

Г. М. ВАЙСМАН, Ю. С. ВЕРЛЕ

62/39

В 14

ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ И РАДИОСИСТЕМЫ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

240895

*Допущено
Главным управлением
гидрометеорологической службы
при Совете Министров СССР
в качестве учебника
для гидрометеорологических техникумов*

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД • 1970

УДК (65.011.56+621.398) : 551.5

В книге изложены основные вопросы радиотехники: распространение радиоволн, теория и конструкции колебательных контуров, антенно-фидерных, радиоприемных и радиопередающих устройств.

Приведен материал о конкретных радиотехнических системах гидрометеорологической службы: связных, радиолокационных и радиотелеметрических. Освещены вопросы теории и практического использования радиоизмерительной аппаратуры, а также приведены сведения по эксплуатации и ремонту различных радиотехнических приборов и систем.

Книга предназначена в качестве учебника для учащихся гидрометеорологических техникумов и может быть полезной для лиц, которым в своей практической деятельности приходится заниматься изучением, эксплуатацией и ремонтом радиотехнической аппаратуры.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная гидрометеорологическая служба практически не может существовать без применения радиотехники. Радиотехнические методы и средства уже сейчас широко используются в гидрометеорологической практике, а в осуществляемой схеме комплексной автоматизации их применение станет массовым.

Цель настоящей книги — дать учащимся основные сведения по теории радиотехники и практике использования радиотехнической аппаратуры. Материал учебника изложен с учетом того, что учащиеся уже знакомы с общей электротехникой и основами электроники, поэтому электронные и полупроводниковые приборы, а также отдельные узлы радиотехнической аппаратуры (усилители, выпрямители и т. п.) подробно не описываются.

В главах 1—6 рассмотрены вопросы применения радиотехнических приборов и систем, распространения радиоволн, колебательных контуров, антенно-фидерных, радиоприемных и радиопередающих устройств. Изложение теоретического материала, как правило, иллюстрируется примерами схем и конструкций того или иного прибора или устройства. Особое внимание обращено на пояснение физических процессов в радиотехнических схемах.

В главах 7—9 описаны наиболее распространенные в гидрометеорологической службе радиотехнические системы: связные, радиолокационные, радиотелеметрические. Этот материал имеет целью подготовить учащихся к практическому использованию конкретных типов радиоаппаратуры.

В главе 10 приводятся сведения о радиоизмерениях и радиоизмерительных приборах. В главе 11 освещаются вопросы эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры.

Помощь в самостоятельной проверке качества усвоения изучаемого материала окажут помещенные в конце каждой главы контрольные вопросы и упражнения.

В связи с тем что изучение радиотехники сравнительно недавно включено в учебные планы гидрометеорологических техни-

кумов и большинство лабораторий находится в стадии становления, в учебник включен лабораторный практикум (глава 12), основная задача которого помочь учащимся в практическом закреплении теоретического материала по данному предмету.

Главы 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11 написаны Г. М. Вайсманом, главы 5, 6, 12 — Ю. С. Верле, глава 7 — В. Г. Даниловым совместно с Г. М. Вайсманом.

Авторы благодарят Р. П. Баталкина-Холодняка и Н. М. Потиевского, внимательно просмотревших рукопись и давших в своих рецензиях ценные замечания и предложения, которые были учтены авторами при окончательной отработке рукописи и подготовке ее к печати. Особую признательность авторы выражают канд. техн. наук Н. М. Потиевскому, который, кроме рецензирования, взял на себя труд по научному редактированию учебника, и Е. И. Шумиловой, принявшей участие в подготовке иллюстративного материала.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОВРЕМЕННОЙ РАДИОТЕХНИКЕ И ИСТОРИИ ЕЕ РАЗВИТИЯ

§ 1.1. РАДИОТЕХНИКА И ОБЛАСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Программой КПСС в числе важнейших определяющих областей технического прогресса нашей страны предусматривается интенсивное развитие радиоэлектроники.

За последние годы радиоэлектроника проникла во все без исключения отрасли народного хозяйства, стала одной из ведущих отраслей науки и техники.

Такое бурное развитие методов и средств радиоэлектроники стало возможным благодаря ряду особых свойств, присущих радиоэлектронной аппаратуре:

1. Радиоволны распространяются с наибольшей достижимой в природе скоростью — скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/сек).

2. Современная приемная радиоэлектронная аппаратура позволяет улавливать ничтожно слабые радиосигналы (чувствительность приемников такова, что могут быть приняты сигналы мощностью до 10^{-22} Вт и даже меньше), а передающая аппаратура может генерировать сигналы большой мощности (сотни киловатт в непрерывном режиме и десятки миллионов киловатт в импульсном режиме). Это обеспечивает надежную радиосвязь на колоссальных расстояниях (по крайней мере в пределах солнечной системы).

3. Радиоэлектронная аппаратура может быть конструктивно выполнена в виде весьма малогабаритных блоков, что позволяет размещать ее на самолетах, ракетах, спутниках и даже вводить внутрь человеческого организма при медицинских исследованиях.

Перечисленные свойства предопределили проникновение радиоэлектроники и в гидрометеорологическую службу.

Понятие «радиоэлектроника» сложилось лишь в настоящее время, оно приходит на смену понятию «радиотехника», связан-

ному с генерацией, излучением, приемом и преобразованием энергии радиоволн длиной от нескольких километров до долей сантиметра (этим длинам волн соответствуют частоты от 50—100 кГц до 300 ГГц).

Сейчас для беспроводной передачи различной информации используется диапазон волн от нескольких десятков километров до десятиллионных долей метра. Таким образом, современная радиоэлектроника, кроме радиотехники, включает также инфракрасную технику и светотехнику.

Но не только расширенный диапазон используемых электромагнитных волн отличает современную радиоэлектронику от радиотехники. Имеется ряд и других особенностей, делающих радиоэлектронику качественно отличной от радиотехники. Основные из этих особенностей следующие.

1. В современной радиоэлектронике резко повышен удельный вес устройств, обеспечивающих последетекторную обработку информации. Если в радиоприемных устройствах 40—50-х годов после детектора производилось лишь усиление выделенного сигнала, то теперь этот сигнал не только усиливается, но и подвергается довольно сложной обработке, прежде чем попасть на выходное устройство.

2. Современная радиоэлектроника очень тесно связана с автоматикой. Эта связь обусловлена, во-первых, тем, что радиосредства часто являются лишь одним из звеньев системы автоматического управления (например, системы управления полетом ракеты). Во-вторых, в самих радиосредствах во многих случаях применяются системы автоматического управления (например, системы автоматического слежения за целью в радиолокационной аппаратуре).

3. В современной радиоэлектронике очень тесно переплетены элементы электронной техники и радиотехнической аппаратуры. Появились комплексные узлы, объединяющие активный элемент (диод, триод) и пассивный элемент (индуктивность, емкость). Примерами таких узлов являются магнетрон, клистрон, в которых радиолампа и колебательный контур составляют единое конструктивное целое.

4. Построение радиоэлектронной аппаратуры основано на огромном количестве физических явлений, главным образом твердого тела. В качестве примера используемых явлений, ранее неизвестных или малоизвестных, следует назвать эффекты Холла, Керра, Пельтье, гиперзвук, туннельный эффект и др. Эти явления широко используются для конструирования транзисторов, лазеров, интегральных твердых схем, выполняющих сложные функции. Появились и новые типы активных элементов, транзисторы, полупроводниковые диоды, варакторы (нелинейные емкости), варисторы (нелинейные положительные сопротивления), терморезисторы и др.

5. В деле развития радиоэлектроники все большую роль играют математические исследования. Если раньше математика применялась лишь для расчета радиотехнических цепей, то теперь она широко используется для определения математическим путем наиболее выгодной (оптимальной) структуры радиоэлектронного технического средства. При этом часто используется теория случайных функций и математическая статистика.

Перечисленные главные особенности и привели к появлению нового термина «радиоэлектроника», хотя в литературе еще довольно часто термины «радиотехника» и «радиоэлектроника» употребляются в одинаковом смысле.

Современное наиболее общее определение радиоэлектроники (радиотехники) таково: *радиоэлектроника (радиотехника) — отрасль науки и техники, связанная с использованием энергии электромагнитных волн для передачи, приема и преобразования информации.*

Основными областями применения радиоэлектронной аппаратуры являются: 1) радиосвязь; 2) радиовещание; 3) телевидение; 4) радиолокация; 5) радионавигация; 6) радиоуправление; 7) радиотелеметрия; 8) радиоастрономия; 9) радиометеорология; 10) радиоизмерения; 11) промышленная радиоэлектроника; 12) радиоэлектроника в научных исследованиях.

Дадим краткие пояснения каждой области применения. Более подробно основные из них рассматриваются ниже, в соответствующих главах учебника.

Радиосвязью называют передачу телеграфных и телефонных сообщений (информации) по радио между определенными корреспондентами. При этом в радиосвязи под передачей информации обычно понимается процесс, включающий в себя как отправление, так и прием информации.

Радиовещание — это односторонняя радиосвязь с большим числом корреспондентов. Радиовещание — это работа радиостанций, транслирующих обычные радиопрограммы. К радиовещанию относится и передача прогнозов погоды, прием которых осуществляется огромным числом организаций и лиц, интересующихся этой информацией.

Телевидение — это передача по радио движущихся и неподвижных изображений.

Радиолокацией называют область радиоэлектроники, которая использует отражение, переизлучение или собственное излучение объектами электромагнитных волн для обнаружения различных целей и для измерения их координат и параметров движения.

Радионавигация — это область радиоэлектроники, объединяющая различные радиоэлектронные методы и технические средства вождения судов, самолетов и других движущихся аппаратов.

Радиотелеметрия — это область радиоэлектроники, применяемая для автоматической приемо-передачи по радио значений контролируемых величин с различных объектов (самолетов, ракет, космических кораблей, радиозондов и т. п.).

Радиоастрономией называют область радиоэлектроники, занимающуюся исследованием космического радиоизлучения. Для наблюдения за этим излучением применяются так называемые радиотелескопы, снабженные высокочувствительными приемниками.

Под радиометеорологией понимают применение радиосредств для сбора информации об элементах погоды (например, характеристик облачности, зон осадков, гроз, градоопасных очагов).

Радиоизмерения — это измерения с помощью радиосредств радиотехнических параметров (напряженности поля, мощности, частоты, фазы и других параметров радиосигналов; частотной, фазовой, амплитудной и других характеристик радиоэлектронных цепей и систем).

Промышленная радиоэлектроника включает различные применения радиоэлектронной аппаратуры в промышленности и других отраслях народного хозяйства (например, применение телевидения для диспетчерской службы; применение высокочастотного излучения для закалки стали и сушки древесины).

Применение радиоэлектроники в науке чрезвычайно разнообразно. Сюда относится применение радиоэлектроники при научных исследованиях в атмосфере и космосе, при исследованиях внутриядерных, атомных и молекулярных процессов, а также явлений, происходящих в живых организмах, машинах и при различных технологических процессах.

Многие из перечисленных основных областей применения радиоэлектроники в значительной мере взаимно перекрываются, границы между ними довольно условны. Так, например, радиолокация часто применяется в радиометеорологии, телевидение нашло место и в радиовещании, и в радиолокации, и в промышленности и т. д.

Безусловно, по мере развития науки и техники области применения радиоэлектроники будут расширяться и углубляться.

§ 1.2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РАДИОТЕХНИКИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

Передача различной информации с помощью электромагнитных колебаний давно является объектом изучения многих исследователей.

В 1831 г. М. Фарадей (1791—1867 гг.) открыл закон электромагнитной индукции, сформулировав положение о воздействии

электрических токов, приводящих «находящуюся в непосредственной близости от них материю в некоторое особое состояние, которое до того было безразличным».

Дж. К. Максвелл (1831—1879 гг.) в 60-х годах высказал идею о единстве природы световых и электрических колебаний, разработал стройную математическую теорию электромагнитных явлений. Генриху Герцу (1857—1894 гг.) в 1888 г. опытным путем удалось обнаружить способность электромагнитных волн отражаться и преломляться и тем самым подтвердить выводы Максвелла.

Однако практическое применение всех этих открытий, выразившееся в изобретении радиосвязи, принадлежит нашему соотечественнику Александру Степановичу Попову (1859—1905 гг.).

К 1895 г. А. С. Попов уже ясно сформулировал свою основную цель — осуществление связи без проводов с помощью электромагнитных колебаний.

Вот как описана самим А. С. Поповым схема первого в мире радиоприемника (рис. 1.1): «Прилагаемая схема показывает расположение частей прибора. Трубка с опилками подвешена горизонтально между зажимами М и N на легкой часовой пружине, которая для большей эластичности согнута со стороны одного зажима зигзагом. Над трубкой расположен звонок, так чтобы при своем действии он мог давать легкие удары молоточком посредине трубки, защищенной от разбивания резиновым кольцом. . . Действует прибор следующим образом. Ток батареи в 4—5 вольт постоянно циркулирует от зажима *Р* к платиновой пластинке *А*, далее через порошок, содержащийся в трубке, к другой пластинке *В* и по обмотке электромагнитного реле обратно к батарее. Сила этого тока недостаточна для притягивания якоря реле, но если трубка *АВ* подвергнется действию электрического колебания, то сопротивление мгновенно уменьшится и ток увеличится настолько, что якорь реле притянется. В этот момент цепь, идущая от батареи к звонку, прерванная в точке *С*, замкнется и звонок начнет действовать, но тотчас же сотрясения трубки опять уменьшат ее проводимость, и реле разомкнет цепь звонка. . . На одиночное колебание прибор

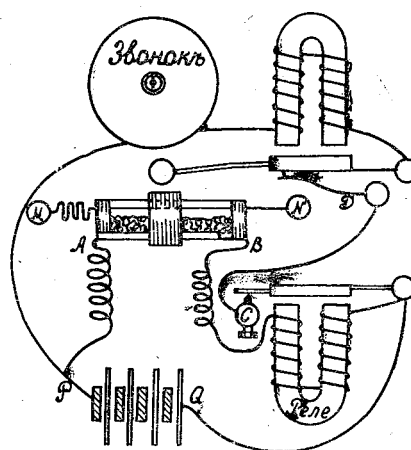


Рис. 1.1. Схема первого в мире радиоприемника — «прибора для обнаружения и регистрирования электрических колебаний» (по рисунку А. С. Попова).

отвечает коротким звонком; непрерывно действующие разряды отзываются довольно частыми, через приблизительно равные промежутки следующими звонками».

В качестве передающего устройства Поповым был использован искровой передатчик, в качестве передающей антенны — «квадратные листы 40 сантиметров в стороне», в качестве приемной антенны — «вертикальная проволока длиной в 2,5 метра».

Вся описанная система радиосвязи весной 1895 г. была испытана Поповым в саду Петербургского минного офицерского класса, а 25 апреля (7 мая) 1895 г. была доложена им на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества. Этот день и является днем открытия радио. Тогда же Поповым была сформулирована мысль о том, что приемник может быть использован и для исследования электрических разрядов в атмосфере. Летом и осенью 1895 г. на метеорологической станции Петербургского лесного института Попов провел наблюдения, используя специально созданный «прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний», запись в котором производилась на ленту самописца. Результатами эксперимента были два важных вывода, имевших историческое значение:

1) устойчивая связь с помощью электромагнитных колебаний возможна, несмотря на атмосферные помехи;

2) имеется практическая возможность исследования этих помех, вызываемых электрическими разрядами в атмосфере.

В последующие годы Попов нашел практическое применение своему изобретению. В 1896 г. Попов вместе с П. Н. Рыбкиным демонстрирует прием на расстоянии 250 м радиосигнала, несущего смысловой текст, с автоматической записью радиограммы на телеграфной ленте. В 1897 г. была установлена радиосвязь на расстоянии 5 км.

Во время опытов с радиосвязью, проводимых на море, было обнаружено, что проходивший между передатчиком и приемником корабль нарушал радиосвязь. А. С. Попов дал правильное объяснение этому явлению, указав на отражение радиоволн от корабля, и высказал предположение о возможном использовании этого явления в целях радионавигации. На явлении отражения радиоволн основана, как известно, радиолокация.

К сожалению, из-за косности государственного аппарата царской России, одно из величайших открытий XIX века не получило должного распространения. Только Великая Октябрьская социалистическая революция обеспечила всестороннее развитие радиотехники в нашей стране.

В декабре 1918 г. по инициативе В. И. Ленина было организовано первое радиотехническое научно-исследовательское учреждение — Нижегородская радиолaborатория, объединившая

наших известных ученых и конструкторов, таких, как М. А. Бонч-Бруевич, Д. А. Рожанский, В. П. Вологдин, В. К. Лебединский, В. В. Татаринев, Г. А. Остроумов, А. А. Пистолькорс, А. Ф. Шорин и др.

За границей еще велись теоретические дискуссии о том, возможно или нет радиовещание, а Нижегородская радиолaborатория в 1919 г. успешно провела радиотелефонные вещательные передачи. В 1920 г. опытная станция мощностью 3,5 кВт была смонтирована в Москве, ее работа была высоко оценена В. И. Лениным. В 1920—1922 гг. в Москве была построена самая мощная в то время в мире радиотелефонная станция. В 1926 г. в СССР работало свыше 40 радиостанций. Особенно быстрое развитие радиоэлектроника получила после Великой Отечественной войны. Появились совершенно новые технические средства, обеспечивающие надежную связь в любое время года и суток, с любыми точками земного шара.

Сейчас в нашей стране имеется много предприятий радиотехнической промышленности и научно-исследовательских радиотехнических институтов; огромного размаха достигли радиовещание и телевидение.

Труды многих советских ученых, в том числе М. В. Шулейкина, Б. А. Введенского, А. И. Берга, А. Л. Минца, В. А. Котельникова, А. А. Пистолькорса, В. И. Сифорова, В. А. Фока и многих других широко известны во всем мире, их выводами пользуются радиоинженеры всех стран.

Решающую роль сыграла радиоэлектроника в обеспечении космических полетов, родиной которых является СССР. Достаточно назвать полеты межпланетных станций «Венера-5» и «Венера-6», осуществивших плавную посадку на планету Венера. На пути движения станций (расстояние порядка 300 млн. км) с ними поддерживалась устойчивая радиосвязь.

Освоение космического пространства в свою очередь дало толчок новому виду радиосвязи через искусственные спутники.

Гидрометеорологическая служба издавна является одним из основных потребителей радиоэлектронной аппаратуры. Выше уже отмечалось, что одной из первых задач, решенных радиоприемником А. С. Попова, было определение грозовых разрядов в атмосфере.

Большое разнообразие производственных процессов, выполняемых гидрометеорологической службой, предопределило применение различных радиосредств, которые можно классифицировать следующим образом.

1. Радиосредства общего применения, предназначенные для передачи разных видов гидрометеорологической информации (сюда относятся общепромышленные серийно выпускаемые радиостанции, с помощью которых можно осуществлять передачу как текстовой, так и графической информации). За тридцать

с небольшим лет радиосредства этого типа получили невиданное развитие, пройдя путь от сравнительно несложной приемопередающей радиостанции, с помощью которой первый полярный радист Э. Т. Кренкель «давал погоду» с дрейфующей станции «Северный Полюс-1», до сложнейшего радиоэлектронного оборудования космической системы связи «Орбита», с помощью которой карту погоды можно принимать практически в любом пункте нашей страны.

2. Радиосредства специального применения, предназначенные только для метеорологических исследований (сюда относятся радиолокаторы, радиозонды, радиоаппаратура автоматических метеорологических станций, метеорологических ракет и спутников). Здесь также налицо огромный шаг вперед: от первого в мире радиозонда, посланного в атмосферу в 1930 г. советским аэрологом П. А. Молчановым, до радиотехнического оборудования метеорологических ракет и спутников.

Особенно бурно происходит внедрение в метеорологическую практику методов и технических средств радиолокации. Данные радиолокационных станций помогают уточнять положение атмосферных фронтов, направление их движения, скорость перемещения и тенденцию развития.

В последние годы широкое распространение получили метеорологические радиолокаторы, предназначенные для штормового оповещения. При этом радиолокаторы объединяются в систему радиолокационного штормового оповещения с перекрытием огромных территорий. Ведутся работы по созданию систем для радиолокационного измерения количества и интенсивности жидких осадков. Странами, где наиболее широко внедряются такие средства, являются СССР, США, Япония, Италия и ряд других.

§ 1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Классификация радиосредств по диапазонам волн. Неодинаковость распространения радиоволн разной длины привела к тому, что конструкции аппаратуры, работающей в разных диапазонах волн, существенно различны. Имеется огромное количество схем и конструкций антенн, приемников, передатчиков, обусловленных различием в условиях распространения, способах генерации и приема волн разной длины.

Ниже (табл. 1.1) приводится принятая в настоящее время классификация электромагнитных волн. Пользуясь этой таблицей, следует иметь в виду, что наименования единиц в ней приведены в соответствие с международной системой единиц (СИ). Эта система рекомендует для образования производных единиц от основных прибавлять термины:

а) для указания, в какое число раз данная производная единица превышает основную, — кило (в 10^3 раз), мега (в 10^6 раз), гига (в 10^9 раз), тера (в 10^{12} раз);

б) для указания, какую долю составляет данная производная единица от основной, — деци (10^{-1}), санти (10^{-2}), милли (10^{-3}), микро (10^{-6}), нано (10^{-9}), пико (10^{-12}):

В соответствии с этой системой соотношения имеют такой вид:

Для длин волн	Для частот
1 <i>мкм</i> (микрометр) = 10^{-6} м,	1 <i>кГц</i> (килогерц) = 10^3 Гц,
1 <i>нм</i> (нанометр) = 10^{-9} м,	1 <i>МГц</i> (мегагерц) = 10^6 Гц,
1 <i>пм</i> (пикометр) = 10^{-12} м,	1 <i>ГГц</i> (гигагерц) = 10^9 Гц,
	1 <i>ТГц</i> (терагерц) = 10^{12} Гц.

При этом допускается употребление и некоторых единиц, применявшихся ранее и связанных с новыми единицами следующими соотношениями: 1 *мкм* = 1 *мк* (микрон); 1 *нм* = 1 миллимикрон = 10 Å (ангстрем).

Длина волны λ и частота f связаны известным соотношением

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

где c — скорость распространения радиоволн (300 000 000 м/сек).

Для практических расчетов удобно выражать частоту в герцах или мегагерцах, тогда длина волны получается в метрах, т. е.

$$\lambda [м] = \frac{300\,000\,000}{f [Гц]} = \frac{300}{f [МГц]}. \quad (1.2)$$

Пример. Определить диапазон частот, занимаемый электромагнитными волнами длиной от 3,2 до 10 см.

Пользуясь формулой (1.2), определим частоты:

$$f_1 = \frac{300}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 0,94 \cdot 10^4 \text{ МГц};$$

$$f_2 = \frac{300}{10 \cdot 10^{-2}} = 0,3 \cdot 10^4 \text{ МГц},$$

т. е. диапазон ограничен частотами 3000 и 9400 МГц, или 3 и 9,4 ГГц.

Правильность расчетов можно проверить по табл. 1.1, согласно которой волны указанных длин находятся в сантиметровом диапазоне, ограниченном частотами от 3 до 30 ГГц.

В природе нет резких границ между диапазонами длин волн. Поэтому приведенное в табл. 1.1 деление в некоторой степени условно: для удобства пользования границы диапазонов проведены исходя из того, что длина самой короткой волны предыдущего диапазона (являющейся в то же время самой длинной волной последующего диапазона) кратна 10.

Диапазоны электро

	Название диапазона	
	современное	прежнее ¹
Радиоволны	Мириаметровые волны	Сверхдлинные волны
	Километровые волны	Длинные волны
	Гектометровые волны	Средние волны
	Декаметровые волны	Короткие волны
	Метровые волны	} Ультракороткие волны (УКВ)
	Дециметровые волны	
	Сантиметровые волны	
	Миллиметровые волны	
	Децимиллиметровые волны	
Оптический диапазон	Инфракрасные лучи дальнего поддиапазона ²	
	Инфракрасные лучи ближнего поддиапазона	
	Видимые лучи	
	Ультрафиолетовые лучи ближнего поддиапазона	
	Ультрафиолетовые лучи дальнего поддиапазона	
Рентгеновское излучение и гамма-излучение	Рентгеновские мягкие лучи	
	Рентгеновские средние лучи	
	Рентгеновские жесткие лучи	
	Гамма-лучи	

¹ Прежние названия диапазонов еще часто встречаются в литературе и их

² Термины «ближний» и «дальний» указывают на степень удаленности данно

Таблица 1.1

МАГНИТНЫХ ВОЛН

Длина волны		Частота	
в метрах (м)	в производных единицах длины	в герцах (гц)	в производных единицах частоты
$10^5 - 10^4$	100—10 км	$(3 \div 30) \cdot 10^3$	3—30 кгц
$10^4 - 10^3$	10—1 км	$(3 \div 30) \cdot 10^4$	30—300 кгц
$10^3 - 10^2$	1 км—100 м	$(3 \div 30) \cdot 10^5$	300 кгц—3 Мгц
$10^2 - 10$	100—10 м	$(3 \div 30) \cdot 10^6$	3—30 Мгц
$10 - 1$	10—1 м	$(3 \div 30) \cdot 10^7$	30—300 Мгц
$1 - 10^{-1}$	1 м—10 см	$(3 \div 30) \cdot 10^8$	300 Мгц—3 Ггц
$10^{-1} - 10^{-2}$	10—1 см	$(3 \div 30) \cdot 10^9$	3—30 Ггц
$10^{-2} - 10^{-3}$	1 см—1 мм	$(3 \div 30) \cdot 10^{10}$	30—300 Ггц
$10^{-3} - 10^{-4}$	1 мм—100 мкм	$(3 \div 30) \cdot 10^{11}$	300 Ггц—3 Тгц
$10^{-4} - 10^{-5}$	100 мкм—10 мкм	$(3 \div 30) \cdot 10^{12}$	(3—30) Тгц
$10^{-5} - 0,76 \cdot 10^{-6}$	10 мкм—0,76 мкм	$(30 \div 40) \cdot 10^{13}$	(30—400) Тгц
$(0,76 \div 0,4) 10^{-6}$	0,76—0,4 мкм	$(40 \div 75) \cdot 10^{13}$	(400—750) Тгц
$0,4 \cdot 10^{-6} - 10^{-7}$	0,4 мкм—0,1 мкм	$(75 \div 300) \cdot 10^{13}$	Эти частоты специальных названий не имеют
$10^{-7} - 10^{-8}$	0,1 мкм—10 нм	$(3 \div 30) \cdot 10^{15}$	
$10^{-8} - 10^{-9}$	10 нм—1 нм	$(3 \div 30) \cdot 10^{16}$	
$10^{-9} - 10^{-10}$	1 нм—0,1 нм	$(3 \div 30) \cdot 10^{17}$	
$10^{-10} - 10^{-11}$	0,1 нм—10 пм	$(3 \div 30) \cdot 10^{18}$	
$< 10^{-11}$	< 10 пм	$> 10^{18}$	

употребление допускается.
го поддиапазона от диапазона видимых лучей.

