на цифру 50 выходное напряжение составит 0,5 в на цифру 10 — 0,1 в и т. д. Следует иметь в виду, что погрешность установки выходного напряжения с гнезда «0,1—IV» прибором не гарантируется, поэтому определенное указанным способом напряжение может быть использовано лишь для приближенных вычислений.

Существенным параметром генератора, характеризующим его влияние на исследуемую схему, является выходное сопротивление генератора. Знание величины этого сопротивления особенно необходимо для обеспечения согласования генератора с нагрузкой. Выходное сопротивление генератора Г4-42 с гнезда «0,1—IV» около 40 ом. Применение шланга с выносным делителем позволяет уменьшить выходное сопротивление до величины по-

рядка 37 ом при снятии напряжения с зажима «Х1», и до величины порядка 7 ом при снятии с зажима «Х0,1».

Поскольку в большинстве случаев при измерении желательно исключить влияние выходного сопротивления генератора на режим работы исследуемой схемы, то необходимо на входных зажимах исследуемой установки поддерживать неизменной величину подводимого напряжения. Осуществить это можно, включив на вход схемы вольтметр и контролируя постоянство его показаний.

Однако при снятии сигнала в генераторе Г4-42 с гнезда «0,1—IV» наиболее простым способом контроля за постоянством напряжения сигнала является использование внутреннего вольтметра генератора, измерительный прибор которого вынесен на переднюю панель. При этом лимб плавного аттенюатора должен быть установлен на цифру 100. В этом случае вольтметр оказывается подключенным параллельно входу исследуемой цепи, и поддержание на входе заданной величины напряжения осуществляется только ручкой «Контроль уровня К».

При подключении генератора к исследуемой установке необходимо обратить внимание на то, чтобы конец шланга, соединенный с «землей» генератора, был присоединен к «земле» исследуемой схемы.

Ламповый вольтметр ВЗ-13

Ламповый вольтметр ВЗ-13 (рис. 0.2) предназначен для измерения эффективного значения синусоидальных переменных напряжений от 0,3 мв до 300 в в диапазоне частот от 20 гц до 1 Мгц.

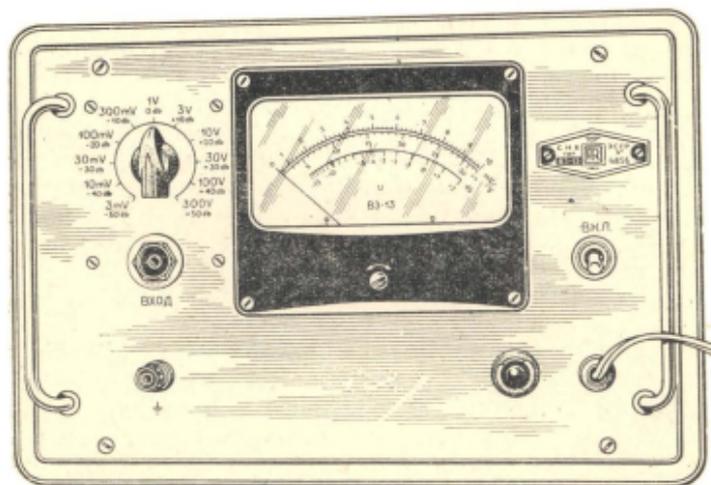


Рис. 0.2

Основная погрешность измерений, выраженная в процентах от номинального значения рабочей части шкалы, не превышает $\pm (4 \div 6) \%$.

Входное сопротивление прибора не менее:

а) при частоте 1000 *гц* 1,0 *Мом* на пределах 3 *мв* — 1 *в*; 1,6 *Мом* на пределах 3—300 *в*;

б) при частоте 1 *Мгц* 400 *ком* — на всех пределах.

Входная емкость прибора без кабеля не более:

а) 25 *пф* на пределах 3 *мв* — 1 *в*,

б) 15 *пф* на пределах 3—300 *в*.

При измерении напряжения на колебательном контуре изменение входной емкости вольтметра при переходе на пределы измерения более 1 *в*, может внести значительную ошибку из-за дополнительной расстройки контура. Поэтому желательно в процессе измерения использовать одну группу пределов либо 1 *в* и ниже, либо 3 *в* и выше. С помощью вольтметра ВЗ-13 можно непосредственно измерять уровень передачи напряжения в децибелах. Для этих измерений предусмотрена шкала абсолютных уровней по отношению к исходному напряжению $U_0 = 0,775$ *в*, которому соответствует уровень 0 *дб*.

При переходе со шкалы 1V на шкалы 3V, 10V и т. д. к абсолютному уровню, отсчитываемому по шкале, добавляются постоянные уровни соответственно «+10 *дб*», «+20 *дб*» и т. д. При переходе на меньшие пределы измерения 300*мВ*, 100*мВ*, добавляются постоянные уровни «-10 *дб*», «-20 *дб*» и т. д.

На практике чаще приходится встречаться с измерением относительных уровней передачи (усиление, ослабление), которые определяются как разность абсолютных уровней.

Например, на входе исследуемого фильтра напряжение равно 0,5 *в*, а на выходе — 60 *мв*. Можно определить коэффициент ослабления (в децибелах) расчетом по формуле

$$K = 20 \lg \frac{0,5 \cdot 10^3}{60} = 18,4 \text{ дб.}$$

Однако тот же результат можно получить сразу же путем непосредственного отсчета по шкале уровней. Так, напряжению 0,5 *в* соответствует абсолютный уровень — 3,8 *дб*, а напряжению 60 *мв* соответствует абсолютный уровень — 22,2 *дб*. Относительный уровень определяем как разность абсолютных уровней 22,2 — —3,8 = 18,4, что и дает нам искомый коэффициент ослабления фильтра.

Перед использованием прибор требует предварительного прогрева в течение 5 *мин*.

Для уменьшения помех необходимо корпус вольтметра

(клемма \perp) надежно соединить с точкой нулевого (или наименьшего) переменного потенциала относительно земли измеряемой схемы.

Ламповый вольтметр ВЗ-3

Ламповый вольтметр ВЗ-3 (рис. 0.3) предназначен для измерения эффективного значения напряжения синусоидального сигнала в диапазоне частот от 30 гц до 10 Мгц. Диапазон измеряемых напряжений составляет от 1 мв до 100 в. Для измерения напряжений от 1 до 100 в используется внешний делитель.

Основная погрешность измерения, выраженная в процентах от номинального значения шкалы:

а) не более $\pm 3\%$ в диапазоне частот 50 гц — 20 кгц,

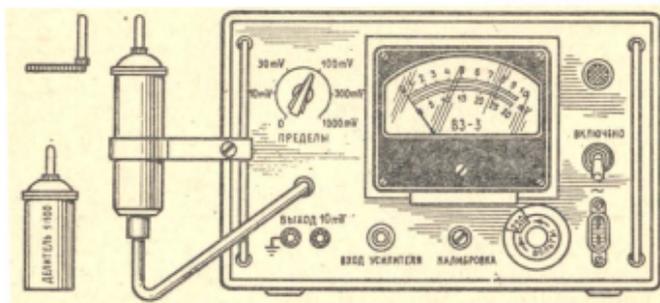


Рис. 0.3

б) не более $\pm 5\%$ в диапазоне частот 30 гц — 5 Мгц,

в) не более $\pm 10\%$ в диапазоне частот 5—10 Мгц.

Прибор снабжен выносной головкой (пробником), входное сопротивление которой представляет активное сопротивление в 1 Мом, шунтированное емкостью в 10 пф. Входное сопротивление при использовании делителя состоит из активного сопротивления в 1 Мом, шунтированного емкостью не более 6 пф. Для нормальной работы прибора требуется предварительный прогрев его в течение 10 мин.

Для измерения напряжения необходимо:

1. Установить переключатель «пределы» в положение, соответствующее ориентировочной величине измеряемого напряжения.

2. Соединить клемму « \perp » с точкой нулевого потенциала по переменному току исследуемой схемы.

3. Подключить пробник к исследуемой схеме.

На конце пробника имеется резьба для навинчивания различных насадок, которые позволяют включить пробник в стандартные штепсельные гнезда; в выходные гнезда генераторов или в стандартные коаксиальные гнезда. При измерении напряжений от 1 до 100 в на пробник навинчивается внешний делитель 1 : 100.

Величину измеренного напряжения определяют по шкале в соответствии с положением переключателя «пределы».

Если необходимо визуально исследовать измеряемый сигнал, к гнезду «выход» можно подключить осциллограф.

Электронный осциллограф С1-5

Осциллограф С1-5 (рис. 0.4) при использовании его внутренних усилителей позволяет визуально наблюдать периодические электрические сигналы с частотой до 10 Мгц и импульсы длительностью от 0,1 до 3000 мксек.

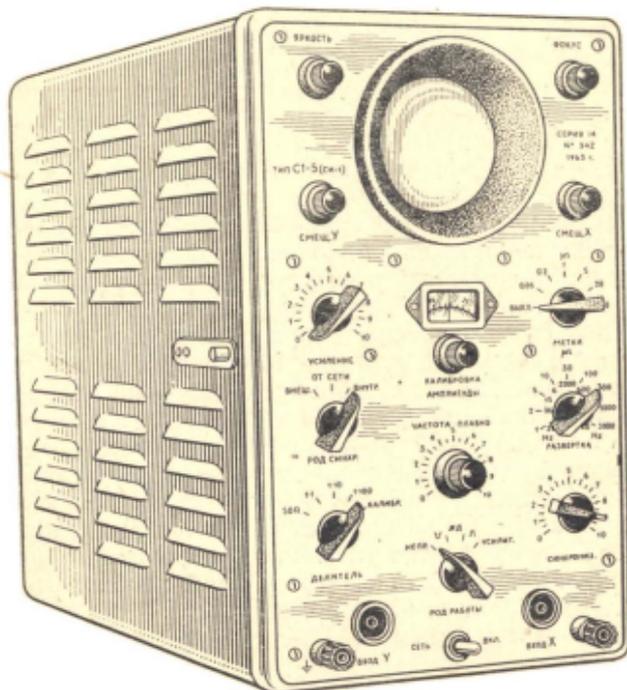


Рис. 0.4

Исследуемый сигнал подается через усилитель на вертикально отклоняющие пластины электроннолучевой трубки. На горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение развертки, вырабатываемое внутренним генератором. В результате воздействия этих двух напряжений на электронный луч, на экране в том или ином масштабе воспроизводится осциллограмма исследуемого напряжения.

Масштаб изображения по вертикали зависит от величины усиления вертикального усилителя и положения переключателя входного делителя, а по горизонтали — от установленной частоты развертки.

Для получения неподвижного изображения на экране необходимо синхронизировать частоту развертки с частотой исследуемо-

го сигнала, т. е. добиться либо равенства, либо кратности этих частот.

Максимальная чувствительность осциллографа по вертикальному каналу усиления — 250 мм/в.

Активная составляющая входного сопротивления вертикального усилителя не менее 500 ком, параллельно с входной емкостью порядка 50 пф.

Подключение осциллографа к исследуемой схеме обычно производится коаксиальным кабелем, экранирующая оболочка которого устраняет влияние паразитных электрических полей и рук оператора. С учетом емкости кабеля, входная емкость осциллографа может составить 80—100 пф.

Внесение такой значительной емкости в исследуемую схему окажет существенное влияние на ее режим, что необходимо учитывать при количественной оценке результатов измерений.

Для уменьшения влияния входной емкости осциллографа, его кабель можно подключать к схеме через резистор с сопротивлением 39—51 ком.

Если допускает уровень напряжения, для еще большего уменьшения входной емкости (до 10—15 пф), можно использовать подключение кабеля через широкополосный делитель, образованный параллельным соединением резистора с сопротивлением 9 Мом и подстроечного конденсатора емкостью 4—15 пф. Последний необходим для корректировки формы частотной характеристики делителя в требуемых пределах при калибровке. Включение такой цепочки вызывает ослабление входного сигнала, которое компенсируется имеющимся запасом по усилению.

При подключении осциллографа к схеме необходимо следить, чтобы к клемме «Земля» была присоединена точка схемы, имеющая нулевой (или наименьший) переменный потенциал относительно земли.

Получение изображения исследуемого сигнала на экране осциллографа С1-5 производится в следующем порядке:

1. Включить вилку шнура питания в сеть переменного тока.
2. Установить тумблер «Сеть» в положение «Вкл.». (При этом переведя переключатель «Делитель» в положение «Калибр», можно убедиться по освещению шкалы, что прибор включен.)
3. Дать прибору прогреться 2—3 мин.
4. Поставить переключатель «Род работы» в положение «Нспр.» и убедиться в наличии развертки, т. е. яркой поперечной линии на экране. При отсутствии линии на экране вероятнее всего предположить, что она смещена за его пределы и может быть возвращена на экран при помощи ручек «Смещ. X» и «Смещ. Y».
5. Регулировкой ручек «Смещ. X» и «Смещ. Y» установить правильное вертикальное и горизонтальное положение линии развертки.

6. Регулировкой ручек «Яркость» и «Фокус» обеспечить наилучшую четкость линии развертки.

7. Поставить переключатель «Род синхр.» в положение «Внутр.».

8. Поставить переключатель «Метки» в положение «Выкл.».

9. Ручку «Синхрониз.» вывести почти в крайнее левое положение.

10. Переключатель «Делитель» поставить в положение «1 : 1».

11. Подключить исследуемое напряжение к гнезду «Вход У». При этом следует помнить, что максимальное напряжение, которое можно подать на вход осциллографа, составляет 200 в по амплитудному значению.

12. Ручку «Усиление» ввести вправо до упора, а переключатель «Делитель» установить в одно из положений «1 : 1», «1 : 10» или «1 : 100», при котором изображение не выходит за пределы экрана (или выходит незначительно). Затем регулировкой ручки «Усиление» установить нужный размер изображения.

Чтобы не перегрузить усилитель, величина изображения синусоидального напряжения при максимальном положении ручки «Усиление» не должна превышать 50 мм, а импульсного — 25 мм.

13. Переключателем «Развертка» и ручкой «Частота плавно» добиться получения на экране двух-трех периодов исследуемого напряжения.

14. Регулировкой ручек «Частота плавно» и «Синхрониз.» получить неподвижное изображение на экране.

Практическое задание

1. Изучить расположение и назначение основных органов управления генератора, вольтметра и осциллографа.

2. Зарисовать эскизы передних панелей изучаемых приборов и обозначить на них названия рассмотренных органов управления.

3. Произвести включение приборов в сеть и освоить основные операции по их использованию:

а) включить приборы в сеть и прогреть их в течение 3—5 мин. Установить на нуль стрелку измерительного прибора генератора. Установить на нуль стрелку лампового вольтметра;

б) установить на выходе ГСС напряжение заданной амплитуды и частоты, измерить его ламповым вольтметром, затем подать на осциллограф и получить на экране осциллографа неподвижное изображение (осциллограмму);

в) определить цену делений нониусной шкалы верньера генератора вблизи заданной частоты.

4. Определить величину входного сопротивления осциллографа.

Для этого между источником синусоидального напряжения с частотой 50 гц (например, понижающим трансформатором, включенным в сеть) и входом «У» осциллографа последовательно включить градуированный переменный резистор величиной в несколько мегом (рис. 0.5, а). Резистор выводится на нуль и в этом положении измеряется величина изображения по вертикали

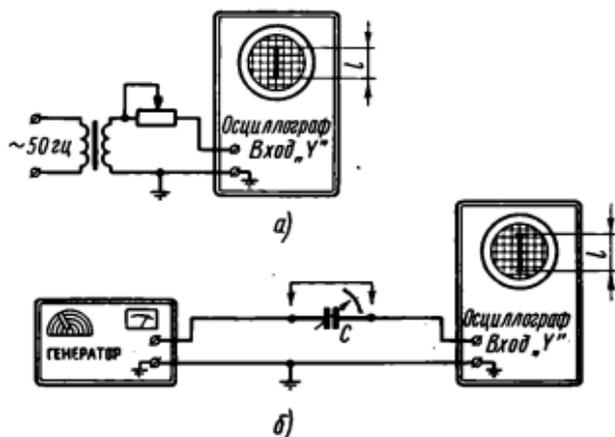


Рис. 0.5

на экране (l). Затем увеличивается сопротивление резистора до тех пор, пока размер изображения на экране не уменьшится вдвое. При этом сопротивление резистора будет равно активной составляющей входного сопротивления осциллографа.

5. Определить величину входной емкости осциллографа. Для приближенной оценки величины входной емкости осциллографа выход генератора соединить со входом «У» осциллографа через градуированный конденсатор переменной емкости (рис. 0.5, б). От генератора подать напряжение с частотой порядка 100—150 кГц и при закороченном конденсаторе, изменяя выходное напряжение генератора и усиление осциллографа, установить на экране удобный для измерения размер изображения (l). Затем удалить закорачивающую перемычку и изменять емкость конденсатора до получения на экране половины первоначального изображения. При этом величина емкости конденсатора будет равна входной емкости осциллографа.

Исследование свободных колебаний в одиночном контуре

Цель работы — изучение процессов, возникающих в контуре при его возбуждении, выяснение влияния параметров контура на характер процессов; ознакомление с методикой экспериментального определения параметров контура.

Оборудование рабочего места

1. Осциллограф С1-5 (1 шт.)
2. Набор элементов для макета колебательного контура

Краткие теоретические сведения

Свободные колебания возникают при переходных процессах в колебательном контуре, связанных с любым резким изменением его режима (включением, выключением и т. п.).

Физическая сущность процесса свободных колебаний в контуре заключается в периодическом обмене энергией между электрическим полем конденсатора и магнитным полем катушки. Вследствие этого, даже при отсутствии внешнего источника переменной э. д. с. в контуре возникает переменный ток, а на элементах контура образуется падение переменного напряжения. Для возбуждения в контуре свободных колебаний достаточно сообщить запас энергии любому реактивному элементу контура.

Если бы контур состоял из одних реактивных элементов, то электрическая энергия, сообщенная какому-либо элементу, например конденсатору, целиком переходила бы в энергию магнитного поля катушки, потом наоборот и т. д. Амплитуда колебаний в контуре в этом случае оставалась бы неизменной с течением времени, т. е. свободные колебания оказались бы незатухающими.

Фактически в реальных контурах всегда имеются потери энергии, характеризующиеся некоторым активным сопротивлением. Поэтому в реальном контуре амплитуда колебаний с течением времени убывает по экспоненциальному закону с постоянной времени (рис. 1.1):

$$\tau = \frac{2L}{r},$$

где L — индуктивность контура, мкГн; r — активное сопротивление контура, Ом; τ — постоянная времени, мксек.

Можно считать, что свободные колебания практически затухают через время $t_{\text{зт}} = (3 \div 5)\tau$ после момента их возбуждения.

При увеличении активного сопротивления контура r продолжительность процесса затухания колебаний уменьшается. Наконец, сопротивление может оказаться так велико, что энергия, сообщенная контуру, израсходуется, прежде чем ток в контуре изменит свое направление, т. е. прежде чем совершится даже одно единственное полное колебание.

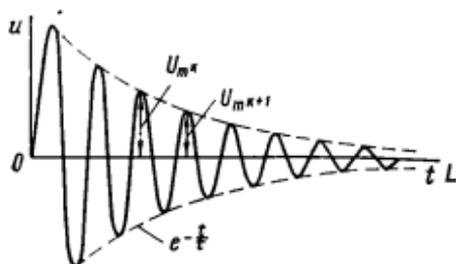


Рис. 1.1

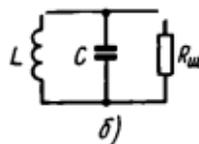


Рис. 1.2

В этом случае контур потеряет свои колебательные свойства. Такой режим работы называется аperiодическим.

Условие аperiодического режима

$$r \geq 2\rho.$$

Здесь ρ — волновое сопротивление контура (ом), равное

$$\rho = 1000 \sqrt{\frac{L}{c}},$$

где L — индуктивность катушки контура, мкГн; c — емкость конденсатора контура, пф.

У большинства контуров, встречающихся на практике, активное сопротивление во много раз меньше волнового и для получения аperiодического процесса необходимо увеличить его активное сопротивление, включая внутрь контура добавочное сопротивление (рис. 1.2, а). Увеличить активное сопротивление контура можно не только включением дополнительного сопротивления последовательно с элементами контура, но и шунтируя контур добавочным сопротивлением $R_{ш}$ (рис. 1.2, б). В этом случае условием аperiодического процесса является выполнение неравенства

$$R_{ш} \leq 0,5\rho.$$

Количественно оценивать степень затухания колебаний, т. е. судить о качестве колебательного контура можно с помощью следующих показателей.

1. Логарифмический декремент затухания (δ) характеризует относительное уменьшение соседних амплитуд, отделенных одним периодом, и определяется по формуле

$$\delta = 2,3 \lg \frac{U_{mk}}{U_{m \ k+1}},$$

где U_{mk} и $U_{m \ k+1}$ — амплитуды соседних колебаний (см. рис. 1.1).

В случае, если качество контура высокое и амплитуды соседних колебаний отличаются менее чем на 1%, можно для вычисления логарифмического декремента пользоваться приближенной формулой

$$\delta \approx \frac{U_{mk} - U_{m \ k+1}}{U_{mk}}.$$

2. Добротность контура (Q) характеризует отношение запаса реактивной энергии в контуре к убыли энергии за время одного периода и определяется по формуле

$$Q = \frac{P}{r}.$$

В радиотехнике используется также величина, обратная добротности, называемая затуханием контура (d),

$$d = \frac{1}{Q}.$$

Добротность и логарифмический декремент затухания связаны между собой соотношением

$$Q = \frac{\pi}{\delta}.$$

Вопросы для самопроверки

1. В каком случае свободные колебания являлись бы незатухающими?
2. Что является причиной затухания свободных колебаний в реальных контурах?
3. По какому закону убывает амплитуда свободных колебаний?
4. Как влияет величина активного сопротивления контура на характер свободных колебаний?
5. Как влияет величина емкости конденсатора на характер свободных колебаний?
6. Каким образом можно получить аperiodический процесс в контуре?
7. Какими параметрами оценивается качество контура? Связь между ними.
8. Как по осциллограмме свободных колебаний определить логарифмический декремент затухания и добротность контура?

Описание установки и методические указания по выполнению лабораторной работы

На рабочем месте имеются катушка индуктивности и конденсатор, из которых собирается исследуемый колебательный контур, имеется также осциллограф для наблюдения процесса свободных колебаний (рис. 1.3).

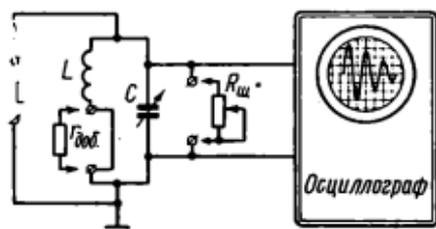


Рис. 1.3

Возбуждение свободных колебаний в исследуемом контуре производится импульсами, получаемыми либо от отдельного импульсного генератора, либо вырабатываемыми блоком развертки того же осциллографа. В последнем случае эти импульсы

через переходной конденсатор, вмонтированный в соединительный провод, снимаются с выхода усилителя «Х», расположенного на задней панели прибора. Монтажная схема соединений изображена на рис. 1.4.

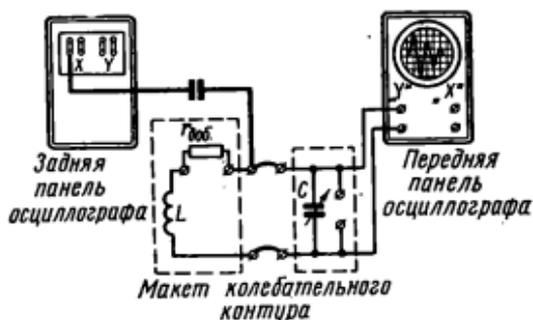


Рис. 1.4

Логарифмический декремент затухания определяется измерением амплитуд соседних колебаний на экране осциллографа. Для повышения точности логарифмический декремент определяется дважды и результат находится как среднее арифметическое. Измерение рекомендуется проводить следующим образом: наложив полоску бумаги на экран осциллографа, сделать на ней остро отточенным карандашом отметки, соответствующие трем соседним удвоенным амплитудам A_1 , A_2 , A_3 (рис. 1.5). После чего с по-

мощью линейки или миллиметровой бумаги измеряется длина отмеченных отрезков в миллиметрах.

Для исследований влияния емкости контура на характер свободных колебаний используется конденсатор переменной емкости. Зависимость его емкости от угла поворота приводится на градуировочной кривой (см. приложение II). При определении величины емкости контура необходимо учесть, что параллельно емкости конденсатора включается еще и входная емкость осциллографа.

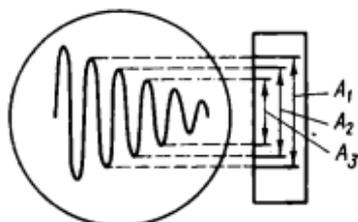


Рис. 1.5

Для исследования влияния активного сопротивления контура на свободные колебания к контуру подключаются добавочные резисторы. Подключать их можно как последовательно с элементами контура, так и параллельно им.

Для более точного подбора величины шунтирующего сопротивления прилагается градуированный переменный резистор.

Содержание работы

Расчетная часть

Исходные данные для расчетов в этой и последующих работах взять из приложения I.

1. Рассчитать частоту свободных колебаний, волновое сопротивление, добротность, затухание и постоянную времени для четырех заданных вариантов контуров. Результаты расчета свести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п.п.	Исходные данные				Результаты расчета					
	L , мкГн	C , пФ	r , Ом	$r_{\text{доб}}$, Ом	f_0 , кГц	$r+r_{\text{доб}}$, Ом	R , Ом	Q	d	τ , мксек
1										
2										
3										
4										

2. Рассчитать, какое сопротивление $R_{ш}$ надо включить параллельно контуру с заданными индуктивностью и емкостью, чтобы оно оказало такое же действие, как заданное сопротивление $r_{доб}$, включенное последовательно с элементами контура.
3. Рассчитать, какое сопротивление $r_{доб}$ надо включить последовательно с элементами заданного колебательного контура, чтобы процесс стал аperiodическим.

Экспериментальная часть

4. Собрать на рабочем месте схему установки (рис. 1.4) и, изменяя элементы колебательного контура в соответствии с исходными данными расчета (табл. 1.1), получить на экране осциллографа кривые свободных колебаний. Для каждого случая определить логарифмический декремент затухания и зарисовать форму осциллограммы.
Результаты измерений и расчетов свести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

№ п/п	Исходные данные			Результаты измерений					
	$L, \text{ мкГн}$	$C, \text{ пФ}$	$r_{доб}, \text{ Ом}$	A_1	A_2	A_3	θ_1	θ_2	$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$
1									
2									
3									
4									

5. Включить параллельно контуру с элементами, соответствующими исходным данным п. 2, рассчитанное $R_{ш}$ и определить логарифмический декремент затухания.
6. Включить последовательно с элементами контура соответствующими данным п.3, рассчитанное добавочное сопротивление для получения аperiodического режима. Зарисовать форму осциллограммы.

Обработка результатов эксперимента

7. По данным п.4 определить добротности контуров и сравнить их с расчетными значениями. Результаты свести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

№ п.п.	Исходные данные			Из расчета	Из эксперимента
	L, мкГн	C, пФ	r _{доб} , Ом	$Q = \frac{P}{r+r_{доб}}$	$Q = \frac{\pi}{\delta}$
1					
2					
3					
4					

8. Сделать выводы о влиянии активного сопротивления и емкости контура на характер свободных колебаний.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. Ч. 1, изд-во «Советское радио», М., 1968, стр. 71—83.
2. Калашников А. М. и Степук Я. В. Основы радиотехники и радиолокации. Колебательные системы. Воениздат, М., 1965, стр. 30—42.
3. Изюмов Н. М. Основы радиотехники. Изд-во «Связь», М., 1965, стр. 34—50.

Примечание. Данные учебные пособия указаны и в остальных лабораторных работах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Последовательный контур при гармоническом воздействии

Цель работы — изучение резонансных свойств последовательного контура и влияние его элементов на амплитудно-частотную характеристику; ознакомление с методикой экспериментального определения основных параметров контура.

Оборудование рабочего места

1. Генератор ВЧ Г4-42 (1 шт.).
2. Ламповый вольтметр ВЗ-13 (1 шт.).
3. Набор элементов для макета колебательного контура.

Краткие теоретические сведения

Последовательным колебательным контуром называется контур, состоящий из катушки индуктивности

и конденсатора, соединенных последовательно по отношению к источнику питания. Электрическая схема такой цепи представлена на рис. 2.1.

Наибольший интерес для практики представляют резонансные свойства контура. Явление резонанса наступает при совпадении частоты источника питания с частотой свободных колебаний контура. При этом реактивные сопротивления катушки и конденсатора оказываются равными по абсолютной величине и, следовательно, полное входное реактивное сопротивление контура обращается в нуль. Таким образом, на частоте резонанса контур представляет

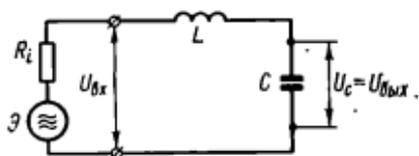


Рис. 2.1

собой для источника наименьшее и чисто активное сопротивление. В соответствии с этим, ток в контуре при резонансе будет максимальным.

Напряжение на конденсаторе в момент резонанса также будет наибольшим и будет превышать вводимое в контур напряжение в Q раз, где Q — добротность контура

$$U_{C \text{ рез}} = QU_{\text{вх}}$$

Таким образом, коэффициент передачи напряжения $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ при резонансе равен добротности контура $K_{\text{рез}} = Q$. На частотах, отличных от частоты резонанса, коэффициент передачи будет уменьшаться.

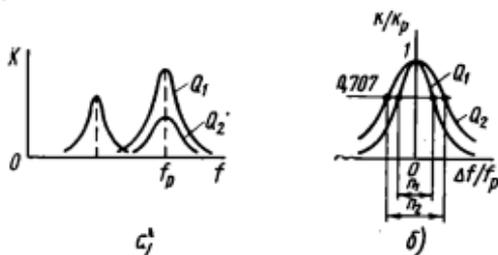


Рис. 2.2

Зависимость коэффициента передачи от частоты источника питания называется амплитудно-частотной характеристикой контура (АЧХ). Если входное напряжение поддерживать постоянным, то коэффициент передачи будет пропорционален выходному напряжению, т. е. напряжению на конденсаторе контура U_C . В этом случае зависимость напряжения, снимаемого с контура, от частоты будет представлять собой АЧХ контура. Вид таких характеристик показан на рис. 2.2, а.

Для сравнения частотных свойств различных колебательных контуров удобно строить АЧХ в относительных масштабах (нормирование АЧХ). При этом по оси ординат откладывается отношение $\frac{K}{K_{рез}} = \frac{U_C}{U_{C_{рез}}}$, а по оси абсцисс — относительная расстройка по частоте: $\frac{\Delta f}{f_{рез}} = \frac{f - f_{рез}}{f_{рез}}$. Вид нормированных АЧХ показан на рис. 2.2, б.

Частотные искажения, вносимые контуром в сигнал, оцениваются полосой пропускания контура. Под полосой пропускания понимается интервал частот, в пределах которого частотные искажения не превышают заданного значения. Наиболее часто таким значением является уровень — 3 дБ, т. е. $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ от наи-

большей величины. При этом полоса пропускания будет отсчитываться между частотами, на которых коэффициент передачи или выходное напряжение составляет 0,707 от резонансного значения. Полоса пропускания Π связана с параметрами контура зависимостью

$$\Pi = \frac{f_{рез}}{Q}.$$

По экспериментально снятой АЧХ контура, определив резонансную частоту и полосу пропускания, легко вычислить добротность контура, как

$$Q = \frac{f_{рез}}{\Pi}.$$

Явление резонанса можно получить, изменяя не только частоту источника питания, но и частоту свободных колебаний контура. Например, изменяя емкость конденсатора контура. Сняв зависимость напряжения на конденсаторе от его емкости (рис. 2.3), можно определить величину добротности контура по формуле

$$Q = \frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1} = \frac{C_0}{\Delta C},$$

где C_1 и C_2 — значения емкостей, при которых напряжение на конденсаторе контура уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с максимальным напряжением при емкости C_0 .

При перестройке частоты контура конденсатором переменной емкости представляет интерес выяснить зависимость его добротности от частоты настройки.

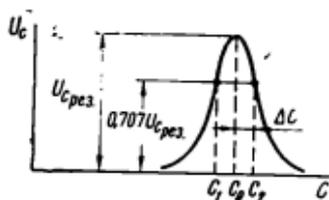


Рис. 2.3

Для выяснения этой зависимости воспользуемся той формулой для добротности, в которую входит меньше величин, зависящих от частоты

$$Q = \frac{\omega_{рез}L}{r}.$$

Если бы активное сопротивление контура не зависело от частоты, то добротность контура линейно возрастала бы с ростом частоты. Однако приходится учитывать, что и активное сопротивление контура также зависит от частоты.

Активное сопротивление контура состоит из двух слагаемых. Одно из них обусловлено потерями в проводе катушки индуктивности и соединительных проводах, а второе определяется диэлектрическими потерями в конденсаторе и каркасе катушки.

Активное сопротивление проводов из-за явления поверхностного эффекта возрастает прямо пропорционально корню квадратному из частоты. Диэлектрические потери растут пропорционально квадрату частоты.

Таким образом, результирующее сопротивление потерь в контуре растет с частотой. Обычно оба вида потерь равноценны, поэтому приближенно можно считать, что активное сопротивление контура линейно растет с частотой.

Отсюда следует, что добротность колебательного контура, настраиваемого емкостью, в первом приближении не зависит от частоты.

Однако на практике могут встретиться случаи, когда преобладающими окажутся либо диэлектрические потери, либо потери в проводах. В первом случае добротность уменьшается с увеличением частоты, а во втором случае — увеличивается.

Вопросы для самопроверки

1. Какое явление в колебательном контуре называется резонансом?
2. Каким образом можно осуществить явление резонанса в контуре?
3. Как регистрируется наступление резонанса в последовательном контуре?
4. Какой коэффициент передачи напряжения у последовательного контура при резонансе?
5. Какая зависимость называется амплитудно-частотной характеристикой последовательного контура?
6. Какие величины откладываются по осям при изображении АЧХ в абсолютном и относительном масштабах?
7. В чем удобство относительного масштаба по сравнению с абсолютным?
8. Как изменится АЧХ контура при введении в него последовательного добавочного сопротивления при изображении АЧХ: а) в относительном и б) в абсолютном масштабах?
9. Что называется полосой пропускания контура?
10. От каких параметров зависит величина полосы пропускания контура?
11. Как определить добротность контура по его АЧХ?

12. Как можно экспериментально определить добротность контура, не снимая АЧХ, а взяв всего один отсчет напряжения по вольтметру?
13. Как влияет добротность контура на его избирательные свойства?
14. Как изменится добротность контура при перестройке его конденсатором переменной емкости?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Принципиальная схема установки изображена на рис. 2.4.

В качестве источника входного сигнала применяется генератор ВЧ Г4-42, а выходное напряжение измеряется на конденсаторе контура ламповым вольтметром ВЗ-13.

Чтобы снятые частотные характеристики контура определялись только его параметрами и не зависели от величины внутреннего сопротивления источника сигнала, необходимо напряжение на входе контура поддерживать постоянным (т. е. $U_{вх} = \text{const}$ на рис. 2.1). Удобно

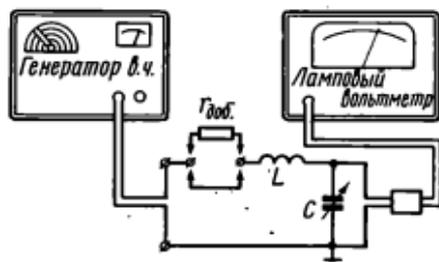


Рис. 2.4

величину входного напряжения установить равной, например, 0,1 в и поддерживать на этом уровне при всех измерениях. Для этого вольтметр ВЗ-13 подключается к клемме «х0,1» выходного шланга Г4-42. Лимб плавного аттенюатора ставится на цифру «100» и ручкой «Контроль уровня К» добиваемся, чтобы вольтметр ВЗ-13 показал 0,1 в. Запоминаем положение стрелки на измерительном приборе генератора и на протяжении всей лабораторной работы будем следить, чтобы она находилась в отмеченном положении.

Если при регулировке частоты генератора будет изменяться и его выходное напряжение, то каждый раз необходимо восстанавливать исходный уровень ручкой «Контроль уровня К».

Влиянием активной части входного сопротивления вольтметра ВЗ-13 на параметры исследуемого контура можно пренебречь, а входную емкость следует учитывать при пользовании градуировочной кривой конденсатора.

Для снятия АЧХ изменяется частота генератора и производится отсчет величины напряжения на конденсаторе. Вблизи резонанса отсчетные точки следует брать чаще и как можно более тщательно.

В случае необходимости (очень острой кривой) отсчет частоты производить с помощью нониуса.

Для исследования влияния активного сопротивления на форму АЧХ в контур включается дополнительное сопротивление.

Явление резонанса может быть получено не только при изменении частоты генератора и постоянных параметрах контура, но и при постоянной частоте генератора и настройке контура на эту частоту. Для того чтобы установить это в работе снимается зависимость напряжения на конденсаторе контура от величины его емкости при неизменных частоте и амплитуде напряжения

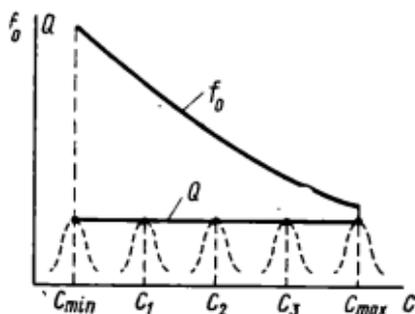


Рис. 2.5

генератора. Величина емкости конденсатора определяется из градуировочной кривой по углу поворота ротора конденсатора (приложение II).

Для исследования влияния емкости контура на его добротность и резонансную частоту снимается зависимость этих параметров от изменения емкости конденсатора контура. Добротность при этом определяется мето-

дом непосредственного отсчета по ламповому вольтметру, так как при входном напряжении, равном 0,1 в, выходное напряжение при резонансе, увеличенное в 10 раз, численно равно добротности контура.

Эта часть работы проводится следующим образом: установив выбранное значение емкости, производим настройку в резонанс, изменяя частоту генератора. Добившись резонанса, записываем значение частоты генератора и показания вольтметра. Всего достаточно взять 4—5 отсчетных точек, при изменении емкости контура от минимальной до максимальной. Примерный характер снимаемых зависимостей изображен на рис. 2.5.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным значениям элементов контуров рассчитать частоту свободных колебаний, добротность и полосу пропускания для случаев: а) без включения добавочного сопротивления; б) с включением последовательно с элементами контура заданного добавочного сопротивления $\Gamma_{доб}$. Результаты расчета свести в табл. 2.1.
2. Для рассчитанного в п. 1 контура без добавочного сопротивления построить АЧХ в относительном масштабе. Результаты расчета свести в табл. 2.2.

Таблица 2.1

№ п/п	Исходные данные	Результаты расчета			
	$L = \dots C = \dots r =$	$f_{рез},$ кГц	$r + r_{доб},$ Ом	Q	$\Pi,$ кГц
а)	без $r_{доб}$				
б)	с $r_{доб}$				

Таблица 2.2

$\frac{\Delta f}{f_{рез}}, \%$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	10	20
$a = 2 \frac{\Delta f}{f_{рез}} Q$										
$\Phi_{вх} = \arctg a$										
$K/K_{рез} = \cos \Phi_{вх}$										

Экспериментальная часть

3. Собрать на рабочем месте, рассчитанный в п. 1, колебательный контур и снять зависимость напряжения на конденсаторе от частоты источника сигнала для случаев: а) без добавочного сопротивления; б) с добавочным сопротивлением.

Показания приборов записать в табл. 2.3..

Таблица 2.3

Исходные данные	Результаты измерений			
$U_{вх} = 0,1 \text{ в}$	а) без $r_{доб}$		б) с $r_{доб} = \dots$	
$L = \dots$	$f, \text{ кГц}$	$U_C, \text{ в}$	$f, \text{ кГц}$	$U_C, \text{ в}$
$C = \dots$				

4. Для заданного (п. 1, случай б) контура с добавочным сопротивлением снять зависимость напряжения на конденсаторе контура от его емкости при постоянной частоте гене-

ратора. Частоту генератора (f_r) установить равной резонансной частоте контура, полученной в п. 3.
Показания приборов записать в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Исходные данные	Результаты измерений		
	$C, \text{ град}$	$C, \text{ пф}$	$U_C, \text{ в}$
$U_{\text{нх}}=0,1 \text{ в}, f_r=...$			
$L=... r_{\text{доб}}=...$			

5. Для рассчитанного контура без добавочного сопротивления (п. 1, случай а) снять зависимость добротности и резонансной частоты от емкости конденсатора контура.
Показания приборов записать в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Исходные данные	Результаты измерений			
	$C, \text{ град}$	$C, \text{ пф}$	$f_{\text{рез}}, \text{ кГц}$	$Q = 10U_C$
$U_{\text{нх}}=0,1 \text{ в}, r_{\text{доб}}=0$				
$L=...$				

Обработка результатов эксперимента

6. По данным п. 3 построить АЧХ в абсолютном и относительном масштабах.
Расчеты, необходимые для построения АЧХ в относительных масштабах, свести в табл. 2.6.

Таблица 2.6

$f, \text{ кГц}$	$\Delta f = f - f_{\text{рез}}, \text{ кГц}$	$\Delta f / f_{\text{рез}}$	$U_C, \text{ в}$	$U_C / U_{C_{\text{рез}}}$

Характеристики в абсолютном масштабе для контура с добавочным сопротивлением и без него строятся на одном листе, а характеристики в относительном масштабе — на другом листе, где уже нанесена АЧХ, полученная расчетом в п. 2.

По построенным экспериментальным АЧХ определить полосу пропускания и добротность.

Необходимые построения выполняются прямо на графиках АЧХ и здесь же надписываются полученные результаты.

7. По данным п. 4 построить зависимость напряжения на конденсаторе от его емкости. По полученной кривой определить добротность контура.
8. Сравнить значения добротности контура, полученные расчетом и экспериментом, поместив данные в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Исходные данные	Из расчета	Из эксперимента		
$L = \dots C = \dots$	$Q = \frac{p}{r + r_{доб}}$	$Q = \frac{f_{рез}}{\Pi}$	$Q = 10U_{C_{рез}}$	$Q = \frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1}$
а) без $r_{доб}$				
б) с $r_{доб}$				

9. Сделать вывод о влиянии активного сопротивления контура на форму его АЧХ, на величину его добротности и полосы пропускания.
10. По данным п. 5 построить зависимость добротности контура и его резонансной частоты от емкости контура. Сделать вывод об изменении добротности при перестройке контура.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б., стр. 83—103.
2. Калашников А. М., стр. 43—58.
3. Изюмов Н. М., стр. 51—70.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование параллельного контура при гармоническом воздействии

Цель работы — изучение частотных свойств параллельного контура и влияния величины внутреннего сопротивления источника на его амплитудно-частотную характеристику; ознакомление с методикой экспериментального определения основных параметров схемы с параллельным контуром.

Оборудование рабочего места

1. Генератор ВЧ Г4-42 (1 шт.)
2. Ламповый вольтметр ВЗ-13 (1 шт.)

3. Лабораторный усилитель (1 шт.)

4. Набор элементов для макета колебательного контура.

Краткие теоретические сведения

Простейший параллельный контур представляет собой цепь, состоящую из катушки индуктивности и конденсатора, соединенных параллельно относительно источника питания (рис. 3.1).

При частоте источника э. д. с., совпадающей с частотой собственных колебаний контура (при условии малости потерь), в параллельном контуре наступает явление резонанса. При этом реактивные проводимости ветвей получают равными по абсолютному значению, а общая проводимость контура — малой и чисто активной. Следовательно, сопротивление контура — большим и тоже активным.

Таким образом, при резонансе параллельный контур представляет для источника наибольшее и притом чисто активное сопротивление ($Z_{\text{вх.рез}}$). Для случая полного включения контура (контур I вида) это сопротивление можно рассчитать по формуле

$$Z_{\text{вх.рез}}^I = \frac{\rho^2}{r} = \rho Q,$$

где ρ — волновое сопротивление контура; r — активное сопротивление контура.

При анализе частотных свойств параллельного контура необходимо учитывать влияние внутреннего сопротивления источника питания. Развиваемая генератором э. д. с. (\mathcal{E}), распределяется между его внутренним сопротивлением, которое можно считать не зависящим от частоты, и колебательным контуром. От соотношения сопротивления контура при резонансе ($Z_{\text{вх.рез}}$) и внутреннего сопротивления источника (R_i) зависят форма АЧХ и, следовательно, избирательные свойства схемы: при $Z_{\text{вх.рез}} \ll R_i$ преобладает избирательность по напряжению, при $Z_{\text{вх.рез}} \gg R_i$ — избирательность по току.

На практике параллельный контур широко применяется в схемах резонансных усилителей и электронных генераторов. В подобных устройствах используются избирательные свойства схемы по напряжению, и, следовательно, источник э. д. с. должен обладать большим внутренним сопротивлением, значительно превосходящим сопротивление контура при резонансе. При этом, если рассматривать внутреннее сопротивление источника относительно контура, то его можно считать подключенным параллельно контуру и тем снижающим его добротность. На основа-

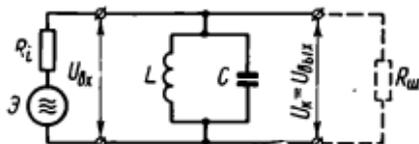


Рис. 3.1

нии этого вводится понятие добротности нагруженного контура (Q_n).

Помимо внутреннего сопротивления источника сигнала на избирательность схемы с параллельным контуром оказывает влияние и входное сопротивление цепи, следующей за контуром ($R_{ш}$ на рис. 3.1).

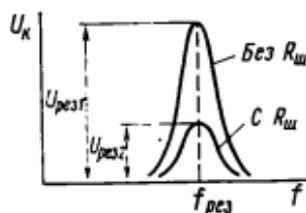


Рис. 3.2

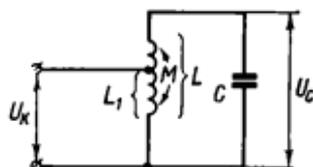


Рис. 3.3

С учетом указанных факторов добротность и полоса пропускания нагруженного контура могут быть определены по формулам:

$$Q_n = \frac{Q}{1 + \frac{Z_{вх.рез}}{R_i} + \frac{Z_{вх.рез}}{R_{ш}}}; \quad \Pi_n = \frac{f_{рез}}{Q} \left(1 + \frac{Z_{вх.рез}}{R_i} + \frac{Z_{вх.рез}}{R_{ш}} \right),$$

где Q — добротность ненагруженного контура; $f_{рез}$ — частота резонанса.

Экспериментальным путем добротность нагруженного контура может быть определена по АЧХ, исходя из соотношения

$$Q_n = \frac{f_{рез}}{\Pi_n}.$$

Если включить параллельно контуру известное активное сопротивление $R_{ш}$, то, измерив при резонансе напряжение на контуре с $R_{ш}$ ($U_{рез2}$) и без $R_{ш}$ ($U_{рез1}$) (рис. 3.2), можно вычислить величину резонансного сопротивления контура по формуле

$$Z_{вх.рез} = R_{ш} \frac{U_{рез1} - U_{рез2}}{U_{рез2}}.$$

В радиоаппаратуре нередко применяются и более сложные схемы включения источника э. д. с. к параллельному контуру. Например, широко используется случай, когда источник подключается лишь к некоторой части витков катушки контура. Такое включение называется неполным включением контура или контуром II вида (рис. 3.3). Сопротивление контура при резонансе в

этом случае можно определить по формуле

$$Z_{\text{вх.рез}}^{II} = p^2 Z_{\text{вх.рез}}^I = p^2 p Q,$$

где p — коэффициент включения.

С учетом взаимной индукции между частями катушки коэффициент включения определяется по формуле

$$p = \frac{L_1 + M}{L}.$$

В условиях эксперимента величину коэффициента включения можно определить, измерив при резонансе напряжения на всем контуре U_K и на конденсаторе контура U_C (рис. 3.3) из соотношения

$$p = \frac{U_{\text{к.рез}}}{U_{\text{С рез}}}.$$

Коэффициент включения всегда меньше единицы. Следовательно, резонансное сопротивление контура II вида всегда меньше, чем контура I вида. Резонансная же частота контура при этом не изменяется. Такой удобный способ изменения входного сопротивления параллельного контура при неизменной его настройке, позволяет при использовании параллельного контура в качестве нагрузки усилителя очень легко обеспечивать наиболее выгоднейшее соотношение между нагрузкой и внутренним сопротивлением усилительного элемента.

Кроме того, при неполном включении контура ослабляется шунтирующее действие внутреннего сопротивления источника сигнала на контур, в результате чего повышается добротность нагруженного контура, т. е. улучшаются его избирательные свойства.

Вопросы для самопроверки

1. Какая цепь называется параллельным контуром?
2. Какое явление в цепи параллельного контура носит название резонанса токов?
3. Как можно зарегистрировать наступление явления резонанса в параллельном контуре?
4. В каких случаях настройку параллельного контура удобнее производить по амперметру, включенному в цепь источника, и в каких по вольтметру, подключенному к контуру?
5. Какое входное сопротивление (по характеру и величине) имеет реальный параллельный контур при резонансе?
6. Как влияет внутреннее сопротивление источника сигнала на форму амплитудно-частотной характеристики схемы с параллельным контуром?
7. Как зависят величина полосы пропускания и добротность схемы с параллельным контуром от величины внутреннего сопротивления источника сигнала?
8. Как экспериментально определить величину входного сопротивления контура при резонансе?

9. Как изменяется входное сопротивление параллельного контура при резонансе в зависимости от коэффициента включения?
10. Как экспериментально определить величину коэффициента включения?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

На рабочем месте из конденсатора переменной емкости и катушки индуктивности составляется колебательный контур, соответствующий данным проделанного расчета. Параметры катушки индуктивности и градуировочная кривая конденсатора указаны на макетах.

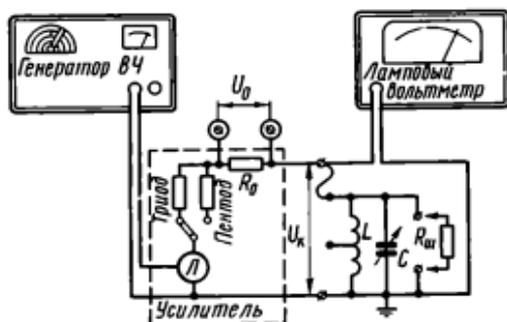


Рис. 3.4

Схема для исследования параллельного контура показана на рис. 3.4. Питание контура осуществляется от усилителя высокой частоты, на вход которого подается напряжение от генератора высокой частоты Г4-42. Усилитель показан на схеме в виде прямоугольника из пунктирных линий. Лампа усилителя условно обозначена буквой Л.

Для исследования влияния величины внутреннего сопротивления источника питания на избирательные свойства схемы предусмотрена возможность переключения лампы усилителя на работу либо в пентодном, либо в триодном режиме. Кроме того, имеется возможность включения резистора $R_{ш}$ параллельно контуру, что имитирует влияние входного сопротивления последующей цепи, а также позволяет экспериментально определить величину входного сопротивления контура при резонансе.

Катушка индуктивности имеет отвод от средней точки, что позволяет произвести включение контура так, чтобы образовался контур второго вида.

Для измерения тока, потребляемого от источника питания, на выходе усилителя включен калиброванный резистор $R_0 = 1 \text{ ком}$. Измерив ламповым вольтметром падение напряжения на этом

резисторе U_0 , можно по закону Ома найти величину питающего тока

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} = \frac{U_0}{1}, \text{ ма.}$$

Ввиду того, что при пентодном включении лампы внутреннее сопротивление лампы очень велико и $R_i \gg Z_{\text{вх.рез}}$, сопротивление всей цепи определяется только величиной внутреннего сопротивления усилителя и от частоты практически не зависит. Поэтому при изменении частоты питающий ток I_0 остается неизменным и для его определения достаточно измерить напряжение U_0 один раз, например, на резонансной частоте.

При снятии всех амплитудно-частотных характеристик выходные напряжение генератора следует поддерживать постоянным и равным 1 в. При выполнении этого требования, форма АЧХ будет соответствовать форме зависимости выходного напряжения, снимаемого с контура, от частоты генератора.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным значениям элементов схемы с параллельным контуром рассчитать частоту свободных колебаний и резонансное сопротивление контура, а также добротность и полосу пропускания нагруженного контура для следующих случаев:

1) контур I вида. Усилитель в триодном включении;

2) контур I вида. Усилитель в пентодном включении;

3) контур I вида. Усилитель в пентодном включении. Включено $R_{ш}$;

4) контур II вида. Коэффициент включения $\rho = 0,5$. Усилитель в пентодном включении.

Результаты расчета свести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Исходные данные						Результаты расчета			
	L , мкГн	C , пФ	r , Ом	R_i' , ком	$R_{ш}'$, ком	ρ	$f_{\text{рез}}$, кГц	$Z_{\text{вх рез}}$, ком	Q_n	Π_n , кГц
1										
2										
3										
4										

Экспериментальная часть

2. Собрать на рабочем месте схему установки (рис. 3.4), согласно исходным данным сделанного в п. 1 расчета.

3. Снять зависимость напряжения на контуре от частоты генератора поочередно для 4 случаев, рассчитанных в п. 1. Результаты измерений записать в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Условия эксперимента:

$f, \text{кГц}$	$U_{\text{вых}}, \text{в}$	$\frac{\Delta f}{f_{\text{рез}}}$	$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.рез}}}$

4. Для 2, 3, 4 случаев (при пентодном включении усилителя) измерить падение напряжения на калиброванном сопротивлении U_0 при резонансе.
5. Для случая включения контура II вида измерить напряжение на конденсаторе контура при резонансе.

Обработка результатов эксперимента

6. По данным п. 3 построить АЧХ в абсолютном и относительном масштабе. Все кривые в абсолютном масштабе изобразить на одном листе, а все кривые в относительном масштабе на другом.
По построенным АЧХ определить резонансную частоту, добротность и полосу пропускания схемы с параллельным контуром. Соответствующие построения выполняются прямо на графиках АЧХ и здесь же надписываются полученные результаты.
Сравнить экспериментально определенные значения с расчетными.
7. По данным п. 4 определить ток, потребляемый от источника питания, для случаев пентодного включения усилителя. Воспользовавшись данными п. 3, определить величину модуля входного сопротивления контура на всех отсчетных значениях частот

$$|Z_{\text{вх}}| = \frac{U_{\text{к}}}{I_0}.$$

Построить на одном листе кривые изменения модуля входного сопротивления контура от относительной расстройки для 2, 3, 4 случаев.

Сравнить полученные значения входных сопротивлений при резонансе с расчетными.

8. По данным измерений в п. 3 для 2 и 3 случая определить величину входного сопротивления контура I вида при ре-

- зонансе. Сравнить полученную величину сопротивления с расчетными значениями.
9. По данным п. 5 определить величину коэффициента включения контура II вида. Сравнить полученную величину с исходным значением $p=0,5$.
 10. Сделать вывод о влиянии внутреннего сопротивления источника сигнала и сопротивления, шунтирующего контур, на форму АЧХ, на полосу пропускания и избирательные свойства схемы.
 11. Сделать вывод об изменении режима схемы при переходе от включения контура I вида к контуру II вида.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б., стр. 104—120.
2. Калашников А. М., стр. 64—83.
3. Изюмов Н. М., 78—106.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование прохождения амплитудно-модулированных колебаний через одиночный колебательный контур

Цель работы — исследование искажений АМ-сигналов при прохождении через колебательный контур; ознакомление с методикой измерения коэффициента модуляции.

Оборудование рабочего места

1. Генератор стандартных сигналов Г4-42 (1 шт.).
2. Генератор сигналов звуковых частот ГЗ-33 (1 шт.).
3. Осциллограф С1-5 (1 шт.).
4. Набор элементов колебательного контура.

Краткие теоретические сведения

В предыдущих лабораторных работах исследуемые цепи подвергались воздействию чисто гармонических колебаний высокой частоты. На практике редко приходится встречаться с прохождением подобных колебаний через контуры, ибо никакой информации, кроме факта своего присутствия, они не несут. Для передачи информации высокочастотные колебания модулируются передаваемым (управляющим) сигналом.

В данной работе исследуется прохождение через одиночный контур амплитудно-модулированных колебаний.

Амплитудно-модулированным (АМ) называется высокочастотное колебание, амплитуда которого изменяется во времени по закону управляющего сигнала.

Если управляющий сигнал представляет собой колебание одной частоты, то модулированные колебания называют тональными. Осциллограмма такого колебания с частотой f_0 , модулированного по амплитуде гармоническим сигналом с частотой F , показана на рис. 4.1, б.

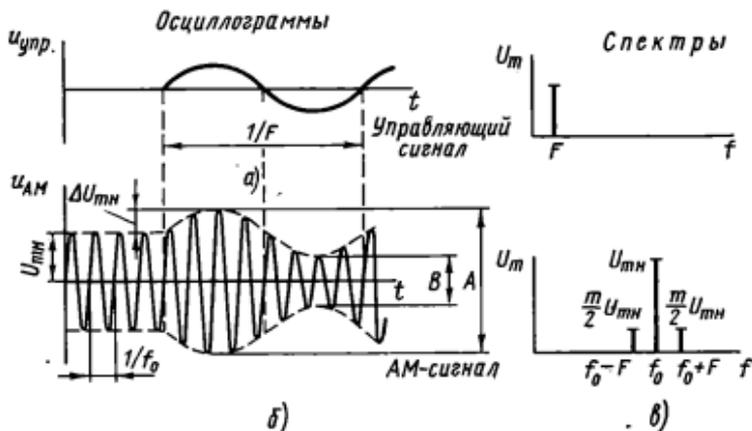


Рис. 4.1

На этом рисунке:

$U_{мн}$ — амплитуда немодулированного колебания с частотой f_0 ; $\Delta U_{мн}$ — амплитуда изменения огибающей высокочастотного сигнала; A — удвоенная максимальная амплитуда модулированных колебаний; B — удвоенная минимальная амплитуда модулированных колебаний.

Величина глубины тональной модуляции оценивается коэффициентом модуляции m , определяемым по формуле

$$m = \frac{\Delta U_{мн}}{U_{мн}} = \frac{A - B}{A + B}.$$

Для анализа искажений, возникающих в сигналах при прохождении через контур, удобно воспользоваться графическим изображением амплитудно-частотного спектра сигнала.

Спектр тонального АМ-колебания (рис. 4.1, в) состоит из трех высокочастотных составляющих: несущей частоты f_0 и двух боковых частот $f_0 + F$ и $f_0 - F$, симметрично расположенных относительно несущей. Чем выше частота управляющего сигнала F , тем дальше отстоят боковые частоты от несущей. Амплитуды составляющих боковых частот всегда одинаковы и равны $\frac{m}{2}U_{мн}$.

Всякое нарушение соотношения между амплитудами составляющих спектра приводит к искажениям сигнала.

Кроме амплитудно-частотного спектра сигнал характеризуется еще и фазово-частотным спектром. Однако фазовые искажения сигнала представляют для практики меньший интерес и рассматриваться в этой работе не будут.

Поскольку коэффициент передачи колебательного контура различен для различных частот, то, проходя через колебательный контур, составляющие спектра АМ-сигнала изменяются неодинаково.

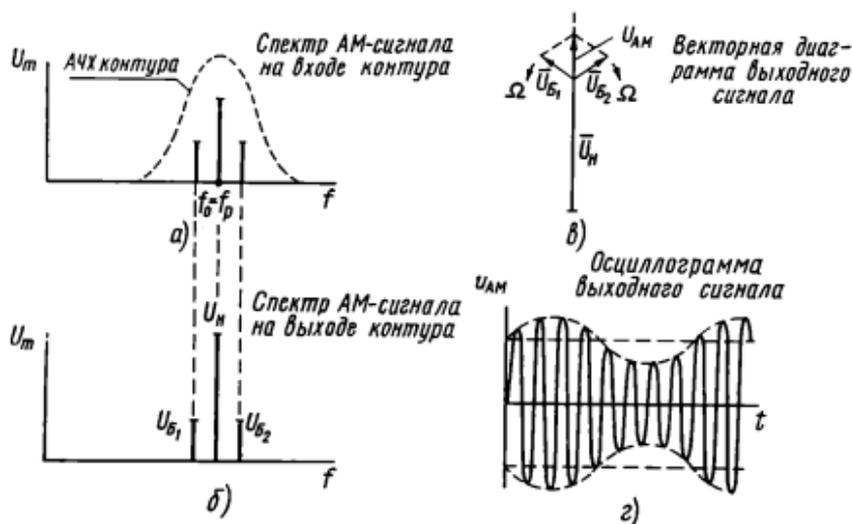


Рис. 4.2

Если контур настроен точно на несущую частоту сигнала (рис. 4.2, а), то боковые составляющие ослабляются в равной степени. Векторная диаграмма, соответствующая этому случаю, будет иметь вид, изображенный на рис. 4.2, б, из которого видно, что конец результирующего вектора по-прежнему перемещается вдоль вектора составляющей несущей частоты. При этом форма огибающей модулированного колебания не нарушится, но из-за изменения соотношения амплитуд колебаний боковых и несущей частот уменьшится глубина модуляции.

Фактор демодуляции D , показывающий во сколько раз уменьшилась глубина модуляции на выходе по сравнению со входом, может быть найден из уравнения АЧХ.

$$D = \frac{m_{\text{вых}}}{m_{\text{вх}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2F}{f_0} Q\right)^2}} .$$

Уменьшение глубины модуляции будет тем значительнее, чем больше добротность контура и чем выше частота управляющего сигнала. Если контур расстроен относительно несущей частоты (рис. 4.3, а), то колебания боковых частот получают разные изменения амплитуды и симметрия сигнала на выходе контура нарушается. На диаграмме рис. 4.3, в конец результирующего вектора колебания U_{AM} будет перемещаться по эллипсу. При

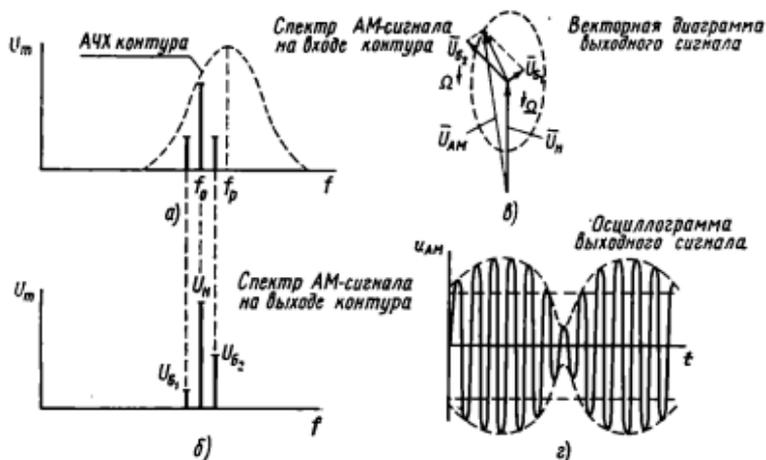


Рис. 4.3

этом, кроме изменения глубины модуляции, возникают искажения формы огибающей — она становится отличной от синусоидальной. Это приводит после детектирования к возникновению нелинейных искажений управляющего сигнала.

При расстроенном контуре возможно как уменьшение, так и увеличение глубины модуляции в зависимости от степени расстройки контура и частоты управляющего сигнала.

При модуляции сложным управляющим сигналом, состоящим из ряда гармонических составляющих, в спектре АМ-колебания каждой составляющей будет соответствовать пара боковых частот, расположенных симметрично относительно несущей. Амплитуды боковых составляющих будут связаны с амплитудой несущего колебания через парциальные (частные) коэффициенты модуляции.

При прохождении такого АМ-сигнала через настроенный контур амплитуды различных пар боковых частот будут ослабляться неодинаково, что вызовет различное уменьшение соответствующих им парциальных коэффициентов модуляции. В результате этого возникают частотные искажения сигнала. При этом

форма огибающей АМ-колебания на выходе контура хотя и будет отличаться от огибающей на входе, эти искажения огибающей не вызовут после детектирования нелинейных искажений, так как они не связаны с нарушением симметрии спектра АМ-колебания.

При прохождении того же АМ-сигнала через расстроенный контур произойдет изменение формы огибающей, приводящее к появлению после детектирования как частотных, так и нелинейных искажений управляющего сигнала.

Вопросы для самопроверки

1. Каким показателем оценивается глубина модуляции?
2. Какой вид имеют осциллограммы тональных АМ-колебаний при $m=25\%$, $m=50\%$, $m=100\%$?
3. Что представляет собой спектр АМ-колебания при тональной модуляции?
4. С чем связано изменение коэффициента модуляции при прохождении АМ-сигнала через колебательный контур?
5. Как зависит фактор демодуляции от свойств контура и частоты управляющего сигнала?
6. Почему при прохождении через настроенный контур тонально-модулированного по амплитуде колебания не искажается форма его огибающей?
7. В каком случае возникает искажение формы огибающей тонального АМ-колебания при прохождении через колебательный контур?
8. Какие искажения сложного АМ-сигнала возникают при прохождении через настроенный и ненастроенный контуры?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Установка (рис. 4.4) состоит из источника амплитудно-модулированных колебаний, в качестве которого используются генератор стандартных сигналов Г4-42, макета колебательного контура и осциллографа типа С1-5 для визуального наблюдения сигнала на выходе колебательного контура.

Для исследования зависимости фактора демодуляции от частоты управляющего сигнала, амплитудная модуляция осущест-



Рис. 4.4

Величину выходного напряжения генератора ГЗ-33 можно изменять плавно ручкой «Рег. выхода» и ступенями через 10 дБ при помощи переключателя «Пределы шкал», «Ослабление». Генератор рассчитан на нагрузку порядка 600 Ом. При работе на нагрузку, сопротивление которой значительно больше чем 600 Ом, для правильного отсчета выходного напряжения следует включить внутреннюю нагрузку тумблером «Внутр. нагрузка».

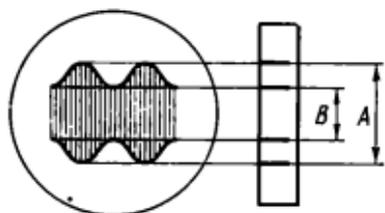


Рис. 4.6

Для оценки степени искажений АМ-сигнала необходимо располагать амплитудно-частотной характеристикой колебательного контура. Так как о величине напряжения на выходе контура можно судить по вертикальному размеру изображения на экране осциллографа,

то АЧХ в относительном масштабе можно снять, измеряя размер изображения непосредственно с осциллографа.

Для этого на вход контура подаются немодулированные колебания и изменением частоты генератора добиваемся максимального вертикального размера изображения на экране. С помощью ручки «Усиление» устанавливаем этот размер достаточно большим и, для удобства дальнейших вычислений, равным целому числу, например, 50 мм. Затем, плавно изменяя частоту генератора, каждый раз измеряем соответствующие размеры изображения на экране осциллографа и по этим данным строим нормированную АЧХ. При этом надо следить за постоянством выходного напряжения генератора. В процессе снятия характеристики нельзя также изменять положение ручек «Делитель» и «Усиление» осциллографа.

Для измерения коэффициента модуляции по изображению на экране осциллографа удобно приложить к экрану полоску бумаги и нанести на ней риски, соответствующие размерам A и B (рис. 4.6). После чего, измерив расстояние между рисками, т. е. величины A и B , подсчитать коэффициент модуляции.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным значениям элементов колебательного контура (с учетом входной емкости осциллографа) рассчитать резонансную частоту и добротность контура.
2. Рассчитать и построить зависимость фактора демодуляции от частоты управляющего сигнала для частот: 1; 5; 10; 15 кГц.

Экспериментальная часть

3. Снять АЧХ заданного контура с помощью осциллографа. Результаты измерений поместить в табл. 4.1.

Таблица 4.1

f	кГц	
l	мм	
l / l_{\max}		

Примечание: l — вертикальный размер изображения на экране осциллографа.

4. Исследовать АМ-колебания на выходе контура при его настройке на несущую частоту сигнала.

Для этого: собрать схему, изображенную на рис. 4.4; с выхода генератора стандартных сигналов подать на вход контура АМ-колебания с несущей частотой, равной резонансной частоте контура ($f_n = f_{\text{рез}}$) и частотой управляющего сигнала, равной поочередно 1; 5; 10; 15 кГц; используя осциллограф, каждый раз измерять величину коэффициента модуляции выходного сигнала, поддерживая на входе коэффициент модуляции неизменным и равным 30—50%; зарисовать огибающую выходного сигнала. Результаты измерений записать в табл. 4.2.

Таблица 4.2

$m_{\text{вх}} = \dots$			$f_n = f_{\text{рез}} = \dots$	
F	A	B	$m_{\text{вых}}$	$D = \frac{m_{\text{вых}}}{m_{\text{вх}}}$
кГц	мм	мм	%	
1				
5				
10				
15				

5. Исследовать АМ-колебания на выходе контура при его расстройке ($f_n \neq f_{\text{рез}}$).

Для этого: установить величину несущей частоты, равную $f_{\text{рез}} + 5$ кГц, и для частот управляющего сигнала, равных по-

очередно 1 и 5 кГц, измерить коэффициент модуляции выходного сигнала и зарисовать форму его огибающей. Результаты измерений записать в табл. 4.3.

Таблица 4.3

$m_{\text{вх}} = \dots$		$f_{\text{рез}} = \dots$		
$f_{\text{нес}}$	F ,	A ,	B ,	$m_{\text{вых}}$
кГц	кГц	ММ	ММ	%
	1			
	5			

Обработка результатов эксперимента

- Построить АЧХ контура, снятую в п. 3, и определить по ней полосу пропускания и добротность. Сравнить с расчетными значениями, полученными в п. 1.
- Построить зависимость фактора демодуляции от частоты управляющего сигнала по данным п. 4 на одном графике с аналогичной кривой, рассчитанной в п. 2. Сравнить результаты расчета и измерения.
- К рисункам огибающих выходного сигнала, выполненным в п. 4, привести соответствующие им взаимное расположение АЧХ контура и спектра входного сигнала.
- То же, что и в п. 8, проделать для случая расстройки контура по данным п. 5.
- Сделать выводы об искажениях, вносимых в АМ-сигнал колебательным контуром.

Литература

- Белоцерковский Г. Б., стр. 23—28.
- Изюмов Н. М., стр. 18—27.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование прохождения частотно-модулированных колебаний через одиночный колебательный контур

Цель работы — исследование искажений ЧМ-сигналов при прохождении через колебательный контур; ознакомление с методикой измерения параметров ЧМ-колебаний и преобразования ЧМ-колебаний в АМ.

Оборудование рабочего места

1. Генератор стандартных сигналов Г4-42 (1 шт.).
2. Генератор сигналов звуковых частот ГЗ-33 (1 шт.).
3. Приставка для получения ЧМ-колебаний РК-1 (1 шт.).
4. Осциллограф С1-5 (1 шт.).
5. Набор элементов колебательного контура (1 шт.).

Краткие теоретические сведения

При частотной модуляции (ЧМ) пропорционально величине управляющего напряжения изменяется несущая частота колебаний, в то время как их амплитуда остается постоянной (рис. 5.1, а).

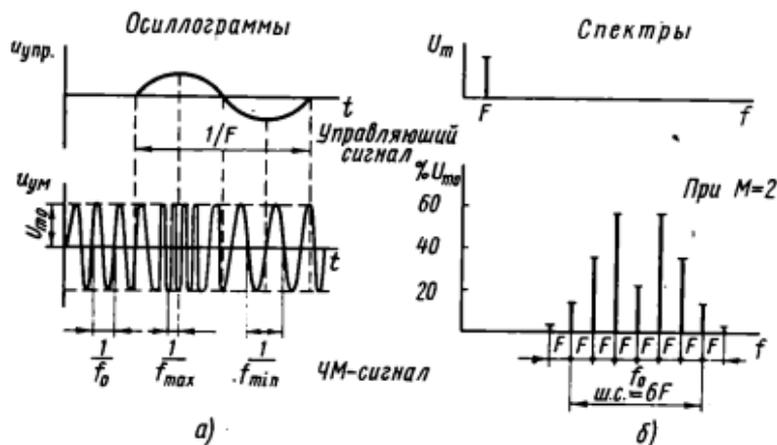


Рис. 5.1

Основным параметром ЧМ-колебания является индекс модуляции M , равный отношению девиации частоты Δf , т. е. максимального отклонения несущей частоты от ее значения без модуляции $f_{но}$, к частоте управляющего сигнала F :

$$M = \frac{\Delta f}{F}.$$

Спектр ЧМ-колебания существенно отличается от спектра АМ-колебания даже при тональной модуляции. Эти отличия заключаются в следующем:

1. Амплитуда несущей частоты может оказаться меньше, чем амплитуды боковых частот (рис. 5.1, б).

2. В спектре имеется не одна, а бесконечное множество симметричных пар боковых частот. Обычно пренебрегают теми составляющими, амплитуды которых меньше 0,1 амплитуды результирующего радиосигнала $U_{\text{мо}}$. При этом условии ширина спектра имеет конечное значение. При $M > 1$ число учитываемых пар боковых частот равно $M + 1$ и, следовательно, ширина спектра ЧМ-сигнала равна

$$\text{ШС}_{\text{ЧМ}} = 2(M + 1)F$$

или при $M \gg 1$, $\text{ШС}_{\text{ЧМ}} \approx 2\Delta f$.

Таким образом, при достаточно большой величине индекса модуляции ширина спектра не зависит от частоты модуляции, а

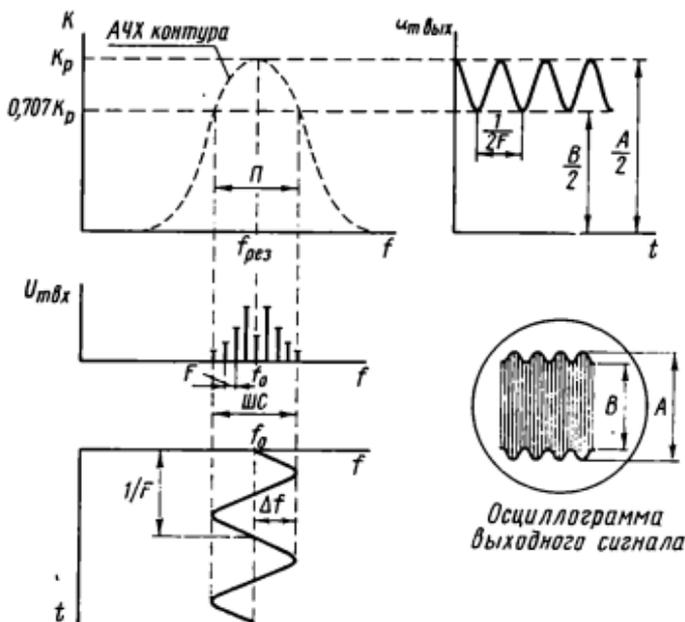


Рис. 5.2

зависит только от девиации частоты, т. е. от амплитуды управляющего сигнала.

Чтобы, проходя через радиоцепь, ЧМ-сигнал не искажался, необходимо, чтобы в пределах ширины его спектра амплитудно-частотная характеристика цепи была бы линейна и параллельна оси абсцисс, а фазово-частотная характеристика была бы линейной.