Отметим, что в радиосвязи иногда пользуются еще одной разновидностью деления радиоволн, согласно которому говорят о *длинных* (750—3000 м), *средних* (200—750 м) и *коротких* (10—200 м) волнах.

Все электромагнитные волны, как видно из таблицы, могут быть разбиты на следующие основные диапазоны: радиоволны, инфракрасные лучи, видимые лучи, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи, гамма-лучи. Как указывалось выше, современная радиоэлектроника охватывает главным образом первые три диапазона (они и рассматриваются в данном учебнике). Ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи¹ пока еще практического применения в передаче информации не нашли, но общая тенденция развития радиоэлектроники показывает, что освоение этих диапазонов — дело недалекого будущего.

Особенности распространения электромагнитных волн разных диапазонов подробно описываются в главе 4.

Классификация радиосредств по степени их сложности. Согласно принятой в настоящее время классификации радиоэлектронной аппаратуры по степени ее сложности, различают следующие виды радиосредств: большие радиосистемы, радиосистемы, радиоприборы, радиоустройства, радиоблоки.

Основной «единицей» этой классификации является радиосистема.

Радиосистемой называется любая система, в которой радиоэлектронная аппаратура выполняет основную или одну из основных функций. При этом радиосистема, как правило, состоит из нескольких конструктивных единиц. Типичными радиосистемами являются радиоэлектронная система передачи информации (система радиосвязи), радиолокационная система температурно-ветрового зондирования атмосферы (система радиолокатор — радиозонд или радиолокатор — метеорологическая ракета), система телеуправления движущимися аппаратами.

Большая радиосистема включает совокупность отдельных радиосистем, объединенных для выполнения общей комплексной задачи. К большим радиосистемам относятся: космическая метеорологическая система «Метеор», включающая комплекс метеорологических спутников и наземных радиосредств; радиолокационная система метеорологического штормового оповещения, включающая несколько радиолокаторов и средства для передачи и обработки штормовой информации; единая система связи страны; система телесвязи «Орбита», включающая искусственные ретрансляционные спутники и комплекс наземных станций.

¹ Применение термина «лучи» вместо «волны» в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом, рентгеновском диапазонах и в гамма-диапазоне обусловлено тем, что в этих диапазонах большую роль играет квантовая «зернистая» природа излучений.

240 895
*Радиоприбор (или радиоаппарат)*¹ — это часть радиосистемы, которая представляет собой в конструктивном отношении единое целое и является эксплуатационно самостоятельной (автономной). Типичные примеры радиоприборов (радиоаппаратов): радиовещательные приемники и телевизоры, радиоизмерительные приборы, метеорологические радиолокаторы, радиометеорологические станции, радиозонды и т. п.

Радиоустройством называется часть радиосистемы или радиоприбора, выполняющая одну из основных функций. Так, радиоустройствами являются приемное или передающее устройство радиостанции, антенно-фидерное устройство, устройство электропитания и т. п.

Радиоблоком называется эксплуатационно несамостоятельная часть радиоприбора или радиоустройства, выполняющая одну или несколько основных функций и конструктивно изготавливаемая независимо от других частей. Примерами радиоблоков могут быть блок промежуточной частоты СВЧ приемника, радиоблок радиозонда, блок строчной развертки в телевизорах и т. п.

Как и всякая систематизация в непрерывно развивающейся науке и технике, приведенная классификация в некоторой степени условна. Современная радиоэлектронная аппаратура отличается таким разнообразием конструкций и схем, что иногда трудно определить, к какой системе, устройству или прибору следует отнести то или иное радиосредство.

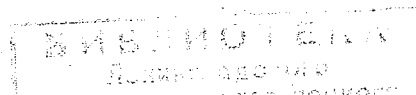
В то же время эта классификация в большинстве случаев позволяет верно отнести каждое средство к соответствующему виду, что в свою очередь помогает определить правильный подход к изучению, эксплуатации и ремонту радиоэлектронной аппаратуры.

Классификация радиосредств по информационным признакам. По информационному назначению радиосистемы подразделяются на следующие основные классы: 1) системы передачи информации; 2) системы извлечения информации; 3) комбинированные информационные системы; 4) системы управления. Приведем краткую характеристику каждой из перечисленных систем.

Системы передачи информации предназначаются для трансляции сообщений от источника информации до ее потребителя.

Функциональная схема радиосистемы передачи информации показана на рис. 1.2.

¹ Обычно радиоприбором называют изделие менее сложное по конструкции (например, радиозонд, осциллограф), а радиоаппаратом — более сложное (например, радиолокатор).



Источником передаваемой информации может быть любой процесс, происходящий в живых организмах или в неживой природе (голос человека, изображение, температура пространства и т. п.). Для передачи эта первичная (или, как ее часто называют, физическая) информация U_1 предварительно преобразуется в электрическую величину U_2 соответствующим электрофизическим преобразователем информации (микрофоном, передающей трубкой, датчиком температуры и т. п.) и кодируется в специальном кодирующем устройстве.

Закодированное сообщение U_3 воздействует на радиопередатчик, осуществляя так называемую *модуляцию* колебаний несущей частоты. Образованный таким образом радиосигнал U_4 излучается антенной A_1 .

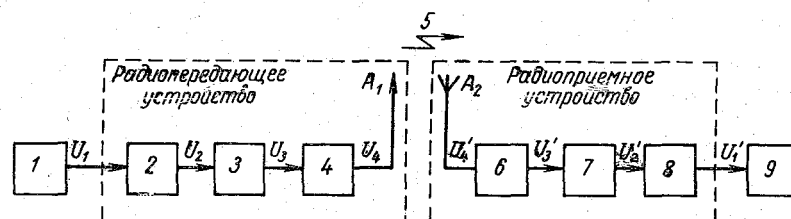


Рис. 1.2. Радиосистема передачи информации.

1 — источник информации; 2 — электрофизический преобразователь; 3 — кодирующее устройство; 4 — радиопередатчик; 5 — распространение электромагнитных волн; 6 — радиоприемник; 7 — декодирующее устройство; 8 — обратный электрофизический преобразователь; 9 — потребитель информации.

В приемной части системы излученная электромагнитная энергия воспринимается приемной антенной A_2 и преобразуется последовательно радиоприемником, декодирующим устройством и обратным электрофизическим преобразователем (телефоном, приемной трубкой, индикатором и т. п.) к виду, необходимому потребителю.

При этом в простейшем случае и при отсутствии помех и искажений сигналы U'_4 , U'_3 , U'_2 и U'_1 в радиоприемном устройстве должны совпадать с соответствующими сигналами в радиопередатчике.

Схема, показанная на рис. 1.2, является *одноканальной*. Если же одно несущее колебание используется для передачи информации от нескольких источников, то система называется *многоканальной*.

Системы передачи информации образуются всеми комплектами устройств, основными из которых являются радиоприемные и радиопередатчики. При этом их функциональные схемы могут и не содержать отдельных узлов, показанных на блок-схеме рис. 1.2, являющейся типовой.

В системах извлечения информации передача отсутствует и имеет место только прием (извлечение) информации. Такой процесс характерен для радиолокации, радиоастрономии, радиоизмерений.

Функциональные схемы перечисленных видов систем извлечения информации показаны на рис. 1.3.

Если извлечение информации происходит без облучения исследуемого объекта специальным так называемым зондирующим сигналом, то система называется *пассивной* (рис. 1.3а). Если же зондирующий сигнал имеется, то система называется *активной*.

В активных системах (рис. 1,3б) малое расстояние источника зондирующего сигнала от радиоприемного устройства позволяет достаточно простым способом ввести в радиоприемник «копию» излученного сигнала, что облегчает распознавание (селекцию) в приемнике отраженного объектом сигнала на фоне помех. В радиолокаторах, например, на приемной трубке можно видеть импульсы, соответствующие излученному и принятому сигналам, и по расстоянию между ними судить об удаленности исследуемого объекта.

К классу комбинированных относятся системы, являющиеся комбинацией радиосистем извлечения и передачи информации. Примером такой системы может служить система радиозондирования атмосферы с помощью радиозонда и наземного радиоустройства. Одно и то же несущее колебание радиозонда используется как для передачи телеметрической информации (температуры, давления, влажности), так и для контроля траектории радиозонда (для определения скорости и направления ветра). Здесь имеет место комбинация системы передачи информации (телеметрическая система) с пассивной системой извлечения информации (система контроля траектории).

К системам управления относятся системы, в которых информация используется для управления какими-либо процессами или аппаратами. Изучаются эти системы в курсе «Автоматика и телемеханика» и в данной книге не рассматриваются.

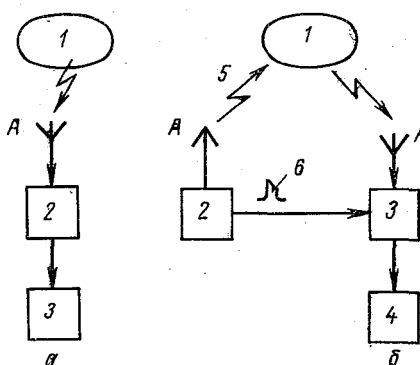


Рис. 1.3. Радиосистемы извлечения информации.

а — пассивная: 1 — исследуемый объект, 2 — радиоприемник, 3 — потребитель информации; б — активная: 1 — исследуемый объект, 2 — радиопередатчик, 3 — радиоприемник, 4 — потребитель информации, 5 — зондирующий сигнал, 6 — копия зондирующего сигнала.

Основные выводы

1. Практическое применение ряда открытий в области электромагнитных излучений, выразившееся в изобретении радиосвязи, принадлежит русскому ученому А. С. Попову, который в 1895 г. осуществил первую в мире беспроводную связь. Большой вклад в развитие радиотехники сделан русскими и советскими учеными.

2. Современная радиоэлектроника благодаря распространению радиоволн со скоростью света, возможности приема очень слабых радиосигналов и миниатюризации радиоаппаратуры все шире проникает во все отрасли науки и техники, в том числе в гидрометеорологию.

3. Основными областями применения радиоэлектронной аппаратуры являются: радиосвязь, радиовещание, телевидение, радиолокация, радионавигация, радиоуправление, радиотелеметрия, радиоастрономия, радиометеорология, радиоизмерения, промышленная радиоэлектроника, радиоэлектроника в научных исследованиях.

4. Все виды радиоэлектронной аппаратуры классифицируются по диапазонам волн, по степени сложности, по информационным признакам.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Дайте определение радиоэлектроники. Что общего и каковы основные различия между радиоэлектроникой и радиотехникой?

2. Перечислите основные области применения радиоэлектронной аппаратуры. Дайте краткие пояснения по каждой области.

3. Какие основные открытия предшествовали изобретению А. С. Поповым радио? Опишите работу первого в мире радиоприемника.

4. Каковы главные этапы развития радиотехники и радиоэлектроники в нашей стране?

5. Для каких целей применяются технические средства радиоэлектроники в гидрометеорологической службе?

6. Назовите основные диапазоны электромагнитных волн и соответствующие им диапазоны частот.

7. Рассчитайте, какой диапазон частот включает волны длиной от 0,5 до 1,5 м. Выразите полученный результат в герцах, килогерцах и мегагерцах.

8. Определите, в каком диапазоне волн лежат частоты от 250 000 до 900 000 гц?

9. Как классифицируются радиосредства по степени их сложности? Изобразите структурную схему какой-либо радиоэлектронной системы или радиоприбора.

10. Изобразите различные (с точки зрения информационных признаков) радиосистемы.

ГЛАВА 2

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ КОНТУРЫ

В радиоэлектронной аппаратуре имеются, как правило, устройства, предназначенные для получения колебаний электрического тока. В качестве таких устройств используются электрические цепи, содержащие индуктивность и емкость; они называются *колебательными контурами*.

В радиопередающих устройствах с помощью колебательных контуров получают токи высокой частоты, необходимые для излучения электромагнитной энергии в виде радиоволн в пространство; в радиоприемных устройствах колебательные контуры необходимы для выделения нужного спектра частот.]

Колебательные контуры выполняют в виде соединенных в определенной последовательности катушек индуктивности и конденсаторов. Такой контур называется *контуром с сосредоточенными параметрами*.

В диапазоне метровых, дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн применяются *контуры с распределенными параметрами*. Они рассматриваются в § 2.5.

В реальный колебательный контур, кроме реактивных элементов — конденсатора C и катушки индуктивности L , — оказывается включенным и некоторое активное сопротивление R , которое складывается из сопротивления проводов и катушки индуктивности, а иногда и специально подключенного резистора.

Электрические величины R , L и C называются *параметрами* колебательного контура.

Дадим определения и приведем обозначения для некоторых характеризующих переменный электрический ток понятий, которыми мы будем пользоваться при дальнейшем изложении.

Наиболее часто встречается периодический переменный ток, т. е. ток, повторяющийся через равные промежутки времени полный цикл своих изменений. Примером периодического переменного тока является синусоидальный переменный ток $i = I_m \sin \omega t$, где i — мгновенное значение тока (т. е. значение тока в любой рассматриваемый момент времени); I_m — амплитуда (т. е. мак-

симальное значение) тока; ω — угловая частота в радианах в секунду ($\omega = 2\pi f$, где f — частота в герцах); t — время в секундах.

Периодом называется время T , в течение которого переменная величина (ток, напряжение) проходит полный цикл своих изменений и возвращается к первоначальному значению.

Частотой f переменного тока называется число полных циклов изменений, протекающих в одну секунду, т. е. $f = \frac{1}{T}$.

Фазой φ переменного тока называется произведение угловой частоты ω на текущее значение времени t , характеризующее мгновенное значение величин переменного тока.

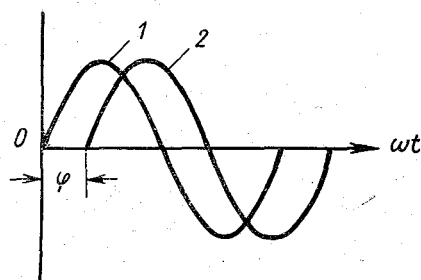


Рис. 2.1. Диаграммы синусоидальных колебаний, сдвинутых по фазе.

Если два колебания проходят через свои максимальные и нулевые значения неодновременно, то говорят, что между этими колебаниями существует *сдвиг по фазе*. При этом принято называть *начальной фазой* сдвиг по фазе любой величины по отношению к другой, проходящей через нулевое значение. Так, начальной фазой колебания 2 по отношению к колебанию 1 (рис. 2.1) является величина φ .

Для расчета часто пользуются так называемым *действующим значением* переменного тока, численно равным такому значению постоянного тока, который в одном и том же сопротивлении за один и тот же промежуток времени выделяет одинаковое с переменным током количество тепла.

Для синусоидального переменного тока его действующее значение меньше амплитудного в $\sqrt{2}$ раз, т. е. действующие значения тока I , напряжения U и э. д. с. E соответственно равны:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m;$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m;$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m.$$

Активное сопротивление R — это сопротивление проводников переменному току, связанное с превращением электрической энергии в тепловую. Активное сопротивление проводника, изме-

ренное при переменном токе, будет больше, чем сопротивление этого же проводника, измеренное при постоянном токе, поскольку переменный ток распространяется не через все поперечное сечение проводника, а главным образом по его поверхности (поверхностный эффект).

Сопротивление проводников переменному току, не связанное с превращением электрической энергии в тепловую, а обусловленное действием противоэДС самоиндукции, называется *индуктивным сопротивлением* (X_L). Величина индуктивного сопротивления зависит от частоты переменного тока и определяется по формуле

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad (2.1)$$

где X_L — индуктивное сопротивление в омах; ω — угловая частота в радианах в секунду; f — частота тока в герцах; L — индуктивность проводника в генри.

Сопротивление, которое проявляется в цепи переменного тока вследствие реакции зарядов, накапливающихся на обкладках конденсатора, обладающего электрической емкостью, называется *емкостным сопротивлением* (X_C). Величина емкостного сопротивления определяется по формуле

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (2.2)$$

где X_C — емкостное сопротивление в омах; C — емкость конденсатора в фарадах.

Полное сопротивление цепи (Z), состоящей из последовательно соединенных активного, индуктивного и емкостного сопротивлений, равно

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (2.3)$$

Знак минус в формуле (2.3) отражает тот факт, что реакции емкости и индуктивности на переменный ток имеют разные знаки.

Поскольку индуктивное и емкостное сопротивления связаны с реакцией на переменный ток, а не с тепловыми потерями, то они называются *реактивными сопротивлениями* (в отличие от активного сопротивления).

Через включенный в цепь постоянного тока конденсатор ток не течет, а индуктивность для постоянного тока — очень малое сопротивление.

Для цепей переменного тока с реактивными элементами L и C справедливы законы Ома и Кирхгофа.

Отметим, что для обозначения элементов электрических цепей пользуются терминами: активное или реактивное сопротивление, индуктивность, емкость. При этом имеют в виду, что в эти

сопротивления включаются сопротивления (активные или реактивные) подводящих проводов, монтажа и т. п. Когда же хотят подчеркнуть, что речь идет о деталях конкретных схем, то употребляют названия: для сопротивления — *резистор*, для емкости — *конденсатор*, для индуктивности — *катушка индуктивности* или просто *катушка*.

§ 2.1. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ

Свободными колебаниями называются колебания, происходящие в контуре при отсутствии постороннего источника колебательной энергии и обусловленные только процессами, возникающими в самом контуре.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в контуре при свободных колебаниях. Для простоты будем считать, что в контуре нет активного сопротивления, т. е. он содержит только конденсатор C и катушку индуктивности L . Такой контур называют *контуром без потерь* или *идеальным контуром*.

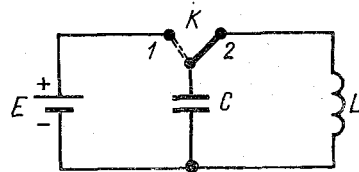


Рис. 2.2. Схема получения свободных колебаний в контуре.

Возникновение свободных колебаний в контуре можно обеспечить, собрав схему, изображенную на рис. 2.2. Поставив переключатель K в положение 1, зарядим конденсатор C до напряжения источника питания. Затем переведем переключатель в положение 2, образовав тем самым контур LC , не соединенный с источником питания. Начиная с этого момента в контуре возникает процесс свободных колебаний, отдельные фазы которого приведены на рис. 2.3.

Фаза 1 (рис. 2.3 а). Конденсатор заряжен. Вся энергия контура сосредоточена в виде энергии электрического поля конденсатора, величина которой, как известно из электротехники, равна

$$W_C = \frac{CU_C^2}{2}, \quad (2.4)$$

где W_C — энергия контура; C — емкость конденсатора, U_C — напряжение, до которого заряжен конденсатор. Тока в контуре в начальный момент нет.

Фаза 2 (рис. 2.3 б). Конденсатор разрядился через катушку. За время от фазы 1 до фазы 2 в контуре течет ток и энергия контура сосредоточивается в виде энергии магнитного поля катушки индуктивности

$$W_L = \frac{LI_L^2}{2}, \quad (2.5)$$

где L — индуктивность катушки; I_L — наибольший ток, протекающий в контуре.

Фаза 3 (рис. 2.3 в). За время от фазы 2 до фазы 3 в контуре вновь происходит перераспределение энергии между катушкой индуктивности и конденсатором. Конденсатор вновь оказывается заряженным до напряжения U_C , а ток снова равен нулю. Однако знак заряда конденсатора поменялся на противоположный.

Фаза 4 (рис. 2.3 г). Процесс продолжается, в контуре вновь течет ток (направление его противоположно току, протекающему в фазах 1—3).

Фаза 5 (рис. 2.3 д). Ток в контуре опять становится равным нулю.

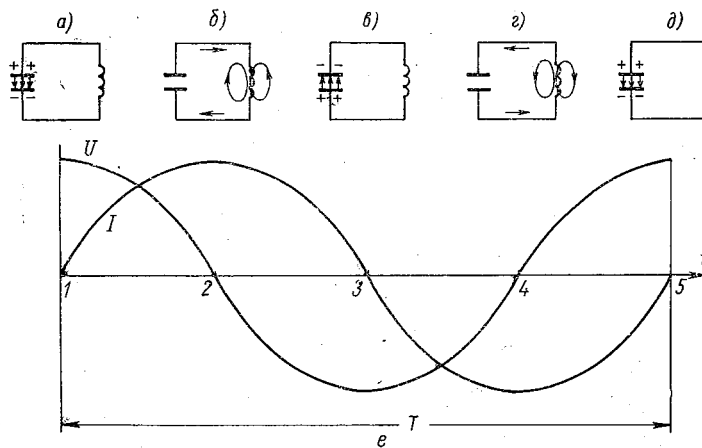


Рис. 2.3. Свободные колебания в контуре.

Диаграммы тока (I) и напряжения (U) в контуре показаны на рис. 2.3 е.

Полный цикл колебаний (моменты от фазы 1 до фазы 5) называется периодом колебаний (T), а величина, обратная периоду, — частотой колебаний (f).

Выведем формулу для определения f через параметры контура.

Так как мы условились считать контур идеальным, т. е. не имеющим потерь энергии, то энергия, запасаемая в конденсаторе, в фазе 1 равна энергии, сосредоточенной в поле катушки в фазе 2. Приравняв правые части формул (2.4) и (2.5), получим

$$\frac{CU_C^2}{2} = \frac{LI_L^2}{2}. \quad (2.6)$$

По закону Ома амплитуда тока в цепи с конденсатором равна

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = \frac{U_C}{\frac{1}{\omega C}} = U_C \omega C. \quad (2.7)$$

Но ток в контуре течет один (т. е. $I_L = I_C$), поэтому значение I_C можно подставить в правую часть равенства (2.6). Получим

$$CU_C^2 = LU_C^2 \omega^2 C^2,$$

откуда угловая частота

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.8)$$

Эта частота называется *собственной частотой колебаний контура*, ее значение в герцах равно

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \quad (2.9)$$

Частота f , как видно из формулы (2.9), уменьшается с увеличением индуктивности и емкости. Это математическое выражение физического явления, проявляющегося в том, что чем больше индуктивность, тем медленнее происходит изменение тока, и чем больше емкость, тем больше времени нужно на перезарядку конденсатора.

Для расчетов удобно пользоваться так называемым *характеристическим сопротивлением контура*, которое равно отношению амплитуды напряжения к амплитуде тока при свободных колебаниях. Из формулы (2.6) можно получить выражение для характеристического сопротивления ρ :

$$\rho = \frac{U_C}{I_L} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.10)$$

Все вышеприведенные расчеты справедливы для случая отсутствия потерь энергии в контуре. В реальном контуре всегда неизбежны потери энергии на активном сопротивлении. Поэтому количество энергии с каждым циклом колебаний в реальном контуре убывает, т. е. свободные колебания всегда являются *затухающими*. Количественно скорость убывания амплитуд свободных колебаний в контуре характеризуется *затуханием контура* d , величина которого вычисляется по формуле

$$d = \frac{R}{\rho} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (2.11)$$

где R — активное сопротивление контура.

Величина, обратная затуханию, называется *добротностью контура* Q :

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{\rho}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R}. \quad (2.12)$$

Выведем еще одно выражение для Q . Умножив числитель и знаменатель подкоренного выражения формулы (2.12) на частоту ω , получим $\frac{\omega L}{\omega C}$. Условимся,

что при некотором значении $\omega = \omega_0$ соблюдается равенство $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, тогда подкоренное выражение станет равным либо $(\omega_0 L)^2$, либо $\left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2$ т. е.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \frac{1}{\omega_0 C}. \quad (2.12a)$$

Ниже будет показано, при каких значениях ω_0 указанное выражение пригодно для расчетов.

Чем меньше величина добротности (или, как принято говорить, чем ниже добротность), тем быстрее убывает амплитуда свободных колебаний. При некотором малом значении Q колебания могут вообще не возникнуть (это происходит при $R \geq$

$\geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$); контур в таком случае называется *апериодическим*.

На рис. 2.4 показаны диаграммы изменения амплитуды напряжения на конденсаторе при затухающих свободных колебаниях при большой (рис. 2.4 а), при меньшей (рис. 2.4 б) добротности контура и в апериодическом контуре (рис. 2.4 в).

У контуров среднего качества $Q = 50 \div 200$, а контуры высокого качества имеют значение $Q > 200$.

Отметим, что для соблюдения размерности во все приведенные в настоящей главе формулы значения сопротивлений нужно подставлять в омах, емкостей — в фарадах, индуктивностей — в генри, частот — в герцах, периодов — в секундах.

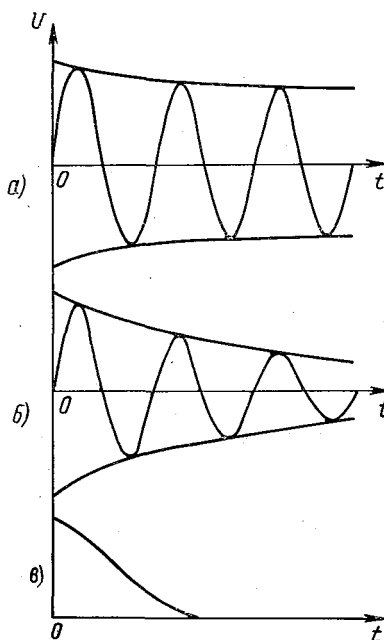


Рис. 2.4. Изменение амплитуды напряжения на конденсаторе при разной добротности контура.

Пример. Замкнутый колебательный контур содержит элементы $C=500$ пф, $R=2,5$ ом и катушку индуктивности L . Определить значение L , при котором $f=10$ Мгц. Найти для этого случая период свободных колебаний в контуре, характеристическое сопротивление, добротность и затухание контура.