Реальные четырехполюсники не имеют таких характеристик. Поэтому при прохождении ЧМ-сигнала, например, через коле-

батальный контур нарушаются амплитудные и фазные соотношения между отдельными составляющими его спектра.

Это вызывает, во-первых, искажение закона изменения мгновенной частоты, что после детектирования приводит к появлению нелинейных искажений; во-вторых, изменение амплитуды полезного частотного отклонения Δf в зависимости от частоты моду-

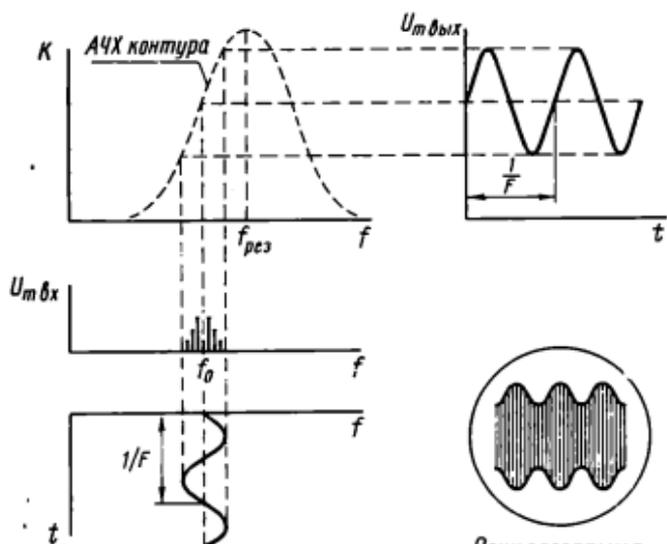


Рис. 5.3

Осциллограмма
выходного сигнала

ляции F , что приводит к частотным искажениям сигнала; в-третьих, появление паразитной амплитудной модуляции.

Если спектр ЧМ-сигнала укладывается в пределах полосы пропускания контура, то нелинейными и частотными искажениями обычно можно пренебречь.

Процесс появления паразитной амплитудной модуляции иллюстрируется построением на рис. 5.2. Очевидно, что изменения амплитуды выходного напряжения зависят от формы АЧХ контура и ширины спектра сигнала. Следует также обратить внимание на то, что основная частота изменения огибающей амплитуды вдвое превышает частоту модуляции.

Если подобрать несущую частоту и девиацию ЧМ-сигнала так, чтобы спектр его располагался на боковом участке АЧХ контура (рис. 5.3), то паразитная амплитудная модуляция будет происходить с частотой, равной частоте управляющего сигнала. Этим можно воспользоваться для преобразования ЧМ-колебаний в АМ.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается осциллограмма ЧМ-колебания от АМ?
2. Что такое индекс модуляции и от чего он зависит?
3. Чем отличается спектр ЧМ-сигнала при тональной модуляции от спектра АМ-сигнала?
4. От чего зависит ширина спектра ЧМ-сигнала при тональной модуляции?
5. Какие искажения испытывает ЧМ-сигнал при прохождении через колебательный контур?
6. От каких факторов зависит глубина паразитной амплитудной модуляции при прохождении через колебательный контур?
7. Как с помощью колебательного контура преобразовать ЧМ-сигнал в АМ-сигнал?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Исследование проводится на установке, схема которой показана на рис. 5.4.

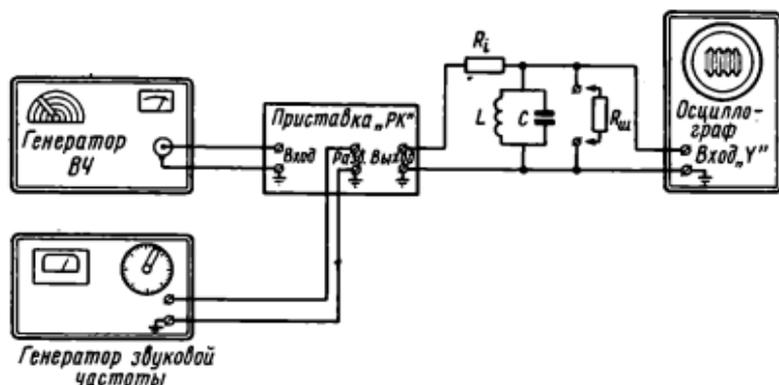


Рис. 5.4

Приставка РК-1 используется для осуществления частотной модуляции. При этом частотная модуляция происходит по закону управляющего сигнала, снимаемого с выхода генератора звуковой частоты и подводимого к клеммам «Разв.» приставки. Уровнем выходного напряжения этого генератора будет определяться величина девиации частоты.

Несущая частота $f_{но}$ ЧМ-сигнала, снимаемого с клемм «Выход» и подаваемого на колебательный контур, при установке лимба шкалы приставки на нулевое деление может быть определена в $кГц$ по формуле: $f_{но} = 4000 \pm f_{г}$, где $f_{г}$ — частота колебаний генератора высокой частоты, подводимых к клеммам «Вход» приставки.

В приставке имеется возможность с помощью лимба осуществить плавную подстройку несущей частоты на выходе на величину ± 25 кГц.

В работе исследуется зависимость величины паразитной амплитудной модуляции от девиации частоты и добротности контура. Для изменения добротности контура последний шунтируется резистором.

Частота паразитной амплитудной модуляции может быть определена подачей на осциллограф напряжения с частотой модуляции непосредственно от звукового генератора и сравнения периодов осциллограмм. Частота развертки осциллографа при этом должна оставаться неизменной.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным значениям индуктивности и емкости контура и с учетом входной емкости осциллографа рассчитать резонансную частоту контура ($f_{\text{рез}}$).
2. Рассчитать частоту генератора высокой частоты ($f_{\text{Г}}$), которую потребуется подвести к входу приставки РК-1 для получения на ее выходе частоты, равной резонансной частоте контура, найденной в п. 1.
3. Для заданных индексов модуляции M_1 и M_2 и модулирующей частоты (F) рассчитать соответствующие им девиации частоты Δf_1 и Δf_2 .
4. По модуляционной характеристике приставки «РК-1» (см. приложение IV) определить величины выходных напряжений звукового генератора, необходимые для осуществления рассчитанных в п. 3 девиаций частот Δf_1 и Δf_2 .

Экспериментальная часть

5. Изменяя частоту генератора высокой частоты вблизи расчетного значения, найденного в п. 2, настроить контур в резонанс. Звуковой генератор при этом должен быть отключен, а лимб приставки «РК-1» установлен на нулевую отметку.
6. Подключить к приставке генератор звуковых частот и установить на нем заданную частоту (F). Устанавливая поочередно выходные напряжения генератора, равные рассчитанным в п. 4 значениям, измерить по осциллограмме на экране осциллографа расстояния A и B . Зарисовать осциллограммы.
7. Определить по осциллограмме частоту паразитной амплитудной модуляции.
8. Понизить добротность контура, шунтируя его резистором, и снова измерить расстояния A и B на осциллограмме.

9. Используя осциллограф как индикатор уровня напряжения на выходе контура и изменяя частоту несущей, снять АЧХ контура и построить ее в относительном масштабе по оси ординат.
10. На склоне построенной в п. 9 АЧХ определить несущую частоту ($f'_{но}$) и допустимую девиацию частоты ($\Delta f'$) для осуществления преобразования ЧМ-сигнала в АМ-сигнал. В соответствии с найденными значениями определить частоту генератора высокой частоты (f'_r) и величину напряжения модулирующего звукового генератора и установить их на приборах. Зарисовать полученную осциллограмму. Определить частоту паразитной АМ.

Обработка результатов эксперимента

11. По АЧХ контура, построенной в п. 9, и величине отношения B/A (по данным п. 6) определить величины девиации частоты Δf_1 и Δf_2 и сравнить их с расчетными значениями.
12. По измеренным в п. 6 и п. 8 значениям A и B определить коэффициенты паразитной амплитудной модуляции. Сделать выводы о влиянии добротности контура и ширины спектра ЧМ-сигнала на уровень паразитной амплитудной модуляции.
13. Сделать графический анализ процесса появления паразитной АМ с помощью построенной в п. 9 АЧХ для случаев $f_{но} = f_{рез}$ и $f_{но} \neq f_{рез}$.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б., стр. 29—35.
2. Изюмов Н. М., стр. 197—200, 203—206.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование способов настройки связанных контуров

Цель работы — *определение оптимальных условий передачи мощности в связанных контурах. Ознакомление с методикой настройки на полный резонанс и на первый и второй частные резонансы.*

Оборудование рабочего места

1. Генератор ВЧ Г4-42 (1 шт.).
2. Ламповый вольтметр ВЗ-13 (2 шт.).
3. Набор элементов для макета двух связанных контуров.

Краткие теоретические сведения

Два контура называются связанными, если энергия из одного может передаваться в другой. При этом контур, в котором имеется источник энергии, называется первичным, а контур, в который энергия поступает, называется вторичным (рис. 6.1). Мощности, выделяемые в первичном и вторичном контурах, могут быть найдены соответственно как $P_1 = r_1 I_1^2$; $P_2 = r_2 I_2^2$, где r_1 и r_2 — активные сопротивления контуров; I_1 и I_2 — токи в контурах.

Коэффициент полезного действия системы двух связанных контуров определится как $\eta =$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2}.$$

В ряде практических применений оказывается необходимым так подобрать режим работы связанных контуров, чтобы во вторичный контур передавалась наибольшая мощность. Самым рациональным способом выполнения этого условия является настройка на режим «полного резонанса», которая производится следующим образом:

1. При разомкнутой цепи вторичного контура, первичный контур настраивают в резонанс с заданной частотой сигнала по максимуму показаний вольтметра, измеряющего напряжение на конденсаторе первичного контура.

2. Цепь вторичного контура замыкают и подбирается такая наименьшая величина связи с первичным контуром, при которой уже обеспечиваются надежные показания вольтметра, включенного ко вторичному контуру. Затем вторичный контур настраивается в резонанс с заданной частотой сигнала по максимуму показаний его вольтметра.

3. Между контурами подбирают оптимальную связь, обеспечивающую получение наибольшего возможного напряжения во вторичном контуре.

Величину оптимального коэффициента связи для настройки в режим полного резонанса можно определить по формуле

$$k_{\text{св. опт}} = \sqrt{d_1 d_2},$$

где d_1 и d_2 — затухания первичного и вторичного контуров.

Сопротивление оптимальной связи между контурами при этом определяется по формуле

$$X_{\text{св. опт}} = \sqrt{r_1 r_2},$$

где r_1 и r_2 — активные сопротивления первичного и вторичного контуров.

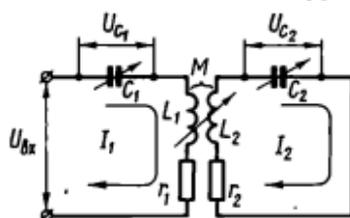


Рис. 6.1

Косвенным образом о величине мощностей, выделяемых в контурах, можно судить по показаниям вольтметров, так как мощности P_1 и P_2 пропорциональны $U_{C_1}^2$ и $U_{C_2}^2$ (при настройке обоих контуров на частоту сигнала). Зависимости мощностей, выделяемых в первичном и вторичном контурах от величины связи между контурами, изображены на рис. 6.2.

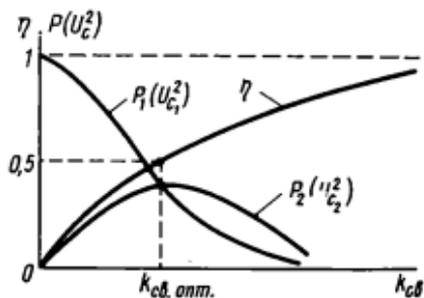


Рис. 6.2

При оптимальной связи мощности, выделяемые в обоих контурах, равны, что соответствует величине коэффициента полезного действия $\eta = 50\%$.

Если желательно ценной некоторого уменьшения мощности, передаваемой во вторичный контур, добиться более высокого значения к. п. д., то необходимо связь между контурами выбирать более сильной, чем оптимальная, ибо, чем больше связь между контурами, тем выше к. п. д.

Величина, показывающая во сколько раз имеющаяся связь отличается от оптимальной, называется степенью связи

$$p_{св} = \frac{k_{св}}{k_{св. опт}} = \frac{X_{св}}{X_{св. опт}}$$

Различают связь слабую ($p_{св} < 1$), сильную ($p_{св} > 1$) и оптимальную ($p_{св} = 1$).

Рассмотрим, как на процессах в связанных цепях отразится расстройка контуров. Предположим, что соблюдается условие полного резонанса, т. е. оба контура настроены на частоту сигнала. Начнем расстраивать первичный контур, например, изменяя величину его емкости C_1 . При этом будем наблюдать за показаниями вольтметров, включенных параллельно конденсаторам обоих контуров.

При расстройке первичного контура в любую сторону от резонанса, его входное сопротивление возрастет за счет появления реактивной составляющей и, следовательно, первичный ток, а вместе с ним и показания вольтметра U_{C_1} , будут падать. С уменьшением первичного тока уменьшится величина э. д. с., наводимая во вторичном контуре, и поскольку его сопротивление остается неизменным, ток в нем и вместе с ним показания вольтметра U_{C_2} , тоже упадут. Таким образом, при перестройке конденсатора первичного контура C_1 напряжения U_{C_1} и U_{C_2} будут изменяться по одному и тому же закону и максимум показаний обоих вольт-

метров должен наступить одновременно. Этот процесс называется настройкой на первый частный резонанс (рис. 6.3, а).

Будем теперь изменять настройку вторичного контура, наблюдая за показаниями вольтметров, измеряющих напряжения U_C и U_{C_2} . При расстройке вторичного контура в любую сторону от резонанса ввиду появления реактивной составляющей его сопротивления ток в нем и, следовательно, падение напряжения U_C , уменьшатся. Показания же вольтметра, измеряющего U_{C_2} , наоборот, увеличатся. Это объясняется тем, что при уменьшении тока во вторичном контуре уменьшается и создаваемая им в первичном противоэ. д. с., иначе говоря, уменьшается величина вносимого в первичный контур добавочного сопротивления. Изменение U_C и U_{C_2} в зависимости от настройки вторичной цепи показано на рис. 6.3, б.

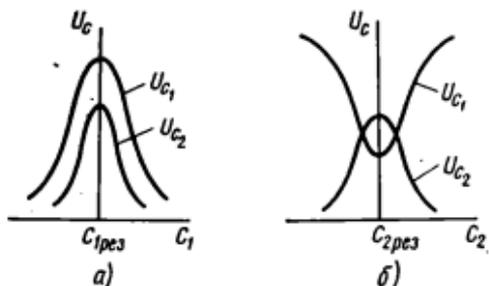


Рис. 6.3

Таким образом, состояние резонанса при перестройке вторичного контура может быть обнаружено или по возрастанию U_C , или по убыванию U_{C_2} . Этот процесс настройки называется настройкой на второй частный резонанс. Следует иметь в виду, что приведенные выше кривые соответствуют лишь случаю соблюдения первоначального условия настройки обоих контуров на частоту сигнала (полный резонанс). При нарушении этого условия точки максимума и минимума кривых настройки могут сместиться по частоте относительно друг друга.

Вопросы для самопроверки

1. Какие контуры называются связанными?
2. Какими показателями оценивается величина связи между контурами?
3. Что характеризует коэффициент связи и от чего зависит его величина?
4. В чем разница между коэффициентом связи ($k_{св}$) и степенью связи ($\rho_{св}$)? Как они зависят друг от друга?
5. Каковы условия передачи максимальной мощности во вторичный контур?
6. Какую необходимо установить связь для получения в системе из двух связанных контуров к. п. д. более 50%?
7. Как производится настройка контуров в полный резонанс?
8. Как изменяются контурные токи при перестройке первичного или вторичного контуров?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Связанные контуры исследуют на установке, схема которой приведена на рис. 6.4. Макет системы связанных контуров состоит из блока индуктивно связанных катушек и двух конденсаторов переменной емкости. Конструкция блока катушек позволяет плавно регулировать связь между ними. Все элементы с по-

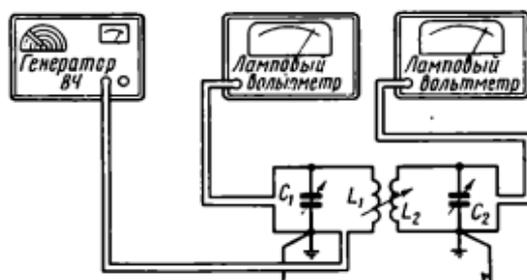


Рис. 6.4

мощью перемычек с однополюсными вилками соединяются между собой. Питание первичного контура осуществляется от генератора Г4-42. Напряжение на выходе шланга генератора рекомендуется снимать с клеммы «х 0,1» и установить равным 0,1 в. Это напряжение, а также частота генератора на протяжении всей работы поддерживаются постоянными. Напряжения на конденсаторах контуров измеряются ламповыми вольтметрами.

Данные катушек индуктивностей, градуировочные кривые конденсаторов и градуировочная кривая зависимости коэффициента связи от расстояния между катушками имеются на рабочем месте.

Содержание работы

Расчетная часть

1. Оба связанных контура идентичны, т. е. $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$; $r_1 = r_2 = r$.

Определить:

1. Резонансную частоту каждого контура ($f_{рез}$);
2. Добротность контура (Q) и его затухание (d);
3. Коэффициент оптимальной связи ($k_{св.опт}$);
4. Оптимальное сопротивление связи ($X_{св.опт}$).

Экспериментальная часть

2. Собрать на рабочем месте исследуемую схему (рис. 6.4) и установить заданные значения емкостей конденсаторов.
3. Определить область частот генератора, в которой будет производиться работа. Для этого связь между контурами подобрать слабой, но такой, которая все же обеспечит надежные показания вольтметра вторичного контура. После чего, изменяя частоту генератора, подобрать такую частоту, при которой показания вольтметров будут наибольшими. Записать это значение частоты (f_r).
4. Установив на генераторе значение частоты (f_r), определенное в п. 3, настроить оба контура в режим полного резонанса и определить расстояние между катушками, соответствующее оптимальной связи ($l_{\text{опт}}$). Записать значения: $l_{\text{опт}} = \dots$, $C_1 = C_{1\text{рез}} = \dots$, $C_2 = C_{2\text{рез}} = \dots$
5. Снять зависимости напряжений на конденсаторах первичного и вторичного контура от расстояния между катушками (l), т. е. от величины связи, для случая, когда оба контура настроены на частоту генератора.

Расстояние между катушками (l) изменять от максимального значения (связь минимальная) до нуля (связь максимальная) через 5 мм. Результаты измерений записать в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Исходные данные	Результаты эксперимента			
	$l, \text{мм}$	$k_{\text{св}}$	$U_{C_1}, \text{в}$	$U_{C_2}, \text{в}$
$U_{\text{вх}} = 0,1 \text{ в}$				
$f_r = \dots$				
$C_1 = C_{1\text{рез}} = \dots$				
$C_2 = C_{2\text{рез}} = \dots$				

Коэффициент связи $k_{\text{св}}$ определяется по градуировочной кривой (приложение III).

6. Снять кривые настройки на I частный резонанс, т. е. зависимости напряжений на конденсаторах первичного и вторичного контуров от изменения емкости первичного контура. Кривые снимаются при оптимальной связи между контурами и неизменной настройке вторичного контура, причем $C_2 = C_{2\text{рез}}$.

Результаты измерений занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Исходные данные	Результаты эксперимента			
	$C_1, \text{град}$	$C_1, \text{рф}$	$U_{C_1}, \text{в}$	$U_{C_2}, \text{в}$
$U_{\text{вх}} = 0,1 \text{ в}$				
$f_r = \dots$				
$l = l_{\text{онт}} = \dots$				
$C_2 = C_{2\text{рез}}$				

Значения емкости контура в пикофарадах определяются по градуировочной кривой конденсатора (приложение II).

7. Снять кривые настройки на II частный резонанс, т. е. зависимости напряжений на конденсаторах первичного и вторичного контуров от изменения емкости вторичного контура. Кривые снимаются при оптимальной связи между контурами и неизменной настройке первичного контура, причем $C_1 = C_{1\text{рез}}$.

Результаты измерений занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Исходные данные	Результаты эксперимента			
	$C_2, \text{град}$	$C_2, \text{рф}$	$U_{C_1}, \text{в}$	$U_{C_2}, \text{в}$
$U_{\text{вх}} = 0,1 \text{ в}$				
$f_r = \dots$				
$l = l_{\text{онт}} = \dots$				
$C_1 = C_{1\text{рез}} = \dots$				

Обработка результатов эксперимента

8. Сравнить полученные экспериментом резонансную частоту и коэффициент оптимальной связи с их расчетными значениями.
9. Определить сопротивление оптимальной связи, соответствующее экспериментально найденному коэффициенту оптимальной связи, по формуле

$$X_{\text{св.онт}} = 2\pi f_r k_{\text{св.онт}} \sqrt{L_1 L_2}$$

Сравнить полученную величину сопротивления с расчетным значением.

10. По результатам п. 5 построить зависимости мощностей, выделяемых в контурах, и коэффициента полезного действия от степени связи между контурами ($\rho_{\text{св}}$). Результаты расчета свести в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Исходные данные	Результаты расчета						
	$k_{св}$	$p_{св} = \frac{k_{св}}{k_{св.онт}}$	U_{C_1}	$P_1 = U_{C_1}^2$	U_{C_2}	$P_2 = U_{C_2}^2$	$\eta = \frac{U_{C_2}^2}{U_{C_1}^2 + U_{C_2}^2}$
$f_r = \dots$							
$C_1 = C_{1рез} = \dots$							
$C_2 = C_{2рез} = \dots$							

Все три кривые $P_1 = \varphi(p_{св})$; $P_2 = \varphi(p_{св})$; $\eta = \varphi(p_{св})$ построить на одном листе. Сделать вывод о зависимости полезной мощности и к. п. д. от величины связи. Выделить на графиках области сильной и слабой связи.

11. Построить по результатам п. 6 и п. 7 кривые настройки на I и II частные резонансы: $U_{C_1} = \varphi(C_1)$; $U_{C_2} = \varphi(C_1)$.
 $U_{C_1} = \varphi(C_2)$; $U_{C_2} = \varphi(C_2)$.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б., стр. 121—136.
2. Калашников А. М., стр. 83—106.
3. Изюмов Н. М., стр. 118—130.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Амплитудно-частотные характеристики связанных контуров

Цель работы — исследование влияния величины связи между контурами на форму амплитудно-частотной характеристики и полосу пропускания связанных контуров. Ознакомление с методикой снятия АЧХ связанных контуров.

Оборудование рабочего места

1. Генератор ВЧ Г4-42 (1 шт).
2. Ламповый вольтметр ВЗ-13 (2 шт).
3. Набор элементов для макета двух связанных контуров.

Краткие теоретические сведения

Амплитудно-частотной характеристикой связанных контуров называется зависимость коэффициента передачи по напряжению от частоты. Под коэффициентом передачи системы из двух свя-

занных контуров понимается отношение выходного напряжения, снимаемого обычно с конденсатора вторичного контура, к входному напряжению, вводимому в первичный контур (рис. 6.1).

Наиболее часто в радиотехнических устройствах применяются системы, состоящие из двух одинаковых контуров, поскольку такие системы выгодны как в электрическом, так и в экономическом отношении.

Если форма амплитудно-частотной характеристики одиночного контура полностью определяется его добротностью, то форма амплитудно-частотной характеристики связанных контуров зависит еще и от величины связи между контурами.

На рис. 7.1 изображено семейство АЧХ двухконтурной системы из идентичных контуров при различных коэффициентах связи. Из этого семейства кривых видно, что с увеличением связи полоса пропускания расширяется.

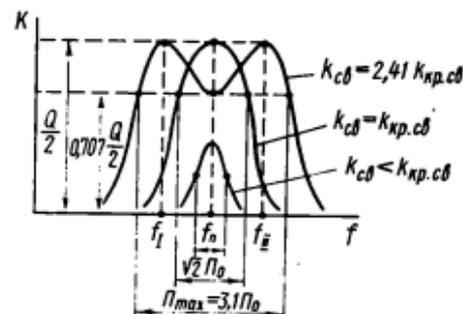


Рис. 7.1

Если имеются два идентичных контура, каждый из которых имеет затухание d и полосу пропускания $\Pi_0 = f_{рез}d$, то при слабой связи полоса пропускания может быть даже меньше, чем у одиночного контура. Например, при коэффициенте связи $k_{св} = 0,1d$ полоса связанных контуров равна $\Pi = 0,65 \Pi_0$.

С увеличением связи полоса пропускания увеличивается и при критической связи ($k_{св} = k_{св.крит} = d$) полоса пропускания связанных контуров становится равной $\Pi = 1,41 \Pi_0$. При этом коэффициент передачи на резонансной частоте достигает наибольшего возможного значения, равного

$$K_{\max \max} = 0,5Q.$$

При связи, большей критической ($k_{св} > d$), кривая АЧХ становится двугорбой и максимальные значения коэффициента передачи наблюдаются при двух значениях частоты, отличных от резонансной и называемых «частотами связи»

$$f_I = \frac{f_{рез}}{\sqrt{1 + \sqrt{k_{св}^2 - d^2}}}, \quad f_{II} = \frac{f_{рез}}{\sqrt{1 - \sqrt{k_{св}^2 - d^2}}}.$$

В этом режиме на резонансной частоте $f_{\text{рез}}$ получается точка минимума кривой АЧХ («провал характеристики»).

Максимально возможное значение полосы пропускания, которое можно получить при связи между контурами больше критической, соответствует случаю, когда коэффициент передачи на частоте настройки обоих контуров равен 0,707 от его наибольшего возможного значения. Это произойдет при коэффициенте связи $k_{\text{св}} = 2,41 d$ и полоса пропускания при этом будет равна $\Pi_{\text{max}} = 3,1 \Pi_0$.

Таким образом, по сравнению с одиночным колебательным контуром двухконтурная система связанных контуров обладает следующими преимуществами:

1) во-первых, форма амплитудно-частотной характеристики может быть получена более близкой к идеальной (прямоугольной) форме и, следовательно, двухконтурная система обеспечивает лучшую избирательность;

2) во-вторых, двухконтурная система позволяет в некоторых пределах регулировать величину полосы пропускания изменением связи между контурами.

Однако одиночный контур легче перестраивать на различные частоты сигналов. Поэтому системы связанных контуров применяются, как правило, при работе на неизменной, фиксированной частоте.

В случае неидентичности контуров, образующих связанную двухконтурную систему, двугорбая кривая АЧХ при связи больше критической становится асимметричной.

Если входное напряжение поддерживать постоянным, то о форме АЧХ системы контуров можно судить по зависимости выходного напряжения (сняемого с конденсатора вторичного контура) от частоты источника сигналов.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется АЧХ системы двух связанных контуров?
2. Каким образом можно экспериментально снять АЧХ системы двух связанных контуров?
3. Как влияет величина связи на форму АЧХ двухконтурной системы?
4. Чем объясняется зависимость формы АЧХ от величины связи?
5. Чем объясняется появление в системе связанных контуров двух частот связи при $k_{\text{св}} > k_{\text{св кр}}$?
6. Как полоса пропускания системы связанных контуров зависит от величины связи?
7. Какая максимальная полоса пропускания может быть получена в системе из двух идентичных связанных контуров?
8. Как влияет неидентичность контуров на форму АЧХ системы?
9. Какие преимущества и недостатки у системы связанных контуров по сравнению с одиночным контуром?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Амплитудно-частотные характеристики связанных контуров исследуются на установке, изображенной на рис. 6.4. Макет системы связанных контуров состоит из блока индуктивно-связанных катушек и двух блоков конденсаторов переменной емкости. Эти блоки с помощью переключателей соединяются между собой, образуя два связанных колебательных контура. Имеется возможность устанавливать различную связь, например, изменять расстояние между катушками.

Питание первичного контура осуществляется от генератора ВЧ Г4-42. Напряжение на выходе генератора в течение всей работы поддерживается постоянным и равным 0,1 в.

Напряжения на конденсаторах контуров измеряются ламповыми вольтметрами.

Данные катушек индуктивности, градуировочные кривые конденсаторов переменной емкости и зависимость коэффициента связи от расстояния между катушками имеются на рабочем месте.

АЧХ снимаются при различных величинах связи. Установив заданное значение связи, изменяют частоту генератора и ведут отсчет напряжения по вольтметру, подключенному к конденсатору вторичного контура. Особое внимание следует обратить на точность отсчета напряжений вблизи резонансной частоты и частот связи.

Перед снятием АЧХ необходимо настроить систему в режим «полного резонанса» (см. работу № 6) и при последующих исследованиях настройку контуров не изменять, кроме того случая, когда исследуются расстроенные контуры. После этого снимается АЧХ при подобранной критической связи. Затем расстояние между катушками увеличивается и снимается АЧХ для случая связи меньше критической.

Величину связи, соответствующую максимальной полосе пропускания, следует подбирать, наблюдая за показаниями вольтметра вторичного контура, таким образом, чтобы напряжение на резонансной частоте составляло 0,707 от максимального значения напряжения.

Для исследования влияния неидентичности контуров на форму АЧХ в работе предусмотрены возможности: а) уменьшения добротности вторичного контура шунтированием его дополнительным резистором, и б) расстройки контуров относительно друг друга изменением, например, емкости конденсатора вторичного контура C_2 относительно ее резонансного значения.

Содержание работы

Расчетная часть

Исходные данные для расчета те же, что и в работе № 6.

1. Определить:
 1. Резонансную частоту контуров ($f_{рез}$).
 2. Добротность контура (Q) и затухание (d).
 3. Полосу пропускания одиночного контура (Π_0).
 4. Полосу пропускания системы связанных контуров при критической связи ($\Pi = 1,41\Pi_0$).
 5. Максимальную величину полосы пропускания (Π_{max}) и соответствующий ей коэффициент связи ($k_{св}$).
 6. Частоты связи для АЧХ, соответствующей максимальной полосе пропускания (f_I и f_{II}).
 7. Максимальный коэффициент передачи ($K_{max\ max} = 0,5 Q$).

Экспериментальная часть

2. Собрать на рабочем месте исследуемую схему (рис. 6.4) и установить заданные значения емкостей конденсаторов.
3. Настроить первичный контур в резонанс на частоту генератора при разомкнутом вторичном контуре. При этом частота генератора устанавливается равной частоте, рассчитанной в п. 1, и подстройка в резонанс достигается изменением емкости конденсатора. Снять АЧХ первичного контура, занеся результаты измерений в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Исходные данные:	C_1, \dots	$U_{вх} = 0,1 \text{ в}$
$f, \text{ кгц}$		
$U_{C_1}, \text{ в}$		

4. Восстановить цепь вторичного контура и произвести настройку в режим полного резонанса. Записать значения: $C_{Iрез} = \dots$; $C_{дрез} = \dots$; $I_{опт} = \dots$
5. Снять зависимость напряжения на конденсаторе вторичного контура от частоты генератора для трех значений величины связи между контурами:
 - а) связь критическая,
 - б) связь меньше критической,
 - в) связь, соответствующая максимальной величине полосы пропускания.

Результаты измерений занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Исходные данные	Результаты эксперимента	
	$f_{кГц}$	$U_{C_2}, \text{В}$
$U_{вх} = 0,1 \text{ В}$ $C_1 = C_{1рез} = \dots$ $C_2 = C_{2рез} = \dots$ $l = \dots$ $k_{св} = \dots$		

6. Шунтировать вторичный контур резистором. Снять зависимость выходного напряжения от частоты генератора для связи, соответствующей максимальной полосе пропускания. Результаты измерений занести в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Исходные данные	Результаты эксперимента	
	$f_{кГц}$	$U_{C_2}, \text{В}$
$U_{вх} = 0,1 \text{ В}, Q \neq Q_2$ $C_1 = C_{1рез} = \dots$ $C_2 = C_{2рез} = \dots$ $l = \dots$ $k_{св} = \dots$		

7. Выключить шунтирующий резистор и расстроить вторичный контур относительно частоты генератора. Для чего изменить емкость C_2 , повернув ротор конденсатора вторичного контура на $20 \div 30^\circ$ относительно резонансного значения. Результаты измерений занести в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Исходные данные	Результаты эксперимента	
	$f, \text{кГц}$	$U_{C_2}, \text{В}$
$U_{вх} = 0,1 \text{ В}$ $C_1 = C_{1рез} = \dots$ $C_2 = \dots$ $l = \dots$ $k_{св} = \dots$		

Обработка результатов эксперимента

8. Построить амплитудно-частотные характеристики одиночного контура и двух связанных контуров по данным п. 3 и п. 5 (характеристики строятся в абсолютном масштабе на одном листе). По характеристикам для каждого случая графически определить полосу пропускания. Необходимые для этого построения выполняются прямо на графиках и здесь же надписываются полученные результаты.
Определить частоты связи и максимальный коэффициент передачи.
- Сравнить все полученные экспериментальные значения с расчетными.
9. Сделать вывод о величине максимального коэффициента передачи одиночного и связанных контуров, о влиянии величины связи на форму АЧХ и на полосу пропускания.
10. Построить на одном листе амплитудно-частотные характеристики, соответствующие связи большей критической, для случаев:
 - а) контуры идентичны (по данным п. 5),
 - б) различны добротности контуров (по данным п. 6),
 - в) различны частоты свободных колебаний контуров (по данным п. 7).
11. Сделать вывод о влиянии неидентичности контуров на форму АЧХ.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б., стр. 137—146.
2. Калашников А. М., стр. 106—116.
3. Изюмов М. В., стр. 131—136.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование влияния экрана на параметры колебательных контуров

Цель работы — изучение влияния экрана на резонансные свойства колебательного контура. Ознакомление с методикой экспериментального определения основных параметров контура.

Оборудование рабочего места

1. Генератор высокой частоты Г4-42 (1 шт.).
2. Ламповый вольтметр ВЗ-4 (1 шт.).
3. Макет колебательного контура с набором сменных экранов.

Краткие теоретические сведения

При конструировании радиотехнических устройств очень важно устранить вредное влияние отдельных узлов схемы прибора

друг на друга. Это влияние возникает из-за наличия емкостных и индуктивных паразитных связей между близко расположенными цепями и деталями. Особенно велика вероятность возникновения паразитных связей при наличии в схеме катушек индуктивности, магнитный поток которых пересекает витки других катушек или монтажные провода, расположенные поблизости. Токи и э. д. с., наводимые при этом, могут нарушить нормальную работу аппаратуры.

Кроме индуктивной связи между катушкой и соседними элементами может возникать и паразитная емкостная связь. Так, например, поднесение руки человека к колебательному контуру изменяет величину его емкости и тем самым нарушает настройку контура.

Основной способ устранения или ослабления паразитных связей — это экранирование.

Для экранирования катушки ее заключают в металлический кожух — экран цилиндрической или прямоугольной формы. Экран, с одной стороны, ограничивает магнитное поле самой экранируемой катушки, т. е. защищает от ее воздействия расположенные поблизости детали и провода; с другой стороны, экран защищает и помещенную в него катушку от воздействия внешних полей.

Физически принцип действия экрана можно объяснить следующим образом: переменное магнитное поле наводит в поверхностном слое металла вихревые токи, которые в свою очередь образуют свое магнитное поле, направленное навстречу возбуждающему их первичному полю. Это противодействующее поле и препятствует проникновению первичного магнитного поля через экран.

Очевидно, что такой экран будет тем эффективнее работать, чем выше частота магнитного поля и чем выше проводимость материала экрана. Обычно экраны изготавливают из меди, латуни или алюминия. В медных и латунных экранах потери меньше, но они дороже алюминиевых и поэтому используются реже.

Для того чтобы экранировать не только магнитное, но и электрическое поле катушки, экран необходимо надежно заземлить (соединить с корпусом прибора).

Помещение катушки в экран существенно изменяет параметры катушки, а следовательно, и контура, в который она включена.

Экран можно рассматривать как короткозамкнутую одновитковую катушку, связанную индуктивно с основной катушкой. При этом, поскольку вторичный контур — экран имеет активно-индуктивный характер сопротивления, то в первичный контур (катушку) вносятся активное и емкостное сопротивления. Первое увеличивает потери в катушке, второе уменьшает ее индуктивность (ибо внесение емкостного сопротивления равносильно уменьше-

нию индуктивного). Присутствие экрана также заметно увеличивает собственную емкость катушки.

В результате уменьшение индуктивности приводит к повышению резонансной частоты контура и, кроме того, добротность экранированной катушки обычно оказывается ниже добротности той же катушки без экрана.

Влияние экрана на параметры катушки зависит от соотношения размеров катушки и экрана. Чем ближе экран к катушке, тем сильнее связь между ними, больше вносимые сопротивления,

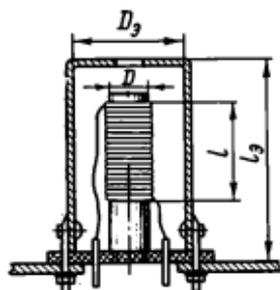


Рис. 8.1

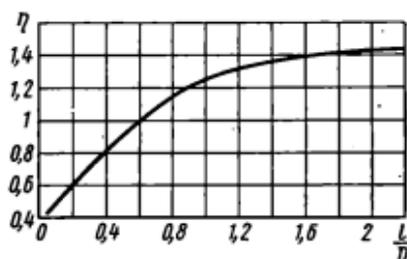


Рис. 8.2

и, следовательно, сильнее влияние экрана на параметры катушки. Увеличение собственной емкости катушки также тем больше, чем ближе к ее виткам расположен экран.

Рассчитать ориентировочную величину индуктивности однослойной и тонкой многослойной катушек в экране можно по формуле

$$L_{\text{эк}} = L \left[1 - \eta \left(\frac{D}{D_3} \right)^3 \right];$$

где $L_{\text{эк}}$ — индуктивность экранированной катушки; L — индуктивность катушки без экрана; D — диаметр катушки (см. рис. 8.1); D_3 — диаметр экрана; η — коэффициент, зависящий от отношения длины намотки (l) к диаметру катушки (D), значения которого приведены на графике рис. 8.2.

Экраны прямоугольной формы позволяют лучше использовать площади на шасси. Для расчета такого экрана следует принять, что $D_3 = 1,2 a$, где a — размер наименьшей стороны прямоугольника или стороны квадрата.

Для того чтобы индуктивность катушек падала не более чем на 10÷15%, рекомендуется для однослойных катушек выбирать диаметр экрана в 1,5—2,5 раза больше диаметра катушки.

Индуктивность однослойной катушки без экрана (L) может быть определена по формуле

$$L = \frac{0,01DN^2}{\frac{l}{D} + 0,44},$$

где L — индуктивность катушки, $\mu\text{кГн}$; D — диаметр катушки, см ; l — длина намотки, см ; N — число витков.

При этом, если в катушку помещен сердечник из ферромагнитного материала, то результирующая индуктивность увеличивается в μ раз, где μ — действующая магнитная проницаемость сердечника.

Вопросы для самопроверки

1. С какой целью колебательные контуры заключаются в экран?
2. Почему поднесение руки к открытому колебательному контуру нарушает его настройку?
3. Объясните физические процессы, лежащие в основе защитного действия экрана.
4. Как влияет экран на параметры катушки?
5. Какое влияние экранирование катушки окажет на резонансные свойства контура?
6. От чего зависит степень влияния экрана на параметры контура?
7. Какой величины рекомендуется выбирать диаметр экрана по сравнению с диаметром катушки?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Схема установки изображена на рис. 8.3.

В качестве источника входного сигнала используется генератор Г4-42. Напряжение снимается с гнезда «0,1 — 1V» с помощью шланга с выносным делителем. На вход контура напряжение снимается с клеммы «х 0,1».

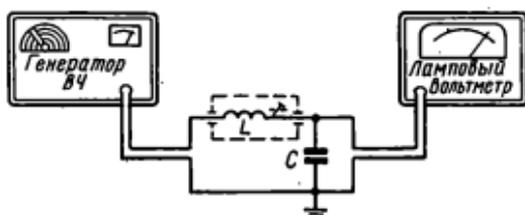


Рис. 8.3

Используемый контур состоит из катушки и конденсатора постоянной емкости. Конструкция катушки контура позволяет закрыть ее экраном. Для выяснения влияния размеров экрана на параметры контура на рабочем месте имеются экраны различного диаметра.

Напряжение на выходе контура измеряется ламповым вольтметром ВЗ-4.

При экспериментальном определении полосы пропускания нет необходимости снимать всю амплитудно-частотную характеристику.

Достаточно, плавно изменяя частоту генератора, зафиксировать ту частоту, при которой напряжение на выходе контура уменьшится до 0,707 от его резонансного значения. При этом удобно на частоте резонанса с помощью плавного делителя выходного напряжения генератора подать на контур такое напряжение, чтобы на его выходе стрелка лампового вольтметра установилась на делении «0 дБ». Тогда полосу пропускания можно определить по расстройке частоты, вызывающей уменьшение показаний вольтметра до отметки «-3 дБ». При этом, как и в предыдущих работах, необходимо контролировать постоянство положения стрелки прибора генератора на отметке «К».

Для повышения точности эксперимента необходимо при определении как резонансной частоты, так и полосы пропускания пользоваться нониусом, определяя цену его делений на каждом участке шкалы частот.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным геометрическим размерам катушки и действующей магнитной проницаемости сердечника рассчитать величину индуктивности.
2. По рассчитанной в п. 1 индуктивности катушки и заданному значению емкости конденсатора рассчитать резонансную частоту контура (с учетом входной емкости лампового вольтметра $C_{вх} = \dots, n\phi$).
3. Рассчитать величины индуктивности катушки и резонансной частоты контура при заключении катушки в экран заданных размеров.

Экспериментальная часть

4. Собрать контур из элементов, соответствующих расчетным данным п. 2.
Изменяя частоту генератора вблизи ее расчетного значения, настроить контур в резонанс. Определить резонансную частоту и полосу пропускания.
Убедиться, что поднесение руки к катушке контура влияет на его настройку.
5. Поместить катушку в экран, соответствующий проделанному в п. 3 расчету.

Определить резонансную частоту и полосу пропускания контура.

6. Прodelать то же самое для экрана другого размера.

Обработка результатов эксперимента

7. По данным п. 4, 5, 6 определить:

- а) величину индуктивности по известной емкости контура и измеренной резонансной частоте;
 б) добротность контура по измеренным резонансной частоте и полосе пропускания.

Результаты вычислений записать в табл. 8.1. Сравнить результаты расчета с экспериментальными данными.

Таблица 8.1

Исследуемый контур	Из расчета		Из эксперимента		
	$L, \text{ мкГн}$	$f_{\text{рез}}, \text{ кГц}$	$L, \text{ мкГн}$	$f_{\text{рез}}, \text{ кГц}$	Q
без экрана					
в большом экране					
в малом экране					

8. Сделать выводы о влиянии экрана на параметры колебательного контура и о рациональном выборе размеров экрана.

Литература

1. Изюмов Н. М., стр. 145—147.
2. Калашников А. М., стр. 118—119.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование фильтров нижних и верхних частот

Цель работы — ознакомление с методикой снятия частотных характеристик фильтров. Экспериментальная проверка результатов расчетов фильтров.

Оборудование рабочего места

1. Генератор высокой частоты Г4-42 (1 шт.).
2. Ламповый вольтметр ВЗ-13 (1 шт.).
3. Набор элементов фильтров и резисторов.

Краткие теоретические сведения

Во многих радиотехнических устройствах возникает необходимость выделения некоторой части из всего имеющегося спектра частот сигнала. Такое выделение требуемой полосы частот осуществляется фильтрами.

Электрическим фильтром называется четырехполюсник, обладающий свойством пропускать колебания в определенном интервале частот с незначительным ослаблением при максимальном подавлении колебаний всех других частот.

Область частот, в пределах которой происходит незначительное ослабление колебаний, носит название полосы пропускания, а область частот, соответствующая их подавлению — полосы задерживания.

Частота, соответствующая теоретической границе между полосами пропускания и задерживания, называется частотой среза фильтра f_c .

В зависимости от полосы пропускаемых частот различают фильтры нижних и верхних частот, полосовые и заграждающие. В данной работе исследуются только фильтры нижних и верхних частот.

Фильтры нижних частот (ФНЧ) пропускают сигналы частот от 0 до f_c и задерживают колебания всех более высоких частот.

Фильтры верхних частот (ФВЧ), напротив, пропускают сигналы, частоты которых простираются от f_c до ∞ , и задерживают сигналы более низких частот.

Исследуемые фильтры являются пассивными, т. е. не содержащими усилительных элементов, и поэтому не нуждаются в источниках питания.

Чтобы обеспечить неодинаковое сопротивление для различных частот, элементы фильтра должны иметь реактивный характер. Практически из-за наличия потерь невозможно создать чисто реактивные элементы, и, как следствие этого, в полосе пропускания фильтры все же вносят некоторое затухание. Чтобы его уменьшить, желательнее фильтры конструировать из элементов с возможно большей добротностью.

В зависимости от типов элементов, образующих звенья фильтра, различают: реактивные LC-фильтры, состоящие из катушек и конденсаторов; фильтры типа RC, состоящие из резисторов и конденсаторов, а также электромеханические, пьезоэлектрические и др. В данной работе исследуются лишь два первых вида фильтров.

Наименьшее количество реактивных сопротивлений, из которых может быть составлен фильтр, равно двум. Одно из них, обозначаемое $\frac{1}{2} Z_1$, включается последовательно между входом и выходом фильтра, а другое, обозначаемое $2 Z_2$, параллельно

входу (или выходу) фильтра. Такое звено напоминает букву «Г» и поэтому оно называется Г-образным (рис. 9.1, а).

Если сначала включить последовательный элемент, а потом параллельный (рис. 9.1, б), то звено будет по-прежнему называться Г-образным, однако его фильтрующие свойства окажутся иными. Следовательно, Г-образное звено является несимметричным.

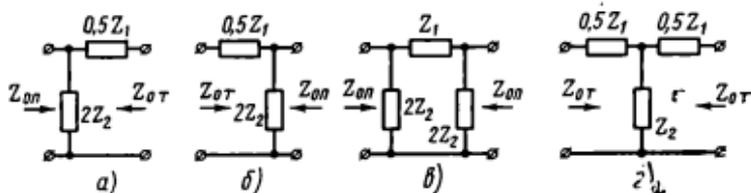


Рис. 9.1

Для получения схем, симметричных относительно входа и выхода, два Г-образных звена соединяют в П- или Т-образные звенья (рис. 9.1, в, г).

При необходимости получить более высокую степень фильтрации применяют многозвенные фильтры, составленные в виде цепочки из простых звеньев.

Для обеспечения нормальной работы LC-фильтра, он должен быть согласован как с нагрузкой, так и с источником сигнала. Кроме того, в случае многозвенного фильтра, отдельные звенья должны быть согласованы между собой. Чтобы выполнить эти условия, фильтр должен быть нагружен на сопротивление, равное его так называемому характеристическому сопротивлению со стороны выхода, а внутреннее сопротивление источника сигналов

Условия согласования: $R_i = Z_{0вх}$ и $R_n = Z_{0вых}$

должно быть равно характеристическому сопротивлению со стороны входа (рис. 9.2).

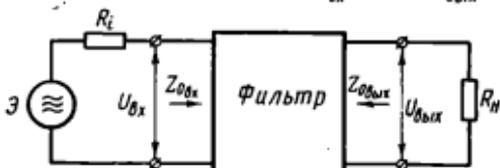


Рис. 9.2

У симметричных фильтров характеристические сопротивления со стороны входа и выхода одинаковы.

Характеристическое сопротивление идеальных

LC-фильтров без потерь в полосе пропускания является чисто активным, но по величине разным для различных частот. В то же время сопротивление нагрузки, как и сопротивление источника, являются обычно постоянными величинами. Поэтому полное согласование может быть выполнено лишь на одной частоте диапазона.

Для LC -фильтров нижних частот обычно обеспечивают полное согласование на частоте $f=0$, а для фильтров верхних частот на частоте $f=\infty$. На этих частотах характеристическое сопротивление фильтров чисто активно и равно

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Степень уменьшения напряжения на выходе фильтра по сравнению с напряжением на его входе, при отсутствии потерь и выполнении условий согласования фильтра, оценивается собственным затуханием фильтра b_c . Затухание — основной параметр, характеризующий качество работы любого фильтра.

Если нагрузка и источник сигнала не согласованы с фильтром, то к собственному затуханию фильтра добавляется еще затухание вследствие явлений отражения энергии от входа и выхода фильтра.

Как было указано выше, в реактивных фильтрах принципиально невозможно обеспечить полное согласование на всех частотах полосы пропускания, поэтому при оценке реальных фильтров, кроме собственного затухания, вводится понятие рабочего затухания, учитывающего это обстоятельство.

Рабочее затухание b , вносимое фильтром, обычно измеряется в децибелах и может быть определено по формуле

$$b = 20 \lg \frac{U_{вх}}{U_{вых}},$$

где $U_{вх}$ и $U_{вых}$ — напряжения на входе и выходе фильтра (рис. 9.2).

В многосвязных фильтрах затухание, выраженное в децибелах, равно сумме затуханий отдельных звеньев. В случае одинаковых n звеньев

$$b_{\phi} = nb_0,$$

где b_{ϕ} — затухание всего фильтра, $дб$; b_0 — затухание одного звена, $дб$.

Важнейшим показателем качества работы фильтра является также зависимость затухания от частоты. Частотные характеристики собственного затухания фильтров изображены на рис. 9.3 пунктирной кривой. С учетом неизбежного рассогласования фильтров в полосе пропускания и наличия потерь в их элементах реальные частотные характеристики рабочего затухания принимают вид, изображенный на рис. 9.3 сплошными линиями.

Приближенный технический расчет LC -фильтров заключается в выборе числа звеньев и в нахождении параметров звена. Число звеньев определяется требуемым затуханием на заданной частоте. Выбор величин L и C производится, исходя из заданных час-

тоты среза (f_c) и сопротивления нагрузки по формулам, приведенным на рис. 9.3.

Фильтры типа RC (или безындукционные фильтры) применяются в радиотехнических устройствах, работающих на частотах

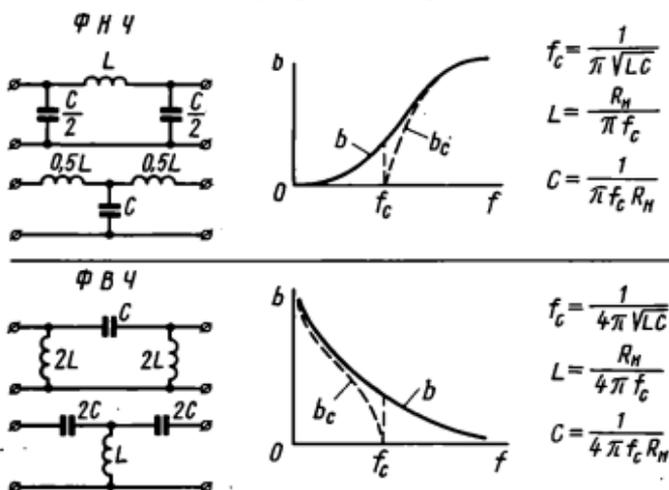


Рис. 9.3

менее сотен герц. На столь низких частотах для реактивного фильтра потребовалась бы катушка с большой индуктивностью, что увеличило бы габариты и стоимость фильтра. Кроме того,

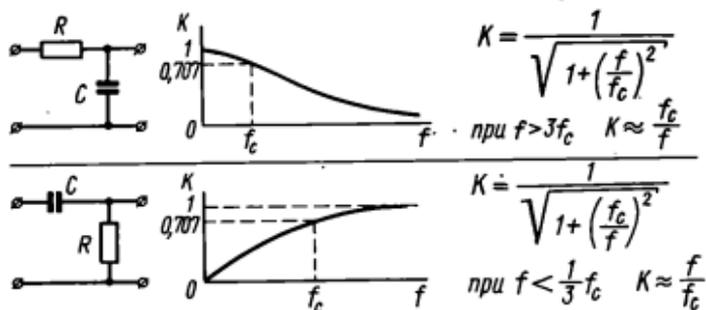


Рис. 9.4

было бы очень сложно у такой катушки получить добротность, достаточную для обеспечения качественной работы фильтра.

По сравнению с реактивными фильтрами безындукционные фильтры отличаются малыми габаритами и весом, низкой стоимостью, простотой изготовления и отсутствием магнитного влияния на окружающие элементы. Правда, фильтры RC не могут

обеспечить таких результатов как фильтры LC , ибо резистор не обладает частотными свойствами и одинаково задерживает колебания всех частот. Кроме того, фильтры RC неприменимы в тех случаях, когда в нагрузку требуется передать большую мощность.

При использовании RC -фильтров сопротивление нагрузки обычно во много раз больше сопротивления резистора фильтра и внутреннего сопротивления источника. Поэтому здесь вопросы согласования не играют существенной роли.

Работа RC -фильтров чаще оценивается не вносимым им затуханием, а коэффициентом передачи $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ и его зависимостью от частоты.

Расчет коэффициента передачи одного звена RC -фильтров при условии $R_{\text{н}} \geq (10 \div 20)R$ производится по формулам (рис. 9.4), где $f_c = \frac{1}{2\pi\tau}$ — частота среза на уровне 0,707; $\tau = RC$ — постоянная времени фильтра.

Вопросы для самопроверки

1. Как классифицируются фильтры в зависимости от диапазона пропускаемых частот; от вида звеньев; от типа элементов, составляющих звено?
2. Какие особенности у Т- и П-образных звеньев по сравнению с Г-образным звеном?
3. Какой режим работы фильтра называется согласованным?
4. В чем заключается условие согласования фильтра с нагрузкой и источником сигнала?
5. Почему нельзя осуществить полное согласование на всех частотах, входящих в полосу пропускания фильтра?
6. В чем отличие понятий рабочего затухания от собственного затухания фильтра?
7. Как на частотную характеристику затухания влияет наличие потерь в элементах фильтра?
8. Как на частотную характеристику затухания влияет увеличение числа звеньев фильтра?
9. В каких случаях целесообразнее использовать реактивные фильтры, а в каких — безындукционные?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

В лабораторной работе исследуются частотные свойства фильтров типа LC и RC в соответствии с данными проделанных заранее расчетов.

Схема установки изображена на рис. 9.5.

При исследовании реактивных фильтров необходимо соблюдать условия согласования как со стороны выхода, так и со стороны входа фильтра.

Поскольку генераторы высоких частот имеют малое выходное сопротивление, то для его увеличения до величины характе-

ристического сопротивления фильтра, последовательно с генератором включается согласующий резистор R_1 . Если сопротивление генератора равно характеристическому сопротивлению фильтра, то резистор R_1 можно было бы и не ставить. Однако такое включение являлось бы менее удачным, ибо в полосе задержания, когда сопротивление параллельных плеч фильтра стремится к нулю, П-образный фильтр, при отсутствии R_1 , сильно шунтировал бы выход генератора.

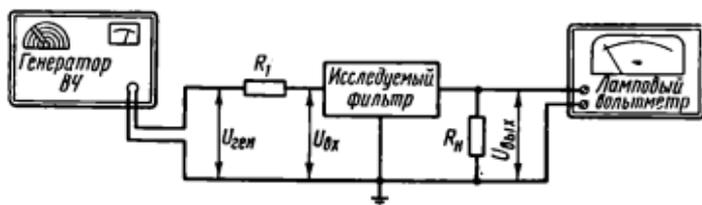


Рис. 9.5

Для обеспечения согласования со стороны выхода сопротивление нагрузки фильтра R_N подбирается равным рассчитанному характеристическому сопротивлению.

Для исследования влияния несогласованности фильтра с нагрузкой, в работе предусмотрено включение нагрузочных сопротивлений, по величине отличных от характеристического.

Для исследования частотных свойств фильтров в работе снимаются их амплитудно-частотные характеристики. При снятии амплитудно-частотных характеристик напряжение генератора $U_{ген}$ необходимо поддерживать строго постоянным и равным, например, 1 в. При использовании генераторов Г4-42, Г4-1А контроль постоянства входного напряжения можно осуществлять по показаниям внутреннего вольтметра генератора (см. раздел «Практическое занятие»). В случае генераторов других типов, можно пользоваться двумя вольтметрами или одним, переключая его со входа на выход. Изменяя частоту генератора в обе стороны от рассчитанной частоты среза в пределах от $1/4 f_c$ до $4 f_c$, каждый раз фиксируется выходное напряжение по показаниям лампового вольтметра.

При расчете рабочего затухания необходимо учитывать, что при наличии согласующего сопротивления R_1 напряжение, поступающее на вход фильтра $U_{вх}$, составит примерно половину напряжения генератора $U_{ген}$. Поэтому рабочее затухание фильтра в децибелах определяется по формуле

$$b = 20 \lg \frac{U_{ген}}{2U_{вых}} .$$

Для удобства вычислений в приложении VI приводится график для пересчета отношения напряжений в децибелы.

Если используемый в работе ламповый вольтметр имеет шкалу уровней, выраженных в децибелах (например, вольтметр ВЗ-13), то затухание фильтра можно определять непосредственным отсчетом по шкале прибора, как было рассмотрено в разделе «Практическое занятие».

При исследовании безындукционных фильтров сопротивление нагрузки должно в 10—20 раз превышать сопротивление резистора фильтра. При этом вопросы согласования роли не играют и согласующее сопротивление R_1 не включается.

Хотя RC -фильтры нашли наибольшее применение на низких частотах, в данной работе, чтобы исключить потребность в генераторе звуковых частот, свойства фильтров исследуются в диапазоне более высоких частот.

Для снятия амплитудно-частотной характеристики RC -фильтров частоту генератора достаточно изменять в пределах от $0,1 f_c$ до $10 f_c$.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным величинам L и C рассчитать сопротивление согласованной нагрузки R_H и частоту среза f_c для П-образного звена фильтра нижних частот.
2. Построить зависимость собственного затухания однозвенного фильтра, рассчитанного в п. 1, от частоты в диапазоне $1/4 f_c \div 4 f_c$. При построении воспользоваться графиком собственных затуханий, приведенным в приложении VII. Результаты расчета свести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

$x = f/f_c$	—	
$f = f_c \cdot x$	кГц	
b_c	дБ	

Частоты на графике откладывать в логарифмическом масштабе. Для облегчения выбора масштаба воспользоваться шкалой, помещенной в приложении VIII.

3. Построить зависимость собственного затухания двухзвенного фильтра, составленного из звеньев, рассчитанных в п. 1, от частоты в диапазоне $1/4 f_c \div 4 f_c$. Частотная характеристика затухания строится на том же графике, где построена характеристика в п. 2.
4. Рассчитать сопротивление согласованной нагрузки и частоту

среза для Т-образного звена ФВЧ, составленного из тех же заданных элементов L и C , что и в п. 1.

5. Рассчитать постоянную времени, частоту среза и амплитудно-частотную характеристику заданного типа фильтра RC по заданным значениям величин резистора и конденсатора.

Результаты расчета АЧХ свести в табл. 9.2.

Таблица 9.2

$x = f/f_c$	—	
$f = f_c x$	кГц	
K	—	

Расчет производить, пользуясь формулами приведенными на рис. 9.4 или графиком, приведенным в приложении IX. По результатам расчета построить АЧХ фильтра в логарифмическом масштабе по оси частот.

Экспериментальная часть

6. Собрать на рабочем месте однозвенный П-образный ФНЧ из элементов, соответствующих расчетным данным п. 1, и подключить к нему приборы согласно схеме рис. 9.5.

Снять зависимость величины рабочего затухания, вносимого фильтром, от частоты источника сигнала для трех значений сопротивления нагрузки:

- а) $R_H = Z_0$; б) $R_H = 5 Z_0$; в) $R_H = 1/5 Z_0$.

Результаты измерений занести в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Тип фильтра: Исходные данные:	$U_{ген} = 1 \text{ в}, R_H = \dots, R_1, \dots$
$f, \text{ кГц}$	
$U_{вых}, \text{ мВ}$	
$b, \text{ дБ}$	

7. Собрать на рабочем месте двухзвенный П-образный ФНЧ из звеньев, исследуемых в п. 6. Снять зависимость величины рабочего затухания от частоты при согласованной нагрузке. Результаты измерений занести в табл. 9.3.

8. Собрать на рабочем месте однозвенный Т-образный ФВЧ, согласно данным п. 4. Снять зависимость величины рабочего за-

тухания от частоты при согласованной нагрузке. Результаты измерений занести в табл. 9.3.

9. Собрать на рабочем месте RC -фильтр, согласно данным задания. Снять АЧХ фильтра. Результаты измерений занести в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Тип фильтра: Исходные данные: $U_{ген} = 1 \text{ в. } R = \dots, C = \dots, R_H = \dots$
$f, \text{ кГц}$	
$U_{вых. мВ}$	
K	

Обработка результатов эксперимента

- По результатам п. 6 и п. 7 построить зависимость рабочих затуханий ФНЧ от частоты. Графики построить на одном листе с графиками собственных затуханий, вычисленных в п. 2 и п. 3. Сравнить экспериментально полученные графики с расчетными. Объяснить причину расхождений.
- Сделать вывод о влиянии числа звеньев фильтра и согласования нагрузки на форму частотной характеристики затухания.
- По результатам п. 8 построить зависимость рабочего затухания ФВЧ от частоты.
- По результатам п. 9 построить АЧХ фильтра RC на одном листе с характеристикой, вычисленной в п. 5. По экспериментальной характеристике определить постоянную времени фильтра. Сравнить ее с расчетным значением.

Литература

- Белоцерковский Г. Б., стр. 147—158, 170—179.
- Исюмов Н. М., стр. 294—311.
- Конашинский Д. А. Частотные электрические фильтры. Госэнергоиздат, 1959, стр. 52—68.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Исследование полосовых и задерживающих фильтров

Цель работы — ознакомление с методикой снятия частотных характеристик фильтров. Экспериментальная проверка результатов расчетов фильтров.

Оборудование рабочего места

1. Генератор высокой частоты Г4-42 (1 шт.).
2. Ламповый вольтметр ВЗ-13 (1 шт.).
3. Набор элементов фильтров и резисторов.

Краткие теоретические сведения

Полосовые и задерживающие (режекторные) фильтры применяются для выделения из всего спектра частот некоторой заданной полосы. Причем полосовые фильтры эту полосу частот пропускают, а режекторные — не пропускают, вырезают.

Если выделяемая полоса частот достаточно широка по сравнению с ее средней частотой, то полосовые и режекторные фильтры можно получить последовательным включением ФНЧ и ФВЧ с взаимно перекрывающимися друг друга характеристиками.

Если же требуется создать узкополосный фильтр с достаточно большой крутизной частотной характеристики затухания, то приходится прибегать к комбинации колебательных контуров, включаемых в последовательные и параллельные ветви.

При этом для частот полосы пропускания реактивные сопротивления всех последовательных ветвей фильтра должны быть равны или близки к нулю, тогда фильтр пропускает эти частоты с малым затуханием, а сопротивления всех параллельных ветвей фильтра должны быть велики, чтобы они не сказывались при работе фильтра на нагрузку.

В полосе задержания, наоборот, реактивные сопротивления всех параллельных ветвей должны быть малы, чтобы фильтр шунтировал токи частот полосы задержания, а все последовательные ветви должны представлять собой бесконечно большие реактивные сопротивления, чтобы фильтр не пропускал токи этих частот.

Выбирая соответствующим образом параметры контуров, образующих ветви фильтра, можно резко разграничить полосу пропускания и полосу задержания, т. е. получить достаточно высокую крутизну частотной характеристики в переходной области.

Для обеспечения правильной работы как широкополосного, так и узкополосного фильтров сопротивление нагрузки и внутреннее сопротивление источника сигналов должны быть согласованы с фильтром, т. е. равны характеристическому сопротивлению.

В пределах полосы прозрачности характеристическое сопротивление изменяется по величине, хотя и сохраняет чисто активный характер. В таких условиях полностью согласовать фильтр с неизменными сопротивлениями нагрузки и источника можно только на одной частоте.

Для полосовых фильтров такой частотой является резонансная частота контуров $f=f_0$, для режекторных фильтров частоты

$f=0$ и $f=\infty$. При этом

$$R_n = Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}} = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}}.$$

Расчетные формулы для полосовых фильтров:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}}.$$

$$f_{c_1} = f_0 (\sqrt{P_\Phi + 1} - \sqrt{P_\Phi}),$$

$$f_{c_2} = f_0 (\sqrt{P_\Phi + 1} + \sqrt{P_\Phi}),$$

$$P_\Phi = \frac{L_2}{L_1} = \frac{C_1}{C_2},$$

$$f_0 = \sqrt{f_{c_1} f_{c_2}},$$

$$\Pi = f_{c_2} - f_{c_1} = \frac{Z_0}{\pi L_1}.$$

Схемы и частотные характеристики затухания полосовых и режекторных фильтров приведены на рис. 10.1. Пунктирной линией показаны кривые собственного затухания фильтров, а сплошной — рабочего затухания.

В результате неизбежного рассогласования в полосе прозрачности и наличия потерь в элементах фильтров их реальные характеристики рабочего затухания значительно отличаются от расчетных. Это отличие проявляется в том, что возникает затухание в полосе прозрачности, величина которого тем больше, чем больше потери. Это затухание возрастает по мере приближения к частотам среза, в результате чего происходит закругление характеристики затухания вблизи частот среза, приводящее к уменьшению избирательности фильтра. На рис. 10.2 показано влияние добротности контуров на характеристики полосового фильтра.

Таким образом, для улучшения характеристик затухания, фильтры необходимо изготавливать из элементов с возможно большей добротностью. Опыт показывает, что добротности элементов фильтра должны быть по крайней мере в 15÷20 раз больше f_0/Π , где f_0 — средняя частота полосы, а Π — ширина полосы пропускания или задержания.

Значительное улучшение характеристики затухания достигается применением в фильтрах пьезоэлектрических, магнитострикционных и электромеханических резонаторов, обладающих высокой добротностью.

Комбинацией RC -фильтров нижних и верхних частот также можно получить полосовые или задерживающие RC -фильтры.

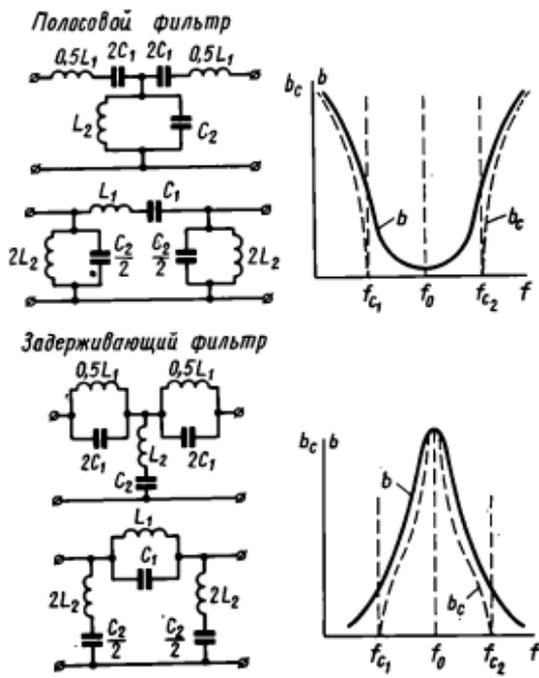


Рис. 10.1

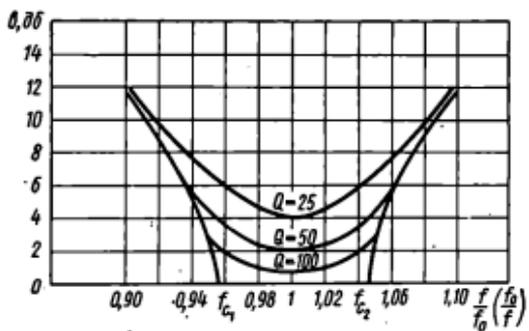


Рис. 10.2

Преимуществами таких фильтров по сравнению с реактивными фильтрами являются: малые габариты, простота изготовления и настройки, нечувствительность к посторонним магнитным полям и возможность создания фильтра для работы в области самых низких частот (начиная с долей герца). Недостатком их является малая крутизна частотной характеристики, что требует использования RC -фильтров совместно с усилителями.

Обычно к полосовым и режекторным RC -фильтрам прибегают при необходимости выделить узкую полосу очень низких частот.

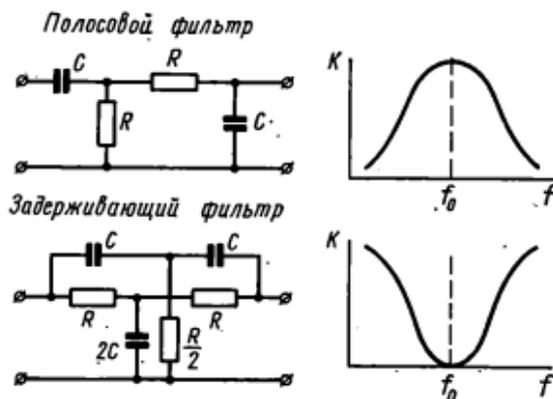


Рис. 10.3

Схемы и амплитудно-частотные характеристики RC -фильтров приведены на рис. 10.3. Расчетная формула:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключаются условия согласования при работе полосовых и режекторных фильтров?
2. На каких частотах выполняется условие полного согласования у полосовых и режекторных фильтров при нагрузке их на сопротивление, равное характеристическому?
3. Чем отличаются характеристики рабочего затухания реальных фильтров от расчетных характеристик собственного затухания?
4. Как зависит частотная характеристика рабочего затухания от добротности элементов фильтра?
5. От каких параметров согласованного полосового фильтра зависят: а) средняя частота полосы пропускания, б) величина полосы пропускания, в) крутизна характеристики затухания?
6. Какие преимущества и недостатки безындукционных полосовых и режекторных фильтров?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Схема установки для исследования фильтров показана на рис. 9.5.

Фильтры различных видов, соответствующие проделанному заранее расчету, собираются на рабочем месте из съемных элементов: индуктивностей, конденсаторов, резисторов.

Для выяснения влияния элементов контуров на величину полосы пропускания полосового фильтра при неизменной средней частоте в работе предусматривается замена последовательного и параллельного контуров на другие, имеющие те же резонансные частоты, но иное соотношение между L_1 и L_2 .

Для исследования влияния добротности элементов на форму частотной характеристики затухания, в работе имеется возможность параллельно конденсаторам фильтра подключать шунтирующие резисторы.

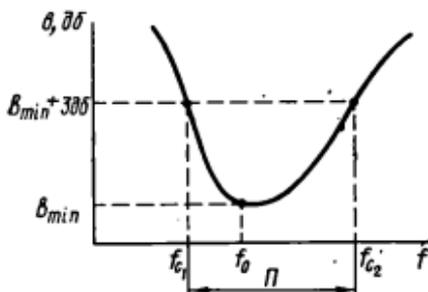


Рис. 10.4

Полоса пропускания по реальным характеристикам затухания определяется на уровне 3 дБ , считая от минимального затухания на частоте f_0 (рис. 10.4). При этом следует иметь в виду, что резонансная частота f_0 находится не точно в середине полосы пропускания, а ближе к нижней частоте среза, и этот сдвиг ее тем больше, чем шире полоса пропускания.

В работе также снимаются частотные характеристики затухания режекторного LC -фильтра.

При снятии характеристик затухания LC -фильтров резисторы R_1 и R_n устанавливаются каждый раз в соответствии с рассчитанным характеристическим сопротивлением Z_0 .

При снятии АЧХ фильтров RC , вопросы согласования не существенны, поэтому R_1 не включается, а сопротивление нагрузки выбирается $R_n = (10 \div 20) R$.

В остальном указания по выполнению работы аналогичны указаниям, приведенным в предыдущей работе по исследованию ФНЧ и ФВЧ.

Содержание работы

Расчетная часть

1. Для заданного типа полосового фильтра по заданным его элементам определить:

1. Резонансную частоту контуров f_0 .
2. Частоты среза f_{c1} и f_{c2} .
3. Характеристическое сопротивление Z_0 .
4. Полосу пропускания P .
2. Те же параметры определить для вторых заданных значений элементов фильтра.
3. Для заданного типа режекторного фильтра по заданным его элементам определить характеристическое сопротивление (Z_0) и резонансную частоту контуров (f_0).
4. Для заданного типа RC -фильтра определить среднюю частоту характеристики f_0 .

Экспериментальная часть

5. Собрать на рабочем месте исследуемую схему полосового фильтра из элементов, соответствующих расчету, проделанному в п. 1.
Снять зависимость затухания, вносимого фильтром, от частоты. Результаты измерений занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Тип фильтра:
Исходные данные:	последовательная ветвь $L=...$, $C=...$ параллельная ветвь $L=...$, $C=...$, $R_1=...$, $R_N=...$, $U_{гсн}=1$ в
f , кГц	
$U_{вых}$, мВ	
b , дБ	

6. При сохранении той же схемы полосового фильтра, заменить контуры на другие, соответственно расчету, проделанному в п. 2.
Снять зависимость затухания от частоты. Результаты измерений занести в табл. 10.1.
7. Не изменяя элементов фильтра, шунтировать все конденсаторы резисторами $R_{ш}=...$, ком.
Снять зависимость затухания от частоты. Результаты измерений занести в табл. 10.1.
8. Собрать на рабочем месте схему исследуемого задерживающего фильтра из элементов, соответствующих расчету, проделанному в п. 3. Снять зависимость затухания от частоты. Результаты измерений занести в табл. 10.1.
9. Собрать на рабочем месте схему исследуемого RC -фильтра, соответствующего расчету, проделанному в п. 4. Снять АЧХ фильтра. Результаты измерений занести в табл. 10.2.

Тип фильтра:
 Исходные данные: $U_{ген} = 1$ в, $R = \dots$, $C = \dots$, $R_n = \dots$

f , кГц	
$U_{вых}$, мВ	
K	

Обработка результатов эксперимента

10. Построить частотные характеристики затухания полосовых фильтров по данным п. 5, 6, 7. Все характеристики строятся на одном листе.
 По характеристикам определить для каждого случая среднюю (геометрическую) частоту f_0 , частоты среза и полосу пропускания.
 Сделать выводы о влиянии элементов фильтра на характеристику затухания.
11. Построить частотную характеристику затухания задерживающего фильтра по данным п. 8.
12. Построить амплитудно-частотную характеристику RC -фильтра, исследуемого в п. 9.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б., стр. 158—161.
2. Изюмов Н. М., стр. 311—316.
3. Коначинский Д. А. Частотные электрические фильтры. Госэнергоиздат, 1959, стр. 69—80, 114—117.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Исследование режимов длинной линии при гармоническом воздействии

Цель работы — ознакомление с конструкцией длинной линии и методикой измерения режимов ее работы; исследование влияния величины и характера нагрузки на режим работы длинной линии.

Оборудование рабочего места

1. Макет длинной линии с генератором СВЧ.
2. Набор нагрузок и шлейфов.

Краткие теоретические сведения

Длинной линией называется электрическая цепь, протяженность которой соизмерима с длиной волны распространяющегося в ней колебания.

При включении такой линии к генератору, вдоль нее начинает распространяться бегущая волна тока и напряжения. Сопротивление, которое оказывает линия бегущей волне тока, называют волновым сопротивлением.

В линии без потерь волновое сопротивление носит чисто активный характер и определяется для двухпроводной линии, расположенной в воздухе, по формуле

$$\rho = 276 \lg \frac{a}{r},$$

где ρ — волновое сопротивление, *ом*; a — расстояние между проводами, *мм*; r — радиус проводов, *мм*.