Из формулы (2.9) найдем

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 10^6)^2 \cdot 500 \cdot 10^{-12}} \approx 51 \cdot 10^{-6} \text{ гн} \approx 51 \text{ мкгн.}$$

Период свободных колебаний — величина, обратная частоте

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6} \text{ сек.}$$

Характеристическое сопротивление контура находим по формуле (2.10)

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{51 \cdot 10^{-6}}{500 \cdot 10^{-12}}} \approx 320 \text{ ом.}$$

Добротность контура, согласно формуле (2.11), будет

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{320}{2,5} \approx 128.$$

Затухание контура вычислим как величину, обратную добротности,

$$d = \frac{1}{Q} = 0,0078.$$

§ 2.2. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

В предыдущем параграфе было показано, что в реальном контуре происходит процесс свободных затухающих колебаний. Чтобы колебания были незатухающими, колебательный контур должен получать энергию от источника переменной э. д. с., под воздействием которой будет непрерывно происходить восполнение потерь энергии, вызванных расходом ее на активном сопротивлении. Полученные таким образом незатухающие колебания уже не являются свободными и носят название *вынужденных колебаний*.

Источник переменной э. д. с. можно подключать к контуру так, чтобы его ток последовательно протекал через все элементы контура или разветвлялся, проходя параллельно через ветви с емкостью и индуктивностью.

Оба эти способа показаны на рис. 2.5. Контур, изображенный на рис. 2.5 а, называется *последовательным*, а контур, представленный на рис. 2.5 б, называется *параллельным*.

Рассмотрим процесс вынужденных колебаний в последовательном контуре.

Действие переменной э. д. с. вызывает в контуре ток, амплитуду которого обозначим I_m . Пользуясь законом Ома и форму-

лами (2.1), (2.2) и (2.3), определим значение тока I_m как отношение э. д. с. к полному сопротивлению контура

$$I_m = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (2.13)$$

Выражение (2.13) называется *уравнением резонансной кривой тока*.

Протекающий в контуре ток I_m создает на каждом элементе контура напряжение. Амплитуда напряжения на индуктивности $U_{mL} = I_m \omega L$, на емкости $U_{mC} = I_m \left(\frac{1}{\omega C}\right)$, на активном сопротивлении $U_{mR} = I_m R$.

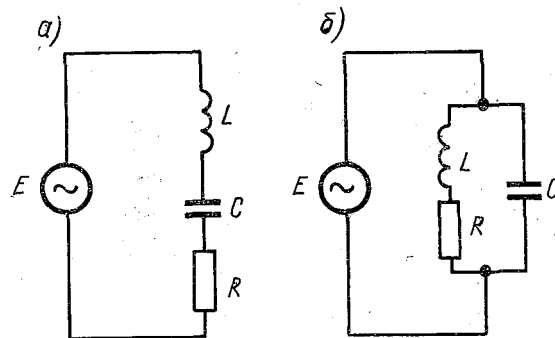


Рис. 2.5. Схема подключения источника переменной э. д. с. к последовательному (а) и параллельному (б) колебательным контурам.

Согласно второму закону Кирхгофа, сумма мгновенных значений этих напряжений в каждый момент времени равна э. д. с. источника. На рис. 2.6 а показаны диаграммы изменений во времени мгновенных значений тока (i) и напряжений на активном сопротивлении (u_R), на индуктивности (u_L) и на емкости (u_C). Напряжение u_R совпадает по фазе с током, напряжение u_L опережает ток на 90° (четверть периода), напряжение u_C отстает от тока на 90° . По отношению друг к другу u_L и u_C сдвинуты по фазе на 180° (половину периода). Когда u_L и u_C принимают максимальные значения, ток и напряжение на активном сопротивлении становятся равными нулю.

В электротехнике и радиоэлектронике представление переменных синусоидальных величин удобно осуществлять с помощью векторных диаграмм, которые дают наглядное представление о соотношениях амплитуд и фаз токов и напряжений.

Правила построения векторных диаграмм следующие: 1) напряжения и токи изображаются в виде векторов (стрелок),

длина которых пропорциональна величинам напряжения и тока; 2) факт отставания по фазе одной величины от другой отражается поворотом «отстающего» вектора по часовой стрелке на соответствующий угол (при 90° угол получается прямым); 3) факт опережения по фазе отражается поворотом «опережающего» вектора против часовой стрелки; 4) факт совпадения двух величин по фазе отражается на диаграмме изображением векторов по одной прямой со стрелками в одну сторону.

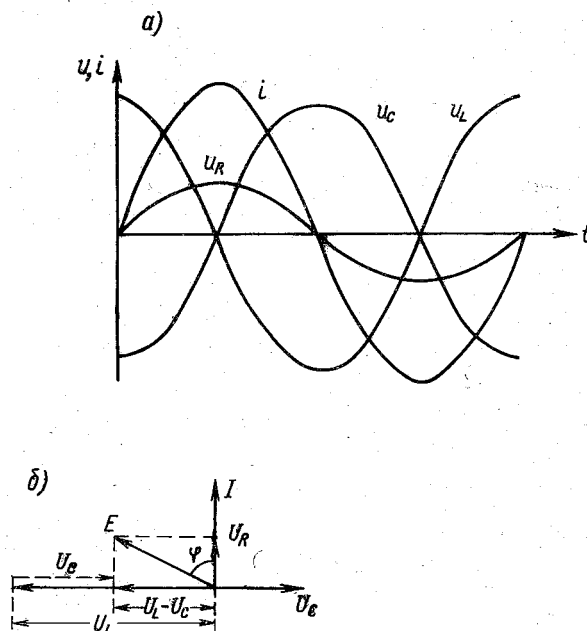


Рис. 2.6. Колебательные процессы в последовательном контуре.

a — диаграммы тока и напряжений; b — векторная диаграмма.

На рис. 2.6 b изображена векторная диаграмма последовательного контура. Вектор тока I направлен вертикально вверх. Напряжение на активном сопротивлении U_R совпадает по фазе с током и его вектор также направлен вверх. Вектор напряжения на индуктивности U_L , опережающего ток на 90° , отложен влево (против движения часовой стрелки), а вектор напряжения на емкости U_C , отстающего от тока на 90° , отложен вправо (по часовой стрелке).

Вектор напряжения источника E определяется как геометрическая сумма трех напряжений U_C , U_L и U_R . По правилу сложения векторов сделаем следующие операции: 1) сложим век-

торы U_L и U_C (резльтирующий вектор равен их разности, так как векторы находятся на одной прямой, но направлены в разные стороны); 2) результирующий вектор $U_L - U_C$ сложим с вектором U_R . Вектор E определяется как диагональ прямоугольника, построенного на векторах U_R и $U_L - U_C$.

Угол φ между векторами E и I показывает сдвиг фаз между ними. На рисунке E опережает I на угол φ . Вычислить этот угол можно с помощью формулы тангенса (используя известные стороны треугольника, образованного векторами E , U_R и $U_L - U_C$)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_K}{R}, \quad (2.14)$$

где X_K —реактивное сопротивление контура, равное $\left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right|$.

На рис. 2.7 изображена диаграмма сопротивлений последовательно соединенных элементов R , L и C и полного сопротивления Z .

Как видно из рисунка, в цепи переменного синусоидального тока результирующее сопротивление равно корню квадратному из суммы квадратов, включенных в цепь сопротивлений, в отличие от цепи постоянного тока, где результирующее сопротивление двух последовательно соединенных сопротивлений равно их арифметической сумме.

Резонанс напряжений. Найдём, как влияет на колебательный процесс в последовательном контуре изменение частоты ω источника питания. При этом параметры контура R , L и C , а также величину E будем считать неизменными.

Очевидно, при некотором значении $\omega = \omega_0$ реактивное сопротивление контура $X_K = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ станет равным нулю, т. е.

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}. \quad (2.15)$$

Явление, при котором полное сопротивление контура становится равным его активному сопротивлению, называется *резонансом*, частота ω_0 называется *резонансной частотой*, а выражение (2.15) — *условием резонанса*.

Из выражения (2.15) определим значение резонансной частоты f_0

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \quad (2.16)$$

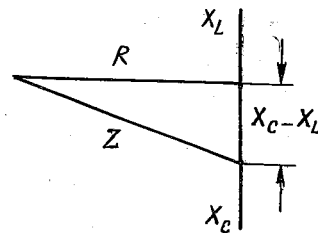


Рис. 2.7. Диаграмма сопротивлений последовательно соединенных элементов R , C и L (треугольник сопротивлений).

Это выражение, полностью совпадающее с формулой (2.9), показывает, что *резонансная частота контура* равна его *собственной частоте*. Этот вывод свидетельствует о том, что резонанс в последовательном контуре наступает при условии равенства частоты э. д. с. источника и частоты собственных колебаний контура.

Так как при резонансе сопротивление емкости равно сопротивлению индуктивности, а ток I_p , протекающий через элементы контура при резонансе, один и тот же, то и величины напряжений на емкости $U_{cp} = I_p \left(\frac{1}{\omega_0 C} \right)$ и индуктивности $U_{Lp} = I_p \omega_0 L$

равны между собой (хотя по направлению U_{cp} и U_{Lp} различаются на 180° и сумма их равна нулю), так что на активном сопротив-

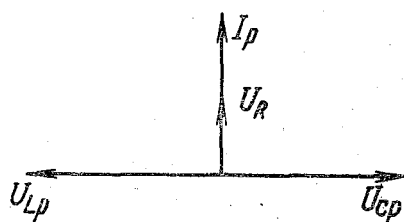


Рис. 2.8. Векторная диаграмма последовательного контура при резонансе.

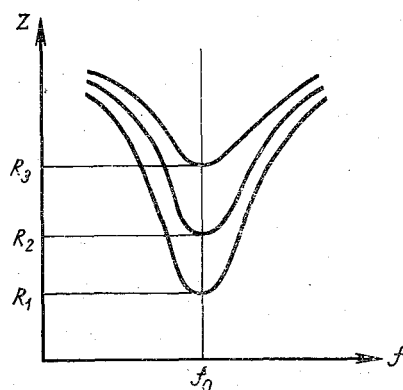


Рис. 2.9. Кривые зависимости полного сопротивления последовательного контура от частоты ($R_3 > R_2 > R_1$).

лению R оказывается падение напряжения, равное э. д. с. источника ($U_{Rp} = E = I_p R$). Поэтому резонанс в последовательном контуре называется *резонансом напряжений*.

Определим соотношение между величиной напряжения при резонансе на реактивном элементе и величиной э. д. с. источника. На индуктивности

$$\frac{U_L}{E} = \frac{I_p \omega_0 L}{I_p R} = \frac{\omega_0 L}{R} = Q;$$

на емкости

$$\frac{U_C}{E} = \frac{I_p \frac{1}{\omega C}}{I_p R} = \frac{1}{\omega C R} = Q, \quad (2.17)$$

где Q — добротность контура (см. формулу (2.12а)).

Из формул (2.17) следует, что *напряжение на каждом реактивном элементе при резонансе в Q раз больше, чем э. д. с. источника*.

На рис. 2.8 показана векторная диаграмма последовательного контура для момента резонанса напряжений. Как видно из диаграммы, ток в контуре при резонансе напряжений совпадает по фазе с э. д. с. источника.

На рис. 2.9 показаны кривые изменения полного сопротивления контура Z в зависимости от частоты f при разных значениях активного сопротивления R . Точка f_0 соответствует резонансу напряжений, при этом $Z=R$. Из рисунка видно, что чем больше активное сопротивление, тем более пологой получается кривая.

Резонансные кривые. Ток в контуре, как и сопротивление, зависит от частоты. Если построить зависимости тока от изме-

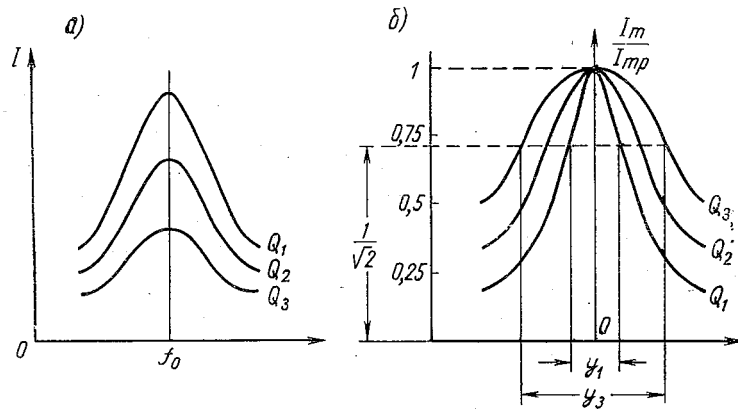


Рис. 2.10. Резонансные кривые последовательного контура при значениях добротности $Q_1 > Q_2 > Q_3$.

a — в абсолютных значениях тока; *b* — приведенные.

нения частоты, то получатся кривые, обратные кривым сопротивления, так как ток при одной и той же э. д. с. обратно пропорционален сопротивлению.

Кривые зависимости тока контура от частоты называются резонансными кривыми последовательного контура.

Однако на практике пользуются не графиками абсолютных значений тока (рис. 2.10 *a*), а графиками относительных величин (по оси абсцисс откладывается отношение частоты источника к резонансной частоте контура, а по оси ординат — отношение тока к его величине при резонансе).

Выведем соотношения для этого случая. Прежде всего преобразуем выражение, стоящее в круглых скобках в формуле (2.13), умножив и разделив его на ω_0

$$\frac{\omega_0}{\omega} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = \omega_0 L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{\omega_0 \omega LC} \right). \quad (2.18)$$

Умножив и разделив на ω_0 величину $\frac{1}{\omega_0 \omega LC}$, получим

$$\frac{1}{\omega_0 \omega LC} = \frac{\omega_0}{\omega_0^2 \omega LC}.$$

Принимая во внимание, что $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, найдем

$$\frac{1}{\omega_0^2 LC} = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2} = 1.$$

Тогда выражение (2.18) запишется в виде

$$\omega_0 L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{\omega_0 \omega LC} \right) = \omega_0 L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right).$$

Теперь максимальная амплитуда тока

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} = \\ &= \frac{\frac{E}{R}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0 L}{R} \right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} = \frac{\frac{E}{R}}{\sqrt{1 + Q^2 y^2}}, \end{aligned}$$

где $\frac{\omega_0 L}{R} = Q$, а $y = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}$.

Зная, что ток при резонансе $I_{mp} = \frac{E}{R}$, определяем

$$\frac{I_m}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 y^2}}. \quad (2.19)$$

Формула (2.19) называется *уравнением приведенной резонансной кривой*, а кривые на рис. 2.10 б — *приведенными резонансными кривыми*. Величина

$$y = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \quad (2.20)$$

называется *относительной расстройкой контура*. Считая, что при частотах, близких к резонансной, $f \approx f_0$, выражение (2.20) можно записать в виде

$$y = \frac{f^2 - f_0^2}{f_0 f} = \frac{(f + f_0)(f - f_0)}{f_0 f} \approx \frac{2f \cdot \Delta f}{f_0 f} = 2 \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (2.21)$$

где $\Delta f = f - f_0$ — так называемая *абсолютная расстройка контура*.

Анализируя форму приведенных резонансных кривых, можно сделать следующие важные выводы: 1) форма кривой зависит от добротности контура: чем больше Q , тем острее резонансная кривая; 2) э.д.с. источника может вызвать в контуре относительно большой ток только при частотах, близких к резонансной частоте контура (обычно говорят, что контур «пропускает» только колебания, частота которых близка к резонансной).

Полоса пропускания. Полосой пропускания контура принято называть спектр частот, в пределах которого токи в контуре отличаются от своего резонансного значения не более чем в $\sqrt{2}$ раз. Величину полосы пропускания легко найти из уравнения (2.19), считая, что $\frac{I_m}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, и зная, что $y = 2 \frac{\Delta f}{f_0}$ [см. формулу (2.21)]:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 y^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(2 \frac{\Delta f}{f_0}\right)^2}}.$$

Приравнявая подкоренные выражения $2 = 1 + Q^2 \left(2 \frac{\Delta f}{f_0}\right)^2$ и извлекая квадратный корень, получим

$$Q \frac{2\Delta f}{f_0} = 1.$$

За полосу пропускания последовательного контура принимается величина

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}. \quad (2.22)$$

Формула (2.22) показывает, что чем выше добротность контура, тем уже полоса пропускания.

Пример. Определить полосу пропускания контура, рассчитанного в качестве примера на стр. 28. Пользуясь формулой (2.22), найдем

$$2\Delta f = \frac{106}{128} \approx 7 \text{ кГц}.$$

Если бы добротность контура была выше, например, 250, то полоса пропускания была бы уже, т. е. $2\Delta f = 4 \text{ кГц}$.

Полосу пропускания легко найти, проведя на графике приведенной резонансной кривой прямую, параллельную оси абсцисс, на уровне $\frac{I_m}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ (эта прямая приведена на рис. 2.10 б).

Последовательный контур часто используется в антенных цепях приемных устройств, где резонанс напряжений дает возможность получить на входе приемника напряжение, значительно превышающее э. д. с., наведенную в антенне.

§ 2.3. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Рассмотрим процесс вынужденных колебаний в параллельном контуре, при этом для простоты расчетов будем считать, что активное сопротивление R сосредоточено только в индуктивной ветви контура (см. рис. 2.5 б).

Определим общее (так называемое эквивалентное) сопротивление контура Z_0 (сопротивление двух параллельных его ветвей):

$$Z_0 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.23)$$

где Z_1 — сопротивление емкостной ветви, Z_2 — сопротивление индуктивной ветви контура.

По закону Ома ток в общей цепи $I = \frac{E}{Z_0}$. Ток в каждой ветви можно определить, исходя из того, что к обеим ветвям контура приложено одно и то же напряжение, равное E :

$$I_C = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}}; \quad I_L = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (2.24)$$

Увеличение частоты, как видно из этих формул, ведет к увеличению тока в емкостной ветви и к уменьшению тока в индуктивной ветви.

Резонанс в параллельном контуре. Так же как и в последовательном контуре, в параллельном контуре наблюдается явление резонанса при некоторой частоте $\omega = \omega_0$. Условием резонанса является равенство $\omega_0 L \approx \frac{1}{\omega_0 C}$ (знак «приблизительно

равно» употреблен из-за наличия активного сопротивления в индуктивной ветви). Ток в общей цепи I_m при резонансе совпадает по фазе с напряжением источника E_m и эквивалентное сопротивление контура оказывается чисто активным. Величина этого сопротивления может быть подсчитана, если в формулу (2.23) подставить значения Z_1 и Z_2 . Опуская промежуточные действия, приведем несколько использующихся при практических расчетах выражений для определения R_0 :

$$R_0 = \frac{L}{CR}; \quad R_0 = RQ^2; \quad R_0 = \rho Q.$$

Векторная диаграмма для случая резонанса показана на рис. 2.11. При резонансе токи в ветвях почти равны между собой: $I_{mC} = I_{mL}$, а ток в общей цепи равен их разности $I_m = I_{mC} - I_{mL}$ и имеет наименьшее из всех возможных значение. Сопротивление контура, следовательно, имеет наибольшее значение.

При резонансе в параллельном контуре имеют место следующие соотношения:

ток в общей цепи

$$I_m = \frac{E_m}{R_\Sigma} = E_m \frac{R}{\rho^2};$$

ток в емкостной ветви

$$I_{mC} = \frac{E_m}{\frac{1}{\omega_0 C}} = \frac{E_m}{\rho};$$

ток в индуктивной ветви

$$I_{mL} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}}.$$

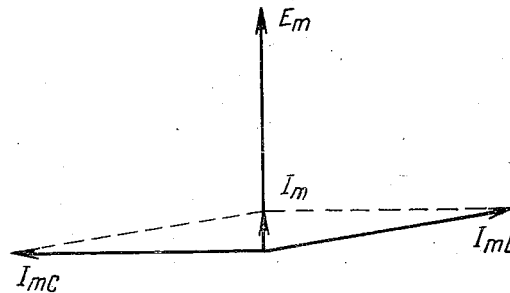


Рис. 2.11. Векторная диаграмма параллельного контура при резонансе ($\omega = \omega_0$).

В реальных контурах активное сопротивление обычно намного меньше, чем индуктивное ($R \ll \omega_0 L$), поэтому

$$I_{mL} \approx \frac{E_m}{\omega_0 L} = \frac{E_m}{\rho}.$$

Отношения токов в каждой ветви к току в общей цепи равны

$$\frac{I_{mL}}{I_m} \approx \frac{I_{mC}}{I_m} = \frac{E_m}{\rho} : \frac{E_m}{\frac{\rho^2}{R}} = \frac{\rho}{R} = Q. \quad (2.25)$$

Как видно из выражения (2.25), при резонансе в каждой ветви ток примерно в Q раз больше тока в общей цепи. Поэтому в параллельном контуре имеет место *резонанс токов*¹.

Зависимость абсолютной величины эквивалентного сопротивления параллельного контура Z_0 от частоты f э. д. с. источника показана на рис. 2.12.

Построим векторную диаграмму параллельного контура (рис. 2.13 а) для случая $\omega > \omega_0$. Вектор э. д. с. E_m направим вверх, тогда вектор тока I_{mC} , опережающего напряжение источника на 90° , будет направлен влево; вектор тока I_{mL} отстает от вектора этого напряжения на некоторый угол ϕ_L , не равный в общем случае 90° из-за наличия в этой ветви активного сопротивления R . Вектор тока в общей цепи I_m — это геометрическая сумма векторов I_{mC} и I_{mL} . Как видно из диаграммы, ток I_m опережает напряжение E на угол ψ . В случае $\omega < \omega_0$ вектор I_m (диагональ параллелограмма), как видно из рис. 2.13 б, отстает от вектора напряжения.

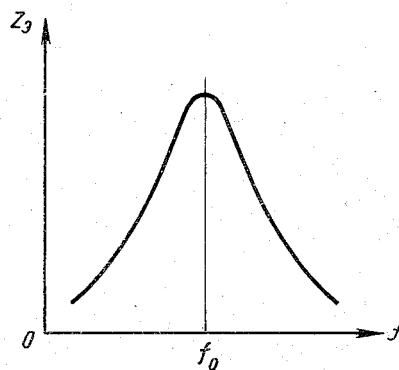


Рис. 2.12. График зависимости эквивалентного сопротивления параллельного контура от частоты.

Резонансные кривые. При рассмотрении резонансных явлений в контурах мы до сих пор не учитывали внутреннего сопротивления источника э. д. с. Если в последовательном контуре внутреннее сопротивление источника последовательно подключено к остальным элементам (и при расчетах просто складывается с общим сопротивлением), то в параллельном контуре оно включается параллельно ветвям контура и оказывает существенное влияние на резонансные свойства контура.

В практических схемах параллельный контур бывает включен в качестве нагрузки в анодную цепь электронной лампы, обладающей внутренним сопротивлением R_i . При этом возможны три случая.

1. Эквивалентное сопротивление контура Z_0 намного превышает R_i , т. е. $Z_0 \gg R_i$. При резонансе ток в общей цепи $I_m \approx \frac{E_m}{Z_0}$ минимален, напряжение на контуре $U_K = E$ и не зависит от частоты.

В практических схемах параллельный контур бывает включен в качестве нагрузки в анодную цепь электронной лампы, обладающей внутренним сопротивлением R_i . При этом возможны три случая.

1. Эквивалентное сопротивление контура Z_0 намного превышает R_i , т. е. $Z_0 \gg R_i$. При резонансе ток в общей цепи $I_m \approx \frac{E_m}{Z_0}$ минимален, напряжение на контуре $U_K = E$ и не зависит от частоты.

¹ Напомним, что в последовательном контуре величина Q показывает, во сколько раз при резонансе напряжение на каждом из реактивных элементов превышает напряжение, приложенное к контуру.

2. Эквивалентное сопротивление контура $Z_0 \ll R_i$. Тогда ток в общей цепи $I_m \approx \frac{E}{P}$ и не зависит от частоты. Напряжение на контуре U_K изменяется пропорционально его сопротивлению и при резонансе имеет наибольшее значение.

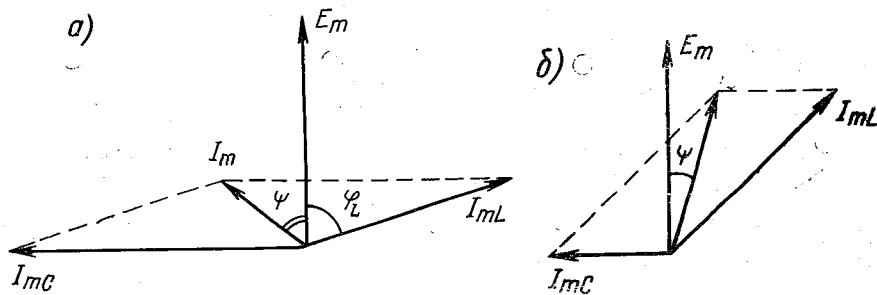


Рис. 2.13. Векторные диаграммы параллельного контура.

а) $\omega > \omega_0$; б) $\omega < \omega_0$.

3. Эквивалентное сопротивление контура Z_0 и R_i соизмеримы друг с другом. Тогда I_m и U_K изменяются в зависимости от частоты.

Резонансные кривые для всех трех случаев показаны на рис. 2.14.

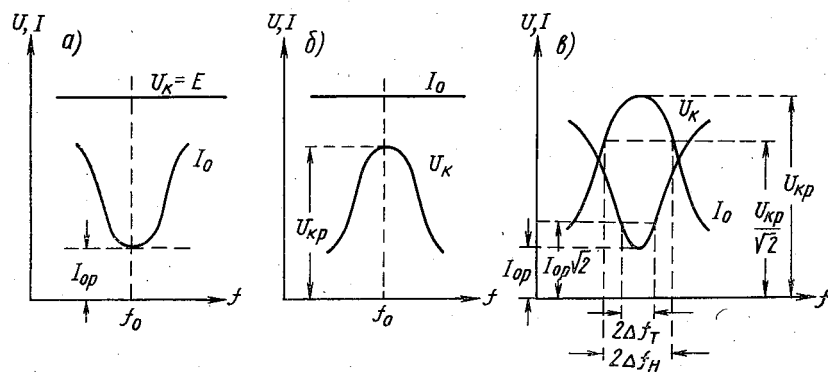


Рис. 2.14. График зависимости напряжения U_K и тока I_0 в параллельном контуре от частоты при разных соотношениях Z_0 и R_i .

а) $Z_0 \gg R_i$; б) $Z_0 \ll R_i$; в) Z_0 соизмеримо по величине с R_i .

Пользуясь этими кривыми, определим полосу пропускания контура. При этом различают *полосу пропускания по току* $2\Delta f_T$ (спектр частот, в пределах которого ток в общей цепи I_m превышает значения тока при резонансе I_m не более чем в $\sqrt{2}$ раз)

и полосу пропускания по напряжению $2\Delta f_H$ (спектр частот, в пределах которого напряжение на контуре U_K меньше напряжения на контуре при резонансе не более чем в $\sqrt{2}$ раз).

Из рисунка видно, что полосы пропускания параллельного контура зависят от соотношений между значениями Z_0 и R_i .

При $Z_0 \gg R_i$ полоса пропускания по напряжению бесконечно велика (контур не обладает избирательными свойствами по напряжению), а при $Z_0 \ll R_i$ полоса пропускания по току бесконечно велика; если Z_0 и R_i соизмеримы по величине, то полосы пропускания имеют конечные значения.

Полосу пропускания по напряжению для этого случая можно рассчитать по формуле (2.22), выведенной для последовательного контура:

$$2\Delta f_H = \frac{f_0}{Q'} . \quad (2.26)$$

Следует иметь в виду, что значение добротности Q' вычисляется с учетом шунтирующего действия внутреннего сопротивления источника R_i :

$$Q' = \frac{Q}{1 + \frac{R_0}{R_i}} . \quad (2.26a)$$

§ 2.4. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СВЯЗАННЫХ КОНТУРАХ

В радиоэлектронной аппаратуре очень часто встречаются схемы, в которых часть энергии колебательного контура передается в другой колебательный контур. Образуется система, состоящая из двух колебательных контуров: *первичного*, возбуждаемого источником э. д. с., и *вторичного*, являющегося «получателем» энергии от первого контура. В практике применяются системы, состоящие также из нескольких контуров.

Существует несколько видов связанных контуров, отличающихся друг от друга так называемым *элементом связи*, общим для обоих контуров. Для изображенных на рис. 2.15 связанных контуров элементами связи являются: трансформатор, составленный из катушек L_1 и L_2 (рис. 2.15 а), автотрансформатор L_1 (рис. 2.15 б), конденсатор $C_{св}$ (рис. 2.15 в), активное сопротивление $R_{св}$ (рис. 2.15 г). В зависимости от способа взаимного влияния контуров связь называется *трансформаторной* (или *индуктивной*), *автотрансформаторной*, *емкостной*, *кондуктивной*.

Степень взаимного влияния одного контура на другой оценивается *коэффициентом связи* K .

Рассмотрим один из наиболее часто встречающихся видов связанных контуров — связанные контуры с трансформаторной связью (рис. 2.15 а). Общий магнитный поток, связывающий

катушки L_1 и L_2 , пропорционален величине тока в катушке первичного контура.

Амплитуда наведенной в катушке вторичного контура э. д. с.

$$E_2 = \omega M I_1, \quad (2.27a)$$

где M — коэффициент взаимной индуктивности; ω — частота; I_1 — ток в первичном контуре. Величина ωM имеет размерность сопротивления и называется *сопротивлением связи*.

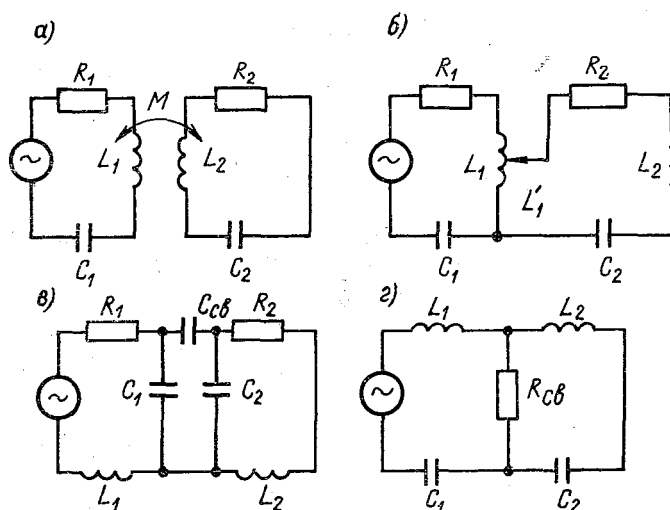


Рис. 2.15. Связь между колебательными контурами.

а — трансформаторная (индуктивная); б — автотрансформаторная;
в — емкостная; г — проводимая.

Коэффициент связи для контуров с трансформаторной связью определяется по формуле

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (2.27б)$$

Коэффициент связи показывает, какую часть магнитного потока катушки L_1 составляет магнитный поток, пронизывающий обе катушки, т. е. связывающий оба контура.

Резонанс напряжений. Пусть каждый из связанных контуров настроен на частоту э. д. с. источника E_{1m} , т. е. в каждом контуре выполняется условие резонанса напряжений. В этом случае ток первичного контура I_{1m} совпадает по фазе с напряжением E_{1m} . Этот ток создает на катушке вторичного контура э. д. с. взаимоиндукции E_{2m} , равную $I_{1m} \omega M$, которая отстает по фазе от тока I_{1m} на 90° . Под воздействием этой э. д. с. во вторич-

ном контуре появляется ток I_{2m} . Согласно условию резонанса, этот ток совпадает по фазе с э. д. с. E_{2m} и равен

$$I_{2m} = \frac{E_{2m}}{R_2} = \frac{I_{1m} \omega M}{R_2}.$$

Этот ток оказывает обратное воздействие на первичный контур, наводя на катушке L_1 первичного контура э. д. с. взаимной индукции

$$E'_{1m} = I_{2m} \omega M = I_{1m} \frac{(\omega M)^2}{R_2}, \quad (2.28)$$

которая отстает по фазе от тока I_{2m} на 90° .

Сказанное иллюстрируется векторной диаграммой (рис. 2.16). Как видно из диаграммы, э. д. с. E'_{1m} направлена противоположно э. д. с. источника E_{1m} , т. е. E'_{1m} противодействует первичному току I_{1m} , уменьшая его величину:

$$I_{1m} = \frac{E_{1m} - E'_{1m}}{R_1}.$$

Рис. 2.16. Векторная диаграмма контуров, связанных индуктивной связью.

Подставив в эту формулу значение E'_{1m} из (2.28), получим

$$I_{1m} = \frac{E_{1m}}{R_1 + \frac{(\omega M)^2}{R_2}} = \frac{E_{1m}}{R_1 + r_{\text{вн}}}, \quad (2.29)$$

где $r_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2}{R_2}$ называется *вносимым сопротивлением*.

Поясним физический смысл вносимого сопротивления. Как видно из соотношения (2.29), эффект получается такой, как будто в результате связи в первичном контуре увеличилось активное сопротивление. Объясняется это тем, что энергия, подводимая от внешнего источника к первичному контуру, расходуется не только в нем, но и частично передается во вторичный контур. Потребление же вторичным контуром энергии из первичного равносильно включению в первичный контур активного сопротивления, рассеивающего то же самое количество энергии, которое потребляет вторичный контур. Поэтому говорят, что благодаря связи из вторичного контура в первичный «вносится» некоторое сопротивление, уменьшающее добротность контура.

Указанное рассуждение справедливо для случая, когда вторичный контур настроен в резонанс.

Если же вторичный контур не настроен в резонанс, то вносимое в первичный контур сопротивление становится комплексным, т. е. содержащим и активное, и реактивное сопротивления. Если при этом сопротивление вторичного контура имеет индуктивный характер, вносимое им сопротивление в первичный контур имеет емкостный характер, и наоборот. Отсюда следует, что расстроенный вторичный контур нарушает настройку и первичного контура.

Описанные выше свойства связанных трансформаторной связью контуров распространяются на другие виды связи с той лишь разницей, что изменяются выражения для расчета сопротивления связи, коэффициента связи и некоторых других характеристик.

Резонансные кривые. Пусть резонансные частоты первичного и вторичного контуров равны между собой ($f_{01} = f_{02} = f_0$). Рассмотрим, как будет влиять на величину тока во вторичном контуре изменение связи между контурами.

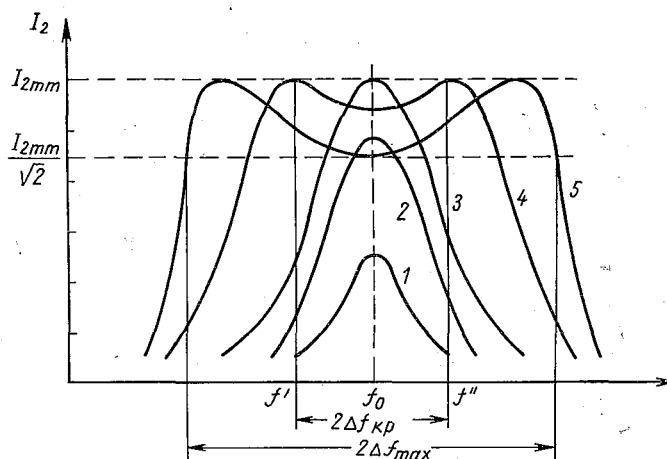


Рис. 2.17. Резонансные кривые связанных контуров.

Предположим вначале, что связь слабая. Тогда при изменении частоты проявляются резонансные свойства вторичного контура и ток I_2 изменяется так, как показано на рис. 2.17 (кривая 1). Увеличим связь между контурами. Максимальное значение тока при резонансе I_{2m} будет больше, чем в первом случае (кривая 2). При некоторой величине связи, называемой *критической связью*, значение тока достигнет самой большой величины I_{2mm} (кривая 3). Эта величина тока читается «макси-

мум-максимум» (максимальное из всех максимальных значений).

При критической связи вносимое в первичный контур активное сопротивление равно собственному сопротивлению этого контура: $r_{вн} = R_1$.

Однако связь можно увеличивать и далее (например, сближать катушки L_1 и L_2 в контурах с индуктивной связью). Начиная с некоторого момента на резонансной кривой появится провал, т. е. кривые примут двугорбую форму (кривые 4 и 5). Ток на частоте f_0 уменьшится, так как вносимое сопротивление станет больше собственного сопротивления первичного контура ($r_{вн} > R_1$).

Если же несколько расстроить контуры, то ток I_2 на некоторых частотах f' и f'' снова примет значения I_{2mm} . Эти частоты носят название *частот связи*. По мере увеличения связи провал в резонансной кривой становится больше и разность частот связи $f'' - f'$ возрастает.

Полоса пропускания. Полоса пропускания связанных контуров определяется шириной резонансной кривой на уровне $\frac{I_{2mm}}{\sqrt{2}}$.

Полоса пропускания, как видно из рис. 2.17, тем шире, чем сильнее связь между контурами. Самая большая полоса пропускания системы из двух связанных контуров $2\Delta f_{max}$, как показывают расчеты (которые из-за громоздкости здесь не приводятся), равна $3,1 \frac{f_0}{Q}$, т. е. в 3,1 раза превышает полосу пропускания одиночного контура (а при критической связи полоса пропускания равна $1,41 \frac{f_0}{Q}$).

При этом, как видно из рис. 2.17, крутизна двугорбых кривых больше, чем обычных резонансных кривых. Это явление используется для применения связанных контуров в схемах, где необходимо обеспечить пропускание резко ограниченного спектра частот. В этих случаях говорят об *избирательности* схемы, т. е. о ее способности реагировать на определенный спектр частот.

Настройка. Настройка системы из двух связанных контуров бывает нужна для того, чтобы обеспечить передачу во вторичный контур возможно большей мощности. При этом стремятся получить во вторичном контуре либо максимальный ток, либо требуемую полосу пропускания при возможно большей избирательности.

Настройкой первичного контура можно добиться резонанса на одной из частот связи (его называют первым частным резонансом), настройкой вторичного контура — второго частного

резонанса — на другой частоте связи. Однако для передачи максимальной мощности нужно еще подобрать наивыгоднейшую связь.

Как показывают расчеты, наилучшая передача мощности из первичного контура во вторичный возможна при выполнении двух условий: реактивное сопротивление, вносимое в первичный контур, должно быть равно по величине и противоположно по знаку его собственному реактивному сопротивлению, а активное сопротивление, вносимое в первичный контур, равно его собственному активному сопротивлению. В отрегулированной таким образом схеме связанных контуров наступает резонанс, называемый *общим резонансом*.

Общего резонанса можно достичь путем нескольких последовательных настроечных операций. Сначала устанавливают слабую связь и настраивают первичный контур по максимуму тока во вторичном контуре. Затем увеличивают связь и, повторяя настройку первичного контура, отмечают новое значение максимума тока I_2 . Такие операции повторяют до тех пор, пока дальнейшее увеличение связи уже не будет приводить к росту тока I_2 .

Несмотря на то, что указанный способ требует наличия всего двух органов регулировки (для изменения связи и для изменения одного из реактивных параметров первичного контура), он применяется редко из-за длительности процесса настройки.

Более удобен и широко применяется так называемый *полный резонанс*, которого добиваются настройкой каждого связанного контура порознь и последующим подбором оптимальной связи. Очевидно, что в этом случае система связанных контуров должна иметь три органа регулировки, однако сам процесс получения полного резонанса сводится всего к трем операциям.

Рассмотренные способы настройки используются тогда, когда, например, необходимо обеспечить наибольшую передачу мощности с оконечного каскада передатчика в антенный контур (см. главу 5).

Если связанные контуры применяются главным образом для обеспечения достаточно широкой полосы пропускания, то ее можно регулировать, изменяя связь между настроенными в резонанс контурами.

В практических схемах обычно контуры не настраивают точно в резонанс, обеспечивая тем самым нужную крутизну резонансной кривой (не заботясь особо о передаче наибольшей мощности).

Связанные контуры используются в усилителях промежуточной частоты приемников (см. главу 6), для которых требуется обеспечить резонансную кривую, по форме приближающуюся к идеальной П-образной характеристике.

§ 2.5. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В предыдущих параграфах мы рассматривали контуры, в которых индуктивность, емкость и сопротивление были сосредоточены в определенных участках схемы в виде радиодеталей: катушек индуктивности, конденсаторов, резисторов. При этом мы пренебрегали тем фактом, что, помимо этих сосредоточенных параметров, каждая реальная цепь обладает еще и распределенными параметрами. Дей-

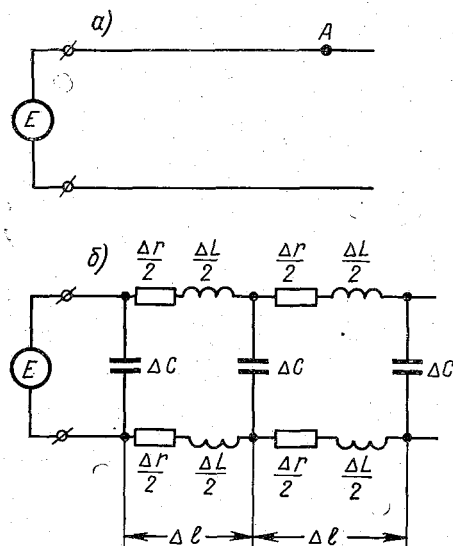


Рис. 2.18. Двухпроводная линия с распределенными параметрами.

а — два провода; *б* — эквивалентная схема (элементарные значения Δr и ΔL на малых участках Δl принимаются одинаковыми).

ствительно, между всякими проводами имеется электрическая емкость, всякий проводник обладает индуктивностью и активным сопротивлением. В обычных контурах этими значениями можно пренебречь, так как на контур, в который включен конденсатор емкостью, допустим, 500 пф, емкость монтажа 5—10 пф существенно не оказывает влияния. Другое дело, когда используется система, имеющая весьма большие размеры, сравнимые с длиной волны, распространяющейся в этой системе. Рассмотрим обычную двухпроводную линию неограниченной длины (рис. 2.18 *а*). Ее эквивалентную схему (рис. 2.18 *б*) можно представить в виде ряда элементарных участков длиной Δl , каждый из которых обладает некоторой индуктивностью ΔL и сопротивлением Δr , а между отрезками линии на этих участках существует емкость ΔC . Такая линия называется *системой с распределенными параметрами*.

Элементарные величины ΔL , ΔC и Δr на длине Δl составляют некоторые значения L_l , C_l и R_l , которые называются *погонными параметрами* и зависят от диаметра и материала проводов, а также от расстояния между ними.

Если подключить к такой линии источник постоянного тока, в линии произойдет процесс смещения электронов вдоль линии, т. е. пройдет ток, вызванный электромагнитным полем. Физи-

чески, между всякими проводами имеется электрическая емкость, всякий проводник обладает индуктивностью и активным сопротивлением. В обычных контурах этими значениями можно пренебречь, так как на контур, в который включен конденсатор емкостью, допустим, 500 пф, емкость монтажа 5—10 пф существенно не оказывает влияния. Другое дело, когда используется система, имеющая весьма большие размеры, сравнимые с длиной волны, распространяющейся в этой системе. Рассмотрим обычную двухпроводную линию неограниченной длины (рис. 2.18 *а*). Ее эквивалентную схему (рис. 2.18 *б*) можно представить в виде ряда

ческий смысл этого явления заключается в том, что при подключении к линии источника э. д. с. ближайшие к нему участки проводов линии заряжаются, между ними возникает напряжение, этот участок линии начинает играть роль источника э. д. с. для соседнего участка и т. д.

Если к линии подключить источник синусоидальной э. д. с., то изменение напряжения в линии и перемещение заряда в каждом из участков линии будут происходить также по синусоидальному закону. Однако эти изменения будут отставать по фазе от изменения напряжения э. д. с., так как пока напряжение, распространяющееся вдоль линии, достигнет некоторой точки A , напряжение на зажимах источника успеет измениться.

Переменное напряжение, распространяясь вдоль линии, создает переменное электрическое поле. Это поле вызывает в проводах переменный ток, который в свою очередь создает переменное магнитное поле вокруг проводов.

Такое распространение напряжения вдоль линии называется *бегущей волной напряжения*, а распространение заряда вдоль линии называется *бегущей волной тока*. При распространении волн вдоль линии значения напряжения, тока, напряженности электрического и магнитного полей на определенных расстояниях друг от друга повторяются. Расстояние между двумя ближайшими точками с одинаковыми значениями полей называют *длиной электромагнитной волны*. Она равна длине волны колебаний, генерируемых источником э. д. с.

Двухпроводные линии, в которых происходят рассмотренные выше явления, называют *длинными линиями*. В сосредоточенных элементах C , L и R фаза и амплитуда колебаний в любых их точках одинаковы. В линии, размеры которой соизмеримы с длиной волны, фаза и амплитуда колебаний в разных точках различны.

Следовательно, понятие «длинная линия» имеет электрический смысл. Оно применимо к линии, геометрические размеры которой соизмеримы с длиной распространяющейся вдоль нее волны.

В длинных линиях невозможно указать точки, где сосредоточивается электрическая и магнитная энергия, это происходит по всей длине проводов.

Свойства длинной линии определяются через ее так называемое *характеристическое (или волновое) сопротивление Z_{λ}* :

$$Z_{\lambda} = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}}. \quad (2.30)$$

Если в формулу (2.30) подставить выражения для погонной индуктивности и емкости (формулы довольно громоздки и здесь

не приводятся), то получим расчетную формулу для $Z_{\text{л}}$ воздушной линии

$$Z_{\text{л}} = 276 \lg \frac{2D}{d}, \quad (2.31)$$

где D — расстояние между осями проводов; d — диаметр проводов (величины D и d выражаются в одинаковых единицах длины, например, в миллиметрах).

Для двухпроводных воздушных линий значение $Z_{\text{л}}$ обычно лежит в пределах 300—800 ом.

Сопротивление $Z_{\text{л}}$ одинаково по всей длине линии, в том числе и в начале линии. Поэтому входное сопротивление бесконечно длинной линии ($R_{\text{вх}}$) равно ее волновому сопротивлению, т. е. $R_{\text{вх}} = Z_{\text{л}}$.

При распространении бегущей волны линия поглощает всю энергию, отдаваемую ей источником э. д. с., поэтому ее можно считать чисто активной нагрузкой для источника. Следовательно, ток и напряжение в линии при режиме бегущей волны совпадают по фазе.

Так как волновое сопротивление в любой точке линии одинаково, то можно, разорвав линию на любом расстоянии от генератора, вместо отсоединенной части линии включить активное сопротивление $R_{\text{н}} = Z_{\text{л}}$. При этом распространение бегущих волн останется таким же, каким оно было и в линии неограниченной длины. Режим распространения бегущей волны устанавливается таким, что в линии волна движется только от начала линии (от места включения источника э. д. с.) к ее концу. Такая волна называется *падающей* (или *прямой*).

Если же $R_{\text{н}} \neq Z_{\text{л}}$, то часть энергии отражается от конца линии и движется к началу, т. е. появляется так называемая *отраженная* (или *обратная*) волна.

Физический смысл возникновения отраженной волны становится ясным, если рассмотреть два случая нагрузки.

1) $R_{\text{н}} = \infty$ (линия разорвана на конце). Бегущая волна достигает «обрывков» линии, заряды дальше двигаться не могут. На обрывках линии начинают накапливаться заряды противоположных знаков. Возрастает напряжение, образующее электрическое поле. Так как ток не идет, то энергия созданного им магнитного поля превращается в энергию электрического поля, но поскольку в соседнем с концом линии элементе потенциал ниже, происходит перемещение заряда к началу линии, т. е. возникает отраженная волна тока и напряжения.

2) $R_{\text{н}} = 0$ (линия замкнута накоротко на конце). Вследствие короткого замыкания проводов на конце линии разность потенциалов между ними равна нулю. В то же время ток на конце линии имеет максимальное значение, т. е. в случае короткого замыкания распределение тока получается таким, каким было

распределение напряжения в разомкнутой линии, а распределение напряжения таким, каким было распределение тока.

В любых других случаях нагрузки, когда $\infty > R_n > 0$, в линии происходит *частичное* отражение.

При сложении падающей и отраженной волн, имеющих одинаковые амплитуды (что характерно для линий без потерь), воз-

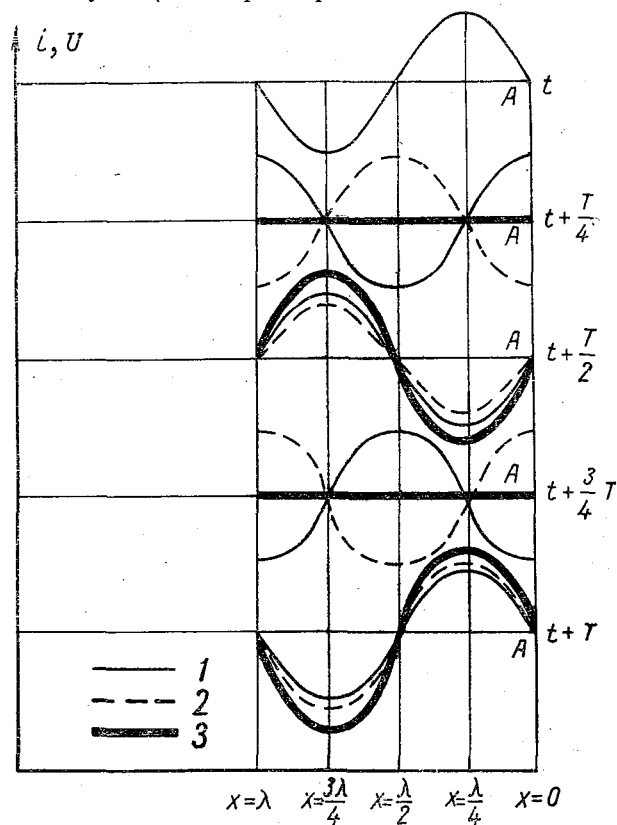


Рис. 2.19. Образование стоячих волн тока (для разомкнутой линии) и напряжения (для линии, замкнутой накоротко).

1 — падающая волна, перемещающаяся слева направо;
2 — отраженная волна, перемещающаяся справа налево;
3 — результирующая волна.

никают так называемые *стоячие волны*. Процесс образования стоячих волн тока в разомкнутой на конце линии показан на рис. 2.19.

В момент t падающая волна достигла конца линии. Через четверть периода $\left(t + \frac{T}{4}\right)$ падающая волна переместится

в направлении к точке A на расстояние $\lambda/4$, а отраженная волна переместится навстречу ей также на расстояние $\lambda/4$. Фазы обеих волн противоположны, и ток во всех точках линии равен нулю.

За следующую четверть периода $\left(t + \frac{T}{2}\right)$ падающая и отраженная волны снова переместятся навстречу друг другу еще на $\lambda/4$. Фазы обоих токов совпадают, токи складываются. Аналогичные процессы происходят и в моменты $t + 3/4T$ и $t + T$.

На рис. 2.19 показаны значения амплитуд тока и напряжения вдоль участка линии в разные моменты времени, в течение которого кривые тока или напряжения как бы пульсируют. При этом на разомкнутом конце ($x=0$) и на расстояниях x , равных $\lambda/2$; $3/2\lambda$; $5/2\lambda$ и т. д., амплитуда тока равна нулю, т. е. в этих точках имеются так называемые *узлы* тока.

В точках, отстоящих от узлов тока на расстояниях x , равных $\lambda/4$; $3/4\lambda$; $5/4\lambda$; $7/4\lambda$ и т. д., амплитуда тока максимальная, т. е. в этих точках имеются так называемые *пучности* тока.

Как видно из рисунка, узлы и пучности напряжения не совпадают по фазе с узлами и пучностями тока; они разнятся на 90° .

В линии, концы которой замкнуты накоротко, также образуются стоячие волны, но, в отличие от разомкнутой линии, здесь в конце линии имеется узел напряжения и пучность тока.

Итак, при передаче энергии в линии должен быть обеспечен режим бегущей волны, т. е. нужно согласовать нагрузочное и волновое сопротивления, иначе часть энергии отразится от конца к началу линии и образует *комбинированные* волны, состоящие из бегущих и стоячих волн.

Практически в линии всегда есть комбинированные волны (так как идеального согласования добиться трудно). Соотношение бегущей и стоячей волн в данной линии количественно оценивают *коэффициентом бегущей волны* (КБВ), равным отношению минимального напряжения (или тока) к его максимальному значению:

$$\text{КБВ} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}. \quad (2.32)$$

Иногда пользуются величиной, обратной КБВ, — коэффициентом стоячей волны (КСВ):

$$\text{КСВ} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}. \quad (2.33)$$

Входное сопротивление линии. Выше было сказано, что входное сопротивление линии, нагруженной на сопротивление, равное волновому, не зависит от длины линии, носит активный характер и равно ее характеристическому сопротивлению.

Входное сопротивление разомкнутой или замкнутой на конце линии ($Z_{вх}$) можно определить как отношение $\frac{U_{вх}}{I_{вх}}$. Для определения его значений будем помещать источник э. д. с. в разные точки линии (см. рис. 2.19). Получим следующие значения $\frac{U_{вх}}{I_{вх}}$:

Линия	Расстояние от конца линии				
	$x=0$	$x=\frac{\lambda}{4}$	$x=\frac{\lambda}{2}$	$x=\frac{3}{4}\lambda$	$x=\lambda$
Разомкнутая на конце	∞	0	∞	0	∞
Замкнутая накоротко на конце	0	∞	0	∞	0

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что линии обладают резонансными свойствами, их отрезки длиной, кратной четверти длины волны, имеют входные сопротивления, равные или нулю, или бесконечности, а это свойственно настроенному в резонанс последовательному или параллельному контуру.