Если нагрузкой линии является активное сопротивление по величине равное волновому сопротивлению ($Z_n = \rho$), то энергия бегущей волны целиком поглощается в нагрузке и никаких отражений не происходит. Такой режим работы линии называется согласованным. В этом режиме амплитуды напряжения остаются неизменными вдоль всей линии (рис. 11.1).

Если линия без потерь на конце замкнута накоротко ($Z_n = 0$), разомкнута ($Z_n = \infty$) или нагружена на чисто реактивное сопротивление ($Z_n = jX_n$), то в нагрузке поглощения энергии не происходит. При этом вся энергия отражается от конца линии, т. е. в линии образуется отраженная бегущая волна, равная по величине падающей волне, но движущаяся от конца линии к генератору. Таким образом, в этом режиме в линии существуют две бегущие волны, распространяющиеся навстречу друг другу: падающая — идущая от генератора к нагрузке, и отраженная, идущая от нагрузки к генератору. В тех точках линии, где напряжения этих волн оказываются в фазе, результирующее напряжение удваивается по амплитуде, образуя «пучности». В тех точках, куда падающая и отраженная волны приходят в противофазе, результирующее напряжение оказывается равным нулю, т. е. получаются так называемые «узлы». Узлы и пучности чередуются через расстояние, равное четверти длины волны.

Так, в результате интерференции двух одинаковых бегущих волн — падающей и отраженной — в линии устанавливается режим стоячих волн. При этом предполагается, что на входе линии согласована с источником сигнала и многократных отражений не происходит.

В режиме стоячих волн линия без потерь представляет для источника реактивное сопротивление. Короткозамкнутый четвертьволновый отрезок и разомкнутый полуволновый отрезки такой линии имеют входное сопротивление, равное бесконечно-

сти (с учетом потерь в линии, входное сопротивление будет активным и максимальным). Короткозамкнутый полуволновый отрезок и разомкнутый четвертьволновый имеют входное сопротивление, равное нулю (с учетом потерь их входное сопротивление будет минимальным и чисто активным). Частотные свойства этих отрезков позволяют их использовать в радиотехнических

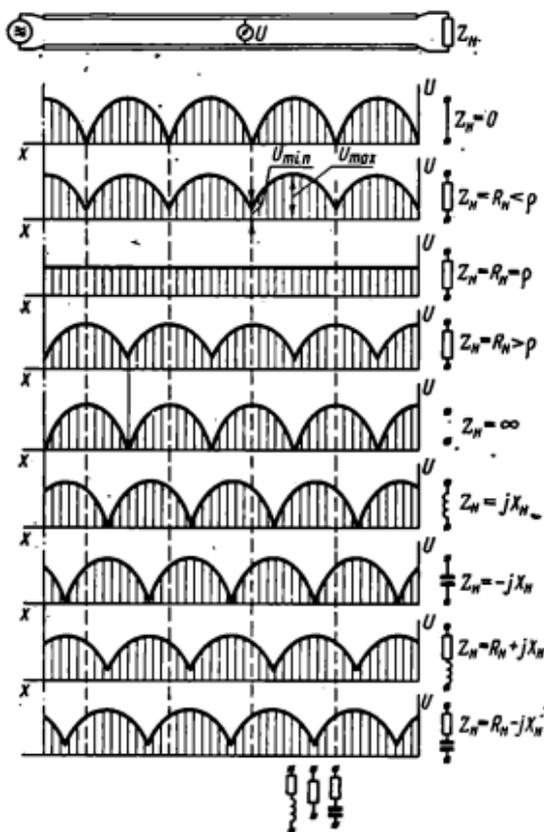


Рис. 11.1

устройствах диапазона СВЧ в качестве колебательных систем. Выбирая соответствующие длины отрезков линии, больше или меньше четверти волны, можно их использовать в качестве эквивалентов индуктивности и емкости.

В общем случае при нагрузке, имеющей либо комплексный характер, либо чисто активный характер, но по величине отличающейся от волнового сопротивления, в линии существуют одно-

временно и бегущая и стоячая волны. Такой режим называется режимом смешанных волн.

Соотношение между амплитудами бегущей волны, поглощаемой в нагрузку, и стоячей волны в этом случае определяется характером и величиной сопротивления нагрузки. Чем ближе значение сопротивления нагрузки к волновому, тем больше амплитуда бегущей волны и тем эффективнее передача мощности в нагрузку. Распределение напряжения вдоль линии в режиме смешанных волн также характеризуется наличием максимумов и минимумов. Однако в отличие от стоячих волн амплитуды в точках максимума будут меньше удвоенной амплитуды бегущей волны, а в точках минимума — не достигают до нулевых значений.

Если сопротивление нагрузки является чисто активным и большим, чем волновое сопротивление, то распределение напряжения имеет некоторое сходство с распределением напряжения в разомкнутой линии, а именно, на конце линии устанавливается максимум напряжения (см. рис. 11.1).

При активном сопротивлении нагрузки, меньшем волнового сопротивления, картина распределения напряжений похожа на режим короткозамкнутой линии тем, что на конце линии наблюдается минимум напряжения.

При комплексном сопротивлении нагрузки на конце линии устанавливается некоторое промежуточное значение напряжения, лежащее между максимальным и минимальным значениями. При этом, в зависимости от характера реактивной составляющей нагрузки, вся картина распределения напряжений сместится в ту или другую сторону по сравнению с картиной распределения при активной нагрузке. Таким образом, по картине распределения напряжения вдоль линии можно судить о характере реактивной составляющей нагрузки: если, считая от конца линии к началу, напряжение убывает, т. е. минимум напряжения находится ближе к концу, чем максимум, характер реактивной части нагрузки — емкостной. Если же от конца к началу линии напряжение возрастает, т. е. ближайшим к нагрузке является максимум напряжения, а не минимум, характер реактивной части нагрузки — индуктивный.

Аналогичным образом, можно определить характер реактивной составляющей сопротивления в любой точке линии: характер окажется емкостным, если точка попадет на нисходящий участок кривой напряжения, считая от конца к началу линии; и индуктивным, если точка располагается на восходящем участке кривой напряжения (см. рис. 11.1).

В радиотехнических устройствах режим смешанных волн специально не создается, возникает он как вынужденный при недостаточном согласовании нагрузки с линией.

Для количественной оценки степени согласованности нагрузки с линией вводится коэффициент бегущей волны $k_{бв}$, равный отно-

шению минимального напряжения (тока) в линии к максимальному (см. рис. 11.1)

$$k_{\text{об}} = \frac{U_{\text{min}}}{U_{\text{max}}}.$$

Величина $k_{\text{об}}$ определяется соотношением между сопротивлением нагрузки и волновым сопротивлением линии. Если сопротивление нагрузки чисто активное, то

$$k_{\text{об}} = \frac{\rho}{R_{\text{н}}} \text{ при } R_{\text{н}} > \rho$$

или

$$k_{\text{об}} = \frac{R_{\text{н}}}{\rho} \text{ при } R_{\text{н}} < \rho.$$

В реальных фидерных линиях получение идеального согласования ($k_{\text{об}} = 1$) практически невозможно. Согласование считается хорошим, если $k_{\text{об}}$ лежит в пределах 0,7—0,8.

Вопросы для самопроверки

1. Какая электрическая цепь называется длинной линией?
2. Какие режимы работы линии возможны?
3. При каких условиях в линии возникают режимы бегущих волн, стоячих волн, смешанных волн?
4. Как численно оценивается степень согласованности линии с нагрузкой?
5. Как экспериментально определяется $k_{\text{об}}$?
6. Почему четвертьволновый короткозамкнутый отрезок линии может быть использован в качестве изолятора?
7. Каковы распределения напряжения и тока в линии при различных режимах ее работы?
8. Какой режим работы линии наиболее целесообразен для передачи энергии от генератора к нагрузке?
9. Как определить характер нагрузки по экспериментально снятому распределению напряжений вдоль линии?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Объектом исследования является двухпроводная воздушная линия (рис. 11.2). Питание линии осуществляется от лампового генератора, работающего в дециметровом диапазоне УКВ. Для снятия зависимости распределения напряжения вдоль линии используется индикаторное устройство, состоящее из симметричного вибратора и кристаллического детектора с микроамперметром магнитоэлектрической системы. Индикаторное устройство смонтировано на каретке, которая может перемещаться вдоль линии. Отсчет расстояния производится по делениям масштабной линейки (линейка сделана перемещающейся и ее конец может быть установлен против любого сечения линии, выбранного за начало отсчета).

Исследуемая линия со стороны нагрузки замкнута накоротко. При исследовании влияния заданных сопротивлений нагрузки их включают на расстоянии в четверть волны от короткозамкнутого конца. В этом случае четвертьволновый короткозамкнутый отрезок линии, оставшийся по другую сторону сопротивления нагрузки, играет роль опорного металлического изолятора. Крепление линии с помощью изолятора из диэлектрика было бы менее удачно, т. е. вызвало бы в реальных условиях комплексную нагрузку,

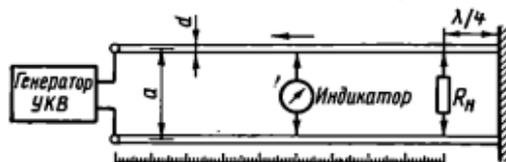


Рис. 11.2

ибо любой изолятор вносил бы какую-то емкость и сопротивление утечки. При этом в линии не удалось бы получить картину распределения амплитуд напряжения, соответствующую разомкнутой на конце линии в чистом виде.

При построении графиков следует иметь в виду, что в линии измеряются не абсолютные значения напряжения, а лишь пропорциональные им величины. Кроме того, поскольку полупроводниковый детектор, применяемый в индикаторном устройстве, имеет практически квадратичную вольт-амперную характеристику, для получения истинной картины распределения напряжения вдоль линии из всех значений показаний прибора индикатора необходимо извлекать квадратный корень.

По той же причине величину коэффициента бегущей волны, исходя из показаний индикаторного прибора, нужно вычислять по формуле

$$k_{об} = \sqrt{\frac{a_{min}}{a_{max}}},$$

где a — показания индикатора.

При исследовании режимов линии, нагруженной на активное сопротивление, в качестве нагрузки используются непроволочные резисторы. При этом следует иметь в виду, что в маркировке резисторов указывается их сопротивление постоянному току, которое будет отличаться от сопротивления на высоких частотах. Поэтому даже при подключении к линии резистора с сопротивлением, равным волновому сопротивлению линии, полного согласования получить не удастся.

При исследовании режимов линии, нагруженной на реактивное сопротивление, в качестве нагрузки используются коротко-

замкнутый и разомкнутый шлейфы, образованные из таких же проводов, что и основная линия. Таким образом, можно считать, что их волновые сопротивления одинаковы.

Содержание работы

Расчетная часть

1. Рассчитать волновое сопротивление линии по известным ее геометрическим размерам (приложение I).

Экспериментальная часть

2. Ознакомиться с конструкцией установки.
3. Включить генератор и снять зависимость показаний индикаторного прибора (α) от расстояния вдоль линии x (без нагрузки).

Результаты измерений занести в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Характер нагрузки	x	α	$\sqrt{\alpha}$

По результатам измерений определить длину волны генератора и положение первого от конца линии максимума, соответствующего точкам линии, отстоящим на четверть длины волны от конца линии.

4. Снять зависимость показаний индикаторного прибора от расстояния вдоль линии (x) при следующих нагрузках, включаемых на расстоянии в четверть длины волны от конца линии:
 - а) активное сопротивление $R_n = \rho$;
 - б) активное сопротивление $R_n = 2\rho$;
 - в) активное сопротивление $R_n = 0,5 \rho$;
 - г) короткозамкнутый на конце отрезок линии, длина которого меньше четверти длины волны;
 - д) разомкнутый на конце отрезок линии, длина которого меньше четверти длины волны;
 - е) короткозамкнутый на конце отрезок линии, длина которого больше четверти длины волны.

Результаты измерений занести в табл. 11.1.

5. Измерить длину шлейфов, подключенных к линии, согласно пунктам г, д, е, п. 4.

Обработка результатов эксперимента

- По данным п. 3 и 4 построить графики распределения напряжения вдоль линии. Графики строить на одном достаточно большом листе один под другим так, чтобы точки, соответствующие одинаковым расстояниям, были на одной вертикали
- По данным п. 4 (*а, б, в*) определить величины $k_{6в}$.
- По геометрическим данным подключаемых шлейфов в п. 4 (*г, д, е*) рассчитать величины их эквивалентных индуктивностей или емкостей, считая, что волновое сопротивление шлейфа такое же, как и у основной линии.

Литература

- Белоцерковский Г. Б., стр. 277—311.
- Калашников А. М., стр. 129—138, 143—169.
- Изюмов И. М., стр. 232—275.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

Исследование электромагнитного поля в прямоугольном волноводе

Цель работы — исследование особенностей распространения радиоволн и структуры электромагнитного поля в прямоугольном волноводе. Ознакомление с волноводом и методикой волноводных измерений.

Оборудование рабочего места

- Генератор сантиметрового диапазона ГЗ-22 (1 шт.).
 - Волноводная измерительная линия Р1-7 (1 шт.).
 - Коаксиально-волноводный переход
 - Развязывающий аттенюатор
 - Волноводная согласованная нагрузка
 - Волноводный короткозамыкающий фланец
 - Волноводное реактивное сопротивление Э9-33 (1 шт.).
 - Волномер Ч2-10 или ВМТ-10 (1 шт.).
 - Микроамперметр магнитоэлектрический М198/2 или М95 (1 шт.).
- из комплекта измерительной линии Р1-7

Краткие теоретические сведения

Волноводами называются металлические трубы или электрические стержни, предназначенные для передачи электромагнитной энергии. Наибольшее распространение получили металлические волноводы с прямоугольной и круглой формой сечения. Способность волновода канализировать электромагнитную

энергию основана на свойстве поверхностей раздела двух сред, обладающих разными электрическими характеристиками, изменять направление движения падающих на них электромагнитных волн. За счет этого явления, в результате интерференции волн, отражающихся от противоположных стенок волновода, в нем возникает результирующая волна, перемещающаяся вдоль волновода.

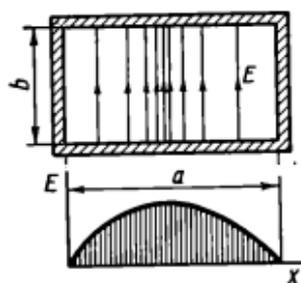


Рис. 12.1

Структура результирующего электромагнитного поля в волноводе отличается от структуры электромагнитного поля в свободном пространстве.

Если в свободном пространстве (и в длинных линиях) распространяются поперечные электромагнитные волны ТЕМ, то в волноводах из-за наличия ограничивающих поле стенок могут распространяться волны только либо поперечно-электрические ТЕ, иначе называемые продольно-магнитными

Н, либо поперечно-магнитные ТМ, иначе называемые продольно-электрическими Е. Первый тип волн отличается тем, что электрическое поле расположено только в плоскости поперечного сечения волновода, а магнитное поле имеет составляющую вдоль оси волновода. Волны типа ТМ, наоборот, характеризуются наличием продольной составляющей электрического поля, в то время как силовые линии магнитного поля лежат в плоскостях, перпендикулярных оси волновода.

В зависимости от частоты источника, способа связи волновода с источником, конфигурации и размеров поперечного сечения волновода в нем могут возбуждаться бесчисленное множество поперечно-электрических TE_{mn} и поперечно-магнитных TM_{mn} волн, определяемых индексами m и n . Для прямоугольного волновода индексы m и n соответствуют числу полуволн поля, укладываемых соответственно, вдоль широкой a и узкой b стороны волновода.

Для прямоугольного волновода основным типом волны, при котором его размеры оказываются минимальными, является волна типа TE_{10} (H_{10}). Картина мгновенного распределения электрического поля в поперечном сечении волновода для волны H_{10} изображена на рис. 12.1. Из этой картины видно, что интенсивность поля вдоль широкой стороны a изменяется по синусоидальному закону от максимума в центре волновода до нуля по краям. Вдоль узкой стороны b поле равномерно.

Силовые линии магнитного поля (не показанные на рисунке) образуют плоские кольца, перпендикулярные к силовым линиям электрического поля.

В отличие от длинных линий вдоль волновода с заданными размерами поперечного сечения будут распространяться только те волны, длина которых не превышает некоторой величины, называемой «критической длиной волны».

Каждому типу волн соответствует своя критическая длина волны, определяемая соотношением:

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}.$$

Для H_{10} критическая длина волны равна удвоенной длине широкой стороны сечения волновода

$$\lambda_{кр} = 2a.$$

Процесс распространения электромагнитных волн вдоль волновода характеризуется фазовой и групповой скоростями. Фазовая скорость определяет только скорость перемещения вдоль оси волновода точек поля, находящихся в одинаковой фазе. Эта скорость не является скоростью движения материи и поэтому она может быть больше скорости света. Передача энергии радиоволны вдоль волновода характеризуется групповой скоростью, которая не может превысить скорость света.

Поскольку фазовая скорость в волноводе оказывается больше скорости света, длина волны в волноводе, определяемая расстоянием между точками поля, находящимися в одной фазе, будет больше, чем в свободном пространстве. Длина волны в волноводе определяется формулой

$$\lambda_{в} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}},$$

где $\lambda_{в}$ — длина волны в волноводе; λ — длина волны в воздухе; $\lambda_{кр}$ — критическая длина волны.

Структура электромагнитного поля в металлическом волноводе обладает следующими основными чертами:

1. Силовые линии электрического поля перпендикулярны к стенкам волновода, на которые они замыкаются.
2. Силовые линии магнитного поля вблизи металлической стенки располагаются параллельно ее поверхности.
3. В плоскости поперечного сечения волновода электрическое или магнитное поле имеет характер стоячих волн.
4. Вдоль оси волновода, в зависимости от величины и характера нагрузки на его конце, могут возникать бегущие, стоячие или смешанные волны.

Для создания в волноводе режима бегущих волн его конец должен быть нагружен на согласованное с волноводом нагрузоч-

ное сопротивление, которое поглощает целиком всю энергию, распространяющуюся вдоль волновода. В этом случае отражения энергии от конца не происходит и амплитуда напряженности электрического поля вдоль волновода остается постоянной.

Если конец волновода замкнуть накоротко металлической пластиной, то в результате взаимодействия падающей и отраженной волн, в нем установится режим стоячих волн. В этом режиме амплитуда напряженности электрического поля вдоль волновода будет изменяться от максимального значения до нуля. При этом расстояние между двумя ближайшими узлами поля равно половине длины волны в волноводе.

Получающаяся аналогия с длинными линиями нарушается при рассмотрении процессов в волноводе, открытом на конце.

Волновое сопротивление волновода зависит от его геометрических размеров; от свойств, заполняющей его среды и от типа волны, распространяющейся по волноводу. Для волны типа H в прямоугольных металлических волноводах волновое сопротивление можно ориентировочно определить по формуле

$$\rho [ом] = 377 \frac{\lambda_n}{\lambda}.$$

Поскольку $\lambda_n > \lambda$, волновое сопротивление волновода с волной H всегда больше, чем волновое сопротивление свободного пространства, равное $377 ом$.

Таким образом, при открытом конце волновода, вследствие различных значений волновых сопротивлений волновода и свободного пространства, только часть распространяющейся по волноводу энергии излучается в окружающее пространство, а оставшаяся энергия отражается от конца обратно в волновод.

Распределения напряженности поля вдоль волновода в режимах бегущих, стоячих и смешанных волн характеризуются коэффициентом бегущей волны ($k_{бв}$), под которым понимают отношение минимальной напряженности поперечной составляющей электрического поля к ее максимальному значению

$$k_{бв} = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}.$$

По величине $k_{бв}$ можно судить о степени согласования волновода с нагрузкой.

Наряду с коэффициентом бегущей волны в технике ультракоротких волн широко используется и обратная ему величина, называемая коэффициентом стоячей волны $k_{св}$

$$k_{св} = \frac{1}{k_{бв}}.$$

Коэффициент $k_{бв}$ может принимать значения от 0 до 1, а $k_{св}$ от 1 до ∞ .

Величину волны электрического поля, отражающейся от несогласованной нагрузки, можно оценить с помощью коэффициента отражения (ρ), модуль которого равен отношению амплитуд отраженной и падающей волн:

$$|\rho| = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{нал}}} :$$

Коэффициент отражения может быть вычислен через величину $k_{\text{бв}}$ по формуле

$$|\rho| = \frac{1 - k_{\text{бв}}}{1 + k_{\text{бв}}} .$$

Учитывая, что энергия пропорциональна квадрату амплитуды, коэффициент отражения энергии волны от несогласованной нагрузки может быть определен по формуле

$$|\rho|^2 = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{нал}}} = \left(\frac{1 - k_{\text{бв}}}{1 + k_{\text{бв}}} \right)^2 .$$

Для волновода с открытым концом $k_{\text{бв}}$ составляет $0,6 \div 0,54$, что соответствует коэффициенту отражения $0,25 \div 0,3$. Таким образом, волновод оказывается плохо согласованным со свободным пространством.

Волноводные линии передачи получили широкое распространение в сантиметровом и дециметровом диапазонах СВЧ, так как по сравнению с длинными линиями они обладают рядом преимуществ.

1. Значительно меньше потери энергии: электромагнитное поле целиком расположено внутри трубы волновода, поэтому отсутствуют потери на излучение; в полости волновода нет необходимости иметь изоляционные материалы, поэтому отсутствуют потери в диэлектрике; резко уменьшаются потери в поверхностном слое проводника, так как нет центрального провода коаксиальной линии с его малой поверхностью.

2. Возможность передачи большей мощности.

3. Более простое конструктивное выполнение.

Однако наличие критической длины волны, связанной с размерами поперечного сечения волновода, делает экономически целесообразным использование волноводов только на волнах, короче 30 см, ибо на более длинных волнах размеры волноводов становятся неприемлемо большими.

Для устранения всякого рода неровностей, вызывающих отражение волн и увеличивающих потери, внутреннюю поверхность волновода приходится полировать и очень тщательно производить сочленения элементов волноводного тракта. Материал стенок волновода должен иметь высокую удельную проводимость, чтобы не допустить проникновения поля в металл и тем умень-

шить потери. Для выполнения последнего требования внутренние стенки волновода нередко золотят или серебрят.

Вопросы для самопроверки

1. Какие преимущества у волноводов по сравнению с коаксиальными линиями?
2. Почему волноводные линии передачи целесообразно использовать на волнах, короче 30 см?
3. Какие режимы волн устанавливаются в волноводе в зависимости от величины и характера нагрузки?
4. Какие типы волн могут возбуждаться в прямоугольном волноводе?
5. Чем отличается структура электромагнитного поля в волноводе от структуры поля в длинной линии?
6. Почему длина волны в волноводе отличается от длины волны в воздухе?
7. Как зависит критическая длина волны типа H_{10} от размеров прямоугольного волновода?
8. Какие преимущества у волны H_{10} перед другими типами волн?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Схема установки для исследования структуры поля в волноводе показана на рис. 12.2.

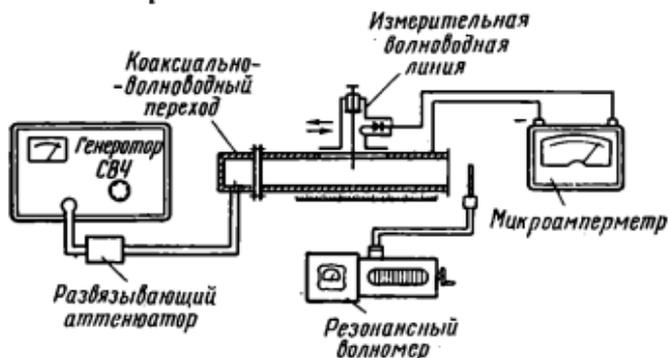


Рис. 12.2

Генератор СВЧ через коаксиально-волноводный переход возбуждает электромагнитные волны в прямоугольном волноводе, в качестве которого используется волновод измерительной линии. Этот волновод посередине верхней широкой стенки имеет продольную щель, вдоль которой перемещается индикаторная головка.

Индикаторная головка (рис. 12.3) представляет собой объемный резонатор, слабо связанный с волноводом погруженным в него зондом, в котором электрическим полем волновода наводит-

ся э. д. с. Под действием этой э. д. с. в резонаторе возникают электромагнитные колебания, которые в свою очередь индуцируют ток в цепи кристаллического детектора. Ток детектора регистрируется магнитоэлектрическим микроамперметром. Величина тока детектора определяется напряженностью электрического поля в той точке волновода, где находится зонд.

Таким образом, перемещая индикаторную головку и отмечая по шкале расстояния точки положений зонда и соответствующие им показания микроамперметра, можно снять всю картину распределения напряженности поперечной составляющей электрического поля вдоль волновода.

Ширина щели настолько мала, что позволяет избежать значительного излучения через нее. Зонд представляет собой тонкую иглу,

неглубоко погруженную в полость волновода. Поэтому внесеными ими искажениями поля в волноводе можно пренебречь.

Чтобы связь зонда с волноводом была достаточной для уверенных отсчетов по шкале микроамперметра, обычно предусматривается возможность регулирования степени погружения зонда в волновод.

Полупроводниковый детектор индикаторной головки выпрямляет подводимые к нему высокочастотные колебания и дает в цепь микроамперметра выпрямленный ток, приблизительно пропорциональный квадрату интенсивности электрического поля, в которое помещен зонд. Поэтому для получения относительных значений напряженности электрического поля необходимо извлечь квадратный корень из показаний микроамперметра.

В соответствии с этим $k_{\text{дн}}$ приближенно определяется по формуле

$$k_{\text{дн}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{min}}}{\alpha_{\text{max}}}},$$

где α_{min} и α_{max} — показания микроамперметра.

В действительности характеристика детектора отличается от квадратичной и при необходимости производить в волноводе более точные измерения следует пользоваться градуировочной кривой детектора.

Для уменьшения погрешности определения положения узлов электрического поля, следует прибегать к методу двух отсчетов.

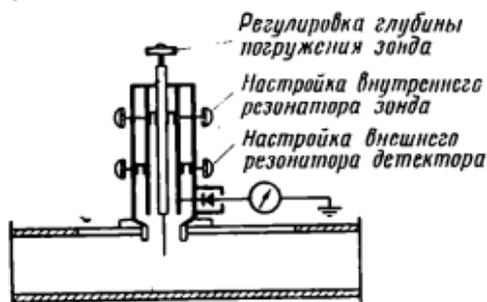


Рис. 12.3

не $1800 \div 3000$ Мгц с погрешностью установки частоты не более 1,25% (рис. 12.5).

Уровень выходной мощности генератора составляет 50 мвт на внешней нагрузке 50 ом и регулируется в пределах от $0 \div 30$ дб относительно максимальной мощности. Генератор имеет два самостоятельных, одинаковых выхода высокочастотной энергии. Величина выходной мощности, снимаемой с этих выходов, изменяется ручками «Регулировка выхода». При этом относительное изменение уровня высокочастотной энергии на выходе контроли-

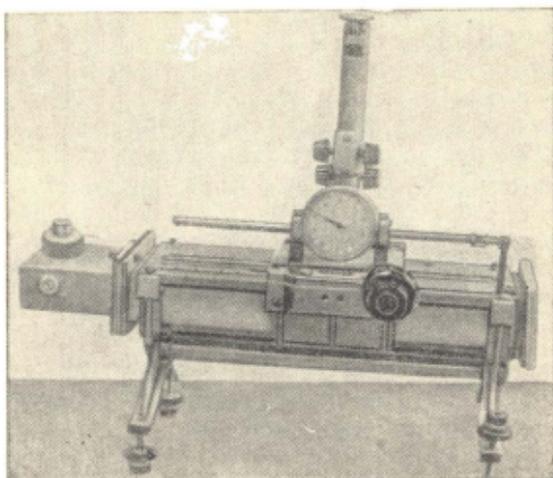


Рис. 12.6

руется по индикаторному прибору, помещенному в левом верхнем углу передней панели генератора. Этот же стрелочный индикатор служит для контроля отсутствия перегрузки генератора, при которой генерация может стать неустойчивой.

Ручкой «Напряжение отражателя» можно дополнительно увеличить мощность на выходе, добиваясь максимального отклонения стрелки индикаторного прибора.

Подготовка генератора к работе производится следующим образом: перед включением прибора рекомендуется снять нагрузку с генератора, выводя ручки «Установка выхода» в положение наименьшей снимаемой мощности.

Подключить нагрузку к выходному гнезду генератора. Другой выход закрыть заглушкой.

Ручкой «Настройка» установить требуемую частоту генерато-

ра, а переключатель рода работ поставить в положение непрерывной генерации НГ.

Включить тумблер питания и дать генератору прогреться не менее пяти минут. При производстве точных измерений время прогрева следует увеличить до 30 мин.

В качестве измерительной линии в лабораторной работе используется линия 10-сантиметрового диапазона типа Р1-7 (рис. 12.6) с поперечным сечением волновода 72×34 мм и максимальной погрешностью измерения $k_{св}$ не выше 3% (указанная погрешность справедлива при нормальной глубине погружения зонда в волновод, составляющей 10—15% от высоты волновода).

Измерительная линия рассчитана на работу с микроамперметром типа М95 на 1 мкА или измерительным усилителем типа У2-1А и обеспечивает достаточную для измерений чувствительность при мощности в волноводном тракте до 1 мВт.

Отсчет расстояний вдоль линии производится по линейке, позволяющей отсчитывать сантиметры и миллиметры, и при помощи стрелочного индикатора часового типа, позволяющего отсчитывать десятые и сотые доли миллиметров. Точность отсчета положения зонда вдоль линии — 0,01 мм.

Подготовка измерительной линии к работе заключается в ее настройке, состоящей из двух операций: установки оптимальной глубины погружения зонда и настройки индикаторной головки в резонанс.

Для удобства настройки линия замыкается накоротко металлической заглушкой и каретка индикаторной головки передвигается вдоль линии до тех пор, пока зонд не попадет в пучность электрического поля. Конструкция головки позволяет регулировать глубину погружения зонда от 0 до 6 мм. Установив первоначально некоторую глубину погружения зонда, настраивают резонаторы зонда и детектора, вращая ручки, расположенные сбоку головки, до получения максимальных показаний индикаторного прибора. Затем, при необходимости, глубину погружения зонда увеличивают или уменьшают до получения требуемой чувствительности. Следует иметь в виду, что при максимальной глубине погружения зонда погрешности измерения возрастают. Поэтому прибегать к большой глубине погружения целесообразно лишь при недостатке мощности или малой чувствительности индикатора. После установки глубины зонда окончательно настраивают индикаторную головку в резонанс.

Для удобства дальнейших измерений, желательно, варьируя настройкой головки и выходной мощностью генератора, установить максимальное отклонение индикаторного прибора (в пучности) равным 100 делениям шкалы.

В заключение подготовки линии к работе, необходимо определить положение узла поля, ближайшего к короткозамкнутому

концу линии. Найденное положение узла принимается за условный конец линии, от которого и ведется отсчет всех расстояний.

Резонансный волномер малой точности ВМТ-10 (рис. 12.7) предназначен для измерения длин волн в диапазоне $4 \div 12$ см с погрешностью не более $\pm 0,5\%$. Чувствительность волномера, т. е. минимальная мощность на его входе, достаточная для измерений, составляет около 100 мкВт . Шкала волномера с делениями, нанесенными по винтовой линии, проградуирована непосредственно в длинах волн в сантиметрах с ценой деления $0,02 \text{ см}$. В волномере имеется возможность калибровки шкалы по контрольной точке на волне 10 см .

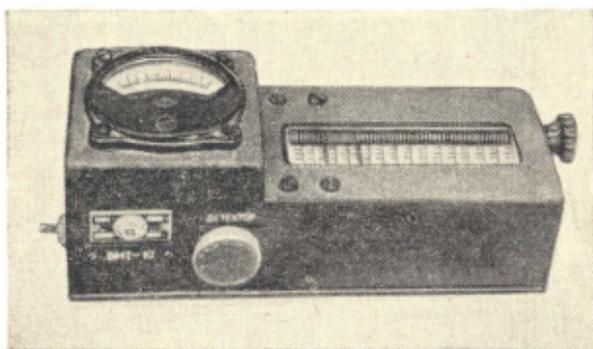


Рис. 12.7

Входом прибора служит коаксиальная линия с волновым сопротивлением 50 ом , в которую вставлена штыревая антенна — зонд. Для измерения длины волны волномер не требует источников питания.

Работа с волномером производится следующим образом. Переключатель вида измеряемых колебаний поставить в положение «Незатухающие». Вращать медленно ручку настройки в ту или другую сторону, следя за стрелкой индикаторного прибора. Когда настройка волномера окажется близкой к частоте генератора, стрелка начнет отклоняться. В момент максимального отклонения стрелки индикаторного прибора положение визирной рамки будет соответствовать длине волны измеряемых колебаний.

В лабораторной работе, кроме своего прямого назначения, волномер используется как измеритель интенсивности электрического поля в поперечном сечении волновода. При этом показание его индикаторного прибора пропорциональны квадрату корню из напряженности электрического поля.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным значениям сторон сечения прямоугольного волновода и длине волны генератора рассчитать:
 - 1) критическую длину волны ($\lambda_{кр}$);
 - 2) длину волны в волноводе (λ_w);
 - 3) волновое сопротивление волновода (ρ_w).
2. Для волновода, рассчитанного в п. 1, открытого на конце, определить приближенное значение коэффициента бегущей волны; коэффициента отражения и долю мощности, излучаемой из открытого конца волновода.
3. Построить график изменения напряженности электрического поля в поперечном сечении волновода вдоль широкой стенки.

Экспериментальная часть

4. Подготовить аппаратуру к измерениям.

Включить генератор и настроить его с помощью волномера на длину волны 10 см. Для этого на шкале волномера устанавливается длина волны, равная 10 см, и по максимальному показанию стрелки индикатора волномера подстраивается частота генератора. Зонд волномера при этом поместить в вертикальном положении в середине открытого конца волновода.

Настроить объемный резонатор индикаторной головки измерительной линии на частоту генератора.

5. Исследовать структуру поля в поперечном сечении волновода.

Перемещая антенну — зонд волномера в вертикальном положении вдоль широкой стенки открытого конца волновода, снять кривую распределения электрического поля вдоль широкой стенки.

Затем, переведя антенну — зонд в горизонтальное положение, проверить наличие электрического поля вдоль узкой стенки волновода и продольной составляющей электрического поля.

На основании измерений начертить структуру поля и определить тип волны в волноводе.

6. Снять кривые распределения электрического поля вдоль волновода при следующих нагрузках:

- 1) волновод на конце замкнут накоротко;
- 2) волновод на конце открыт;
- 3) волновод нагружен на согласованную с ним нагрузку;
- 4) волновод нагружен на реактивное сопротивление.

Для каждого случая зависимость показаний индикаторного прибора (α) от расстояний до условного конца линии (x) следует заносить в табл. 12.1.

Исходные данные:	
$x, \text{ м.м.}$	
a	
E_0	

Обработка результатов измерений

- Сравнить структуру поля в поперечном сечении, полученную экспериментально в п. 5, с построенной теоретически в п. 3.
- Построить графики зависимости относительной напряженности электрического поля E_0 от расстояния вдоль волновода по данным п. 6.
По графикам, соответствующим режимам 1 и 4. п. 6, определить длину волны в волноводе. Сравнить ее с расчетным значением.
По построенным графикам для всех режимов определить величины коэффициентов $k_{\text{об}}$ и $k_{\text{св}}$.
- Определить коэффициент отражения электрического поля от открытого конца волновода по результатам 2 п. 6.
Сделать вывод о доли мощности (в %), которая излучается из открытого на конце волновода. Сравнить экспериментально полученные результаты с расчетными.
- Сделать выводы о влиянии нагрузки на режим работы волновода.

Литература

- Белоцерковский Г. Б., стр. 362—386.
- Калашников А. М., стр. 208—233.
- Изюмов Н. М., стр. 361—376.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

Снятие диаграммы направленности симметричного вибратора

Цель работы — исследование направленных и диапазонных свойств симметричного вибратора. Ознакомление с методикой измерения характеристик направленности антенн.

Оборудование рабочего места

1. Генератор дециметрового диапазона Г4-5 (1 шт.)
2. Передающая антенна (1 шт.).
3. Приемные симметричные вибраторы (5 шт.).
4. Индикаторный прибор с детектором или резонансный волномер Ч2-8, ВМТ-Д (1 шт.).

Краткие теоретические сведения

Направленностью антенны называется ее способность излучать (или принимать) различное количество энергии по различным направлениям.

Для качественной оценки направленных свойств антенны служит характеристика направленности, а для количественной оценки — числовые параметры: ширина диаграммы направленности 2θ , коэффициент направленного действия D и коэффициент усиления G .

Характеристикой направленности антенны называется зависимость напряженности поля (или излучаемой мощности) от направления в пространстве в равноудаленных от антенны точках. Графическое изображение этой зависимости $f(\theta, \varphi)$ называется диаграммой направленности.

Чтобы получить представление о пространственном характере диаграммы направленности, обычно снимают диаграммы направленности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, например, горизонтальной и вертикальной.

Построение снятой диаграммы направленности можно производить как в полярной, так и в прямоугольной системе координат.

При построении диаграммы направленности в полярной системе координат из полюса (начала координат) под различными углами (θ) откладывают радиус — вектор, длина которого пропорциональна напряженности поля (или излучаемой мощности) в направлении данного радиуса, а затем концы этих радиусов — векторов соединяют плавной кривой (рис. 13.1, а).

В прямоугольной системе координат по оси абсцисс откладывается угол (θ), характеризующий направление излучения в соответствующей плоскости, а по оси ординат — величина напряженности поля или излучаемой мощности (рис. 13.1, б).

Диаграммы направленности, выполненные в полярных координатах, отличаются большей наглядностью. В прямоугольной же системе координат можно выбрать любой масштаб по обеим осям и более четко выявить структуру сложных диаграмм, растянув их вдоль оси абсцисс. Обычно широкие диаграммы направленности строят в полярной, а узкие — в прямоугольной системе координат.

Для суждения о направленных свойствах антенны представляют интерес не абсолютные значения параметров электромагнитного поля, а их относительное распределение. Поэтому на практике широко пользуются нормированными характеристиками направленности, в которых величины напряженности поля или мощности выражены относительно их максимального значения: $F(\theta, \varphi) = \frac{f(\theta, \varphi)}{f_{\max}(\theta, \varphi)}$. У нормированных диаграмм максимальное значение всегда равно единице.

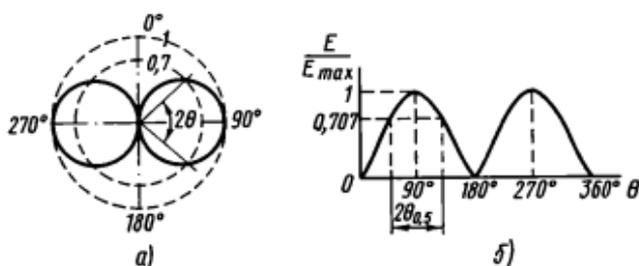


Рис. 13.1

Шириной диаграммы направленности $2\theta_{0,5}$ называется угол между направлениями, вдоль которых напряженность поля уменьшается в 0,707 раз по сравнению с максимальной напряженностью поля (см. рис. 13.1). Если снята диаграмма направленности по мощности, то ширина диаграммы определяется на уровне половины от максимальной мощности.

Исследуемый в работе симметричный вибратор является одним из широко распространенных видов антенн в диапазонах КВ и УКВ.

Симметричный вибратор представляет собой прямолинейный, в середине разделенный изолятором, провод, у которого в симметричных (относительно середины) точках токи равны по величине и одинаковы по направлению.

Полагая распределение тока вдоль вибратора синусоидальным, для тонкого вибратора характеристика направленности в плоскостях, проходящих через ось антенны (меридиональных), определяется выражением

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\pi \frac{l}{\lambda} \cos \theta\right) - \cos \pi \frac{l}{\lambda}}{\sin \theta},$$

где $f(\theta)$ — ненормированная функция направленности по напряженности электрического поля; θ — угол, отсчитываемый от оси вибратора; l — длина вибратора; λ — длина волны.

Таким образом, форма диаграммы направленности симметричного вибратора в меридиональных плоскостях зависит от величины соотношения l/λ .

Для полуволнового вибратора ($l=0,5\lambda$) характеристика направленности $f(\theta) \approx \sin \theta$, т. е. диаграмма направленности представляет собой фигуру, напоминающую восьмерку, составленную из двух окружностей (рис. 13.2, а).

Для волнового вибратора ($l=\lambda$) нормированная характеристика направленности определяется формулой

$$F(\theta) = \frac{\cos(\pi \cos \theta) + 1}{2 \sin \theta}$$

В этом вибраторе наблюдается улучшение направленных свойств по сравнению с полуволновым за счет двукратного увеличения общего числа элементарных диполей, составляющих симметричный вибратор, каждый из которых обладает направленностью (рис. 13.2, б).

При дальнейшем увеличении соотношения l/λ в антенне появляются участки с противоположным направлением тока (рис. 13.2, в и г); в результате чего в диаграмме направленности появляются дополнительные лепестки, а излучение в экваториальной плоскости ($\theta=90^\circ$) уменьшается.

При длине вибратора $l=2\lambda$ участки с встречными направлениями тока станут равны по длине, поэтому излучение в экваториальной плоскости полностью исчезнет, ибо поля скомпенсируют друг друга, и диаграмма направленности примет вид, изображенный на рис. 13.2, г.

Изображенные на рис. 13.2 диаграммы направленности построены в предположении тонких вибраторов, т. е. таких, у которых диаметр много меньше длины. Утолщение диаметров приво-

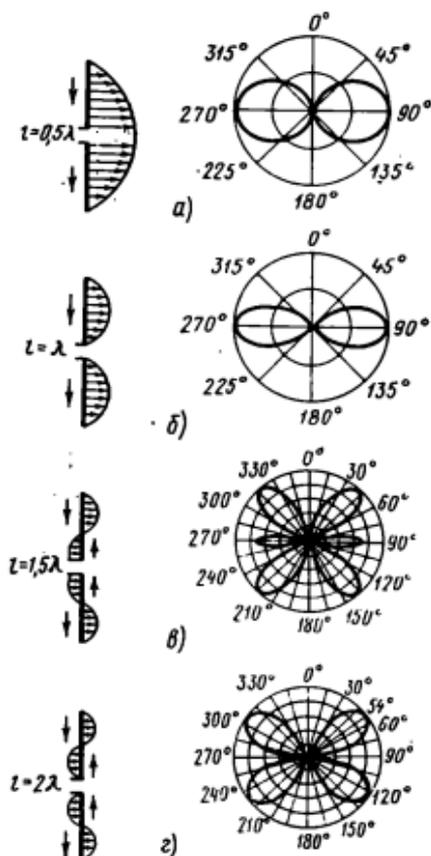


Рис. 13.2

дит к тому, что вместо нулей в диаграммах направленности получаются минимумы излучения, а малые добавочные лепестки становятся менее заметными.

В плоскостях, перпендикулярных оси антенны, симметричный вибратор направленными свойствами не обладает и, следовательно, диаграмма направленности представляет собой окружность.

Входное сопротивление симметричного вибратора, в общем случае, имеет как активную, так и реактивную составляющие. При длине вибратора равной или кратной половине длины волны его реактивное сопротивление обращается в нуль. Такая длина вибратора называется резонансной.

Точная резонансная длина вибратора на несколько процентов меньше целого числа полу-волн. Причиной этого отличия антенн от длинных линий, является наличие излучений в антеннах, приводящее к такому изменению распределения стоячих волн, вдоль вибратора, что в его входном сопротивлении при длине, кратной полуволне, появляется индуктивная составляющая, для компенсации которой длину вибратора следует немного укоротить.

Коэффициент укорочения k , показывающий во сколько раз должна быть уменьшена расчетная длина вибратора, может быть найден по графикам рис. 13.3, а для полуволнового и б для волнового вибраторов.

Поясним пользование этими графиками. Например, требуется найти геометрическую длину полуволнового вибратора диаметром $d=2$ мм, работающего на частоте $f=375$ МГц. Эта частота соответствует длине волны $\lambda=80$ см. По графику рис. 13.3, а находим, что отношению $\frac{\lambda}{d}=\frac{800}{2}=400$, соответствует коэффициент укорочения $k=0,945$. Таким образом, укороченная длина вибратора равна $k \cdot \frac{\lambda}{2} = 0,945 \cdot \frac{80}{2} \approx 38$ см.

При изменении частоты принимаемого сигнала величина э. д. с. на выходе симметричного вибратора также будет изменяться. Это обусловлено, во-первых, изменением реактивной части входного сопротивления антенны, и, во-вторых, изменением

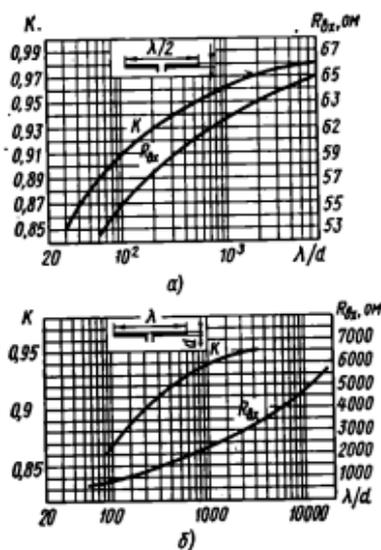


Рис. 13.3

характеристики направленности. Если, поддерживая постоянной мощность источника сигнала, снять зависимость э. д. с. от частоты, то получим амплитудно-частотную характеристику антенны. По форме такой частотной характеристики можно судить о полосе пропускания антенны, о ее диапазонных свойствах.

Резонансные свойства антенны зависят от величины ее волнового сопротивления, которое в свою очередь существенно зависит от диаметра вибратора. С увеличением диаметра уменьшается волновое сопротивление и расширяется полоса пропускания антенны.

Фидер, подводящий питание к симметричному вибратору резонансной длины, должен быть согласован с ним, т. е. волновое сопротивление фидера должно быть равно входному сопротивлению вибратора. Если же эти сопротивления отличаются друг от друга, то между фидером и вибратором включается согласующее устройство. Кроме того, если симметричный вибратор питается от несимметричного фидера в виде коаксиальной линии, то помимо согласования входного сопротивления вибратора с волновым сопротивлением фидера, необходимо произвести симметрирование, т. е. обеспечить электрическую симметрию каждой половинки вибратора относительно заземленной оболочки фидера. Для решения этой задачи фидер подключается к антенне через специальное симметрирующее устройство.

Напряженность электрического поля, создаваемого антенной, характеризуется не только амплитудой и фазой, но и поляризацией.

Плоскостью поляризации волны считается плоскость, проходящая через направление ее распространения и вектор напряженности электрического поля.

Поляризация волн, излучаемых симметричным вибратором, определяется его положением в пространстве. Вертикально расположенный вибратор излучает вертикально-поляризованные волны, горизонтальный вибратор — горизонтально-поляризованные.

Э. д. с., индуцируемая в приемном вибраторе, пропорциональна проекции вектора напряженности электрического поля на ось антенны. Если приемный вибратор расположен вдоль силовых линий электрического поля, то наводимая в нем э. д. с. будет наибольшей. Если же приемный вибратор ориентирован перпендикулярно силовым линиям электрического поля, то никакой э. д. с. в нем индуцироваться не будет. Поэтому, для получения максимального приема передающий и приемный вибраторы должны быть одинаково ориентированы в пространстве.

Вопросы для самопроверки

1. Как распределены ток и напряжение вдоль симметричного вибратора длиной: $l=0,5\lambda$; $l=\lambda$; $l=1,5\lambda$; $l=2\lambda$?

2. Чем отличается нормированная характеристика направленности от ненормированной?
3. Какую форму имеет диаграмма направленности симметричного вибратора в плоскости, проходящей через ось вибратора при: $l=0,5\lambda$; $l=\lambda$; $l=1,5\lambda$; $l=2\lambda$?
4. Какую форму имеет диаграмма направленности симметричного вибратора в плоскости, перпендикулярной его оси?
5. Как определяется ширина диаграммы направленности по напряженности поля и по мощности?
6. Как отражается на форме диаграммы направленности увеличение диаметра провода вибратора?
7. Что такое амплитудно-частотная характеристика антенны?
8. От чего зависит ширина полосы пропускания вибратора?
9. Для чего производится укорочение резонансной длины вибраторов? От чего зависит величина укорочения?
10. Чем определяется поляризация поля симметричного вибратора?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Схема установки для исследования симметричного вибратора приведена на рис. 13.4.

Установка состоит из генератора дециметрового диапазона, питающего через согласующее и симметрирующее устройство 1 передающую антенну 2, в качестве которой используется частотно-независимая в рабочем диапазоне частот антенна (например,

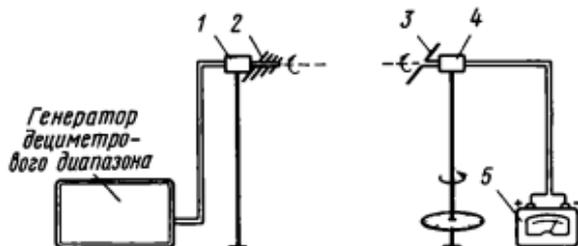


Рис. 13.4

логопериодическая структура). Использование такой антенны позволит сохранить согласование с генератором при изменении его частоты.

Исследуемой антенной является приемная 3. Она может поворачиваться в горизонтальной плоскости на 360° с отсчетом углов поворота по лимбу. Кроме того, для исследования влияния поляризации поля и снятия диаграмм направленности в плоскости, перпендикулярной оси вибратора, обе антенны (передающая и приемная) могут поворачиваться в вертикальной плоскости на угол 90° .

Для исследования влияния геометрических размеров симметричного вибратора на его характеристику направленности и по-

лосу пропускания в работе предусмотрены сменные вибраторы различной длины и диаметра. Чтобы избежать включения очень длинных и тонких вибраторов, ввиду их малой механической жесткости, исследование вибраторов длиной $l=1,5\lambda$ и $l=2\lambda$ производится при переходе на более высокую частоту генератора.

Э. д. с. с выхода приемной антенны поступает на детектор 4, а выпрямленный детектором ток измеряется микроамперметром 5 магнитоэлектрической системы. Приблизительно можно считать, что показания прибора пропорциональны принимаемой мощности или квадрату напряженности поля.

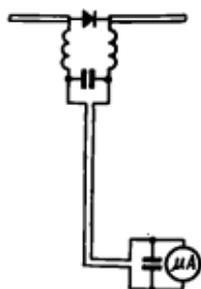


Рис. 13.5

Фильтр нижних частот, включаемый в провода, идущие к прибору, развязывает микроамперметр и антенну по высокой частоте (рис. 13.5).

В лабораторной работе диаграммы направленности исследуемых антенн снимаются в режиме приема, что более удобно, чем в режиме излучения.

Диаграмма направленности антенны является характеристикой, не зависящей от расстояния. Для каждой антенны при снятии диаграммы направленности можно подобрать минимальное расстояние между передающей и приемной антенной, при котором диаграмма направленности практически получается такой же, как и на бесконечно большом расстоянии. Для этого расстояние между антеннами должно быть таким, чтобы исследуемая приемная антенна оказалась в дальней зоне излучения передающей антенны, т. е. в области пространства, где напряженность поля убывает обратно пропорционально расстоянию. Для исследуемых в данной работе антенн это расстояние должно быть не менее $(5 \div 10)\lambda$.

При выборе места расположения антенн необходимо, чтобы на пути радиоволн не было каких-либо отражающих объектов. Такие объекты создают дополнительные отраженные волны, интерференция которых с прямыми волнами искажает диаграмму направленности. При измерениях внутри помещений следует располагать антенны как можно дальше от стен, поднимать подальше от уровня пола, не приближая особенно близко к потолку. При ограниченности размеров помещения, чтобы уменьшить отражения от стен, пола и потолка, их можно покрыть материалами, поглощающими радиоволны.

Учащиеся в процессе измерений не должны находиться вблизи приемной и передающей антенн. С этой целью микроамперметр приемной антенны вынесен достаточно далеко от нее, что позволяет после поворота антенны на нужный угол отойти от нее.

Для снятия диаграмм направленности в меридиональной плоскости, проходящей через ось вибратора, передающая и приемная антенны располагаются горизонтально; приемная антенна поворачивается вокруг вертикальной оси, а передающая остается неподвижной.

Для снятия диаграммы направленности в экваториальной плоскости (перпендикулярной оси вибратора) передающая и приемная антенны располагаются вертикально и приемная антенна поворачивается так же вокруг вертикальной оси.

В процессе снятия диаграммы направленности необходимо следить, чтобы мощность генератора, питающего передающую антенну, оставалась неизменной. Эту мощность следует подобрать такой, чтобы в положении максимального приема стрелка индикаторного прибора отклонялась не менее, чем на две трети шкалы. Для сокращения вычислений при нормировании диаграмм очень удобно установить показания прибора при максимальном отклонении на 100 делений.

При измерении боковых лепестков диаграммы направленности достаточно фиксировать их максимумы и минимумы.

Для снятия АЧХ антенны необходимо установить ее в направлении максимума диаграммы направленности. Затем, изменяя частоту генератора через ± 5 Мгц от основной частоты, произвести запись уровней принимаемого сигнала по показаниям микроамперметра. Полоса пропускания антенны определяется при этом на уровне 0,5 от максимального показания прибора.

В качестве источника питания передающей антенны в работе используется генератор Г4-5 (рис. 13.6). Этот генератор вырабатывает сигналы дециметрового диапазона с частотой от 150 до 1000 Мгц при погрешности по частоте $\pm 1,5\%$. Прибор имеет два высокочастотных выхода с выходным сопротивлением 75 ом: а) мощный — с регулируемой выходной мощностью от 0,1 мвт до 1,0 вт; б) микровольтовый — калиброванный по напряжению от 1 мкв до 0,1 в. Генератор может работать как в режиме непрерывной генерации НГ, так и с различными видами модуляции.

Для подготовки прибора к работе необходимо:

- 1) переключатели «Выкл. ген. ВЧ» и сети поставить в положение «Выкл.»;
- 2) присоединить шланг питания к генератору и включить его в сеть питания;
- 3) ручку «Расстройка» установить в положение, указанное в формуляре прибора и отмеченное на приборе;
- 4) ручку «Установка выхода ВЧ» установить в крайнее левое положение;
- 5) тумблер включения прибора перевести в положение «Вкл.», при этом должна загореться сигнальная лампа;

б) ручкой «Установка нуля» установить стрелку прибора на нуль.

После подготовки прибора к работе устанавливается требуемая частота генератора с помощью штурвала по показаниям шкалы «МГц». Для устранения погрешности из-за люфта шкалы частоту следует устанавливать подходом к необходимой точке шкалы, вращая штурвал по часовой стрелке.

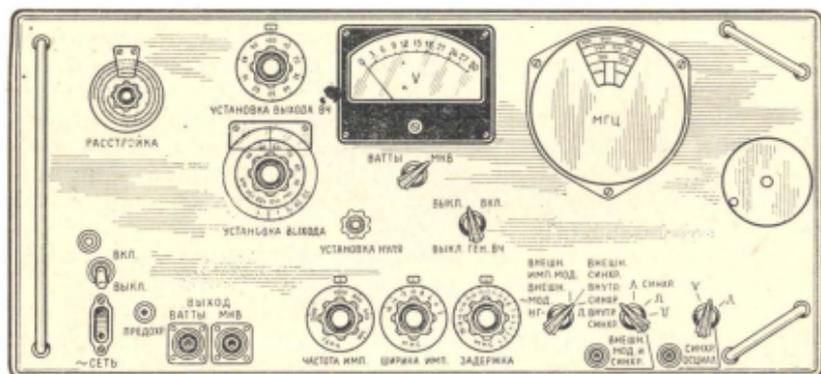


Рис. 13.6

Переключатель вида работы установить в положение НГ (непрерывная генерация).

После указанных операций включить высокочастотный генератор. Необходимо помнить, что высокочастотный генератор можно включать не ранее, чем через 2 мс после включения тумблера сети и что виды работы переключаются только при выключенном генераторе высокой частоты.

Выходной сигнал генератора в зависимости от положения переключателя выхода снимается либо с гнезда «Выход — ватты», либо с гнезда «Выход — мкв».

Выходная мощность, снимаемая с гнезда «Выход — ватты» регулируется ручкой «Установка выхода ВЧ». Величина этой мощности при условии согласованной нагрузки может быть определена по формуле

$$P = \frac{U^2}{150},$$

где U — показания вольтметра (в вольтах), на передней панели генератора.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным значениям частоты f_1 и диаметра антенны d_1 определить геометрическую длину (с учетом укорочения) полуволнового и волнового вибраторов.
2. Определить длину полуволнового вибратора (с учетом укорочения) для той же частоты f_1 , но для большего диаметра антенны — d_2 .
3. Определить электрическую длину (без учета укорочения) вибраторов длиной $l=1,5\lambda$ и $l=2\lambda$ для заданной частоты генератора f_2 .
4. Рассчитать нормированную характеристику направленности вибратора длиной $l=\lambda$ в меридиональной плоскости. Результаты расчета свести в табл. 13.1.

Таблица 13.1

θ	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
$F(\theta)$										

По данным расчета построить диаграмму направленности в полярных координатах.

5. Рассчитать один лепесток нормированной характеристики направленности вибратора длиной $l=2\lambda$ в меридиональной плоскости. Результаты расчета свести в табл. 13.2.

Таблица 13.2

θ	20°	30°	40°	50°	54°	60°	70°	80°	90°
$f(\theta)$									
$F(\theta)$									

По данным расчета построить диаграмму направленности антенны в полярных координатах, вычерчивая остальные лепестки симметрично рассчитанному.

Примечание. Учащимся групп вечернего обучения вместо расчета диаграмм направленности в п. 4 и 5, можно построить их, перенося данные с рис. 13.2.

Экспериментальная часть

6. Установить частоту генератора, равной f_1 . Снять диаграмму направленности по мощности тонкого полуволнового вибратора

ра, рассчитанного в п. 1 в экваториальной плоскости в секторе углов от 0 до 360°. Результаты измерений занести в табл. 13.3.

Таблица 13.3

θ°	
α	
α/α_{\max}	

7. Повернуть передающую антенну на 90° вокруг горизонтальной оси, чтобы излучалась горизонтально-поляризованная волна. Убедиться в отсутствии приема при вертикальном расположении приемного вибратора. Поворачивая на 90° ось приемной антенны, наблюдать увеличение показаний индикаторного прибора.
8. Снять диаграмму направленности тонкого полуволнового вибратора по напряженности поля в меридиональной плоскости в секторе углов 0÷360°. Результаты измерений записать в табл. 13.4.

Таблица 13.4

Данные антенны:	$l = \dots\dots d = \dots\dots$
θ°	
α	
α/α_{\max}	
$\sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}}$	

Таблица 13.5

Данные антенны:	$l = \dots\dots d = \dots\dots$
$f, \text{ МГц}$	
α	
$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$	
$\frac{f-f_1}{f_1}, \%$	

9. Снять амплитудно-частотные характеристики полуволновых вибраторов с диаметрами d_1 и d_2 . Результаты измерений записать в табл. 13.5.
10. Установить в качестве исследуемой антенны рассчитанный в п. 1 волновый вибратор и снять его характеристику направленности в меридиональной плоскости. Результаты измерений записать в табл. 13.4.
11. Установить в качестве исследуемой антенны поочередно рассчитанные в п. 3 вибраторы длиной $l=1,5\lambda$ и $l=2\lambda$. Ориентировав приемные вибраторы на передающую антенну в направлении ожидаемого максимума диаграммы направленности, добиться наибольшего отклонения стрелки микроамперметра подстройкой частоты генератора вблизи ее расчетного значения f_2 и небольших поворотов исследуемых вибраторов вокруг вертикальной оси.
Снять характеристики направленности в меридиональной плоскости вибраторов длиной $l=1,5\lambda$ и $l=2\lambda$.
Результаты измерений записать в таблицу 13.4.

Обработка результатов эксперимента

12. Построить нормированные диаграммы направленности в полярных координатах по данным п. 6, 8, 10, 11. Необходимые для построения вычисления записывать в табл. 13.3 и 13.4. Экспериментальные диаграммы строить на одном листе с соответствующей расчетной диаграммой. Сделать выводы о сравнении экспериментальных и теоретических диаграмм направленности.
13. Для диаграмм направленности в меридиональной плоскости полуволнового и волнового вибраторов определить ширину диаграммы направленности и сравнить ее с теоретической величиной.
14. Построить АЧХ полуволновых вибраторов с различными диаметрами согласно данным п. 9. Необходимые вычисления записать в табл. 13.5.
Характеристики обоих вибраторов строить на одном листе в относительных масштабах по осям. По характеристикам графически определить полосы пропускания антенн.
Сделать вывод о зависимости полосы пропускания от диаметра вибратора.

Литература

1. Белоцерковский Г. Б., ч. II. Антенны, стр. 27—35.
2. Изюмов Н. М., стр. 439—449.
3. Калашников А. М., стр. 288—294.

Измерение входного сопротивления симметричного вибратора

Цель работы — исследование зависимости величины и характера входного сопротивления антенны от ее размеров. Ознакомление с методикой измерения входного сопротивления антенн.

Оборудование рабочего места

1. Генератор дециметрового диапазона Г4-5 (1 шт.).
2. Развязывающий аттенюатор 5÷10 дБ (1 шт.).
3. Измерительная коаксиальная линия Р1-2 (1 шт.).
4. Короткозамыкающая заглушка линии (1 шт.).
5. Магнитоэлектрический микроамперметр (1 шт.).
6. Набор симметричных вибраторов (4 шт.).

Краткие теоретические сведения

Одним из существенных параметров антенны является величина ее входного сопротивления.

Входное сопротивление антенны в режиме передачи является нагрузкой генератора, а в режиме приема — внутренним сопротивлением источника сигнала. В обоих случаях для выполнения условий согласования антенны с фидером ее входное сопротивление должно быть чисто активным.

Входное сопротивление симметричного вибратора произвольной длины является комплексным, т. е. состоит из активной и реактивной составляющих $Z_{вх} = R_{вх} + jX_{вх}$. Величины этих составляющих зависят от длины волны и диаметра вибратора (рис. 14.1).

Реактивная составляющая входного сопротивления обращается в нуль при электрической длине вибратора, равной

или кратной половине длины волны. Такая длина антенны называется резонансной. Очевидно, что входное сопротивление вибраторов резонансной длины является чисто активным.

У полуволнового вибратора ($l=0,5\lambda$) распределение токов и напряжений вдоль антенны таково, что в середине вибратора,

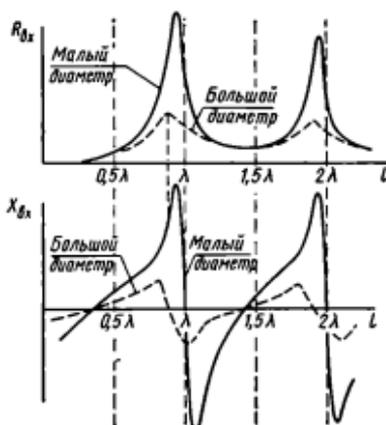


Рис. 14.1

т. е. в точках включения генератора, оказывается пучность тока и узел напряжения. Следовательно, его входное сопротивление является малой величиной и, пренебрегая потерями, равной сопротивлению излучения.

У волнового вибратора ($l = \lambda$), наоборот, в середине антенны получаются пучность напряжения и узел тока, т. е. его входное сопротивление имеет максимальную величину.

Распределение токов и напряжений вдоль симметричного вибратора только в первом приближении аналогичны распределению



Рис. 14.2

токов и напряжений в соответствующей разомкнутой длинной линии. Если же учесть особенности распределения стоячих волн, связанные с наличием излучения энергии, то при геометрической длине антенны, равной точно целому числу полуволн, на ее входе появляется некоторая индуктивная составляющая сопротивления. Чтобы ее скомпенсировать, геометрическую длину вибратора нужно немного укоротить. Величина этого укорочения зависит от диаметра вибратора. Таким образом, для получения чисто активного входного сопротивления геометрическая длина вибраторов должна быть на несколько процентов меньше электрической резонансной длины. Графики для определения коэффициента укорочения и входного сопротивления полуволнового и волнового вибраторов приведены на рис. 13.3.

Входное сопротивление антенны удобнее измерять в режиме передачи. При этом его можно определить либо непосредственным измерением напряжения и тока на входе антенны, либо измерением коэффициента бегущей волны в питающем антенну фидере. На СВЧ измерения напряжения и тока на входе антенны затруднительны, поэтому обычно измерение входных сопротивлений производится при помощи измерительной линии, включенной в фидер.

Упрощенная схема измерительной установки изображена на рис. 14.2.

Симметричный вибратор, включенный на конце измерительной линии и питаемый синусоидальной э. д. с., в общем случае, можно рассматривать как некоторую комплексную нагрузку ли-

нии. Из теории длинных линий известно, что величина и характер этой нагрузки однозначно определяют картину распределения тока и напряжения вдоль линии (см. лабораторную работу № 11).

Следовательно, сняв картину распределения показаний индикатора вдоль измерительной линии, можно судить о величине и характере ее нагрузки, т. е. входного сопротивления антенны.

При резонансной длине антенны, когда ее входное сопротивление чисто активно, оно может быть рассчитано по известному значению волнового сопротивления измерительной линии и измеренной величине коэффициента бегущей волны.

Вопросы для самопроверки

1. Какой характер, в общем случае, имеет входное сопротивление симметричного вибратора?

2. При какой электрической длине вибраторов их входные сопротивления становятся чисто активными?

3. Чем отличаются входные сопротивления полуволнового и волнового вибраторов?

4. Почему геометрическая длина резонансных вибраторов короче электрической?

5. От чего зависит необходимая величина укорочения?

6. На каком принципе основано измерение входного сопротивления антенны?

7. Каким будет характер входного сопротивления и распределение напряжения вдоль фидера при симметричном вибраторе с длиной: $l < 0,5 \lambda$; $l = 0,5 \lambda$; $0,5 \lambda < l < \lambda$; $l = \lambda$?

8. Как можно определить численную величину входного сопротивления антенны, если оно имеет чисто активный характер?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Установка (рис. 14.2) состоит из генератора дециметрового диапазона, измерительной линии дециметрового диапазона и исследуемых симметричных вибраторов.

Для повышения стабильности работы генератора при нагрузке на реактивное сопротивление измерительной линии между ними включается развязывающий аттенуатор на 5—10 дБ.

Все соединения в схеме производятся коаксиальными кабелями: при этом кабель, соединяющий генератор с линией, должен иметь волновое сопротивление, равное выходному сопротивлению генератора (при 75 Ом берется кабель РК-75-9-12), а кабель, соединяющий линию с антенной, должен обладать волновым сопротивлением, равным волновому сопротивлению измерительной линии (например, при 50 Ом, кабель РК-50-9-12).

Для исследования входного сопротивления антенн различной длины в работе предусмотрены сменные вибраторы. Поскольку вся работа проводится на одной и той же частоте гене-

ратора, упрощается конструкция симметрирующего устройства, в качестве которого может быть использован четвертьволновый стакан.

Измерение входного сопротивления вибраторов производится в следующей последовательности:

1. Замыкается накоротко выход измерительной линии. Настроив измерительную линию (по методике, аналогичной описанной в работе 12), определяется место ближайшего к концу линии узла, который принимается за условный конец линии.

2. К выходу измерительной линии подключается исследуемый симметричный вибратор и, перемещая зонд вдоль линии, снимается картина распределения показаний индикатора вдоль линии, отсчитывая расстояния от условного конца.

3. В случае активного сопротивления вибратора, определяется его величина по значению $k_{6в}$ и волновому сопротивлению измерительной линии, которое для P1-2 равно 50 ом.

4. В случае комплексного сопротивления вибратора, в работе определяется лишь характер реактивной составляющей его сопротивления.

При определении величины коэффициента бегущей волны характеристику детектора линии можно считать квадратичной.

Необходимые сведения по эксплуатации генератора Г4-5 приведены в описании лабораторной работы № 13.

Измерительная линия, используемая в работе, является коаксиальной измерительной линией типа P1-2, предназначенной для работы в диапазоне частот 1000—3750 Мгц (30—8 см). Волновое сопротивление линии — 50 ом. Точность отсчета положения зонда $\pm 0,05$ мм. Работа с измерительной линией аналогична работе с линией, описанной в работе № 12.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным значениям частоты генератора и диаметра вибраторов антенны определить геометрическую длину и величину входного сопротивления полуволнового и волнового симметричных вибраторов (при расчете воспользоваться графиками, приведенными на рис. 13.3).

Экспериментальная часть

2. Установить на генераторе заданную частоту. Замкнуть линию накоротко заглушкой и определить точку условного конца линии.
3. Снять распределение напряжений вдоль измерительной линии при подключении к ней поочередно следующих симметричных

вибраторов:
 длиной $l < 0,5\lambda$; $l = 0,5\lambda$; $0,5\lambda < l < \lambda$; $l = \lambda$.
 Результаты измерений записать в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Тип антенны:	
x , мм	
α	
$\gamma\alpha$	

Примечание. x — расстояние от условного конца линии;
 α — показания индикатора линии.

Обработка результатов эксперимента

- По данным п. 3 построить кривые распределения напряжений вдоль линии для всех исследуемых антенн. Кривые для удобства сравнения строить на одном листе. Сделать выводы о характере входного сопротивления исследуемых антенн.
- Для резонансных вибраторов по данным п. 3 определить величины входных сопротивлений и сравнить их с расчетными значениями.

Литература

- Белоцерковский Г. Б., ч. II, стр. 55—58.
- Исюмов Н. М., стр. 459—462.
- Калашников А. М., стр. 282—285.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

Исследование антенны типа «волновой канал»

Цель работы — исследование направленных и диапазонных свойств антенны. Ознакомление с конструкцией и методикой настройки антенны.

Оборудование рабочего места

- Генератор дециметрового диапазона Г4-5 (1 шт.).
- Передающая антенна (1 шт.).
- Приемная антенна типа «волновой канал» (1 шт.).
- Детекторная коаксиальная секция (1 шт.).
- Микроамперметр магнитоэлектрический (1 шт.).

Краткие теоретические сведения

Для увеличения направленности и создания однонаправленного излучения в антенной технике широко используется метод построения антенных систем из нескольких полуволновых симметричных вибраторов.

Поле, создаваемое системой таких вибраторов, является результатом сложения полей, создаваемых отдельными вибраторами с учетом их фазовых сдвигов, определяемых как разностью хода лучей до рассматриваемой точки пространства, так и разностью фаз токов в вибраторах.

При этом взаимное расположение вибраторов и фазовые соотношения питающих их токов подбираются так, что электромагнитные поля, создаваемые вибраторами в заданном направлении, суммируются, образуя главный максимум излучения. Во всех же других направлениях поля отдельных вибраторов взаимно ослабляют друг друга.

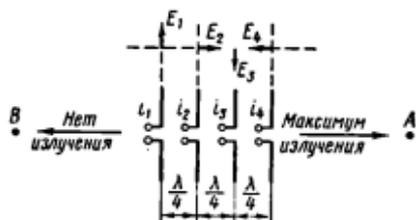


Рис. 15.1

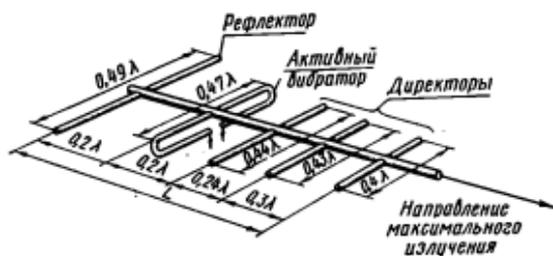


Рис. 15.2

Так, например, если расположить в одной плоскости в линию несколько симметричных вибраторов на расстоянии четверти волны друг от друга и питать их токами одной и той же амплитуды, но со сдвигом по фазе на 90° (рис. 15.1), то в направлении точки *A* поля будут складываться, а в направлении точки *B* (при четном числе вибраторов) — взаимно уничтожаться. Получается антенная система с однонаправленным излучением.

Этот принцип и положен в основу антенны типа «волновой канал» (рис. 15.2).

В отличие от рассмотренного примера, в антенне «волновой канал» фидер, идущий от генератора, питает только один вибра-

тор, называемый активным. В остальных вибраторах, называемых пассивными, токи индуктируются электромагнитным полем активного вибратора. Амплитуды и фазы токов пассивных вибраторов зависят от их длины, диаметра и взаимного расположения по отношению к активному вибратору и друг к другу.

Пассивный вибратор, расположенный сзади активного и направляющий излучение в сторону активного вибратора, называется рефлектором (отражателем).

Пассивный вибратор, расположенный впереди активного и направляющий максимум излучения на себя, называется директором (направителем).

Обычно в антенне «волновой канал» используется несколько директоров, поэтому эту антенну называют еще и «директорной антенной».

По сравнению с системой активных вибраторов, изображенной на рис. 15.1, антенна с пассивными вибраторами более проста по конструкции. Все вибраторы в своих центрах крепятся к деревянной или металлической рейке. Последнее возможно благодаря тому, что распределение напряжения вдоль вибраторов таково, что в центре каждого имеется точка нулевого потенциала.

Однако настройка такой антенны получается довольно сложной, ибо токи в вибраторах получаются не одинаковые по амплитуде, а регулировки амплитуды и фазы токов в элементах взаимозависимы. При этом условие возбуждения токов максимальной амплитуды и условие получения наиболее благоприятных фазовых соотношений для сложения полей в главном направлении не совпадают. Поэтому обычно добиваются такого компромиссного соотношения амплитуд и фаз токов для данной системы вибраторов, при котором получается максимальное усиление в направлении главного излучения.

Ввиду сложности точного расчета антенн типа «волновой канал», задача получения максимальной направленности обычно решается экспериментально, настройкой, т. е. подбором длин пассивных элементов и расстояний между ними.

Рефлектор должен быть настроен таким образом, чтобы возникающий в нем ток опережал по фазе ток активного вибратора. Для этого сопротивление рефлектора должно иметь индуктивный характер, что достигается увеличением длины вибратора относительно геометрической резонансной длины.

Токи директоров, наоборот, должны отставать по фазе по отношению к току активного вибратора. Их реактивная составляющая сопротивления должна иметь емкостный характер. Для этого длины директоров уменьшаются по сравнению с геометрической резонансной длиной.

Ориентировочные размеры антенны с тремя директорами приведены на рис. 15.2, а диаграммы направленности — на рис. 15.3.

Диаграмма направленности антенны в плоскости вибраторов (плоскости E , см. рис. 15.3, а) уже, чем в плоскости H (см. рис. 15.3, б), что объясняется наличием в плоскости E направленности у каждого вибратора.

Ширина диаграммы направленности зависит от числа директоров: чем больше директоров, тем острее диаграмма. Однако при увеличении числа директоров выигрыш в направленности, создаваемый каждым последующим директором, постепенно уменьшается, в то время, как габариты антенны возрастают. Поэтому число директоров обычно не превышает 10. При этом ширина диаграммы направленности в плоскости вибраторов достигает примерно 20° .