В остальных точках линии входное сопротивление имеет реактивный характер: емкостный (от $x=0$ до $x=\lambda/4$; от $x=\lambda/2$ до $x=3/4\lambda$ и т. д.) или индуктивный (от $x=\lambda/4$ до $x=\lambda/2$; от $x=3/4\lambda$ до $x=5/4\lambda$ и т. д.).

Рассмотренные выводы и соотношения справедливы для идеальных линий, т. е. не имеющих потерь. Реальные линии всегда имеют потери энергии, обусловленные наличием во входном сопротивлении активной составляющей, так что значения $Z_{вх}$ не равны точно ни нулю, ни бесконечности. Однако это не влияет на правильность выводов о том, что эти линии ведут себя как колебательные контуры, так как сопротивления в контурах также отличаются от нуля и бесконечности.

Применение рассмотренных в параграфах 2.1—2.4 колебательных контуров ограничивается диапазоном волн не короче 5—10 м. На более высоких частотах возрастают потери в контуре, уменьшается его добротность. Это происходит из-за поверхностного эффекта, диэлектрических потерь и потерь на излучение электромагнитной энергии. Поэтому в диапазоне волн от нескольких метров и короче в качестве колебательных контуров часто используют отрезки длинных линий, обладающих резонансными свойствами.

Такие колебательные контуры выполняются в виде двухпроводных воздушных или коаксиальных линий и в виде объемных резонаторов.

В *двухпроводной воздушной линии* настройка осуществляется перемещением перемычки, в коаксиальной линии — перемещением поршня. Добротность таких колебательных контуров достигает нескольких тысяч, работают они на метровых и дециметровых волнах. Двухпроводные воздушные линии обладают небольшими потерями, однако на их работу оказывают большое влияние метеорологические условия (влажность, обледенение).

В *коаксиальных линиях* один провод помещен внутри второго, выполненного обычно в виде гибкой металлической оплетки. Электромагнитное поле ограничено внутри кабеля, что является преимуществом коаксиальной линии. Однако потери в диэлектрике кабеля достаточно велики.

Четвертьволновые отрезки линий в зависимости от того, замкнуты или разомкнуты они на конце, могут играть роль *изолятора* или *фильтра*. Входное сопротивление четвертьволнового замкнутого на конце отрезка (рис. 2.20 а) очень велико, поэтому

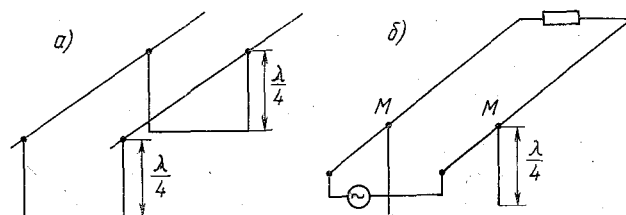


Рис. 2.20. Четвертьволновые отрезки длинных линий в качестве изоляторов (а) и фильтра (б).

на нем потери энергии будут незначительными и он может быть использован как металлический изолятор. Недостатком такого изолятора является только то, что с изменением частоты колебаний его сопротивление изменяется и изолирующие свойства ухудшаются.

Входное сопротивление четвертьволнового разомкнутого на конце отрезка очень мало. Если такой отрезок подключить к точкам *ММ* линии (рис. 2.20 б), то он не пропустит к сопротивлению нагрузки колебания с длиной волны λ , так как для них линия в этом участке замкнута накоротко.

В сантиметровом диапазоне потери оказываются значительными даже на длинных линиях, в связи с чем здесь наиболее применимы так называемые *объемные резонаторы*. Это — системы, обладающие распределенными емкостью и индуктивностью, однако не имеющие проводов.

Объемные резонаторы являются отрезками еще одной разновидности длинных линий — полых металлических труб, называемых *волноводами*. Как правило, волноводы применяются для длин волн 10 см и короче, так как для более длинных волн их пришлось бы делать громоздкими. Радиоволноводы по сравнению

с другими длинными линиями обладают следующими преимуществами: 1) почти полным отсутствием потерь на излучение в диэлектрике и в стенках; 2) большой величиной передаваемой мощности; 3) простотой конструкции и способностью пропускать более широкий спектр частот, чем коаксиальная линия. Как и во всех длинных линиях, в волноводах могут устанавливаться режимы: бегущей волны, стоячей волны и комбинированный. Наиболее распространены цилиндрические и прямоугольные объемные резонаторы.

Поясним процессы, происходящие в цилиндрическом объемном резонаторе. Сначала рассмотрим замкнутый накоротко на

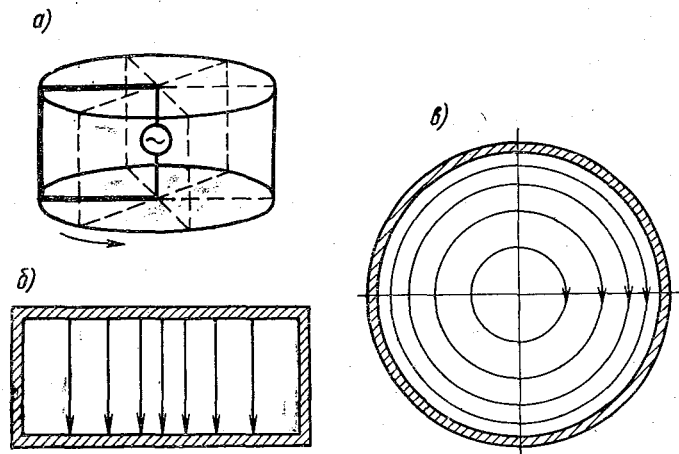


Рис. 2.21. Цилиндрический резонатор.

а — образование цилиндра вращением отрезка длинной линии;
 б — распределение электрических силовых линий; в — распределение магнитных силовых линий.

конце четвертьволновый отрезок длинной линии. Такой отрезок, как было показано выше, обладает свойствами параллельного колебательного контура. В начале линии создается пучность напряжения, здесь получается наибольшая напряженность электрического поля и наибольшая густота электрических силовых линий. Если вращать этот отрезок линии вокруг ее начала, получим цилиндрическую поверхность (рис. 2.21 а), образующую объемный резонатор. В этом резонаторе сосредоточатся свойства бесконечно большого количества расположенных вокруг источника переменной э. д. с. четвертьволновых отрезков, т. е. наибольшая густота силовых линий электрического поля окажется в центре цилиндра (рис. 2.21 б).

Силовые линии магнитного поля — это концентрические окружности, расположенные в плоскостях, параллельных крышкам цилиндра (рис. 2.21 в). Наибольшая густота магнитных линий

получается у стенки цилиндра. Это является следствием того, что у замкнутого конца отрезка наибольшая величина (пучность) тока.

Возбуждение колебаний в резонаторах можно осуществить либо *штырем-зондом*, либо *петлей связи*. На рис. 2.22 показаны оба эти способа. Штырь-зонд, помещаемый в пучность электрического поля (рис. 2.22 а), является концом центральной жилы

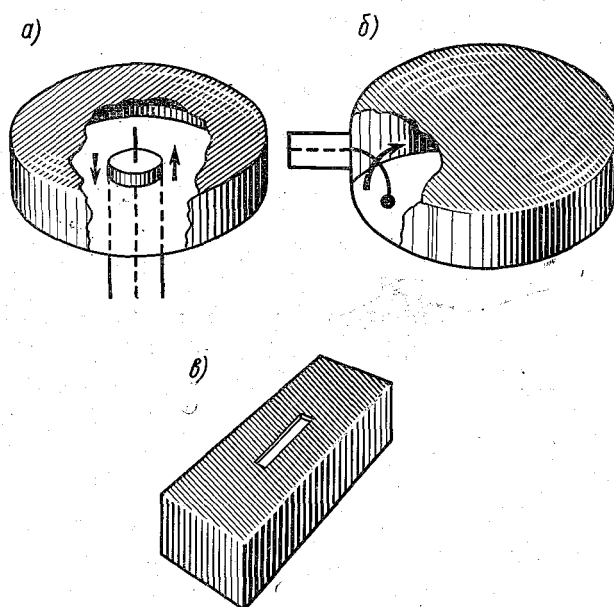


Рис. 2.22. Возбуждение колебаний в объемных резонаторах.

а — штырем-зондом; б — петлей связи; в — с помощью щели. Стрелками показаны направления возбуждаемых полей.

коаксиального кабеля. Незатухающие колебания в резонаторе возбуждаются электрическим полем этой жилы, совпадающим с направлением электрических силовых линий резонатора. Петля связи (рис. 2.22 б) также образуется из центральной жилы коаксиального кабеля, заканчивающейся витком, подсоединенным к внутренней стенке резонатора. Магнитное поле, образующееся вокруг этого витка, совпадает с направлением магнитных силовых линий резонатора и возбуждает в нем незатухающие колебания. Виток связи помещают в пучность магнитного поля.

В прямоугольных резонаторах колебания иногда возбуждаются с помощью щели в стенке резонатора (рис. 2.22 в), ко-

торая должна прорезаться так, чтобы она была перпендикулярна поверхностным токам.

Упомянутые выше способы возбуждения колебаний в объемных резонаторах пригодны и для вывода энергии из них.

Основные выводы

1. В одиночных колебательных контурах может происходить процесс свободных или вынужденных колебаний электрического тока. Свободными затухающими колебаниями называются колебания, происходящие в контуре при отсутствии постороннего источника колебательной энергии. Вынужденные (незатухающие) колебания возникают в контуре под воздействием энергии постороннего источника переменной э. д. с.

2. Частота колебаний в контуре обратно пропорциональна величинам параметров контура: индуктивности и емкости. Для характеристик реального колебательного контура, в котором происходят потери энергии, пользуются величинами затухания $\left(d = \frac{R}{\sqrt{L/C}}\right)$ и добротности $\left(Q = \frac{1}{d}\right)$. Чем меньше величина

добротности контура, тем быстрее убывает амплитуда свободных колебаний.

3. В процессе вынужденных колебаний могут возникать такие условия, при которых значение реактивного сопротивления контура станет равным нулю. Это явление, называемое резонансом, может произойти, если частота источника переменной э. д. с. станет равной собственной частоте колебаний контура, определяемой значениями его параметров.

4. Применение связанных колебательных контуров, т. е. систем, в которых часть энергии одного колебательного контура передается в другой, позволяет получить резонансные кривые, существенно отличающиеся от кривых одиночных контуров. Изменяя величину связи между контурами и параметры каждого контура, можно получить резонансные кривые нужной формы.

5. Если колебательные системы имеют геометрические размеры, сравнимые с длиной электромагнитной волны, то образуются колебательные контуры с распределенными (погонными) параметрами. Примерами таких систем являются отрезки длинных линий и объемные резонаторы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Дайте определение колебательного контура.
2. Поясните процесс свободных колебаний в колебательном контуре.
3. Определите частоту свободных колебаний контура, имеющего параметры $L=90 \text{ мкГн}$, $C=500 \text{ пФ}$, $R=2,5 \text{ Ом}$. Рассчитайте также период колебаний, характеристическое сопротивление, затухание и добротность контура.

4. Какие колебания называются вынужденными?
5. Что такое резонанс напряжений?
6. К последовательно соединенным элементам $L=1000 \text{ мГн}$, $C=1000 \text{ пФ}$ и $R=10 \text{ Ом}$ приложено переменное напряжение $U=15 \text{ В}$ с частотой $f=200 \text{ кГц}$. Найти общее сопротивление контура, ток и сдвиг фаз между током и напряжением и построить векторную диаграмму.
7. Выведите уравнение приведенной резонансной кривой последовательного контура.
8. Определите полосу пропускания последовательного колебательного контура, имеющего параметры $L=100 \text{ мкГн}$, $C=200 \text{ пФ}$, $R=4 \text{ Ом}$.
9. Поясните явление резонанса в параллельном колебательном контуре.
10. Определите полосу пропускания по напряжению параллельного контура, имеющего параметры $L=50 \text{ мкГн}$, $C=300 \text{ пФ}$, $R=3,5 \text{ Ом}$ при условии $Z_0=1,2R_i$ (сопротивление R включено в индуктивную ветвь контура).
11. Перечислите основные виды связи между контурами. Изобразите принципиальные схемы.
12. Опишите процессы, происходящие в индуктивно связанных колебательных контурах.
13. Какой физический смысл имеет вносимое сопротивление?
14. При каких условиях резонансная кривая двух связанных контуров имеет два максимума (становится двугорбой)?
15. Что такое распределенные параметры?
16. Определите характеристическое сопротивление длинной линии, имеющей $L_l=170 \text{ мкГн}$, $C_l=70 \text{ пФ}$.
17. Поясните процесс возникновения бегущих и стоячих волн. Дайте определения коэффициентов КБВ и КСВ.
18. Опишите конструкции колебательных контуров с распределенными параметрами и методы возбуждения колебаний в таких контурах.
19. Каковы свойства четвертьволновых отрезков длинных линий?

ГЛАВА 3

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 3.1. ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Антенно-фидерное устройство — одна из главных составных частей радиоэлектронной системы. Антенно-фидерным устройством называется совокупность антенны и линии передачи (фидера) высокочастотной энергии; эта линия связывает антенну с радиопередатчиком или радиоприемником.

Назначение передающей антенны (антенны радиопередатчика) — преобразование энергии модулированного тока высокой частоты в энергию электромагнитных волн и излучение ее в заданных направлениях.

Назначение приемной антенны (антенны радиоприемника) — преобразование энергии электромагнитных волн в энергию токов высокой частоты.

Во многих случаях одна и та же антенна может быть использована и для передачи, и для приема электромагнитных волн. При этом ее основные характеристики остаются без изменения, так что при изучении антенн их обычно не подразделяют на передающие и приемные.

Распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле создается переменным электрическим током. Простейшим способом получения такого поля является подключение к источнику переменной э. д. с. пары металлических проводов. Интенсивность излучаемого электромагнитного поля зависит не только от величины э. д. с., но и от размеров и формы, которые можно придать этим проводам.

Обычно антенны располагают на некотором расстоянии от генераторов переменной э. д. с., что и вызывает необходимость в фидерных линиях. При создании фидерных линий, по которым энергия генератора передается к антенне, стремятся уменьшить до минимума их излучения, для чего провода линии располагают параллельно и близко друг к другу. Такое расположение приводит к тому, что поля двух равных по величине, но проти-

воположных по направлению токов взаимно компенсируются и излучение энергии в окружающее пространство оказывается чрезвычайно малым. Если же в качестве фидерных линий используется коаксиальный кабель или волновод, то излучения практически совсем не происходит.

В антеннах, в отличие от фидерных линий, необходимо получить максимально возможное излучение. Для этого можно использовать фидерные линии, у которых нужно устранить воз-

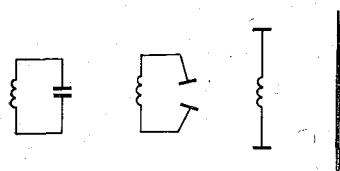


Рис. 3.1. Фазы перехода от замкнутого колебательного контура к открытому (антенне).

можность взаимной компенсации полей. Этого добиваются различными способами: раздвижкой проводов на некоторый угол, укорочением или исключением одного из проводов, изменением фаз токов в параллельных проводах и т. п. Это привело к созданию большого числа различных типов антенн. Применение каждого типа обусловлено целым комплексом требований, предъ-

являемых к той или иной радиоэлектронной системе.

Свободные колебания в открытом колебательном контуре. Если обычный колебательный контур видоизменить так, как показано на рис. 3.1, то получим систему, называющуюся *открытым колебательным контуром*. Роль конденсатора в нем играет емкость между разными точками провода, а роль катушки индуктивности — распределенная индуктивность провода.

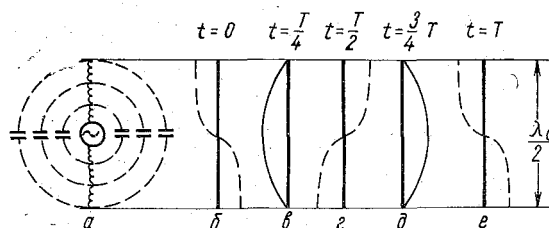


Рис. 3.2. Свободные колебания в открытом колебательном контуре.

a — эквивалентная схема; *b, в, г, д, e* — распределение тока и напряжение в разных фазах колебаний.

Элементарные индуктивности провода соединены между собой последовательно, т. е. общая индуктивность наибольшая между концами провода и равна нулю в его середине. Общая же емкость наибольшая в середине.

Разорвем получившийся провод по середине и подключим источник переменной э. д. с. (рис. 3.2). Элементарные емкости зарядятся и между половинами провода возникнет электрическое поле. Затем отключим источник и соединим накоротко обе поло-

вины провода (момент $t=0$ на рис. 3.2). Так же как и в обычном колебательном контуре, рассмотренном в § 2.1, это послужит началом процесса свободных колебаний.

В системе возникает разрядный ток, направленный сверху вниз. Энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля. К моменту $t=\frac{T}{4}$ заряд половины провода будет из-

расходован полностью, ток станет наибольшим, а затем начнет уменьшаться. Это приводит к уменьшению магнитного поля. Наведенная э. д. с. самоиндукции перезарядит половины провода

зарядами обратных знаков. К моменту $t=\frac{T}{2}$ напряжение станет наибольшим, после чего ток в проводе пойдет в обратном направлении. К моменту $t=\frac{3}{4}T$ ток станет наибольшим, затем он снова уменьшится и произойдет перезарядка половин провода зарядами обратных знаков.

К моменту $t=T$ напряжение вновь достигнет наибольшего значения, после чего весь цикл будет повторяться вновь.

Рассмотренный процесс аналогичен процессу образования стоячих волн в четвертьволновом отрезке разомкнутой на конце длинной линии (§ 2.5). При этом на концах провода образуются узлы тока и пучности напряжения, а в середине — узел напряжения и пучность тока.

Как видно из рис. 3.2, в длине провода, составляющего открытый колебательный контур, укладывается ровно половина длины волны свободных колебаний, т. е.

$$\lambda_0 = 2l, \quad (3.1)$$

где λ_0 — длина волны, l — длина провода. Поэтому открытый колебательный контур называется *симметричным* (или *полуволновым*) *вибратором*.

Вынужденные колебания в открытом колебательном контуре. Включим в середину симметричного вибратора источник синусоидальной э. д. с. В вибраторе возникает переменный ток, изменяющийся с частотой э. д. с., а следовательно, и изменяющиеся электрическое и магнитное поля.

Изменение электрического поля в плоскости рисунка в течение одного цикла (периода) колебаний э. д. с. источника показано на рис. 3.3.

Пусть в момент $t=0$ ток равен нулю, заряд вибратора равен нулю, электрического поля нет.

В течение четверти периода (от $t=0$ до $t=\frac{T}{4}$) ток от нуля возрастает до максимального значения. При этом заряды перемещаются от зажимов источника по проводам к их концам,

а вместе с зарядами «перемещаются» и силовые линии электрического поля.¹

В течение следующей четверти периода (от $t = \frac{T}{4}$ до $t = \frac{T}{2}$) ток уменьшается и заряды переходят от концов вибратора к его середине (к источнику), а вместе с зарядами «стягиваются» к середине вибратора и силовые линии.

В момент $t = \frac{T}{2}$ ток равен нулю, заряд вибратора также равен нулю, нет и силовых линий электрического поля. Однако в пространстве все же электрическое поле осталось, оно образовано замкнувшимися (в результате стягивания к середине вибратора) силовыми линиями, «оторвавшимися» от вибратора. Наибольшее расстояние этих оторвавшихся от вибратора линий равно половине длины волны.

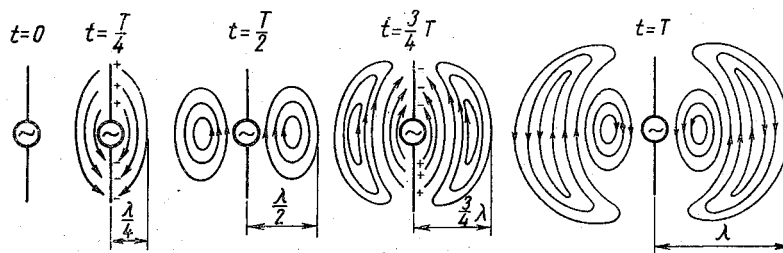


Рис. 3.3. Изменение электрического поля в свободном пространстве, окружающем симметричный вибратор.

В течение следующей четверти периода (от $t = \frac{T}{2}$ до $t = \frac{3}{4}T$) в вибраторе вновь увеличивается ток, имеющий противоположный по отношению к току первой половины периода знак. Вместе с перемещением заряда происходит перемещение силовых линий. При этом их направление таково, что они «отталкивают» в пространство силовые линии первой полуволны, возникшие в первом полупериоде.

К моменту $t = T$ заканчивается образование второй полуволны. За один период колебаний э. д. с. источника силовые линии отходят от вибратора на расстояние, равное длине волны.

Рассмотренный процесс, при котором оторвавшиеся от вибратора пучки силовых линий перемещаются в пространстве,

¹ Из курса общей электротехники известно, что существует единое электромагнитное поле, которое для удобства и наглядности изучения обычно представляют в виде условных силовых линий, связанных с зарядами. Именно в таком понимании здесь и далее говорится о перемещении, стягивании и отрыве силовых линий.

называют *излучением*. Заметим, что при свободных колебаниях, приводящих к образованию стоячих волн, излучения нет.

При изменении электрического поля в окружающем пространстве обязательно возникает связанное с электрическим магнитное поле. Силовые линии магнитного поля — это концентрические окружности, центры которых совпадают с осью вибратора. Совокупность электрического и магнитного полей называют *электромагнитным полем*. Электромагнитное поле — это форма материи, существующей во времени и пространстве, а электрическое и магнитное поля — составляющие этого поля. Электрическое и магнитное поля, перемещаясь в пространстве, находятся в постоянном взаимодействии. Электромагнитное поле распространяется со скоростью, равной скорости света, и не зависит от каких-либо электрических токов и зарядов.¹

Распространяющееся электромагнитное поле называется *полем излучения*, представляющим собой бегущие волны, подобные бегущим волнам тока и напряжения в двухпроводной линии. Проявлением действия на электрическое поле движущегося магнитного поля является искривление силовых линий электрического поля (см. рис. 3.3).

Каждый пучок силовых линий, отделяющихся от вибратора, содержит в себе определенное количество электромагнитной энергии. Совокупность этих пучков обычно и называют *электромагнитными волнами* или *радиоволнами*.

Если провести аналогию распространения электромагнитной энергии по длинной линии, нагруженной на волновое сопротивление, с распространением энергии в свободном пространстве (имеющем конечное значение волнового сопротивления, равное 377 ом), то приходим к выводу о том, что электрическое и магнитное поля находятся в фазе, т. е. существует бегущая волна.

Для количественного определения электромагнитного поля пользуются двумя характеристиками:

1) напряженностью электрического поля **E**, которой называют разность потенциалов на единицу длины; измеряется **E** в единицах напряжения на метр (*в/м*, *мв/м* и *мкв/м*);

2) напряженностью магнитного поля **H**, которой называют падение магнитного потенциала на единицу длины; измеряется **H** в амперах на метр (*а/м*).

E и **H** — векторы, так как имеют определенное направление в пространстве, а произведение этих векторов

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \mathbf{H} \quad (3.2)$$

¹ Электрические заряды нужны только для создания поля, но когда оно создано, в зарядах нет необходимости для поддержания этого поля, подобно тому как продолжают распространяться волны на поверхности воды, вызванные камнем, который уже находится на дне [9].

называется вектором Умова—Пойнтинга. Численное значение этого произведения равно мощности потока электромагнитной энергии, проходящего через единицу площади, а направление вектора $\mathbf{S}$ совпадает с направлением распространения электромагнитной энергии.

Векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ перпендикулярны друг к другу. Вектор $\mathbf{S}$ перпендикулярен обоим векторам, его направление определяется по правилу правого буравчика: если вращать рукоятку буравчика по кратчайшему пути от вектора $\mathbf{E}$ к вектору $\mathbf{H}$, то поступательное движение буравчика покажет направление вектора $\mathbf{S}$ (рис. 3.4 а).

На рис. 3.4 б радиоволны схематически изображены в виде двух синусоид, имеющих общую ось и расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях.

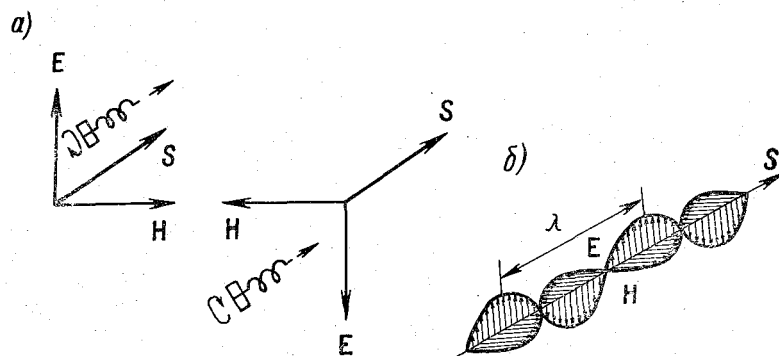


Рис. 3.4. К определению направления распространения радиоволн.

а — определение направления вектора $\mathbf{S}$ по правилу правого буравчика; б — изображение поля с помощью синусоид.

Направление векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{S}$ определяет особую плоскость, проходящую через эти векторы и называемую *плоскостью поляризации*. Если векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{S}$ параллельны поверхности земли, то говорят о *горизонтально поляризованной волне*; если вектор $\mathbf{S}$ параллелен поверхности земли, а вектор $\mathbf{E}$ перпендикулярен ей, то говорят о *вертикально поляризованной волне*.

Оба случая поляризации показаны на рис. 3.5, из которого видно, что вертикально поляризованные волны создаются вертикальным вибратором, а горизонтально поляризованные волны — горизонтальным вибратором.

Процессы в приемной антенне. Прием электромагнитных волн называется преобразование энергии электромагнитного поля в энергию электрического тока, протекающего по антенной цепи.

В простейшей приемной антенне (в виде вертикального провода) линии магнитного поля пересекают провод и наводят в нем

переменную э. д. с. Линии электрического поля, достигая антенны, создают между крайними точками провода э. д. с.

$$E_A = El, \quad (3.3)$$

где E — напряженность поля вдоль провода антенны; l — длина провода.