Коэффициент направленного действия антенны D может быть определен по формуле

$$D \approx k \frac{L}{\lambda},$$

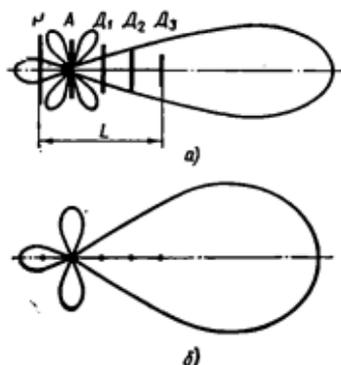


Рис. 15.3

где L — осевая длина антенны; λ — рабочая длина волны; k — коэффициент, зависящий от отношения $\frac{L}{\lambda}$, как показано на рис. 15.4.

Ширину диаграммы направленности в плоскости вибраторов приближенно можно определить по формуле

$$2\theta^\circ \approx \frac{200}{n},$$

где n — число пассивных элементов, или по графику рис. 15.5.

Антенна «волновой канал» является узкодиапазонной, так как принцип ее действия основан на резонансных свойствах эле-

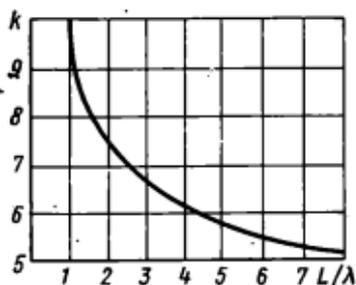


Рис. 15.4

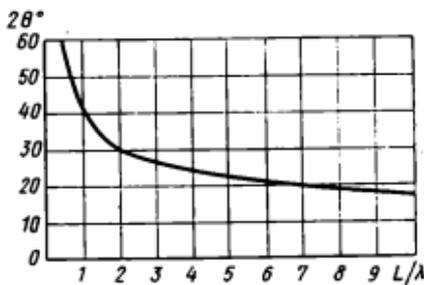


Рис. 15.5

ментов. При этом, чем больше элементов содержит антенна, тем уже ее полоса рабочих частот, ибо труднее выдержать при расстройке частоты необходимые амплитудные и фазовые соотношения. Обычно полоса пропускания таких антенн составляет (5÷15) % от средней частоты рабочего диапазона. При расстройке генератора на $\pm 10\%$ антенна перестает работать, так как оказывается расстроенной и рассогласованной. Поэтому антенна «волновой канал» удобна при работе на фиксированной частоте.

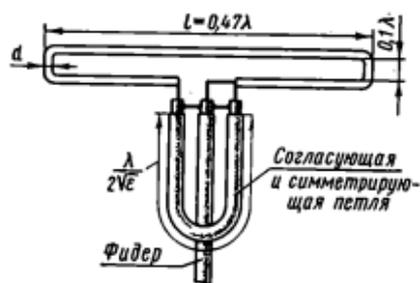


Рис. 15.6

В качестве активного вибратора антенны «волновой канал» чаще всего применяется петлевой вибратор (рис. 15.6) по следующим причинам.

Во-первых, из-за влияния пассивных вибраторов входное сопротивление активного симметричного полуволнового вибратора падает до 20—30 ом, что затрудняет его согласование с фидером. Входное же сопротивление петлевого вибратора равно, примерно, 290 ом и влияния пассивных вибраторов

даже с учетом уменьшения из-за него оно остается достаточно большим.

Во-вторых, диапазонные свойства директорной антенны в значительной степени определяются диапазоном активного вибратора. По этому показателю полуволновый вибратор уступает петлевому.

В-третьих, петлевой вибратор можно крепить в точке нулевого потенциала, находящейся в середине неразрезанной части, непосредственно к металлическому стержню без помощи изоляторов, что очень удобно в конструктивном отношении.

Питание к петлевому вибратору подводится либо двухпроводным ленточным фидером, либо коаксиальным кабелем. В последнем случае необходимо симметрирующее и согласующее устройство, например, в виде U-образного колена фидера, показанного на рис. 15.6. Следует иметь в виду, что геометрическая длина полуволнового U-образного колена определяется, исходя из длины волны в фидере, которая в $\sqrt{\epsilon_0}$ раз меньше длины волны в воздухе. Для диэлектрика, заполняющего фидер типа РК-75-9-12, диэлектрическая проницаемость $\epsilon_0 = 2,3$.

Вопросы для самопроверки

1. В чем сложность настройки антенны «волновой канал»?
2. От чего зависит фаза тока в пассивных вибраторах?
3. Как отличаются по своим размерам рефлектор от директора?

4. Как формируется диаграмма направленности антенны? Почему излучение является однонаправленным?
5. Чем отличаются и какой имеют вид диаграммы направленности в горизонтальной E и вертикальной H плоскостях?
6. От чего зависит ширина диаграммы направленности?
7. Почему нецелесообразно увеличивать число директоров более десяти?
8. Каковы диапазонные свойства антенны?
9. Почему в качестве активного вибратора чаще всего используется петлевой вибратор?
10. Как осуществляется связь петлевого вибратора с коаксиальным фидером?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Установка для исследования антенны «волновой канал» (рис. 15.7) состоит из генератора дециметрового диапазона, передающей антенны 1, представляющей собой логопериодическую структуру, частотно-независимую в рабочем диапазоне частот; исследуемой антенны 2; детекторной коаксиальной секции 3 и индикаторного прибора 4.

Антенна «волновой канал» исследуется в режиме приема. Для снятия диаграммы направленности антенна имеет возможность поворачиваться в горизонтальной плоскости с фиксацией углов поворота по лимбу с градусными делениями.

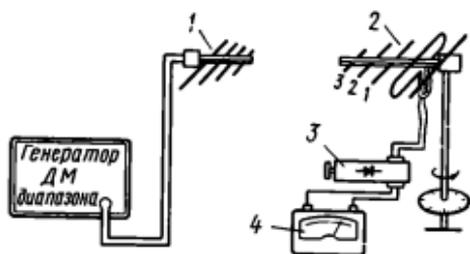


Рис. 15.7

Для исследования зависимости диаграммы направленности антенны от числа вибраторов, последние делаются съемными.

Для настройки антенны пассивные вибраторы могут перемещаться вдоль оси антенны.

Подготовка аппаратуры к работе заключается во включении генератора, установке на нем расчетной частоты и настройке коаксиальной детекторной секции в резонанс с частотой входящих колебаний по максимуму показаний индикаторного прибора.

Характеристику детектора можно считать квадратичной.

Настройка антенны «волновой канал» производится следующим образом. Устанавливают активный вибратор в положение максимального приема. Перед ним на расчетном расстоянии устанавливают рефлектор и, немного перемещая его вдоль оси антенны, добиваются минимальных показаний индикаторного прибора. Далее поворачивают антенну на 180° в горизонтальной плоскости и поочередно добавляют директоры, подстраиваясь

каждый раз на максимум приема. Поскольку каждый вновь поставленный директор изменяет настройку предыдущего директора и всей системы в целом, то при настройке на максимум следует подбирать наиболее выгодное положение не только последнего, а всех директоров. Кроме того, необходимо заново подстроить и положение рефлектора, повернув ось антенны на 180° и добиваясь минимума приема.

Все диаграммы направленности в работе снимаются только в плоскости вибраторов в секторе углов от 0 до 360° через 10° . При снятии диаграмм направленности следует руководствоваться методикой, изложенной в описании работы № 13.

Для определения ширины диаграммы направленности, не снимая всей диаграммы, достаточно поворачивать антенну влево и вправо от направления главного максимума, пока показания индикаторного прибора не уменьшатся до половины от максимального значения.

Для оценки диапазонных свойств антенны ее диаграмма направленности снимается на частоте, отличающейся на 10% от рабочей частоты. При этом детекторная секция должна быть вновь настроена в резонанс на частоту генератора.

В качестве генератора в данной работе используется прибор Г4-5, инструкция по работе с которым была приведена в описании работы № 13.

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданной частоте генератора для антенны «волновой канал» с тремя директорами определить:
 - 1) размеры вибраторов и расстояния между ними;
 - 2) ширину диаграммы направленности в плоскости вибраторов;
 - 3) коэффициент направленного действия;
 - 4) длину отрезка коаксиального кабеля, образующего U-образное колено.

Экспериментальная часть

2. Снять диаграмму направленности одиночного петлевого вибратора.
Результаты измерений записать в табл. 15.1.
3. Настроить антенную систему, состоящую из петлевого вибратора и рефлектора.
Снять диаграмму направленности системы.
Результаты измерений записать в табл. 15.1.
4. Добавить к системе первый директор. Настроить антенну и измерить ширину диаграммы направленности.

Тип антенны:	
Исходные данные:	$f_r = \dots$
θ°	
α	
$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$	

- Добавить к системе второй директор. Настроить антенну и измерить ширину диаграммы направленности.
- Добавить к системе третий директор. Настроить антенну и снять диаграмму направленности. Результаты измерений записать в табл. 15.1.
- Расстроить частоту генератора на 10% относительно расчетной частоты и снять диаграмму направленности антенны. Результаты измерений записать в табл. 15.1.

Обработка результатов эксперимента

- Построить нормированные диаграммы направленности в полярных координатах по данным измерений, сделанных в п. 2, 3, 6, 7. Для удобства сравнения все диаграммы построить на одном листе. Определить ширину диаграмм направленности. Сравнить с расчетной величиной.
- Сделать выводы о влиянии рефлектора и директоров на форму и ширину диаграммы направленности.
- По результатам п. 7 сделать вывод о диапазонных свойствах антенны.

Литература

- Белоцерковский Г. Б., ч. II, стр. 179—185.
- Изюмов Н. М., стр. 503—505.
- Калашников А. М., стр. 310—314.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

Исследование поверхностных антенн

Цель работы — исследование направленных свойств рупорных антенн в зависимости от размеров раскрыва рупора. Ознакомление с направленными свойствами диэлектрической антенны. Ознакомление с методикой антенных измерений в сантиметровом диапазоне.

Оборудование рабочего места

1. Генератор сантиметрового диапазона ГЗ-14А (1 шт.).
2. Отрезки волноводных секций.
3. Передающая рупорная антенна (1 шт.).
4. Приемные рупорные антенны разных видов (2—3 шт.).
5. Диэлектрическая антенна (1 шт.).
6. Плавный аттенюатор (1 шт.).
7. Детекторная волноводная секция (1 шт.).
8. Микроамперметр магнитоэлектрический (1 шт.).

Краткие теоретические сведения

В диапазоне СВЧ широкое распространение получили поверхностные антенны, в которых в отличие от проволочных антенн электромагнитное поле излучается некоторой поверхностью, называемой раскрывом антенны.

Направленные свойства таких антенн при заданной длине волны зависят от площади раскрыва: чем площадь больше, тем выше коэффициент направленного действия и, следовательно, коэффициент усиления антенны. Размеры сторон раскрыва влияют на форму диаграммы направленности в плоскостях, проходящих через рассматриваемые стороны.

Простейшей поверхностной антенной является волноводный излучатель, т. е. волновод, через открытый конец которого происходит излучение радиоволн. Раскрыв антенны в этом случае равен поперечному сечению волновода. Размер широкой стороны волновода a влияет на остроту диаграммы направленности в плоскости H , а узкой b — в плоскости E (полагая, что в волноводе распространяется волна типа H_{10}).

Считая поле в раскрыве синфазным, т. е. полагая, что из открытого конца волновода выходит плоская волна, ширину диаграммы направленности в плоскостях E и H , и коэффициент усиления антенны G можно приближенно определить по формулам:

$$2\theta_E = 51 \frac{\lambda}{b}; \quad 2\theta_H = 51 \frac{\lambda}{a}; \quad G \approx 10 \frac{ab}{\lambda^2}.$$

Волноводный излучатель принципиально не может обеспечить острой диаграммы направленности, так как размеры раскрыва волновода нельзя увеличивать более некоторой величины. Действительно, чтобы в прямоугольном волноводе с волной H_{10} не могли возникнуть волны высших порядков, необходимо чтобы размеры сечения не выходили за пределы $\frac{\lambda}{2} < a < \lambda$, $b < \frac{\lambda}{2}$.

При таких размерах сторон волновода ширина диаграммы направленности получается достаточно большой.

Другой особенностью волноводных излучателей является их относительно плохое согласование со свободным пространством (см. работу № 12). Из-за резкого изменения условий распространения электромагнитной энергии при переходе от волновода к свободному пространству, коэффициент отражения для стандартных волноводов достигает по модулю величины $\rho = 0,25 \div 0,3$, что соответствует величине $k_{\text{отн}} = 0,6 \div 0,54$.

Из-за указанных недостатков антенна в виде открытого конца волновода находит ограниченное применение. Обычно она используется там, где требуется широкая диаграмма направленно-

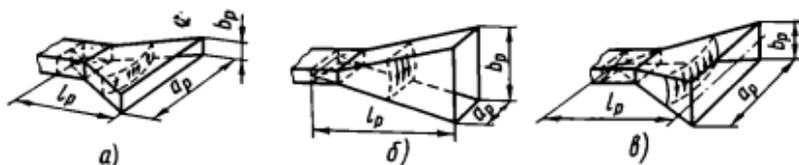


Рис. 16.1

сти и где сравнительно сильное отражение от конца волновода не играет существенной роли (например, в качестве облучателя более сложных антенн).

Чтобы получить более острую диаграмму направленности и в то же время избежать появления высших типов волн, можно размеры поперечного сечения волновода увеличивать постепенно, плавно, придавая волноводу форму рупора. В этом случае структура поля в волноводе в основном сохранится. Правда, в горле рупора, т. е. в месте его соединения с волноводом, все же возникнут волны высших типов, однако при достаточно плавном расширении волновода (малом угле раствора рупора) эти волны быстро затухают и по рупору будут распространяться только колебания основного типа.

Плавное увеличение сечения волновода улучшает также согласование со свободным пространством.

Таким образом, рупорные антенны по сравнению с открытым концом волновода обладают лучшей направленностью и лучшим согласованием с внешней средой.

Существуют различные виды рупоров, образуемых из прямоугольного волновода. Если расширение прямоугольного волновода происходит только в одной плоскости, то получается секториальный рупор. В зависимости от того, в какой плоскости происходит расширение, различают *H*-плоскостные (рис. 16.1, а) и *E*-плоскостные (рис. 16.1, б) секториальные рупоры. В секториальных рупорах обострение диаграммы направленности происходит в одной плоскости. Если требуется получить сужение ди-

аграммы направленности сразу в двух плоскостях, то расширяются одновременно обе стороны сечения волновода, образуя пирамидальный рупор (рис. 16.1, в).

Плоский фронт волны в волноводе, попадая в рупор, искривляется, превращаясь в цилиндрический фронт в секториальных рупорах и в сферический — в пирамидальных. Волны, распространяющиеся в рупоре, как бы исходят из воображаемой точки или линии пересечения сторон рупора, называемой его вершиной. Это приводит к тому, что в плоскости раскрыва рупора поле оказывается несинфазным, что вызывает расширение диаграммы направленности. Нарушение синфазности при этом тем больше, чем больше угол раскрыва рупора. Поэтому приходится угол раскрыва брать небольшим, а нужной площади раскрыва добиваться увеличением длины рупора l_p .

Если при заданной длине рупора увеличивать размеры его раскрыва, то диаграмма направленности сначала будет сужаться, из-за увеличения площади излучающей поверхности, которая пока еще остается синфазной, а потом начнет расширяться, из-за возрастающего нарушения синфазности.

Следовательно, для заданной длины рупора l_p/λ можно подобрать такие максимальные размеры раскрыва (a_p/λ , b_p/λ), при которых получается наиболее узкая диаграмма направленности, т. е. максимальный коэффициент усиления. Эти размеры рупора называются оптимальными.

Расчетные соотношения для рупоров оптимальных размеров приведены в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Тип рупора	Оптимальные размеры	Ширина диаграммы направленности	Коэффициент усиления
Секториальный H -плоскостной (рис. 16.1, а)	$l_p = \frac{a_p^2}{3,3\lambda}$	$2\theta_E = 51 \frac{\lambda}{b_p}$; $2\theta_H = 80 \frac{\lambda}{a_p}$	$G \approx 8 \frac{a_p b_p}{\lambda^2}$
Секториальный E -плоскостной (рис. 16.1, б)	$l_p = \frac{b_p^2}{2,1\lambda}$;	$2\theta_E = 53 \frac{\lambda}{b_p}$; $2\theta_H = 68 \frac{\lambda}{a_p}$	$G \approx 8 \frac{a_p b_p}{\lambda^2}$
Пирамидальный (рис. 16.1, в)	$b_p = 0,8a_p$; $l_p = 0,3 \frac{a_p^2}{\lambda}$	$2\theta_E = 53 \frac{\lambda}{b_p}$ $2\theta_H = 80 \frac{\lambda}{a_p}$	$G \approx 6 \frac{a_p b_p}{\lambda^2}$

Увеличение длины рупора свыше оптимальной, хотя и уменьшает несинфазность поля в раскрыве, является нецелесообразным, так как при этом направленные свойства улучшаются незначительно, а габариты антенны резко возрастают. Поэтому рупорные антенны применяются в тех случаях, когда требуемая ширина диаграммы направленности составляет десятки градусов. Достоинствами рупорных антенн являются простота конструкции и хорошие диапазонные свойства.

Наряду с металлическими волноводами, можно создать и диэлектрические волноводы, вдоль которых электромагнитные волны будут распространяться, отражаясь от границы раздела диэлектрик — воздух. На этом принципе и основаны диэлектрические антенны.

Такие антенны состоят из возбуждателя в виде металлического волновода, в открытый конец которого вставлена собственно антенна, представляющая собой стержень из диэлектрика с малы-

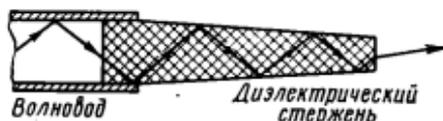


Рис. 16.2

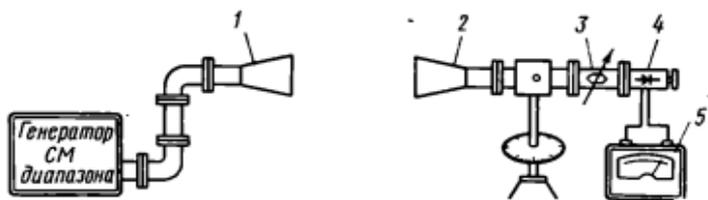


Рис. 16.3

ми потерями, например полистирола (рис. 16.2). При определенном соотношении между длиной волны и площадью поперечного сечения стержня, вдоль него возникают бегущие волны. На конце стержня волны частично отражаются, а большая часть их преломляется, выходит за пределы стержня и распространяется в пространстве вдоль оси стержня, образуя в этом направлении главный максимум излучения.

Для уменьшения отражения волн от конца стержня и тем самым согласования его со свободным пространством, конец стержня выполняют постепенно суживающимся. Такой суживающийся диэлектрический стержень аналогичен расширяющемуся металлическому рупору.

Характеристика направленности диэлектрической антенны определяется размерами и формой стержня. Длина диэлектрической антенны обычно не превышает $(6 \div 7)\lambda$, а ширина ее диаг-

раммы направленности составляет при этом 22—25°. При уменьшении длины стержня ширина главного лепестка диаграммы увеличивается.

Достоинствами диэлектрических антенн являются сравнительно широкая диапазонность, небольшие размеры и конструктивная простота.

Вопросы для самопроверки

1. От чего зависят направленные свойства поверхностных антенн?
2. Какими недостатками обладает волноводный излучатель?
3. Чем отличаются E - и H -плоскостные секториальные рупоры друг от друга?
4. Почему нельзя повысить коэффициент направленного действия рупорной антенны заданной длины, беспредельно увеличивая размеры раскрыва рупора?
5. Какие рупоры называются оптимальными?
6. Как влияет увеличение длины рупора при сохранении размеров раскрыва на ширину диаграммы направленности?
7. Как скажется присоединение диэлектрической антенны к волноводу на диаграмме направленности его открытого конца?
8. Как зависит ширина диаграммы направленности от длины диэлектрического стержня?
9. Каким образом достигается согласование диэлектрической антенны со свободным пространством?

Описание установки и методические указания по выполнению работы

Исследование поверхностных антенн производится на установке, изображенной на рис. 16.3.

Установка состоит из генератора сантиметрового диапазона, который возбуждает рупорную антенну 1. Передача высокочастотной энергии от генератора к рупору осуществляется по волноводному тракту.

Исследуемой антенной является приемная 2. Принятые ею электромагнитные поля через плавный аттенюатор 3 поступают в волноводную детекторную секцию 4. Выпрямленный ток регистрируется микроамперметром 5. Характеристику детектора можно приближенно считать квадратичной и, следовательно, показания микроамперметра будут пропорциональны принимаемой мощности.

Для снятия характеристики направленности исследуемая антенна может плавно поворачиваться в горизонтальной плоскости, при этом угол поворота отсчитывается по лимбу с градусными делениями.

Чтобы исключить механический поворот антенны в вертикальной плоскости при снятии соответствующих характеристик направленности, в работе изменяются плоскости поляризации приемной и передающей антенн и диаграмма направленности снимается снова в горизонтальной плоскости.

Изменение плоскости поляризации приемной антенны производится ее поворотом от руки в держателе на 90° вокруг горизонтальной оси, изменение плоскости поляризации передающей антенны производится с помощью скрученной на 90° секции волновода.

Расстояние между антеннами при снятии характеристик направленности должно быть не менее $2d^2/\lambda$, где d — наибольший размер раскрыва, а λ — длина волны генератора.

Перед снятием диаграммы направленности необходимо: подготовить к работе генератор и установить на нем заданную частоту; установить приемную и передающую антенны в направлении максимального приема; проверить соответствие их плоскостей поляризации; настроить детекторную секцию перемещением поршня до получения максимальных показаний микроамперметра.

Чтобы сократить вычисления при нормировании диаграмм, целесообразно регулировкой выходной мощности генератора и ослабления, вносимого аттенюатором приемной антенны, установить наибольшее отклонение стрелки микроамперметра, равное 100 делениям.

Диаграмму направленности следует снимать, поворачивая антенну на угол $3 \div 5^\circ$ вокруг вертикальной оси, сначала в одну сторону от максимума, а затем в другую.

В работе снимаются диаграммы направленности открытого конца волновода, различных видов рупорных антенн и диэлектрической антенны. Чтобы резче подчеркнуть зависимость ширины диаграммы направленности от размеров раскрыва рупоров, последние выбраны значительно отличающимися друг от друга.

В качестве источника питания передающей антенны в работе используется генератор ГЗ-14А (ГС624М) (рис. 16.4), вырабатывающий высокочастотные колебания малой мощности в диапазоне частот $7500 \div 10\,400$ Мгц ($4 \div 2,88$ см) с погрешностью установки частоты $\pm 0,2\%$. Уровень выходной мощности (некалиброванной) порядка 5 мвт. Выходом прибора служит волновод сечением $28,5 \times 12,6$ мм. Генератор может работать как в режиме непрерывной генерации, так и в режиме импульсной модуляции.

Для подготовки прибора к работе: присоединяют шланг питания к прибору и включают его в сеть питания; переключатель сети ставят в положение «Вкл.», при этом должна загораться лампочка, освещающая шкалу волномера; переключатель «Род работы» ставят в положение «Непрер.» и прогревают прибор не менее получаса.

Требуемую частоту устанавливают ориентировочно по таблице «Частоты генератора» и шкале «Частота». Более точно значение частоты можно установить с помощью волномера генератора, пользуясь его градуировочной кривой.

Для получения некалиброванной мощности на выходе, переключатель выхода устанавливается в положение «*mW*», «Аттенюаторы выхода» выводятся до нуля, а нужный уровень мощности устанавливается attenuатором «Начальн. уровень».

Для получения максимальной мощности необходимо произвести подстройку генератора следующим образом: 1) переключатель

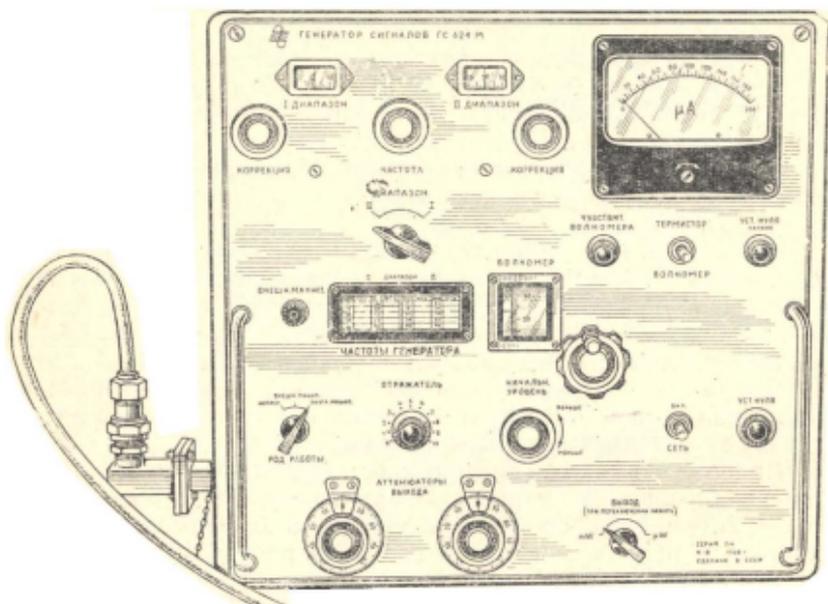


Рис. 164

тель «Термистор — волномер» поставить в положение «Термистор», 2) attenuator «Начальный уровень» вывести вправо до отказа; 3) ручкой «Уст. нуля плавно» установить стрелку индикаторного прибора на нуль; 4) повернуть влево ручку attenuатора «Начальный уровень»; 5) добиться максимального отклонения стрелки индикаторного прибора, оперируя ручками «Отражатель» и «Коррекция».

Содержание работы

Расчетная часть

1. По заданным частоте генератора и размерам сечения волновода определить ширину диаграммы направленности в E и H плоскостях и коэффициент усиления волноводного излучателя.
2. По заданным частоте генератора и размерам раскрыва рупор-

ных антенн определить оптимальную длину рупора, ширину диаграммы направленности в E и H плоскостях и коэффициент усиления антенны для секториального и пирамидального рупоров.

Экспериментальная часть

- Измерить размеры раскрыва и длину рупорных антенн.
- Снять характеристики направленности в E и H плоскостях на расчетной частоте генератора: 1) открытого конца волновода; 2) секториального рупора; 3) пирамидального рупора; 4) диэлектрической антенны.

Результаты измерений записать в табл. 16.2.

Таблица 16.2

Тип антенны:
Исходные данные:

θ^0	
α	
$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$	

- Убедиться в отсутствии приема сигналов при несоответствии плоскостей поляризации передающей и приемной антенны.

Обработка результатов эксперимента

- Сделать вывод о соответствии измеренных в п. 3 размеров рупоров рассчитанным оптимальным размерам.
- По данным измерений п. 4 построить диаграммы направленности исследуемых антенн в прямоугольной системе координат. По графикам для каждой антенны определить ширину диаграммы направленности в E и H плоскостях и сравнить ее с расчетным значением.
- Сделать выводы о влиянии подключения рупоров и диэлектрической антенны на диаграмму направленности открытого конца волновода.

Литература

- Белоцерковский Г. Б., ч. II, стр. 202—214, 185—188.
- Изюмов Н. М., стр. 510—514.
- Калашников А. М., стр. 328—331, 340—342.

ВОПРОСЫ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ КАРТ ПРОГРАММИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

При разработке контрольных вопросов для проверки подготовленности к лабораторным работам ставилась цель сократить до минимума вопросы чисто теоретического характера, расширив число вопросов, отражающих реальные ситуации, возникающие в практической деятельности, связанной с выполнением соответствующей лабораторной работы. Контрольные вопросы даются лишь к работам, рекомендуемым учебными программами.

Ввод ответов в предлагаемых контрольных задачах строится либо по альтернативному (выборочному) принципу, либо по результативному.

При альтернативном построении, ответы подбирались таким образом, чтобы они не содержали неправдоподобной, принципиально ложной информации, что было бы не оправдано педагогически. В подавляющем большинстве приводимые вопросы требуют от учащихся не простого воспроизводства знаний по памяти, а анализа причинно-следственных связей и отношений, требуют определенной цепи умозаключений. Такие вопросы активизируют познавательную деятельность учащихся, развивают их техническое мышление.

К некоторым вопросам приводятся верные и неверные цифровые ответы. В этих случаях неправильные ответы, составлены на основании анализа причин наиболее часто встречающихся ошибок и, таким образом, выбор учащимся того или иного неверного ответа сразу же позволит выявить ход его рассуждений и сделанную им ошибку.

Из всех вопросов, приведенных в каждой задаче, в контрольную карточку отбираются один-два вопроса, что позволяет довести общее число вопросов в каждой контрольной карте по лабораторной работе, например, по пяти-шести, обеспечивая в то же время разнообразие содержания отдельных контрольных карт.

Места для цифровых данных и кодов в большинстве задач оставлены незаполненными, чтобы учебные заведения могли привести их в соответствие с возможностями контролирующих машин, которыми они располагают.

Исследование свободных колебаний в одиночном контуре

Задача 1. Для схемы, приведенной на рис. К.1, с параметрами:

- а) э. д. с. источника питания (\mathcal{E}):
 - б) внутреннее сопротивление источника питания (R_i):
 - в) индуктивность катушки контура (L):
 - г) емкость конденсатора контура (C):
 - д) сопротивление потерь в контуре (r):
- при размыкании ключа K определить:
- 1) частоту возникающих колебаний (кГц),
 - 2) наибольшую амплитуду колебания тока в контуре (мА),

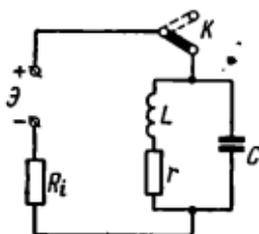


Рис. К.1

3) наибольшую амплитуду колебания напряжения на контуре (\mathcal{E}),

- 4) добротность контура,
- 5) постоянную времени контура (мксек).

Полученные ответы ввести в контролируемую машину.

Задача 2. Как изменится характер свободных колебаний в контуре, изображенном на рис. К.1, если последовательно с катушкой контура включить:

- 1) резистор с сопротивлением 10 Ом ,
- 2) резистор с сопротивлением 100 Ом ,
- 3) конденсатор,
- 4) катушку индуктивности.

Ответы и их коды приведены на рис. К.2, где первоначальная

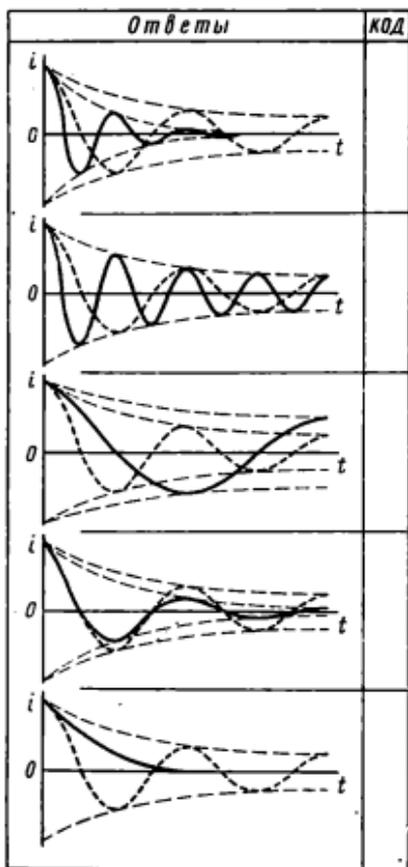


Рис. К.2

кривая колебаний изображена штриховой линией, а изменившаяся — сплошной. Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 3. Определить добротность контура, осциллограмма свободных колебаний которого изображена на рис. К.3. Полученный ответ ввести в контролируемую машину.



Рис. К.3

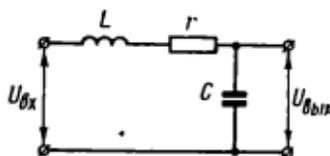


Рис. К.4

Задача 4. Определить величину наибольшего сопротивления резистора в килоомах, которым надо шунтировать контур с параметрами $L = \dots$ (мкГн), $C = \dots$ (пФ), $Q = \dots$, чтобы перевести его в апериодический режим. Ответ в килоомах ввести в контролируемую машину.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Последовательный контур при гармоническом воздействии

Задача 1. Для схемы (рис. К.4) заданы следующие величины:

- 1) входное напряжение (мВ)
- 2) несущая частота поступающего радиосигнала (кГц)
- 3) добротность контура
- 4) емкость конденсатора контура (пФ)

Определить:

- 1) какую индуктивность (мкГн) должна иметь катушка, чтобы контур с заданной емкостью был настроен в резонанс на заданную несущую частоту сигнала?
- 2) какое активное сопротивление потерь (Ом) допустимо у катушки, чтобы контур обладал заданной добротностью?
- 3) выходное напряжение (В) при настройке контура в резонанс.
- 4) полосу пропускания контура (кГц) на уровне 0,707.

Числовые значения ответов ввести в контролируемую машину.

Задача 2. Сравнив кривые амплитудно-частотных характеристик контуров, приведенные на рис. К.5, определить:

- 1) какой из контуров обладает большей добротностью?
- 2) какой из контуров обладает лучшей избирательностью?
- 3) какой из контуров имеет более широкую полосу пропускания?

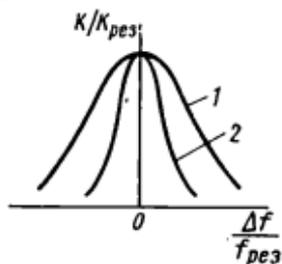


Рис. К.5

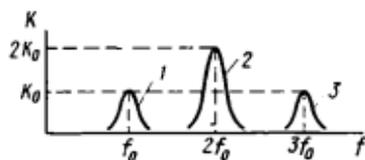


Рис. К.6

Номер выбранной кривой введите в контролируемую машину.

Задача 3. Сравнив кривые амплитудно-частотных характеристик контуров, приведенные на рис. К.6, определите:

- 1) какой из контуров настроен на более высокую частоту?
- 2) какой из контуров обладает большей добротностью?
- 3) какой из контуров обладает лучшей избирательностью?
- 4) какой из контуров имеет более широкую полосу пропускания?

5) какой из первых двух контуров имеет более широкую полосу пропускания?

Ответ	Код
контур 1	
контур 2	
контур 3	
Сравниваемый показатель у контуров одинаков	

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 4. Как изменится форма амплитудно-частотной характеристики контура при:

- 1) включении в контур резистора?

- 2) шунтировании контура резистором?
- 3) увеличении емкости конденсатора контура?
- 4) уменьшении емкости конденсатора контура?
- 5) увеличении индуктивности катушки контура?
- 6) уменьшении индуктивности катушки контура?

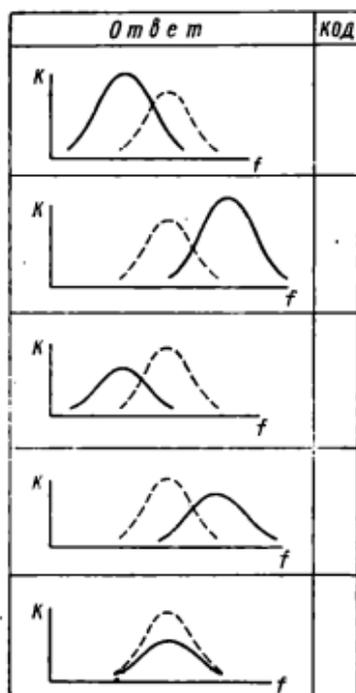


Рис. К.7

Ответы и их коды приведены на рис. К.7. Штриховой линией изображена АЧХ до изменения параметров контура, а сплошной — после. Изменением величины активного сопротивления потерь в контуре от частоты в данной задаче пренебрегаем.

Задача 5. Какой минимум измерительных приборов целесообразнее использовать для снятия амплитудно-частотной характеристики контура, если имеются генератор (код 1), осциллограф (код 3) и ламповый вольтметр (код 5)? Сумму кодов выбранных приборов введите в контролируемую машину.

Задача 6. Контур настраивается конденсатором переменной емкости.

По какому закону при увеличении емкости изменяется:

- 1) частота собственных колебаний?
- 2) добротность контура (при условии, что активное сопротивление линейно растет с частотой)?

Правильный ответ выберите из рис. К.8 и соответствующий ему код введите в контролируемую машину.

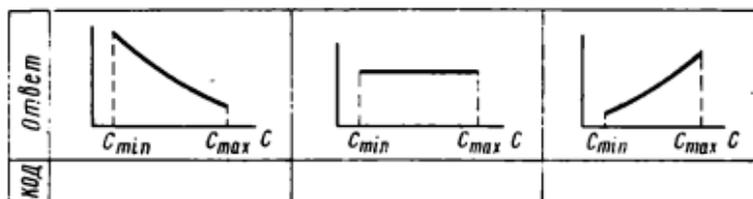


Рис. К.8

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование параллельного контура при гармоническом воздействии

Задача 1. Как изменится форма АЧХ схемы с параллельным контуром (при условии, что внутреннее сопротивление источника ка много больше входного сопротивления контура при резонансе) при:

- 1) увеличении внутреннего сопротивления источника?
- 2) уменьшении внутреннего сопротивления источника?
- 3) уменьшении индуктивности контура?
- 4) увеличении индуктивности контура?
- 5) включении добавочного конденсатора параллельно конденсатору контура?

Правильный ответ выберите из рис. К.9 и соответствующий ему код введите в контролируемую машину. На рис. К.9 первоначальная форма АЧХ изображена штриховой линией, а новая — сплошной.

Задача 2. Каким должно быть внутреннее сопротивление источника сигнала R_i по сравнению с входным сопротивлением контура при резонансе $Z_{вх.рез}$, чтобы схема с параллельным контуром обеспечивала:

- 1) избирательность по напряжению?
- 2) избирательность по току?
- 3) выделение в контуре наибольшей мощности?