При этом следует иметь в виду, что если в поле вертикально поляризованных волн поместить горизонтальную приемную ан-

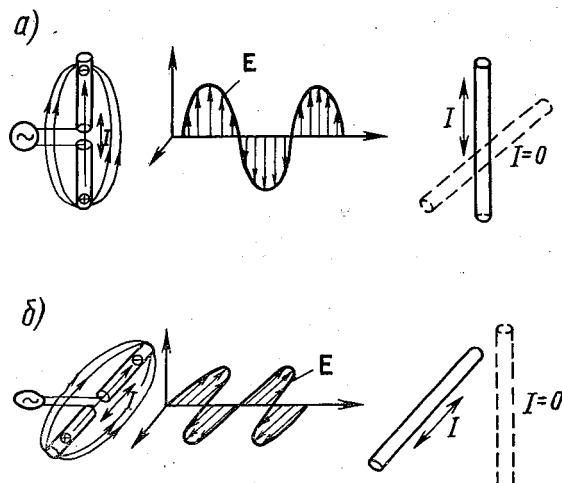


Рис. 3.5. Излучение и прием вертикально (а) и горизонтально (б) поляризованных радиоволн.

тенну или в поле горизонтально поляризованных волн поместить вертикальную антенну, то в них не будет наведено тока (см. пунктирное изображение вибраторов, в которых $I=0$, на рис. 3.5). В то же время, чем ближе направление оси приемной антенны к направлению поляризации, тем больший ток в ней наводится.

§ 3.2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АНТЕНН

Классификация антенн. Конструкции антенн зависят от многих требований: диапазона волн, назначения аппаратуры, требования к весу и габаритам и т. д. По каждому из этих требований антенны разделяют на многочисленные виды. Однако есть и общие черты, присущие всем, без исключения, антеннам. В предыдущем параграфе было упомянуто о том, что если раздвинуть участки двухпроводной длинной линии, укоротить или убрать один из проводов, получатся излучающие системы (вибраторы).

В зависимости от наличия или отсутствия второго провода вибраторы делятся на симметричные и несимметричные.

Симметричными антеннами являются V-образная, ромбическая антенны, уголкового антенна Пистолькорса, уже рассмотрен-

ный нами симметричный вибратор. На рис. 3.6 а показаны перечисленные типы антенн, указано направление токов в проводах, приведены значения углов, на которые раздвинуты провода.

К *несимметричным* антеннам относятся так называемые антенны с верхним светом конструкции Бонч-Бруевича, несимметричные вибраторы, Г-образные и Т-образные антенны, наклонные антенны и антенны с отводом (рис. 3.6 б). При питании этих антенн второй зажим генератора соединяется с землей (заземляется), т. е. роль второго провода начинает играть земля.

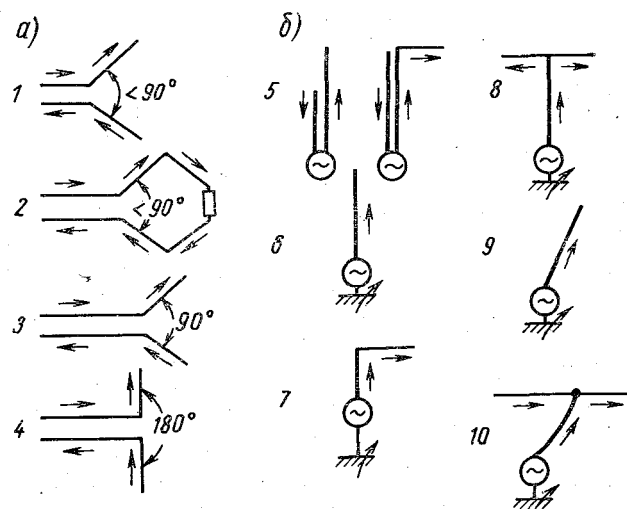


Рис. 3.6. Симметричные (а) и несимметричные (б) антенны.

1 — V-образная; 2 — ромбическая; 3 — уголко́вая. Пистолькорса; 4 — полуволновый симметричный вибратор; 5 — два варианта антенн с верхним светом; 6 — несимметричный вибратор; 7 — Г-образная; 8 — Т-образная; 9 — «наклонный луч», 10 — с отводом.

Сделать систему излучающей можно и другими способами, приводящими к созданию так называемых синфазных и противофазных антенн.

Излучение в *синфазных* антеннах достигается благодаря тому, что участок одного из проводов длиной в половину волны сгибается в так называемый неизлучающий шлейф. В результате этого соседние участки двух проводов обтекаются токами, совпадающими по фазе, что приводит не к их взаимной компенсации, а к взаимному усилению. Относящиеся к этой разновидности синфазная антенна и шлейф-вибратор показаны на рис. 3.7.

Излучение в *противофазных* антеннах обеспечивается тем, что расстояние между проводами делают соизмеримым с длиной волны. В этом случае волны, излученные обоими проводами по

некоторым направлениям, оказываются не в фазе и полностью не уничтожаются. Можно так подобрать расстояние между проводами, что в некоторых направлениях волны от обоих проводов будут складываться.

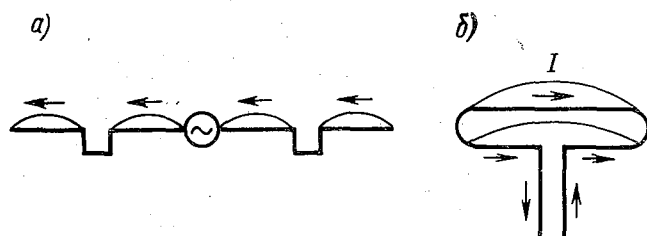


Рис. 3.7. Разновидности синфазных антенн.
а — обычная синфазная антенна; б — шлейф-вибратор.

Примеры трех противофазных антенн показаны на рис. 3.8. В антенне 1 противофазность в проводах а и б обеспечивается подключением их к фидеру на расстоянии, равном половине

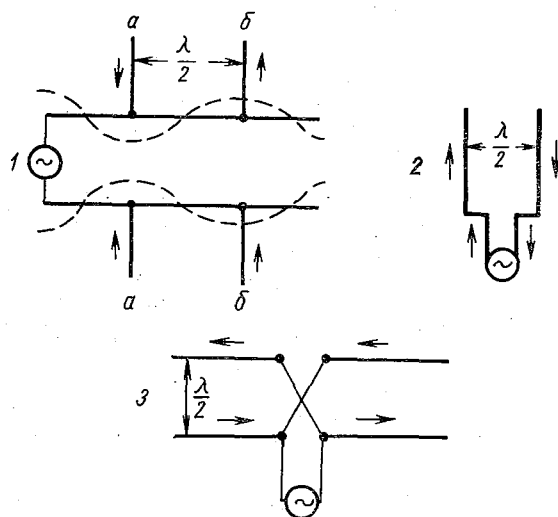


Рис. 3.8. Противофазные антенны.

длины волны. Антенна 2 — это фидер с расширением на конце, в антенне 3 противофазность токов возникает благодаря перекрещиванию питающих проводов.

Существуют и антенны, в которых используется одновременно несколько перечисленных выше способов.

Более подробно конструкции антенн рассматриваются ниже, в параграфах 3.3 и 3.4, а также в главах, где описываются конкретные радиоэлектронные системы.

Основные технические показатели антенн. Антенны, как и всякие радиоэлектронные устройства, характеризуются общетехническими, экономическими и радиотехническими показателями. К общетехническим и экономическим показателям относят сложность конструкции, габариты и вес, механическую прочность, удобство и безопасность в эксплуатации, стоимость. Антенну стремятся сделать простой, легкой, прочной, дешевой, надежной в работе.

Радиотехнические показатели характеризуют антенну с точки зрения эффективности преобразований, происходящих в ней. Основные радиотехнические показатели антенн следующие.

1. Мощность излучения антенны (P_{Σ}) — это мощность электромагнитных волн, излучаемых антенной в свободное пространство. Излучаемая мощность имеет активный характер, так как она полностью рассеивается в окружающем антенну пространстве. Мощность излучения определяется по формуле

$$P_{\Sigma} = I_A^2 R_{\Sigma} \quad (3.4)$$

где I_A — действующее значение тока в пучности; R_{Σ} — так называемое сопротивление излучения.

Сопротивление излучения характеризует способность антенны к излучению электромагнитной энергии при данной силе тока, возбужденного в антенне. Количественно сопротивление излучения определяется как активное сопротивление, на котором рассеивается мощность, численно равная мощности излучения, если ток в этом сопротивлении равен току в антенне. Для каждого вида антенны выведены расчетные формулы сопротивления излучения. Например, для расчета сопротивления излучения заземленного вибратора пользуются выражением $R_{\Sigma} = 1600 \frac{h^2}{\lambda^2}$, где

h — высота антенны, λ — длина излучаемой волны.

2. Коэффициент полезного действия (КПД) антенны характеризуется отношением мощности излучения (полезной мощности) к полной мощности, подводимой к антенне. Введение КПД связано с тем, что в любой реальной антенне наблюдаются потери мощности. Численно КПД антенны η_A определяется по формуле

$$\eta_A = \frac{P_{\Sigma}}{P_A} = \frac{I_A^2 R_{\Sigma}}{I_A^2 R_A} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_n} \quad (3.5)$$

где $P_A = I_A^2 R_A$ — мощность в антенне, численно равная мощности, подводимой к антенне от передатчика, R_A — так называемое

активное сопротивление антенны, которое складывается из сопротивления излучения R_{Σ} и сопротивления потерь R_{Π} , вызывающего потери мощности в проводах и изоляторах антенны.

3. Входное сопротивление антенны ($R_{\text{вх}}$) — сопротивление, оказываемое току генератора у входных зажимов антенны.

В общем случае антенна, как и всякий колебательный контур, представляет собой комплексную нагрузку для генератора, т. е. ее входное сопротивление имеет реактивную и активную составляющие. Так как высокочастотная энергия подводится к антенне по фидерной линии, то для передачи в антенну наибольшей мощности нужно, чтобы входное сопротивление антенны было равно волновому сопротивлению линии, т. е. чтобы реактивная составляющая входного сопротивления антенны была равна нулю. А это, как мы знаем, происходит при резонансе. Таким образом, чтобы антенна представляла для генератора чисто активную нагрузку, она должна быть настроена в резонанс.

4. Направленность антенны — это способность антенны излучать электромагнитные волны в определенных направлениях (или принимать электромагнитные волны с определенных направлений).

Направленность антенны удобно представлять графически, с помощью так называемой *диаграммы направленности*. При этом пользуются не абсолютными значениями мощности, излучаемой в разных направлениях, а отношениями мощностей, излучаемых в данном направлении, к максимальной излучаемой мощности. Диаграмма направленности в этом случае называется *нормированной диаграммой направленности*. Диаграмму направленности обычно строят в двух плоскостях: горизонтальной и вертикальной. Представляется диаграмма чаще всего в полярных или прямоугольных координатах. Для наглядности иногда пользуются аксонометрическим (объемным) изображением.

На рис. 3.9 показаны все три способа представления нормированной диаграммы направленности вертикального симметричного вибратора. Как видно из рис. 3.9, диаграмма направленности в полярных координатах в вертикальной плоскости имеет вид восьмерки, а в горизонтальной плоскости она имеет форму окружности.

Направленные свойства антенны, т. е. ее способность к неравномерному излучению по разным направлениям, удобно оценивать с помощью таких численных показателей, как ширина диаграммы направленности, коэффициент направленного действия и коэффициент усиления антенны.

Ширина диаграммы направленности — это угол 2θ , в пределах которого мощность электромагнитного поля уменьшается не более чем в 2 раза по сравнению с мощностью, излучаемой в направлении максимального излучения антенны. Диаграммы

направленности, изображенные на рис. 3.9, имеют ширину угла $2\theta = 120^\circ$.

Часто антенны характеризуют диаграммами направленности не излучаемой мощности, а напряженности создаваемого поля. В этом случае границы угла раствора диаграммы направленности соответствуют $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ от напряженности поля в направлении наибольшего излучения (так как мощность пропорциональна квадрату напряженности).

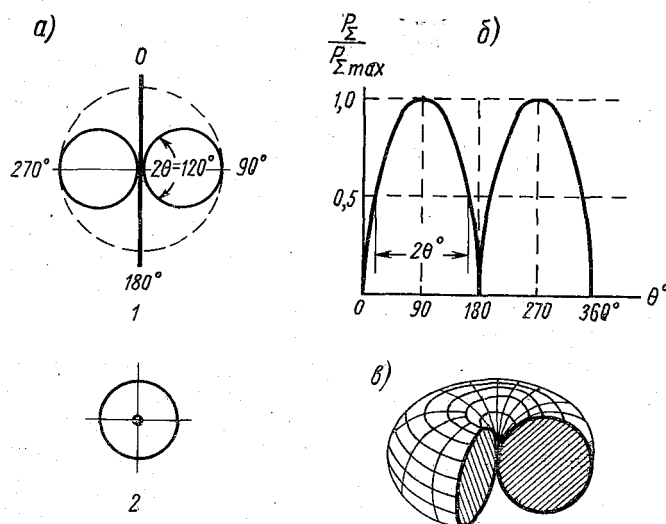


Рис. 3.9. Диаграмма направленности симметричного вибратора.

a — в полярных координатах (1 — в вертикальной плоскости, 2 — в горизонтальной плоскости); *б* — в прямоугольных координатах; *в* — в аксонометрии.

Коэффициентом направленного действия антенны (D) называется отношение плотности потока мощности, излучаемой антенной в направлении ее максимального излучения ($P_{\Sigma \max}$), к плотности потока мощности, которая излучалась бы в любом направлении идеально направленной антенной ($P_{\Sigma \text{ ср}}$). Другими словами, коэффициент направленного действия антенны показывает, во сколько раз нужно увеличить мощность излучения при переходе от направленной антенны к воображаемой ненаправленной (или всенаправленной, т. е. такой, у которой по всем направлениям излучается одинаковая мощность), если требуется поддержать неизменной напряженность поля в точке приема.

Численно коэффициент направленного действия равен

$$D = \frac{P_{\Sigma \max}}{P_{\Sigma \text{cp}}} \quad (3.6)$$

Коэффициентом усиления антенны (G) называется отношение плотности потока мощности, излучаемой реальной антенной в направлении ее максимального излучения ($P_{\Sigma \max}$), к плотности потока мощности, которая излучалась бы в любом направлении воображаемой ненаправленной и не имеющей потерь антенной ($P'_{\Sigma \text{cp}}$) при условии равенства подводимой к ним мощности

$$G = \frac{P_{\Sigma \max}}{P'_{\Sigma \text{cp}}} \quad (3.7)$$

Умножив числитель и знаменатель правой части формулы (3.7) на величину $P_{\Sigma \text{cp}}$, получим

$$G = \frac{P_{\Sigma \max}}{P'_{\Sigma \text{cp}}} \cdot \frac{P_{\Sigma \text{cp}}}{P_{\Sigma \text{cp}}} = \frac{P_{\Sigma \max}}{P_{\Sigma \text{cp}}} \cdot \frac{P_{\Sigma \text{cp}}}{P'_{\Sigma \text{cp}}}.$$

Величина $\frac{P_{\Sigma \max}}{P_{\Sigma \text{cp}}}$, как следует из формулы (3.6), равна коэффициенту направленного действия антенны D . Величину $\frac{P_{\Sigma \text{cp}}}{P'_{\Sigma \text{cp}}}$

можно рассматривать как отношение плотности потока мощности, излучаемой антенной, к плотности потока мощности такой антенны, которая не имеет потерь (что можно представить себе, как антенну, которая излучает всю подводимую к ней мощность). Такое отношение, по определению, данному на стр. 66, называют КПД антенны η_A . С учетом сказанного выражение для коэффициента усиления антенны можно записать в виде

$$G = D \eta_A \quad (3.8)$$

Коэффициент усиления антенны — весьма важная характеристика, учитывающая, с одной стороны, концентрацию энергии в определенном направлении вследствие направленных свойств антенны, а с другой — уменьшение излучения из-за потерь мощности в антенне. Заметим, что коэффициенты D и G часто выражают не в величинах, получаемых в результате деления значений мощностей, а в так называемых децибелах (дБ).

Децибелы — это логарифмические единицы. Их применение очень удобно, так как: 1) умножение и деление чисел заменяется более простыми действиями — сложением и вычитанием; 2) громоздкая запись больших и дробных чисел заменяется более краткой.

Для отношения мощностей пользуются выражением

$$N[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.9)$$

Если отношение мощностей нужно определить через напряжения (при условии равенства сопротивлений, на которых эти мощности выделяются), то пользуются соотношением

$$N[\text{дБ}] = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}. \quad (3.10)$$

Шкалу децибел удобно применять для сравнения мощностей передатчиков или чувствительностей приемников, а также для оценки величин мощностей или напряжений относительно заранее выбранного начального (нулевого) уровня. Обычно за нулевой уровень мощности принимается 1 Вт, 1 мВт или 10 мкВт.

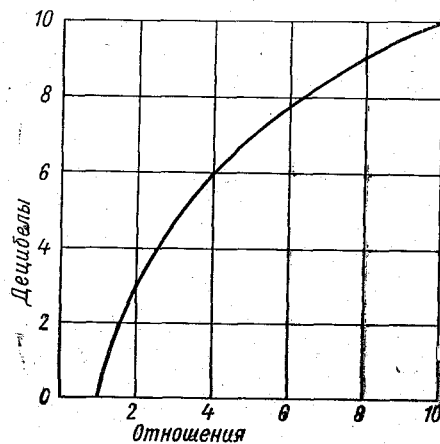


Рис. 3.10. График перевода отношений мощности и напряжений в децибелы.

Для того чтобы при каждом расчете не производить довольно громоздких вычислений логарифмов и антилогарифмов, на практике обычно пользуются графиком (рис. 3.10), выражающим зависимость между отношениями мощностей (или напряжений) и соответствующими им величинами, выраженными в децибелах.

Расчет производится следующим образом. Сначала отношение мощностей представляется в виде произведения коэффициента (меньшего 10) на соответствующий показатель степени у 10. Тогда отношение мощностей в децибелах определяется как сумма децибел, соответствующих коэффициенту (найденному по графику), и децибел, соответствующих показателю степени у 10, умно-

женному на 10 (для мощности) или 20 (для напряжения).

Пример. Выразить в децибелах отношение мощности $P_2=400$ Вт к нулевому уровню ($P_1=P_0=1$ мВт). Выразим отношение мощностей в виде

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{400}{1 \cdot 10^{-3}} = 4 \cdot 10^5.$$

Коэффициенту 4 по графику соответствует 6 дБ, а степень у 10 в данном примере равна 5. Таким образом,

$$N = 6 + 10 \cdot 5 = 56 \text{ дБ}.$$

Если бы требовалось выразить отношение мощностей $\frac{P_1}{P_2}$, то расчет нужно было бы вести так:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{10^{-3}}{400} = \frac{10}{4} \cdot 10^{-4} = 2,5 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициенту 2,5 по графику соответствует 4 дБ, а второе слагаемое равно $10 \cdot (-5) = -50$. Тогда

$$N = 4 - 50 = -46 \text{ дБ}.$$

5. Частотная характеристика антенны — это зависимость тока в антенне от частоты при постоянном по амплитуде напряжении на входных зажимах антенны.

Наилучшей частотной характеристикой антенны в пределах спектра частот, в которых используется антенна, была бы прямая линия. Однако в связи с тем что антенна обладает резонансными свойствами, ее реальная частотная характеристика имеет вид, показанный на рис. 3.11.

6. Действующая высота антенны h_d — это условная величина, связывающая напряженность поля в направлении

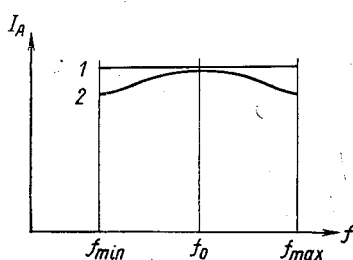


Рис. 3.11. Частотные характеристики антенны.

1 — идеальной; 2 — реальной.

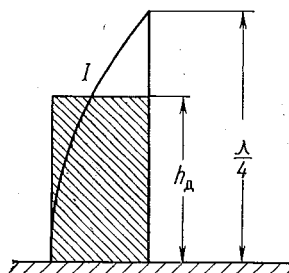


Рис. 3.12. К определению действующей высоты вертикальной антенны.

максимального излучения на расстоянии r от антенны с током на входных зажимах антенны:

$$h_d = \frac{E \lambda r}{60 \pi I_A}, \quad (3.11)$$

где E — напряженность поля в направлении максимального излучения; r — расстояние от антенны; I_A — ток на входных зажимах антенны.

Обычно из формулы (3.11) определяют не значение действующей высоты антенны, а напряженности поля, создаваемого излучением антенны на расстоянии r от нее

$$E = \frac{60 \pi h_d I_A}{\lambda r}. \quad (3.12)$$

Зная h_d и I_A , можно подсчитать E в направлении максимального излучения, а затем по диаграмме направленности определить E в любых других направлениях.

Величину h_d обычно рассчитывают по известным величинам подводимого тока, форме и размерам антенны. Для вертикаль-

ной антенны (рис. 3.12) величина h_d численно равна высоте прямоугольника, площадь которого равна площади, заключенной между кривой распределения тока и проводом антенны. Для увеличения мощности, как следует из формулы (3.12), нужно увеличивать действующую высоту антенны.

При использовании антенны в качестве приемной также следует помнить о действующей высоте и в формулу (3.3) вместо l подставлять значение действующей высоты (или длины)

$$E_A = E h_d.$$

При рассмотрении конкретных типов антенн (§ 3.3) мы укажем способы повышения действующей высоты.

7. Максимальное напряжение в антенне — это наибольшее напряжение излучателя, при котором обеспечивается нормальный режим работы антенны.

Введение этой характеристики обусловлено тем, что увеличение напряжения на излучателе с целью повышения излучаемой мощности не беспредельно. Если напряжение превысит максимальное, то напряженность электрического поля у антенны станет такой, что в воздухе возникнет ионизация и электрический разряд. Эти явления приводят к увеличению потерь энергии и уменьшению КПД антенны, к опасности разрушения антенны, к искажению излучаемых сигналов из-за появления в связи с разрядом дополнительных токов в антенне.

Особенности антенн, работающих в режиме приема. Приемная антенна под действием приходящих электромагнитных волн также становится в определенной степени излучателем. Часть принимаемой энергии она излучает обратно в пространство (вторичное излучение), часть расходуется в виде потерь в самой антенне. Кроме того, на приемную антенну действуют поля многих радиостанций (помехи), одной из форм устранения которых является применение направленных антенн. Эти и другие факторы приводят к тому, что применительно к приемным антеннам ряд выведенных в настоящем параграфе коэффициентов приобретает иной смысл.

Так, под КПД приемной антенны понимают характеристику, показывающую, какая часть принятой энергии передается в приемник. Коэффициент направленного действия приемной антенны показывает, какому увеличению мощности передатчика эквивалентно создаваемое антенной превышение уровня сигнала над уровнем помех (предполагая, что помехи поступают равномерно со всех направлений).

Под диаграммой направленности приемной антенны понимают графическое изображение величин э. д. с., наводимых в антенне, в зависимости от направления.

§ 3.3. АНТЕННЫ РАЗНЫХ ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН

Как мы уже упоминали, диапазон волн оказывает существенное влияние на конструкции радиоэлектронной аппаратуры, в том числе антенн. При этом на каждом диапазоне волн по-разному проявляются те или иные факторы, определяющие габариты,

форму, условия питания и другие характеристики антенных устройств. Поэтому антенны разных диапазонов волн обычно изучаются раздельно.

Антенны метраметровых, километровых и гектометровых волн. К этим волнам относят волны длиной более 100 м. Как мы уже указывали, длина антенны должна быть соизмерима с длиной излучаемой (или принимаемой) волны (полуволновые, четвертьволновые вибраторы). Однако для волн длиной от сотен метров до десятков километров сооружение антенн таких размеров — весьма трудная задача. Поэтому для волн рассматриваемых диапазонов применяются антенны, геометрические размеры которых значительно меньше, чем длины излучаемых ими волн. Для того чтобы добиться максимального излучения, приходится применять специальные методы.

Рассмотрим простейшую антенну, применяемую для волн длиннее 100 м. Это — вертикальный вибратор, для которого мы определяли понятие действующей высоты антенны (см. рис. 3.12).

На практике такая антенна выполняется в виде прикрепленного к мачте провода, который у земли соединяется с одним концом фидерной линии. Другой конец фидерной линии соединяется с землей. Если считать землю идеальным проводником, то получившуюся систему можно рассматривать как полуволновый вибратор, состоящий из двух четвертьволновых вибраторов, один из которых — провод, другой — земля. Однако на практике проводимость земли далека от идеальной, поэтому приходится делать специальное заземление в виде зарываемых в землю металлических проводов или пластин. Получается так называемый *заземленный*, или *несимметричный вибратор*. Длина его собственной волны $\lambda_0 = 4l$, т. е. учетверенной длине находящегося над землей провода. Однако мачту, к которой прикрепляется провод, трудно сделать выше 300 м. Антенна такой высоты позволяет излучать волны не длиннее чем 1000—1200 м. Поэтому для волн длиной 1000 м и более приходится применять так называемое «электрическое» удлинение антенны.

Мы уже знаем, (см. стр. 51), что входное сопротивление разомкнутой на конце длинной линии (при ее длине короче четверти длины волны) имеет емкостный характер. Включим в рассматриваемую антенну катушку индуктивности $L_{удл}$ (рис. 3.13 а). При определенной величине индуктивности емкостное сопротивление антенны скомпенсируется индуктивным сопротивлением катушки. Благодаря этой катушке антенна может

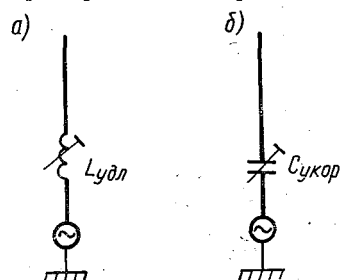


Рис. 3.13. Удлинение (а) и укорачивание (б) электрической длины антенны.

быть настроена на волны, длина которых превышает длину антенны.

На волнах порядка нескольких сотен метров длина собственной волны антенны λ_0 может оказаться больше, чем длина волны генератора λ . В этом случае настройку антенны можно осуществить с помощью конденсатора переменной емкости (рис. 3.13 б), который называется укорачивающим $C_{укор}$. С его помощью антенну можно настроить на волны, длина которых меньше длины антенны. На практике для настройки антенны $L_{удл}$ и $C_{укор}$ часто применяют одновременно: катушку для грубой настройки, конденсатор — для точной.