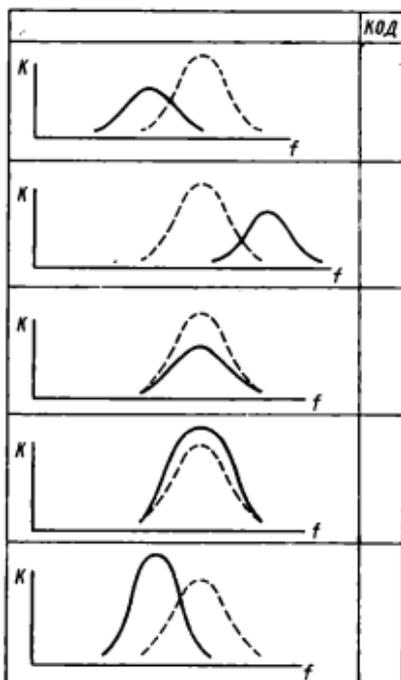


Рис. К.9

Ответы	$R_i < Z_{вх.рез}$	$R_i = Z_{вх.рез}$	$R_i > Z_{вх.рез}$
Код			

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 3. Как изменятся при перемещении шупа вниз (рис. К.10) следующие параметры:

- 1) резонансная частота контура?
- 2) добротность контура?
- 3) входное сопротивление контура при резонансе?
- 4) ток, потребляемый от генератора при резонансе?
- 5) мощность, выделяемая в контуре, если $\frac{L}{cr} > R_i$?
- 6) мощность, выделяемая в контуре, если $\frac{L}{cr} \leq R_i$?

Ответы	Код
будет увеличиваться	
будет уменьшаться	
останется постоянным	
будет иметь максимум	
будет иметь минимум	

Задача 4. Какая из изображенных на рис. К.11 амплитудно-частотных характеристик соответствует: а) положению переключателя I, б) положению переключателя II?

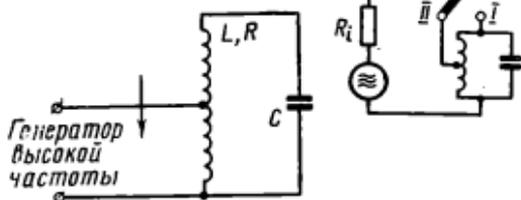


Рис. К.10

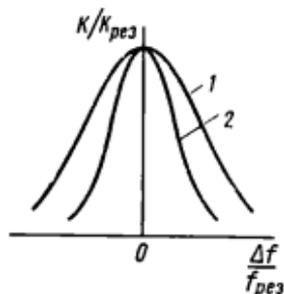


Рис. К.11

Номер характеристики введите в контролируемую машину.

Задача 5. Для контура с параметрами $L = \dots$
 $C = \dots$ $r = \dots$ определите входное сопротивление при резонансе:

1) в случае полного включения контура (положение переключателя *I* на рис. К.11)?

2) в случае неполного включения контура с коэффициентом включения $p=0,5$ (положение *II* на рис. К.11)?

Ответ (ком) введите в контролируемую машину.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 .

Исследование способов настройки связанных контуров

Задача 1. Как изменяется коэффициент связи двух катушек при следующих операциях:

1) катушки отодвигаются друг от друга?

2) катушки придвигаются друг к другу?

3) оси катушек поворачиваются на некоторый угол (меньший чем 90°) из соосного положения?

4) оси катушек поворачиваются на некоторый угол (меньший 90°) из взаимно-перпендикулярного положения?

5) увеличивается ток через первичную катушку?

6) уменьшается ток через первичную катушку?

Ответы	Код
уменьшается	
остаётся постоянным	
увеличивается	

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 2. Какое значение будет иметь:

1) ток в первичном контуре при настройке на I частный резонанс?

2) ток во вторичном контуре при настройке на I частный резонанс?

3) ток в первичном контуре при настройке на II частный резонанс?

4) ток во вторичном контуре при настройке на II частный резонанс?

5) ток во вторичном контуре при настройке на полный резонанс?

Ответы	Код
минимальное	
максимальное	
максимально возможное	

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 3. Для случая полного резонанса определите коэффициент оптимальной связи между идентичными контурами, обладающими добротностью $Q=100$. Ответ, увеличенный в 10 раз, введите в контролируемую машину.

Задача 4. По какому закону изменяется при увеличении связи между контурами:

- 1) к. п. д. связанных контуров?
- 2) мощность, выделяемая в первичном контуре?
- 3) мощность, выделяемая во вторичном контуре?
- 4) модуль сопротивления, вносимого из вторичного контура в первичный?

Правильный ответ выберите из рис. К.12 и соответствующий ему код введите в контролируемую машину.

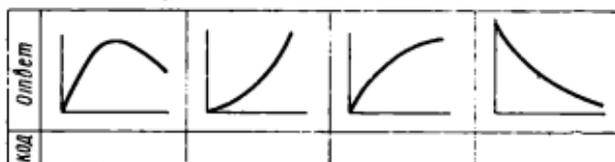


Рис. К.12

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Амплитудно-частотные характеристики связанных контуров

Задача 1. Какой добротностью должен обладать каждый из двух одинаковых контуров, связь между которыми равна критической, чтобы на частоте... кГц обеспечить полосу пропускания... кГц.

Ответ, уменьшенный в 10 раз, введите в контролируемую машину.

Задача 2. Колебательная система состоит из двух одинаковых связанных контуров, обладающих добротностями $Q =$ и настроенных на частоту $.$ кГц.

Определите:

- 1) полосу пропускания при критической связи (кГц)?
- 2) полосу пропускания при максимально допустимой связи (кГц)?
- 3) наибольший возможный коэффициент передачи напряже-
ния?

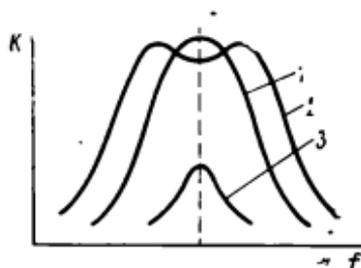


Рис. К.13

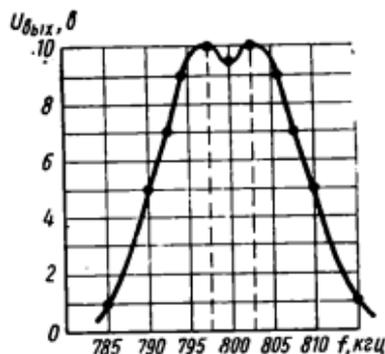


Рис. К.14

Полученные ответы введите в контролирующую машину.

Задача 3. Какая из приведенных на рис. К.13 кривых АЧХ соответствует условию:

- 1) $k_{св} < d$,
- $k_{св} = d$,
- $k_{св} > d$.

Номер выбранной кривой введите в контролирующую машину.

Задача 4. По экспериментально снятой зависимости выходного напряжения системы двух связанных контуров от частоты генератора при поддержании выходного напряжения генератора постоянным и равным 0,5 в (рис. К.14) определите:

- 1) максимальный коэффициент передачи,
- 2) коэффициент передачи на частоте резонанса,
- 3) полосу пропускания (кГц),
- 4) коэффициент прямоугольности $K_{по,1}$ (при вводе ответа результат увеличить в десять раз).

Полученные ответы введите в контролирующую машину.

Задача 5. Какую величину связи необходимо установить между одинаковыми контурами, обладающими добротностью, равной 100, для обеспечения:

- 1) передачи наибольшей мощности во вторичный контур?
- 2) достаточно высокого значения к. п. д.?
- 3) наиболее широкой полосы пропускания?
- 4) наименьшего влияния контуров друг на друга?

Ответ	$k_{св} < 0,01$	$k_{св} = 0,01$	$k_{св} = 0,024$	$k_{св} = 0,04$	$k_{св} > 0,04$
Код					

Код правильного ответа введите в контролирующую машину.

Задача 6. Как изменится форма АЧХ связанных контуров с трансформаторной связью при:

- 1) удалении катушек контуров друг от друга?
- 2) приближении катушек контуров друг к другу?

Правильный ответ и его код выберите из рис. К.15, где штриховой линией показана первоначальная АЧХ, а сплошной — после перемещения катушек.

О т в е т ы

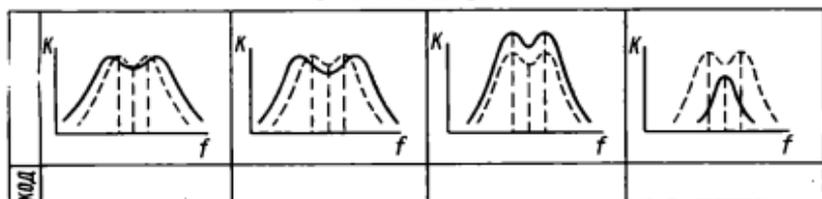


Рис. К.15

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование фильтров нижних и верхних частот

Задача 1. Для фильтра № ..., приведенного в табл. рис. К.16, определите сопротивление нагрузки, согласованное с данным фильтром. Полученный ответ (ком) введите в контролирующую машину.

Задача 2. Для фильтра № ..., приведенного в табл. рис. К.16, определите частоту среза. Полученный ответ (кГц) введите в контролирующую машину.

Задача 3. Затухание однозвенного фильтра на некоторой частоте равно ... дБ. Определите затухание трехзвенного фильтра на той же частоте. Полученный ответ (дБ) введите в контролирующую машину.

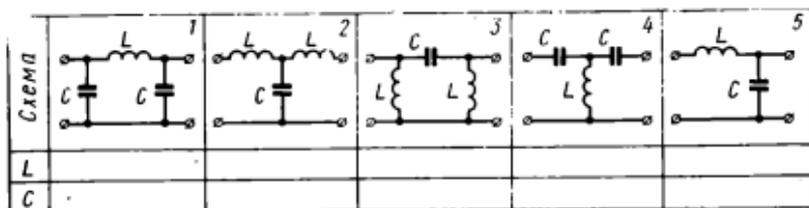


Рис. К.16

Задача 4. На какой частоте будет осуществляться полное согласование реактивного фильтра, нагруженного на характеристическое сопротивление $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ для:

- 1) фильтра нижних частот?
- 2) фильтра верхних частот?

Ответ	$f=0$	$f=1/C$	$f=\infty$	На всех частотах в полосе прозрачности
Код				

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 5. Какая из изображенных на рис. К.17 схем фильтров, является:

- 1) фильтром нижних частот?
- 2) фильтром верхних частот?

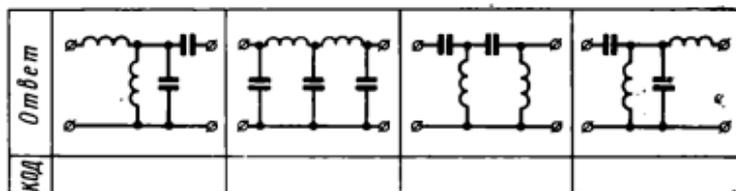


Рис. К.17

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 6. На рис. К.18 приведены частотные характеристики затухания нескольких фильтров.

Определите, какая характеристика соответствует:

- 1) однозвенному ФНЧ с согласованной нагрузкой;
- 2) однозвенному ФНЧ с несогласованной нагрузкой;

- 3) двухзвенному ФНЧ с согласованной нагрузкой;
- 4) однозвенному ФВЧ с согласованной нагрузкой;
- 5) однозвенному ФВЧ с несогласованной нагрузкой;
- 6) двухзвенному ФВЧ с согласованной нагрузкой.

Номер выбранной кривой введите в контролируемую машину.

Задача 7. Как изменится:

- 1) частота среза, если из одних и тех же катушек и конденсаторов составить ФНЧ сначала по П-образной схеме, а потом по Т-образной?

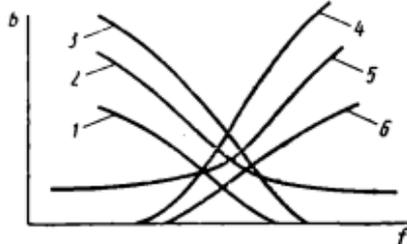


Рис. К.18

- 2) частота среза, если из одних и тех же катушек и конденсаторов составить однозвенный П-образный фильтр сначала нижних частот, а потом верхних частот?

- 3) сопротивление согласованной нагрузки для ФНЧ, составленного из одних и тех же

элементов сначала по П-образной, а потом по Т-образной схеме?

- 4) сопротивление согласованной нагрузки, если из одних и тех же элементов составить Т-образный фильтр сначала нижних, а потом верхних частот?

Ответ	Уменьшится в 4 раза	Уменьшится в 2 раза	Не изменится	Увеличится в 2 раза	Увеличится в 4 раза
Код					

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Исследование режимов длинной линии при гармоническом воздействии

Задача 1. Определите волновое сопротивление воздушной длинной линии, состоящей из двух параллельных проводов диаметром... мм, отстоящих на расстоянии ... см друг от друга. Ответ в омах, уменьшенный в 100 раз, введите в контролируемую машину.

Задача 2. Картины изменения показаний индикатора при перемещении вдоль воздушной линии длиной 20 м при различных нагрузках показаны на рис. К.19. Наличием потерь в линии пренебречь. Частота источника — 30 МГц.

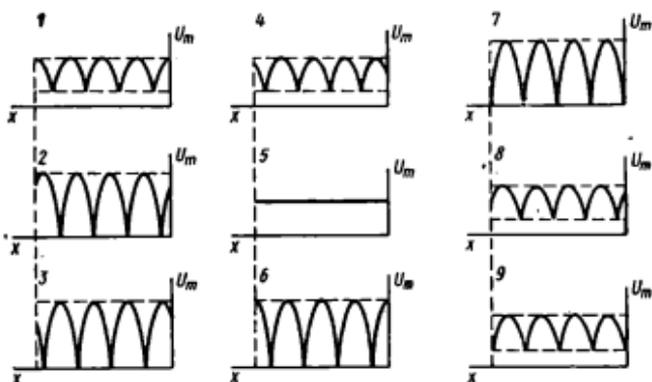


Рис. К.19

Определите:

1. Характер сопротивления нагрузки для графика № ...

Ответ	$Z_N=0$	$Z_N=\infty$	$R_N=\rho$	$R_N>\rho$	$R_N<\rho$	$+jx_N$	$-jx_N$	$\pm R_N + jx_N$	$R_N - jx_N$
Код									

2. Характер входного сопротивления для графика №...

Ответ	$\rho^{k_{об}}$	$\rho/R_{об}$	0	∞	$+jx_{вх}$	$-jx_{в}$	0	$\pm R_{вх} + jx_{вх}$	$R_{вх} - jx_{вх}$
Код									

3. Характер сопротивления линии в точке, удаленной от конца линии на расстояние ... (м) для графика № ...

Ответ	0	∞	ρ	$\rho^{k_{об}}$	$\infty^{k_{об}}$	$+jx$	$-jx$	$R+jx$	$R-jx$
Код									

4. Величину коэффициента бегущей волны ($k_{об}$) для графика № ...

Ответ	$k_{об}=0$	$k_{об}<1$	$k_{об}=1$
Код			

Коды правильных ответов введите в контролируемую машину.

Задача 3. На рис. К.20 показан экспериментально снятый график показаний вольтметра при перемещении вдоль линии с волновым сопротивлением, равным ... Ом.

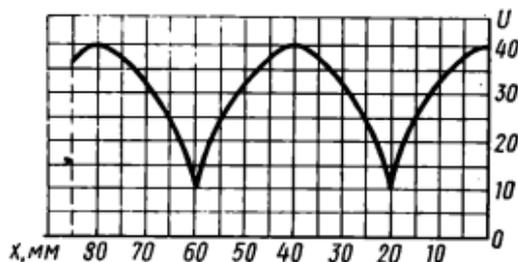


Рис. К.20

Определите:

- 1) длину волны генератора (см),
- 2) коэффициент бегущей волны (при вводе ответа в машину результат увеличить в 20 раз).

3) величину сопротивления нагрузки (Ом).

Ответы введите в контролируемую машину.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

Исследование электромагнитного поля в прямоугольном волноводе

Задача 1. Какая структура поля в поперечном сечении волновода на рис. К.21 соответствует волне типа:

- 1) H_{10} ? 2) H_{20} ? 3) H_{01} ?

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

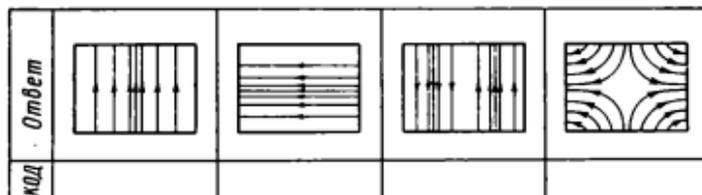


Рис. К.21

Задача 2. Определите критическую длину волны типа H_{10} для волновода с размерами поперечного сечения 25×10 мм. Ответ (см) введите в контролируемую машину.

Задача 3. Прямоугольный волновод питается от генератора, вырабатывающего колебания с частотой 3000 МГц. Какой из приведенных ответов соответствует длине волны в волноводе?

Ответ	6 см	10 см	14 см
Код			

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.
Задача 4. Какой режим установится в волноводе при:

- 1) подключении к концу волновода согласованной с ним нагрузки?
- 2) подключении к концу волновода реактивной нагрузки?
- 3) открытом конце волновода?
- 4) подключении к открытому концу волновода металлического короткозамыкателя?

Ответы	Код
режим бегущей волны	
режим стоячей волны	
режим смешанных волн	

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 5. На рис. К.22 показан экспериментально снятый график изменения модуля напряженности электрического поля вдоль волновода.

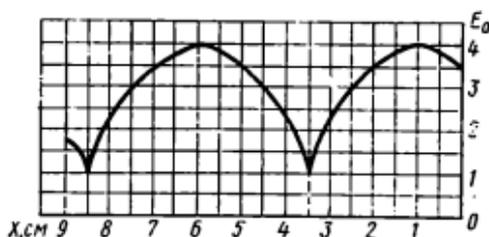


Рис. К.22

Определите:

1. Характер сопротивления в точке удаленной на расстояние ... см от условного конца волновода (начала отсчета по оси абсцисс)

Ответ	$\rho^{K_{6B}}$	$r^{K_{6B}}$	$R+jx$	$R-jx$
Код				

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

2. Длину волны в волноводе. Ответ (см) введите в контролируемую машину.

3. Коэффициент стоячей волны. Ответ введите в контролируемую машину.

4. Коэффициент отражения. Ответ, увеличенный в 10 раз, введите в контролируемую машину.

Задача 6. Определите волновое сопротивление волновода, длина волны в котором в 1,33 раза больше длины волны в воздухе. Ответ (в омах), уменьшенный в 100 раз, введите в контролируемую машину.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

Снятие диаграммы направленности симметричного вибратора

Задача 1. Определите какая из диаграмм направленности, снятых в плоскости вибратора (рис. К.23), соответствует вибраторам длиной: 1) $l=0,5\lambda$; 2) $l=\lambda$; 3) $l=1,5\lambda$; 4) $l=2\lambda$.

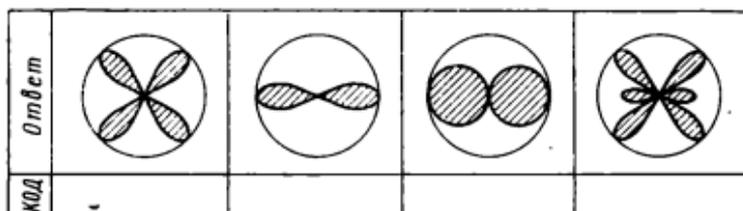


Рис. К. 23

Задача 2. Каким образом необходимо соединить заданный фидер с заданным типом антенны для получения эффективного излучения?

Фидеры	Антенны
1. Двухпроводный с $\rho=200$ ом	1. Симметричный вибратор длиной $l=0,5 \lambda$
2. Двухпроводный с $\rho=300$ ом	2. Симметричный вибратор длиной $l=\lambda$
3. Коаксиальный с $\rho=75$ ом	3. Петлевой вибратор длиной $l=0,5 \lambda$

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Ответ	Код
непосредственное соединение	
через симметрирующее устройство	
через согласующее устройство	
через симметрирующее и согласующее устройства	

Задача 3. Как влияет увеличение диаметра проводов полуволнового вибратора на полосу пропускания антенны?

Ответ	Код
полоса не изменится	
полоса увеличивается	
полоса уменьшается	

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 4. Экспериментально снятая диаграмма направленности симметричного вибратора изображена на рис. К.24. Опреде-

лите ширину диаграммы направленности в градусах, если диаграмма построена: а) по напряженности поля, б) по мощности.

Ответ, уменьшенный в 10 раз, введите в контролирующую машину.

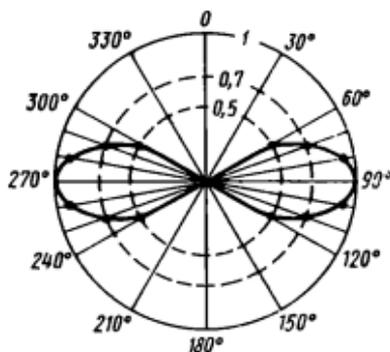


Рис. К.24

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

Исследование поверхностных антенн

Задача 1. Как изменится диаграмма направленности открытого на конце волновода при присоединении к нему:

- 1) секториального рупора с расширением в плоскости E ?
- 2) секториального рупора с расширением в плоскости H ?
- 3) пирамидального рупора?

Ответ	Код
не изменится	
станет более узкой в плоскости H	
станет более узкой в плоскости E	
станет более узкой в плоскостях E и H	

Код правильного ответа введите в контролирующую машину.

Задача 2. Как повлияет на коэффициент направленного действия (КНД) антенны:

- 1) увеличение поверхности раскрыва антенны?
- 2) увеличение рабочей длины волны?
- 3) увеличение излучаемой мощности?

Ответ	Код
КНД не изменится	
КНД увеличится	
КНД уменьшится	

Код правильного ответа введите в контролируемую машину.

Задача 3. Для рупора, изображенного на рис. К.25, сняты диаграммы, направленности в двух плоскостях. Определите, какая из диаграмм соответствует: а) плоскости E , б) плоскости H ?

Номер выбранной диаграммы введите в контролируемую машину.

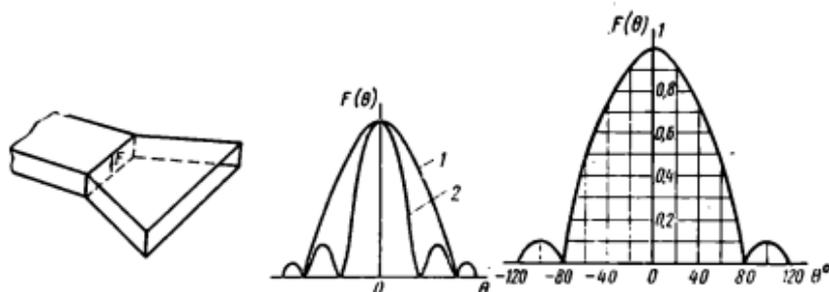


Рис. К.25

Рис. К.26

Задача 4. На рис. К. 26 изображена диаграмма направленности поверхностной антенны. Определите ширину диаграммы в градусах при условии, что диаграмма снята: а) по мощности, б) по напряженности.

Полученный ответ, уменьшенный в 10 раз, введите в контролируемую машину.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

Таблица исходных данных расчета

бригады № . . .

Работа №	Исходные данные						Примечания
	пункт задания	$L,$ мкГМ	$C,$ пФ	$r,$ Ом	$r_{\text{лоб}},$ Ом	$R_{\text{ш}},$ Ком	
1	1 1						Входная емкость осциллографа... (пФ)
	2						
	3						
	4						
	2						
	3						
	2						
3						внутреннее сопротивление усилителя: в пентодном режиме (Ком) в триодном режиме (Ком)	
4						Входная емкость осциллографа (пФ)	
5						Входная емкость осциллографа (пФ) Индексы модуляции $M_1 = \dots$ $M_2 = \dots$ Частота модуляции $F = \dots$	
6—7							

Работа №	Исходные данные	Примечания
8	Параметры катушки $I = \dots$ $D = \dots$ $N = \dots$ $\mu_c = \dots$ Емкость конденсатора $C = \dots$ Диаметры экранов: $D_{\phi 1} = \dots; D_{\phi 2} = \dots$	Входная емкость лампового вольтметра... (пф)
9	п. 1 $L = \dots C = \dots$	RC-фильтр типа ...
	п. 5 $R = \dots C = \dots$	
10	п. 1 Полосовой «...»-образный фильтр последовательная ветвь $L = \dots C = \dots$ параллельная ветвь $L = \dots C = \dots$	
	п. 2 последовательная ветвь $L = \dots C = \dots$ параллельная ветвь $L = \dots C = \dots$	
	п. 3 Режекторный «...»-образный фильтр последовательная ветвь $L = \dots C = \dots$ параллельная ветвь $L = \dots C = \dots$	
	п. 4 RC-фильтр типа $R = \dots C = \dots$	
11	Диаметр проводов линии $d = \dots$ расстояние между проводами $a = \dots$	
12	Размеры сечения волновода: $a = \dots; b = \dots$ Длина волны генератора: $\lambda_r = \dots$	
13	Частоты генератора $f_{r1} = \dots; f_{r2} = \dots$ Диаметры вибраторов $d_1 = \dots; d_2 = \dots$	

Работа №	Исходные данные	Примечания
14	Частота генератора $f_r = \dots$ Диаметр вибратора $d = \dots$	
15	Частота генератора $f_r = \dots$	
16	Частота генератора $f_r = \dots$ Размеры сечения волновода: $a = \dots; b = \dots$ Размеры раскрыва секторных рупоров: <i>E</i> -плоскостного: $a_p = \dots; b_p = \dots$ <i>H</i> -плоскостного: $a_p = \dots; b_p = \dots$ Размеры раскрыва пирамидального рупора: $a_p = \dots; b_p = \dots$	

Приложение II

Градуировочная кривая конденсаторов переменной емкости

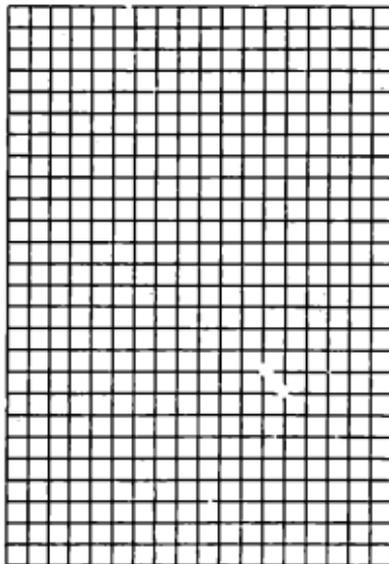


Рис. П.2

Приложение III
Зависимость коэффициента связи двух катушек $k_{св}$ от расстояния между ними l (для работ № 6—7)

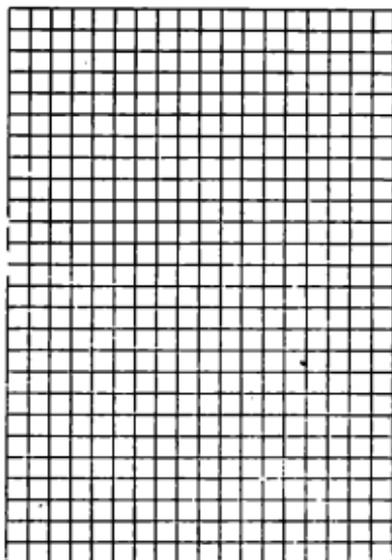


Рис. П.3

Приложение IV
Модуляционная характеристика приставки РК-1 (для работы № 5)

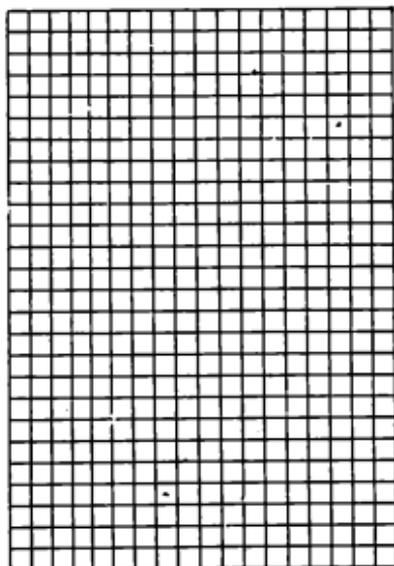


Рис. П.4

Таблица децибел

дб	Отношение напряжений		дб	Отношение напряжений	
	увеличение	ослабление		увеличение	ослабление
0	1,00	1,000	5,5	1,88	0,531
0,1	1,01	0,989	6,0	2,00	0,500
0,2	1,02	0,977	6,5	2,11	0,473
0,3	1,04	0,966	7,0	2,24	0,447
0,4	1,05	0,955	7,5	2,37	0,422
0,5	1,06	0,944	8,0	2,51	0,398
0,6	1,07	0,933	8,5	2,66	0,376
0,7	1,08	0,923	9,0	2,82	0,355
0,8	1,10	0,912	9,5	2,99	0,335
0,9	1,11	0,902	10,0	3,16	0,316
1,0	1,12	0,891			
			11,0	3,55	—
1,1	1,14	0,881	12,0	3,98	0,251
1,2	1,15	0,871	13,0	4,47	—
1,3	1,16	0,861	14,0	5,01	0,200
1,4	1,17	0,851	15,0	5,62	—
1,5	1,18	0,841	16,0	6,31	0,158
1,6	1,20	0,832	17,0	7,08	—
1,7	1,22	0,822	18,0	7,94	0,126
1,8	1,23	0,813	19,0	8,91	—
1,9	1,24	0,804	20,0	10,0	0,100
2,0	1,26	0,794			
			21,0	11,22	—
2,2	1,29	0,776	22,0	12,59	—
2,4	1,32	0,759	23,0	14,13	—
2,6	1,35	0,741	24,0	15,85	—
2,8	1,38	0,724	25,0	17,8	0,056
3,0	1,41	0,707	26,0	19,95	—
			27,0	22,39	—
3,2	1,45	0,692	28,0	25,12	—
3,4	1,48	0,676	29,0	28,18	—
3,6	1,51	0,661	30,0	31,6	0,032
3,8	1,55	0,646			
4,0	1,58	0,631			
			31,0	35,48	—
4,2	1,62	0,617	32,0	39,81	—
			33,0	44,67	—
4,4	1,66	0,603	34,0	50,12	—
4,6	1,70	0,589	35,0	56,2	0,018
4,8	1,74	0,575	36,0	63,10	—
5,0	1,78	0,562			
			37	70,79	—
			38	79,43	—

Продолжение приложения V

дБ	Отношение напряжений		дБ	Отношение напряжений	
	увеличение	ослабление		увеличение	ослабление
39	89,13	—	55	562	0,002
40	100,0	0,010	60	1000	0,001
			65	1780	0,0006
			70	3160	0,0003
			75	5620	0,0002
41	112,2	—	80	10 000	0,0001
42	125,9	—	85	17 800	0,00006
43	141,3	—	90	31 600	0,00003
44	158,5	—	95	56 200	0,00002
45	178,0	0,006	100	100 000	0,00001
46	199,5	—			
47	223,9	—			
48	251,2	—			
49	281,8	—			
50	316,0	0,003			

Приложение VI

Номограмма для пересчета отношений напряжений в децибелы

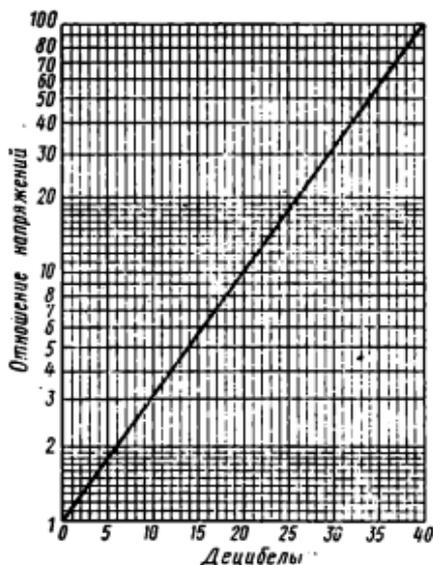


Рис. 11.6

График собственных затуханий фильтра нижних частот в полосе задерживания (к работе № 9)

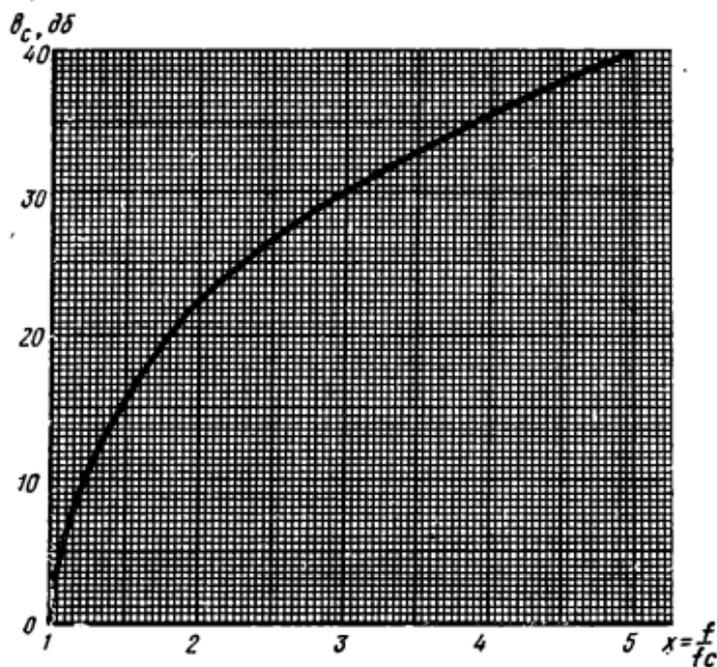


Рис. П.7

Шкала для построения логарифмических масштабов

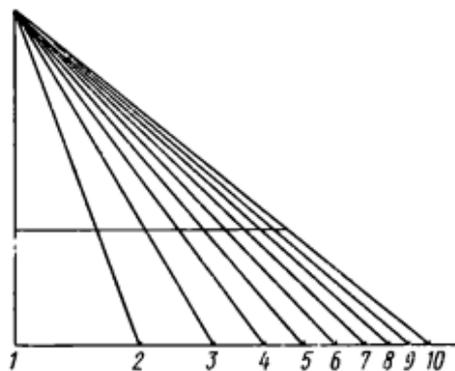


Рис. П.8

График частотной зависимости коэффициентов передачи фильтров нижних и верхних частот (для работы № 9)

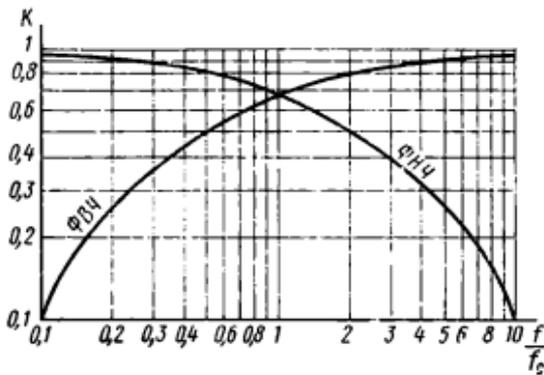


Рис. П.9

Принципиальная схема лабораторного усилителя (для работы № 3)

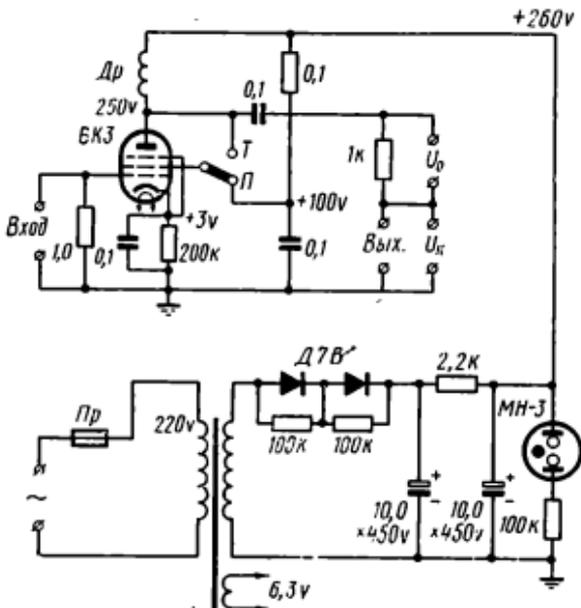


Рис. П.11

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
Предисловие	3
Методические указания по выполнению лабораторных работ	4
Практическое занятие. Ознакомление с измерительной аппаратурой, используемой при лабораторных работах	8
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Исследование свободных колебаний в одиночном контуре	19
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Последовательный контур при гармоническом воздействии	25
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Исследование параллельного контура при гармоническом воздействии	33
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Исследование прохождения амплитудно-модулированных колебаний через одиночный колебательный контур	40
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Исследование прохождения частотно-модулированных колебаний через одиночный колебательный контур	48
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Исследование способов настройки связанных контуров	54
<i>Лабораторная работа № 7.</i> Амплитудно-частотные характеристики связанных контуров	61
<i>Лабораторная работа № 8.</i> Исследование влияния экрана на параметры колебательных контуров	67
<i>Лабораторная работа № 9.</i> Исследование фильтров нижних и верхних частот	72
<i>Лабораторная работа № 10.</i> Исследование полосовых и задерживающих фильтров	81
<i>Лабораторная работа № 11.</i> Исследование режимов длинной линии при гармоническом воздействии	88
<i>Лабораторная работа № 12.</i> Исследование электромагнитного поля в прямоугольном волноводе	95
<i>Лабораторная работа № 13.</i> Снятие диаграммы направленности симметричного вибратора	107
<i>Лабораторная работа № 14.</i> Измерение входного сопротивления симметричного вибратора	120
<i>Лабораторная работа № 15.</i> Исследование антенны типа «Волновой канал»	124
<i>Лабораторная работа № 16.</i> Исследование поверхностных антенн	131
Вопросы для составления карт программированного контроля подготовленности к лабораторным работам	140
Приложения	160

32 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКВА
1973 ГОД



ВЫСШАЯ ШКОЛА