Применение описанных элементов настройки не изменяет сопротивления излучения антенны, которое зависит только от ее электрической длины. Однако малое сопротивление излучения приводит к тому, что резонансная кривая антенны становится более острой, из-за чего антенна оказывается очень критичной к настройке. Снижается при этом и КПД антенны. Поэтому для увеличения КПД, вместо того чтобы включать удлинительную катушку, часто увеличивают длину антенны и сгибают ее на высоте мачты под прямым углом. Такая Г-образная антенна излучает лучше, чем прямая антенна с удлинительной катушкой, но для нее требуется вторая мачта. Горизонтальная часть Г-образной антенны не излучает, так как вместе с землей образует двухпроводную линию, но зато распределение тока в ней становится таким, что пучность поднимается ближе к верхнему концу излучающего провода (рис. 3.14, 3.15 а).

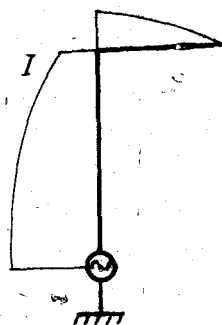


Рис. 3.14. Распределение тока в Г-образной антенне.

Увеличения амплитуды тока на верхнем конце антенны можно также добиться с помощью двух горизонтальных лучей [так называемая Т-образная антенна (рис. 3.15 б)] или многих лучей [так называемая антенна со «звездочкой» (рис. 3.15 в)]. Во всех этих случаях горизонтальные элементы антенн и земля образуют некоторую емкость, благодаря чему амплитуда тока на конце вертикальной антенны уже не равна нулю и распределение тока вдоль излучающего провода становится более равномерным. Площадь тока, а следовательно, и действующая высота антенны увеличивается.

Передающие антенны рассмотренных диапазонов, как видно из рис. 3.15, это довольно сложные конструкции. Следует отметить, что в случае, показанном на рис. 3.15 в, ток течет по самой башне, которая и является излучателем.

КПД рассмотренных антенн колеблется от 10 до 40% в диа-

пазоне километровых волн и от 70 до 80% в диапазоне гектометровых волн.

Рассмотренные антенны могут быть использованы и в качестве приемных. Однако часто приемные антенны выполняют в виде простых вертикальных проводов, иногда с горизонтальной частью. Высоту приемной антенны можно ограничить 20—30 м.

В качестве приемной антенны можно использовать так называемую *рамочную антенну*, обладающую направленным действием. Геометрические размеры рамки обычно значительно меньше длин волн, для работы с которыми предназначена рамочная антенна. Токи в противоположных сторонах рамки, как видно из рис. 3.16 а, имеют противоположное направление, так что диаграмма направленности имеет минимумы в направлениях, перпендикулярных к плоскости рамки, и максимумы в направлениях, совпадающих с плоскостью рамки (рисунок 3.16 б).

Из-за малых геометрических размеров рамочной антенны ее сопротивление излучения и действующая высота незначительны. Поэтому рамочные антенны почти не используются в качестве передающих. В приемной же технике рамочные антенны применяются довольно широко. Направленные свойства рамочной антенны используются для уменьшения влияния помех. С этой целью рамку нужно ориентировать так, чтобы плоскость ее была перпендикулярна к направлению помехи.

Обычно рамочная антенна представляет собой две взаимно перпендикулярные рамки (рис. 3.16 в). Рамки при помощи двух-

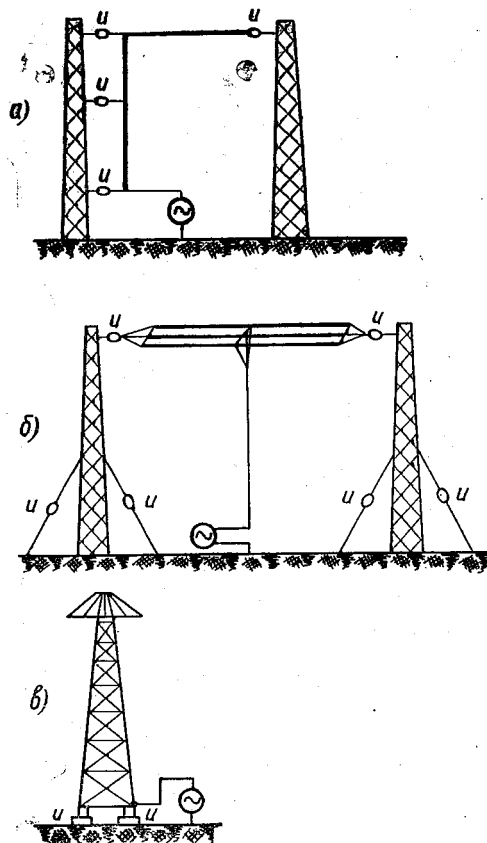


Рис. 3.15. Конструкции антенн с увеличенной действующей высотой (u — изоляторы).
а — Г-образная; б — Т-образная; в — со «звездочкой».

проводного воздушного фидера присоединяются к устройству, называемому *гониометром*. Гониометр имеет три катушки индуктивности: две неподвижные (статорные), расположенные взаимно перпендикулярно, и одну подвижную (роторную). Рамки антенны подключены к статорным катушкам, а концы роторной катушки подведены к входу приемника. Цепь ротора с помощью конденсатора может настраиваться на частоту принимаемой станции.

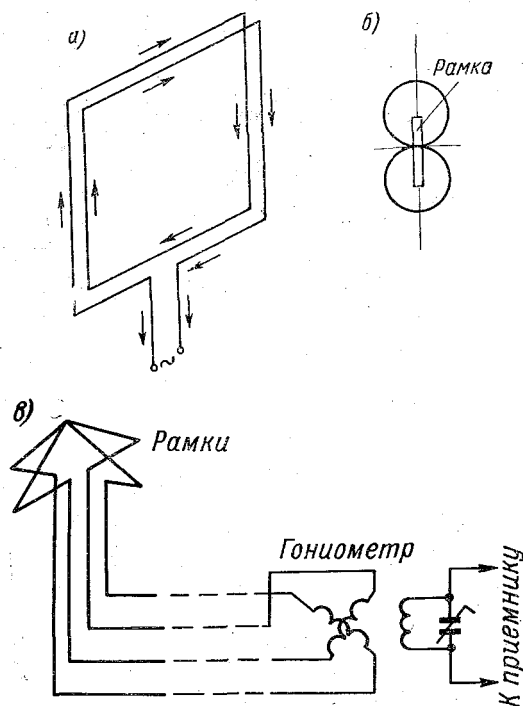


Рис. 3.16. Рамочная антенна.

a — конструктивная схема двухвитковой рамки;
б — диаграмма направленности; *в* — антенна с гониометром.

Использование рамочной антенны наиболее удобно, когда нет места для установки антенны больших габаритов. В то же время уменьшать размеры рамки можно до тех пор, пока еще в ней наводится ток, достаточный для воздействия на входные цепи приемника. В этих случаях выгодно применять одну из разновидностей рамочной антенны направленного действия — так называемую ферритовую антенну. Такая антенна может быть выполнена из цилиндрического стержня из феррита, на который надета однослойная катушка, играющая роль рамки. И хотя

площадь рамки невелика, за счет высокой магнитной проницаемости феррита под действием магнитного поля радиоволны создается сильный магнитный поток.

В заключение отметим, что антенны гектометровых волн и более длинных работают только при вертикальной поляризации волн.

Антенны декаметровых волн. Условия распространения радиоволн таковы, что поляризация волн в декаметровом диапазоне может быть и горизонтальной, и вертикальной. Не обяза-

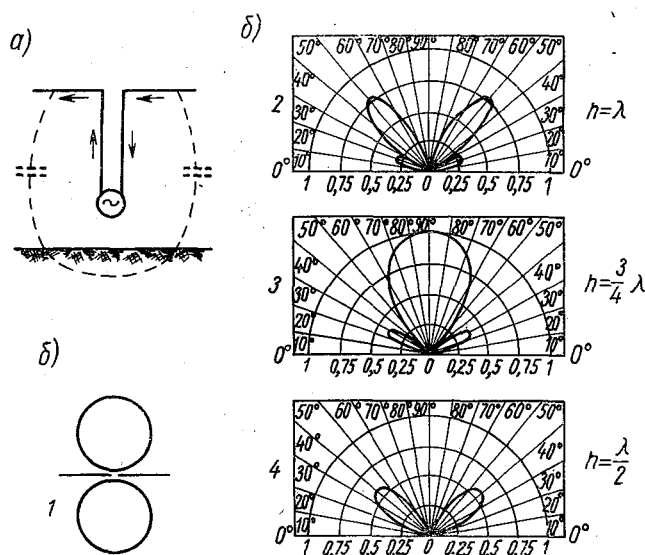


Рис. 3.17. Горизонтальный вибратор.

а) путь замыкания тока; б) диаграмма направленности в разных плоскостях: 1 — в горизонтальной, 2, 3, 4 — в вертикальной при трех высотах подъема вибратора над землей.

тельно согласование с точки зрения поляризации приемной и передающей антенн, хотя опыт эксплуатации показывает, что горизонтальные антенны в этом диапазоне применять выгоднее по следующим причинам:

1) для декаметровых волн проводимость почвы ухудшается, из-за чего возрастают потери в заземлении. Поэтому на этих волнах выгоднее применять симметричные горизонтальные вибраторы.

2) отношение длины антенны к длине волны может быть сделано любым, что позволяет увеличить сопротивление излучения и КПД антенны (до 90—95%).

Наиболее распространенный тип антенны декаметровых волн — горизонтальный полуволновый вибратор. Работа антенны

в нужном диапазоне волн наиболее просто осуществляется при питании вибратора в центре двухпроводным воздушным фидером.

Такой вибратор показан на рис. 3.17 а. Пунктиром показан путь тока, проходящего через провода, землю и распределенные между проводами и землей емкости. На рис. 3.17 б показаны

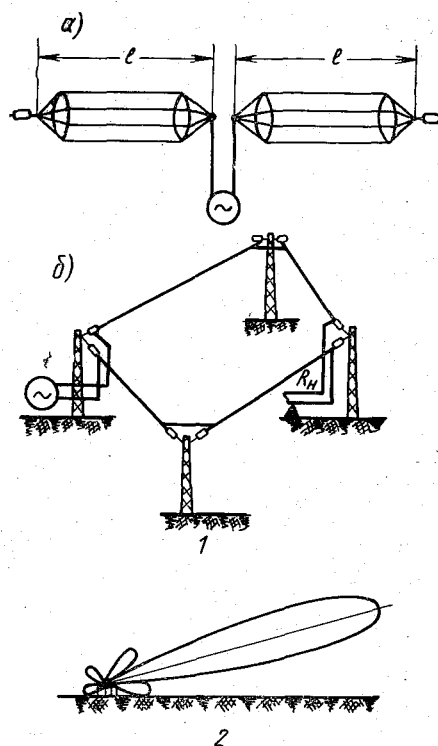


Рис. 3.18. Антенны декаметровых волн. а) диполь Надененко; б) ромбическая антенна: 1 — конструкция (R_n — нагрузка, в качестве которой используется линия из стального провода), 2 — диаграмма направленности в вертикальной плоскости.

Диполь Надененко (рис. 3.18 а) — это вибратор, состоящий из 6—8 проводов, расположенных по образующим цилиндра и конусов. Диаметр цилиндра обычно выбирается равным 0,8—1,5 м, высота подвеса вибратора 15—25 м. Эта конструкция уменьшает волновое сопротивление до 200—250 ом (против 1000 ом для простого вибратора), что приводит к сглаживанию резонансной кривой и делает антенну применимой в некотором диапазоне волн (в пределах $4l > \lambda > 1,5l$, где l — длина плеча

диаграммы направленности симметричного вибратора. В горизонтальной плоскости диаграмма направленности имеет вид восьмерки. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости оказывается искаженной. Это обусловлено тем, что в любую точку пространства приходят две волны: одна непосредственно от антенны, другая — отраженная от земли. Таким образом, в одних точках пространства происходит увеличение энергии, в других — уменьшение, что вызывает изменение формы диаграммы, появление в ней так называемых лепестков. Форма, число и величина лепестков (диаграммы 2, 3, 4) зависят от соотношения длины волны λ и высоты подъема антенны над землей h .

На рис. 3.18 показаны два типа декаметровых антенн, являющихся разновидностями полуволнового горизонтального вибратора.

диполя). Сокращенно диполи Надененко обозначаются буквами ВГД (вибратор горизонтальный, диапазонный).

Ромбическая антенна 1 (рис. 3.18 б) имеет в качестве излучающих элементов провода длиной около 100 м, расположенные в горизонтальной плоскости по сторонам ромба. Высота подвеса антенны 20—30 м. В один из углов антенны включается активное сопротивление, равное волновому сопротивлению ромба, к противоположному углу подключается фидер. Благодаря этим условиям в антенне устанавливается режим бегущей волны и возникают диаграммы направленности каждого провода, дающие общую диаграмму 2. Хорошая направленность при перекрытии диапазона волн от $0,8$ до $2,5 \lambda$ является положительным качеством ромбической антенны.

Простые горизонтальные вибраторы часто используются в качестве элементов более сложных (многовибраторных) антенн, которые обеспечивают остронаправленное излучение и прием. Примером может служить многовибраторная антенна с расстояниями между «этажами», равными половине длины волны.

Если токи во всех вибраторах возбуждаются в фазе, антенна является синфазной, в противном случае — противофазной.

На рис. 3.19 изображена синфазная многовибраторная антенна. Диаграмма ее направленности такова, что энергия концентрируется перпендикулярно к плоскости антенны по обе стороны от нее.

Вибраторы питаются от генератора по двухпроводному фидеру. Синфазное возбуждение вибратора обеспечивается перекрещиванием проводов фидеров.

Чтобы антенна излучала только в одну сторону, сзади нее на расстоянии, равном примерно $0,25 \lambda$, ставят такое же полотно антенны, называемое *рефлектором*.

Антенна бегущей волны — это один горизонтальный медный или биметаллический провод, подвешенный на высоте от 2,5 до 4,5 м над землей. Провод укрепляется на изоляторах и располагается по направлению на передающую радиостанцию. Один конец антенны подводится к клемме приемника «антенна» (клемма приемника «земля» заземляется), а другой конец, обращенный в сторону передатчика, включается на активное сопротивление, равное волновому сопротивлению антенны (обычно

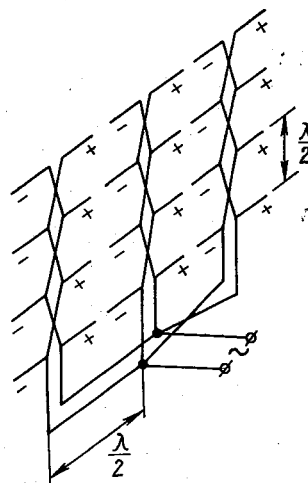


Рис. 3.19. Синфазная многовибраторная антенна.

500 ом). Второй конец этого поглощающего сопротивления подсоединяется к заземлению. Равенство активного сопротивления волновому обеспечивает режим бегущей волны, а описанная конструкция приводит к возникновению диаграммы направленности, представляющей собою довольно узкий лепесток, наклоненный в направлении движения волны. Острота диаграммы и угол наклона лепестка возрастают с увеличением электрической длины провода.

Антенна типа «наклонный луч» — это измененная Г-образная антенна, провод которой натянут под некоторым углом к земле (см. антенну 9 на рис. 3.6). Верхний конец антенного провода изолируется и закрепляется на вершине мачты, нижний конец, укрепляемый с помощью изолятора, является вводным для фидера, идущего к входу приемника. Антенна применяется в тех случаях, когда нет возможности установить высокую мачту для Г-образной антенны.

Антенна бегущей волны и антенна типа «наклонный луч» используются в качестве приемных, когда радиоприемник предназначен для приема излучения всегда от одной и той же радиопередающей станции.

Антенны метровых волн. В диапазоне метровых (и тем более дециметровых и сантиметровых) волн значительно легче сделать размеры антенны соизмеримыми с длиной волны. Поэтому для приема и излучения волн этого диапазона применяется большое количество разнообразных конструкций антенны. Сравнительно небольшие размеры вибраторов дают возможность построить антенны практически с любой диаграммой направленности.

На метровых (и дециметровых) волнах часто применяется шлейф-вибратор (см. рис. 3.7 б). При длине вибратора, равной половине длины волны, токи в обоих параллельных проводах находятся в фазе.

Так же как и одиночный вибратор, шлейф-вибратор имеет диаграмму направленности в виде восьмерки. Для увеличения направленных свойств антенны применяют систему, в которой за вибратором располагается еще один вибратор (так называемый *пассивный рефлектор*), а перед ним еще один или несколько вибраторов, называемых *пассивными директорами*. Питание подводится только к шлейфу-вибратору, и поэтому он называется *активным вибратором*. Такая антенна, носящая название «*волновой канал*», изображена на рис. 3.20 а. При соблюдении размеров, показанных на этом рисунке, антенна обеспечивает однонаправленное излучение и прием.

Принцип действия антенны основан на том, что рефлектор имеет индуктивное сопротивление, а директоры — емкостное, что обеспечивает вторичные излучения пассивных вибраторов; в некоторых точках пространства произойдет сложение и взаим-

ная компенсация их полей, в результате чего сформируется диаграмма направленности в плоскости антенны, изображенная на рис. 3.20 б. При этом чем больше директоров, тем меньше ширина диаграммы направленности.

Антенна типа «волновой канал», изготовленная из медных или латунных трубок, часто применяется для приема телепередач. Иногда вместо рефлектора применяется отражающая металли-

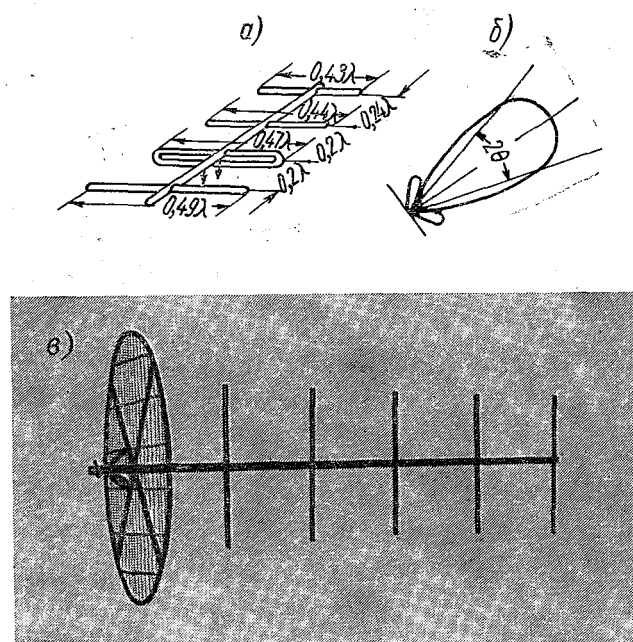


Рис. 3.20. Антенна типа «волновой канал».

a — конструктивная схема; *б* — диаграмма направленности в плоскости вибраторов; *в* — антенна радиотеодолита «Малахит» (рефлектор выполнен в виде металлической сетки).

ческая сетка, как это сделано, например, в антенне радиотеодолита «Малахит», работающего на длине волны 1,5 м (рис. 3.20 в).

Обычно число директоров в антенне бывает от 3 до 7, ширина диаграммы направленности оказывается равной соответственно от 40 до 25°.

Антенны дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн. Дальнейшее уменьшение длины волны приводит к появлению так называемых *поверхностных антенн*, которые в отличие от ранее рассмотренных вибраторных антенн имеют две особенности.

1. Если во всех вибраторных антеннах осуществляется не только преобразование тока высокой частоты в электромагнитные волны, но и концентрация этих волн в определенных направлениях (формирование диаграммы направленности), то в поверхностных антеннах эти функции часто разделены.

Излучение электромагнитных волн осуществляется *облучателем*, а формирование диаграммы направленности обеспечивается *отражателем*, который собственно и является поверхностной антенной.

2. Поверхностные антенны очень близки по своим свойствам к оптическим системам, так как линейные размеры антенны, особенно в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, можно

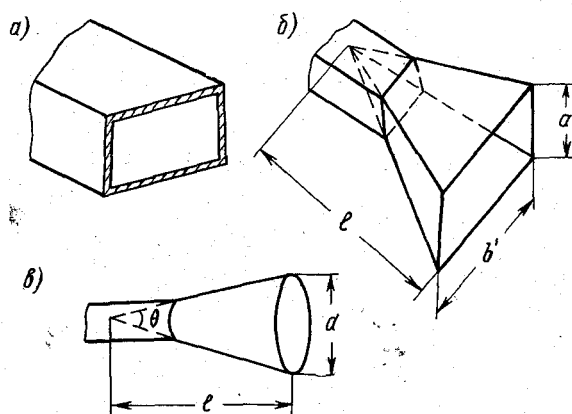


Рис. 3.21. Рупорные антенны.

a — открытый конец волновода; б — пирамидальный рупор; в — конический рупор.

сделать намного больше, чем длина волны. Это позволяет формировать весьма узкие диаграммы направленности.

Рассмотрим несколько типов поверхностных антенн.

Рупорные антенны. Простейшим излучателем служит открытый конец волновода (рис. 3.21 а), излучающей поверхностью которого является так называемый раскрыв антенны. Однако использование конца волновода в качестве излучателя является малоэффективным, вследствие того что в раскрыве происходит огибание излученными волнами краев конца волновода, а это ухудшает направленные свойства антенны. Этот недостаток устраняется присоединением к концу волновода рупора, выполненного в одном из показанных на рис. 3.21 вариантов. Благодаря тому что площадь раскрыва в такой антенне больше площади отверстия волновода, направленность излучателя повышается (раскрыв можно рассматривать как многовибратор-

ную антенну, составленную из большого числа элементарных излучателей, что обеспечивает хорошую направленность). Кроме того, поперечное сечение рупора постепенно увеличивается к концу, это обеспечивает плавный переход волнового сопротивления от волновода к свободному пространству.

Размеры рупоров в зависимости от длины волны λ и необходимого коэффициента усиления G определяются по следующим формулам:

для пирамидального рупора

$$a' = 0,8b', l = 0,3 \frac{(b')^2}{\lambda}, G = \frac{6a'b'}{\lambda^2}; \quad (3.13)$$

для конического рупора

$$l = \frac{0,3 \cos \theta}{1 - \cos \theta} \lambda, d = \frac{0,6 \sin \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta} \lambda, G = 5,1 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2. \quad (3.14)$$

В этих формулах линейные размеры и углы соответствуют указанным на рис. 3.21.

В каждой системе уравнений (3.13) и (3.14) для данной длины волны λ содержится четыре независимые переменные. Задаваясь одной из них (например, необходимым коэффициентом усиления G), можно определить три остальные.

Как самостоятельные рупорные антенны применяются редко. В большинстве случаев они служат облучателями отражательных поверхностей, в качестве которых чаще всего используются параболические отражатели, являющиеся главной частью так называемых параболических антенн.

Параболические антенны. Параболическими антеннами называются такие излучающие устройства, внутри которых электромагнитные волны, создаваемые первичным излучателем (облучателем), при помощи рефлектора изменяют свое направление на обратное. В качестве рефлектора наибольшее распространение получили параболоиды вращения (рис. 3.22). Параболоид обладает тем свойством, что длина пути любого луча от точки O (называемой фокусом) до некоторой плоскости, перпендикулярной к оси параболоида, одинакова. Это приводит к тому, что лучи, отраженные рефлектором (например, лучи OAB , OCD), в плоскости выходного отверстия параболоида имеют одинаковую фазу. Физически это эквивалентно расположению в плоскости выходного отверстия большого числа эле-

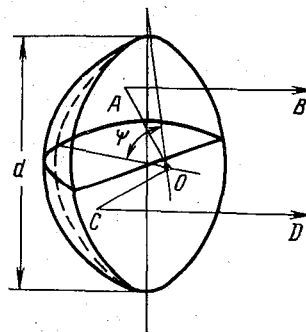


Рис. 3.22. Параболоид вращения.

ментарных синфазных излучателей, образующих синфазную антенну, которая, как уже указывалось, обладает остронаправленным излучением. Для облучения параболических отражателей

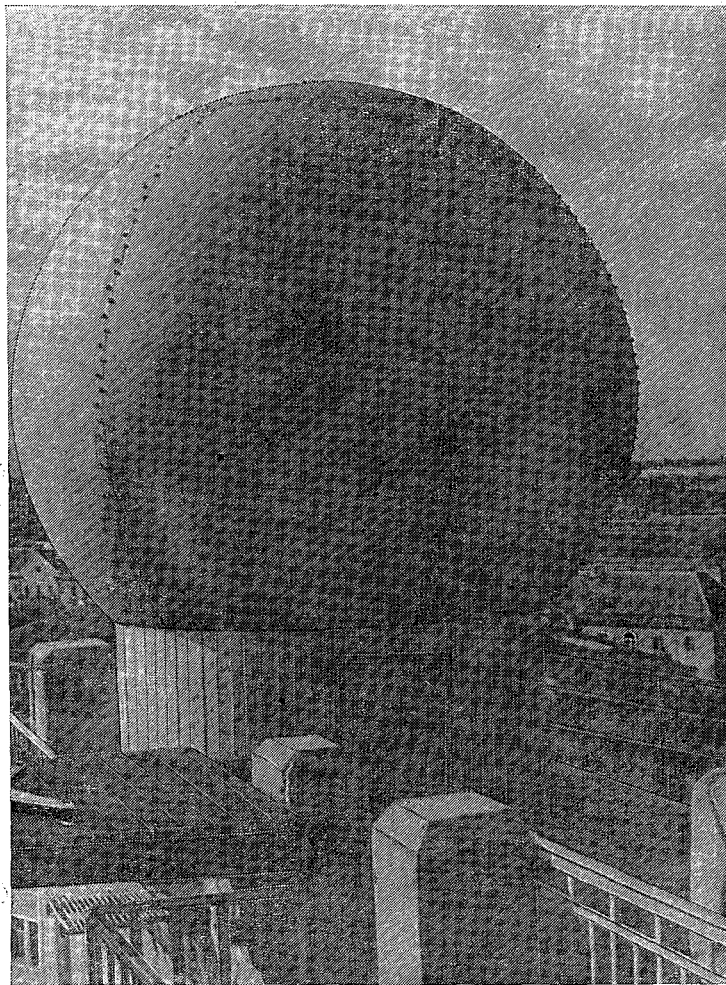


Рис. 3.23. Радиопрозрачное укрытие, защищающее антенну радиолокатора.

применяют чаще всего волноводные, рупорные и вибраторные излучатели, помещаемые в фокусе антенны.

На практике пользуются следующими расчетными формулами, связывающими коэффициент усиления параболической

антенны G и ширину ее диаграммы направленности 2θ с геометрическими размерами антенны:

$$G \approx 1,8\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2; 2\theta [град] \approx 75 \frac{\lambda}{d}, \quad (3.15)$$

где d — диаметр раскрыва антенны при угле раскрыва $\psi \approx 70^\circ$ (именно таким обычно выдерживается угол ψ при конструировании параболических антенн).

Параболические антенны больших размеров испытывают значительную ветровую нагрузку, поэтому часто они снабжаются так называемыми радиопрозрачными укрытиями, которые, кроме снятия ветровой нагрузки, улучшают условия эксплуатации антенны при незначительных ухудшениях таких характеристик антенн, как мощность излучения и диаграмма направленности. Радиопрозрачное укрытие выполняется из стеклопластика (жесткое укрытие) или в виде надувного баллона из специальных тканей (мягкое укрытие).

На рис. 3.23 показано жесткое радиопрозрачное укрытие антенны метеорологического радиолокатора типа МРЛ.

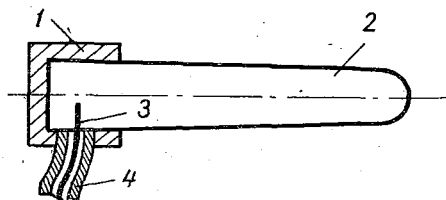


Рис. 3.24. Стержневая антенна.

Стержневые антенны — это один или несколько конусообразных стержней, изготовленных из диэлектрика, обладающего малыми потерями (рис. 3.24). Возбуждение стержня 2 осуществляется с помощью штыря 3, являющегося продолжением внутреннего провода коаксиальной линии 4, питающей антенну. Наружный провод линии соединен с металлическим патроном 1, отражающим волны, возбуждаемые штырем, и обеспечивает, таким образом, излучение вдоль штыря. Направленность излучения в стержневых антеннах достигается за счет изменения скорости распространения электромагнитных волн в диэлектрике, а также отражения и преломления волн на границе раздела двух сред (диэлектрик — воздух).

Подбирая размеры антенны и материал диэлектрика, добиваются нужной диаграммы направленности.

Щелевые антенны — это антенны, в которых излучение и прием электромагнитных волн происходит при помощи одной или нескольких щелей, длиной около $\lambda/2$, прорезанных в волноводе или объемном резонаторе (рис. 3.25).

Спиральная антенна представляет собою проволочную спираль, один конец которой подсоединен к внутреннему проводу питающего фидера (рис. 3.26). Экран фидера соединен с отражателем, имеющим диаметр $0,8 \lambda$.

В зависимости от отношения общей длины витков спирали nL (n — число витков, L — расстояние между двумя соседними витками) к длине волны λ изменяется диаграмма направленности антенны (чем больше отношение nL/λ , тем лучше направленность). Режим бегущей волны достигается при $L/\lambda \approx 1$.

Спиральная антенна является диапазонной антенной, диаграмма ее направленности практически не изменяется при изменении рабочей длины волны в пределах $\pm 25\%$. При этом ширина диаграммы направленности не выходит за пределы 10—20%.

Кроме того, спиральная антенна обеспечивает так называемую *круговую поляризацию* излучаемого поля (вектор напря-

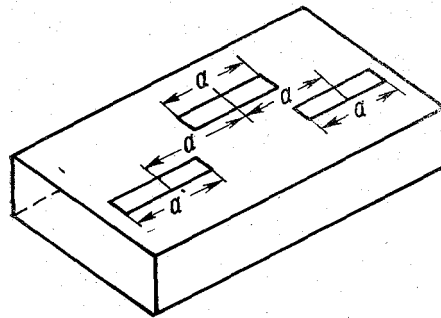


Рис. 3.25. Трехщелевая антенна.
Все размеры a равны примерно $\lambda/2$.

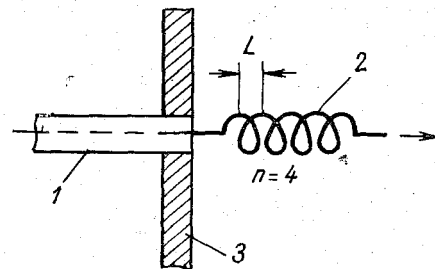


Рис. 3.26. Спиральная антенна.
1 — питающий кабель; 2 — спиральный облучатель; 3 — отражатель.

женности электрического поля за период колебаний изменяет направление на 360°), что обеспечивает независимость качества приема таких сигналов от положения антенны в пространстве.

Часто спиральная антенна выполняется в виде диэлектрической основы, на которую проводящей краской наносятся спиральные проводники.

В заключение отметим, что одни и те же антенны в диапазоне дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн используются и как приемные, и как передающие.

§ 3.4. ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

Основное назначение *фидерных устройств* (*фидерных линий*) — обеспечить передачу высокочастотной энергии от одного радиоэлектронного устройства к другому с минимальными потерями.

В качестве фидеров наиболее часто применяются открытые (воздушные) двухпроводные или четырехпроводные линии, экранированные двухпроводные линии, коаксиальные линии и волноводы. Конструкции перечисленных фидеров показаны на рис. 3.27.

Применение того или иного типа фидерной линии, а также ее конструкция определяется диапазоном рабочих частот и передаваемой мощностью. Двухпроводные, четырехпроводные и коаксиальные линии применяются в диапазоне волн от самых длинных до метровых и частично дециметровых. В диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн из-за потерь энергии в указанных линиях приходится применять главным образом волноводы.

Открытые (воздушные) двухпроводные линии (рис. 3.27 а) состоят из двух параллельных проводов, расстояние между которыми меньше $\lambda/4$. Провода закрепляются на изоляторах. Воздушные двухпроводные линии обладают высоким волновым сопротивлением, равным 400—650 ом, и имеют сравнительно большие потери на излучение. Поэтому в качестве воздушных фиде-

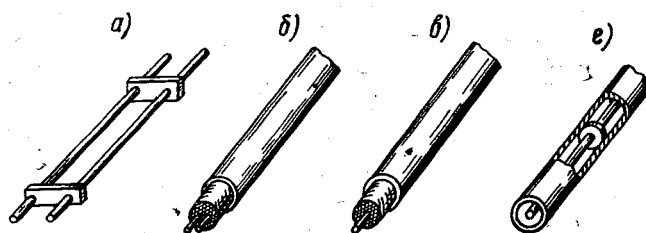


Рис. 3.27. Фидерные линии.

а — открытая (воздушная); б — двухпроводная экранированная;
в — коаксиальная со сплошной изоляцией; г — коаксиальная с воздушной изоляцией.

ров радиопередатчиков часто применяют линии, состоящие из четырех параллельных проводов (четыrehпроводные воздушные линии). Провода линии соединяются попарно в начале, конце и в промежуточных точках вдоль линии. Благодаря такой конструкции волновое сопротивление их уменьшается (обычно равно 208 ом), излучение значительно ослабевает, появляется возможность передавать большие мощности. Это предопределило использование четырехпроводных фидеров на наиболее мощных передающих радиостанциях.

Двухпроводная экранированная линия (рис. 3.27 б) состоит из двух параллельных проводов, расположенных внутри эластичного диэлектрика (чаще всего полиэтилена). Снаружи диэлектрик покрыт выполняющей роль экрана оплеткой из тонких медных проволочек. Для предохранения от повреждений экран защищен внешней оболочкой из хлорвинила, резины или другого эластичного изоляционного материала. Такие линии имеют волновое сопротивление 200 ом и применяются в диапазоне метровых и дециметровых волн.

Коаксиальная линия (или кабельная линия) представляет собой внутренний провод, заключенный в металлический экран,

играющий роль второго (внешнего) провода. Между этими проводами имеется изоляция в виде сплошного эластичного наполнителя (рис. 3.27 *в*) или в виде керамических шайб (рис. 3.27 *г*). Для улучшения электрических свойств кабеля внутренний провод делается многопроволочным (из медной отожженной и посеребренной проволоки). Коаксиальные линии имеют волновое сопротивление от 40 до 150 *ом*. Внешним проводом обычно является оплетка из медной луженой или посеребренной проволоки или медная лента.

Ввиду того что сопротивление изоляции у кабелей на рис. 3.27 *в* больше, они применяются для передачи энергии от передатчика к антенне. Кабели же с меньшим сопротивлением изоляции (рис. 3.27 *г*) применяются для связи приемной антенны с приемником.

Кабельные линии обладают существенными преимуществами перед воздушными: они лучше защищены от атмосферных влияний, более надежны в эксплуатации и не излучают энергии в пространство.

Волноводы. Мы уже рассматривали способы возбуждения и отвода энергии от объемных резонаторов (§ 2.5). Такие же способы применяются и при использовании в качестве фидерных линий *волноводов*. Волноводы сохраняют все преимущества экранированных кабельных линий, довольно просты в конструктивном отношении, однако имеют и недостатки, выражающиеся в наличии так называемой *критической волны*, длиннее которой волны в волноводе распространяться не могут.

Значение критической длины волны $\lambda_{кр}$ с достаточной точностью определяется по формулам:

для прямоугольного волновода

$$\lambda_{кр} = 2a;$$

для круглого волновода

$$\lambda_{кр} = 2,61R$$

где a — длина широкой стороны прямоугольного волновода; R — радиус внутреннего диаметра круглого волновода.

Следует отметить, что применение волноводных фидерных линий встречает ряд конструктивных трудностей: необходимость изготовления сложных переходов, ответвлений, так называемых вращающихся сочленений и т. д. Однако простота выполнения самих волноводов сделала их незаменимыми в радиолокационной технике.

Согласование фидерной линии с антенной. Рассматривая все типы фидерных линий, следует помнить, что передача энергии вдоль любой линии происходит не внутри проводящих материалов (проводов, оплеток, стенок), а в пространстве, их окружаю-

щем. Носителем энергии является поле. Провода в данном случае выполняют только роль направляющих «рельсов».

Как известно, максимальная передача энергии по линии происходит в режиме бегущей волны, а этот режим осуществим тогда, когда *фидерная линия согласована с нагрузкой*, т. е. сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии. Мы знаем также, что нагрузкой для фидерной линии является антенна. Однако не часто встречаются случаи, когда входное сопротивление антенны в точности равно волновому сопротивлению линии, поэтому приходится применять довольно большое число различных согласующих устройств. Одно из простейших устройств такого типа — четвертьволновой согласующий трансформатор, представляющий собой отрезок линии длиной $\frac{\lambda}{4}$, включаемый между основным фидером и нагрузкой (рис. 3.28 а).

Волна, приходящая от генератора к точкам а и б, частично отражается обратно, а частично движется через согласующий трансформатор к нагрузке R_n . От нагрузки эта волна отражается и возвращается к точкам а и б.

По сравнению с волной, отраженной от точек а и б вначале, волна, отраженная от R_n , проходит дополнительное расстояние до нагрузки и обратно, т. е. $(\lambda/4)2 = \lambda/2$. Из-за этого две отраженные волны сдвигаются по фазе на 180° . Если амплитуды этих отраженных волн равны между собой, то произойдет их взаимная компенсация и вдоль основного фидера будут распространяться только бегущие волны.

Другой распространенный вид согласования — применение так называемой *Δ-образной схемы* (рис. 3.27 б). Размеры X и D определяются по расчетным формулам (при согласовании полуволнового вибратора с линией, имеющей волновое сопротивление порядка 600 ом):

$$D [см] = \frac{2040}{f [Мгц]};$$

для антенн декаметровых волн

$$X [см] = \frac{1800}{f [Мгц]};$$

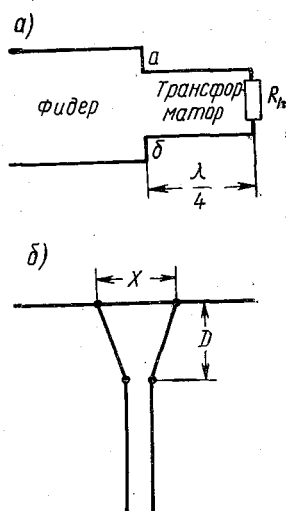


Рис. 3.28. Согласование фидерной линии с антенной.

а — с помощью четвертьволнового трансформатора;
б — с помощью Δ-образной схемы.

для антенн метровых и более коротких волн

$$X [\text{см}] = \frac{1350}{f [\text{Мгц}]}.$$

Физический смысл согласования с помощью Δ -образной схемы заключается в том, что осуществляется плавный переход от волнового сопротивления линии к волновому сопротивлению антенны.

Помимо согласования антенны и линии в части волновых сопротивлений на метровых и более коротких волнах, часто приходится производить так называемое *симметрирование*. Дело в том, что антенны в этих диапазонах, как правило, являются симметричными, а питаются они с помощью коаксиального кабеля, не являющегося симметричным.

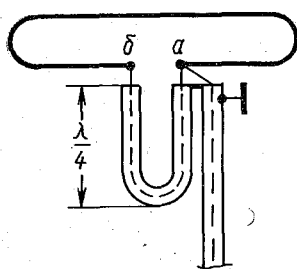


Рис. 3.29. Симметрирующее U-колесо.

При этом даже при равенстве волновых сопротивлений антенны и кабеля по оплетке кабеля течет уравнивающий ток, вызывающий вредное излучение, приводящее к потере мощности и искажающее диаграмму направленности. Устройства, исключающие эти недостатки, называются *симметрирующими*.

В качестве примера симметрирующего устройства рассмотрим так называемое U-колесо (рис. 3.29), представляющее собой полуволновый шлейф, выполненный из того же кабеля, что и питающая линия. Оплетки линии питания и шлейфа соединены. Благодаря тому что фазы тока в точках *а* и *б* оказываются противоположными (так как до точки *а* ток проходит дополнительное расстояние $\lambda/2$), питание вибратора оказывается симметричным.

Основные выводы

1. Антенно-фидерное устройство, представляющее собой совокупность антенны и линии передачи, предназначено для обеспечения излучения вырабатываемой радиопередатчиком или улавливания приемником энергии электромагнитных колебаний. Для удобства расчетов и объяснения физических процессов, происходящих в антенне, последнюю обычно представляют в виде открытого колебательного контура.

2. Электромагнитное поле, называемое полем излучения, представляет собой бегущие волны, подобные бегущим волнам тока и напряжения в двухпроводной линии. Количественно электромагнитное поле определяется напряженностью электрического поля *Е* и напряженностью магнитного поля *Н*. Числен-

ное значение вектора $\mathbf{S} = \mathbf{E}\mathbf{H}$, называемого вектором Умова-Пойнтинга, равно мощности потока электромагнитной энергии, проходящего через единицу площади, а его направление показывает направление распространения электромагнитной энергии.

3. Диапазон волн оказывает существенное влияние на конструкцию антенн. Для волн, длиннее 100 м, наиболее применимы вертикальные антенны, для декаметровых и метровых волн чаще всего используются горизонтальные вибраторы. Для более коротких волн применяют поверхностные антенны, близкие по своим свойствам к оптическим системам и имеющие, как правило, конструктивно разделенные облучатель и отражатель.

4. В качестве фидеров в зависимости от диапазона волн используются открытые (воздушные) двухпроводные или четырехпроводные линии, экранированные двухпроводные линии, коаксиальные линии и волноводы. Для обеспечения максимальной передачи энергии по линии необходимо обеспечить равенство волнового сопротивления линии сопротивлению нагрузки (антенны). Для этой цели применяются различные согласующие устройства.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Поясните процесс возникновения свободных и вынужденных колебаний в открытом колебательном контуре.
2. Как происходит излучение электромагнитных волн в пространство?
3. Поясните физический смысл распространения электромагнитного поля.
4. Что такое горизонтально и вертикально поляризованные радиоволны?
5. Приведите примеры симметричных и несимметричных антенн.
6. Что такое мощность излучения антенны? Определите P_{Σ} для заземленного вибратора, имеющего высоту 100 м и излучающего волны длиной 83 м.
7. Определите КПД антенны, имеющей параметры $R_A = 150 \text{ ом}$, $I_A = 1 \text{ а}$, $P_{\Sigma} = 200 \text{ вт}$.
8. Определите коэффициент усиления антенны, имеющей $\eta_A = 0,65$, $D = 10^3$. Выразите G и D в децибелах.
9. Какой угол принимается за ширину диаграммы направленности?
10. Что такое действующая высота антенны?
11. Приведите примеры антенн, применяемых в диапазоне километровых и гектометровых радиоволн.
12. Какими способами добиваются электрического удлинения и укорочения антенн?
13. Приведите примеры антенн декаметровых волн.
14. Опишите принцип действия антенны типа «волновой канал».
15. Какие антенны называются поверхностными?
16. Рассчитайте размеры пирамидальной рупорной антенны (рис. 3.21 б), с коэффициентом усиления, равным 30, предназначенной для излучения волн длиной 3 см.

17. Рассчитайте ширину диаграммы направленности параболической антенны, имеющей угол раскрыва 70° , диаметр раскрыва 2,5 м и работающей на волне 10 см.

18. Опишите устройство и принцип действия стержневых, щелевых и спиральных антенн.

19. Перечислите основные типы фидерных линий и их свойства и поясните их конструктивное исполнение.

20. Опишите способы согласования фидерной линии с антенной.

21. Изобразите схему и дайте пояснения симметрирования шлейфа-вибратора с помощью U-колена.

ГЛАВА 4

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

§ 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

Законы распространения радиоволн. Распространению радиоволн, как и всем иным электромагнитным колебаниям, включая световые, свойственны следующие общие законы.

1. Закон прямолинейного распространения в однородной среде, т. е. в такой среде, в любой точке которой свойства одинаковы.

2. Закон рефракции. Если радиоволны распространяются в неоднородной среде, т. е. в такой среде, свойства которой изменяются от точки к точке, то траектория их распространения становится криволинейной, причем кривизна тем больше, чем резче изменяются свойства среды. Закон рефракции проявляется в основном в дециметровом и сантиметровом диапазонах.

3. Законы отражения и преломления. Согласно этим законам, при переходе из одной среды в другую радиоволны претерпевают отражение и преломление. При этом угол падения равен углу отражения, а углы падения и преломления связаны известным из оптики законом синусов

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2. \quad (4.1)$$

где n_1, n_2 — коэффициенты преломления сред; φ_1, φ_2 — углы, образованные лучом и нормалью в точке падения.

Коэффициент преломления равен отношению скорости света к скорости распространения электромагнитных волн в данной среде. Если при переходе из более плотной среды в менее плотную угол падения превысит некоторый *критический угол*, то луч во вторую среду не проникнет, а полностью отразится от границы раздела сред. Это явление называется *полным внутренним отражением*.

4. Закон дифракции, заключающийся в огибании радиоволнами препятствий (непрозрачных для них тел), находящихся на их пути. Дифракции практически нет, если размеры препятствий намного больше длины волны. Если же геометрические

размеры препятствий соизмеримы с длиной волны, дифракция проявляется особенно заметно. Явление дифракции обусловлено тем, что объект, на который попадают радиоволны, становится источником вторичного излучения, огибающего препятствие.

5. Закон интерференции, проявляющийся в том, что распространяющиеся в пространстве волны с одинаковыми периодами либо складываются, либо вычитаются. В результате интерференции волн в различных точках пространства получается увеличение или уменьшение амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения фаз складывающихся волн.

В зависимости от конкретных условий распространение радиоволн происходит либо у поверхности земли (*поверхностное распространение*, обусловленное интерференцией и дифракцией радиоволн), либо в результате однократного или многократного отражения от атмосферных слоев (*пространственное распространение*, связанное с формированием радиолуча в верхних слоях атмосферы за счет преломления и отражения радиоволн от ионосферы). В первом случае радиоволны называются *поверхностными* (или *земными*), во втором — *пространственными*.

Идеальная радиопередача. Представим себе, что существует неограниченное свободное пространство с однородными свойствами и в одной из точек такого пространства помещена антенна, излучающая радиоволны одинаково по всем направлениям. Мощность излучения примем равной P_{Σ} . В другой точке этого пространства, отстоящей от излучателя на расстоянии r , находится приемная антенна. Воздействие радиоволн на приемную антенну будем оценивать величиной напряженности электрического поля E в точке приема. Приблизительно E вычисляется по формуле

$$E \approx 5,5 \frac{\sqrt{P_{\Sigma}}}{r}. \quad (4.2)$$

Можно представить себе и другой случай, когда передающая и приемная антенны расположены в так называемом полупространстве, находящемся над идеально проводящей плоскостью. В этом случае волны, падающие на эту плоскость, снова отражаются в полупространство, напряженность поля в отдельных точках увеличивается и может быть определена по формуле

$$E \approx 7,75 \frac{\sqrt{P_{\Sigma}}}{r}. \quad (4.3)$$

Формулы (4.2) и (4.3) называются *формулами идеальной радиопередачи*. Из этих формул следует, что в условиях идеальной радиопередачи (т. е. в условиях неограниченного свободного пространства или полупространства) напряженность поля в точке приема не зависит от длины волны. Однако в реальном

пространстве, окружающем Землю, волны разной длины распространяются по-разному.

Это объясняется тем, что мощность излучения $P_{\text{з}}$ реальных антенн зависит от длины волны (см. § 3.2) и кроме того, Земля и окружающее ее пространство отличаются от идеального пространства. Основные отличия заключаются в следующем:

1) атмосфера не является однородной; 2) земная поверхность не плоская, проводимость ее разных участков неодинакова.

Эти отличия не позволяют во всех случаях пользоваться формулами (4.2) и (4.3), так как на самом деле напряженность поля в точке приема зависит не только от мощности излучения, но и от длины волны.

Влияние атмосферы на распространение радиоволн. Разделение волн на диапазоны, описанные в главе 1, в большой степени определено особенностями их распространения. Рассмотрим, какое влияние на распространение радиоволн оказывают свойства реальной земной атмосферы и поверхности земли.

Знания о составе и строении атмосферы основаны как на прямых методах изучения атмосферы (радиозонды, ракеты, спутники, ионосферные станции), так и на косвенных (наблюдения за полярными сияниями, свечением ночного неба, полетами метеоритов и др.). Указанными методами получены определенные данные, позволившие представить структуру земной атмосферы так, как показано на рис. 4.1.

До высоты 100 км атмосфера состоит в основном из молекул кислорода и азота, состав ее меняется из-за постоянного перемешивания воздушными течениями.

Нижний слой атмосферы называется *тропосферой*, ее верхняя граница проходит на высоте примерно 16—17 км. Далее до высоты примерно 60 км простирается слой, называемый *стратосферой*.

Начиная с высоты примерно 70 км и до уровня в несколько сотен километров находится *ионосфера*. На высоте более 100 км воздушных течений практически нет постоянного перемешивания не происходит; это позволило выделить в ионосфере несколько слоев.

В тропосфере возникают метеорологические явления (образование облаков, образование и выпадение осадков, ветры, интенсивные воздушные течения). Состояние атмосферы характеризуется, как известно из общих курсов метеорологии, в основном давлением воздуха, температурой и влажностью.

В тропосфере с ростом высоты давление, содержание влаги и температура уменьшаются. Все это приводит к тому, что в тропосфере коэффициент преломления изменяется с высотой. Его изменение не влияет на распространение волн длиной несколько метров и более. Траектории же более коротких волн заметно искривляются с изменением коэффициента преломления.

около 90 км (уже в ионосфере).

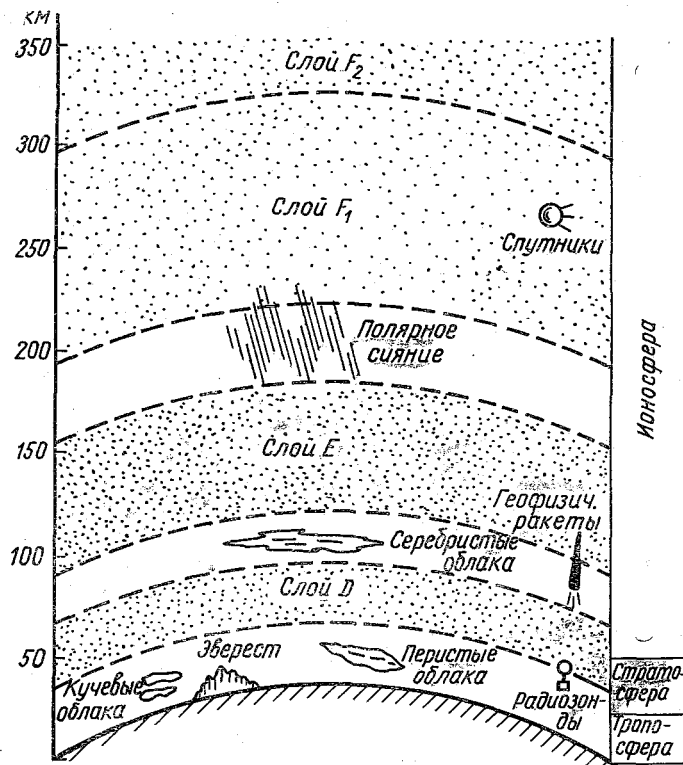


Рис. 4.1. Схематический разрез земной атмосферы.

Ионосфера находится под непрерывным воздействием солнечного и космического излучений, следствием чего является ионизация содержащихся на этих высотах атомов газов. Степень ионизации принято характеризовать *плотностью электронного заряда N* , равной количеству свободных электронов в 1 см^3 ($\text{эл}/\text{см}^3$).

На рис. 4.2 показано распределение температуры и плотности электронного заряда по высоте.

Сложные сочетания таких факторов, как наличие или отсутствие освещенности Солнцем (день или ночь), зимнее или летнее время, наличие или отсутствие космического излучения, характе-

ристика солнечной активности¹ и др., обусловили следующие особенности отдельных слоев ионосферы, называемых слоями D , E , F_1 и F_2 (см. рис. 4.1).

Слой D возникает только летом и существует днем. Ночью он распадается из-за рекомбинации электронов с ионами. Примерные границы высот его существования.— от 50 до 80 км.

Слой E является наиболее устойчивым по отношению к суточным и годовым условиям ионизации. Он существует зимой и летом, днем и ночью, высоты его границ почти не изменяются: нижняя граница располагается на высотах 100—120 км, верхняя—на высотах 150—160 км. В этот слой часто попадают метеоры, которые, сталкиваясь с молекулами газа, испаряются,

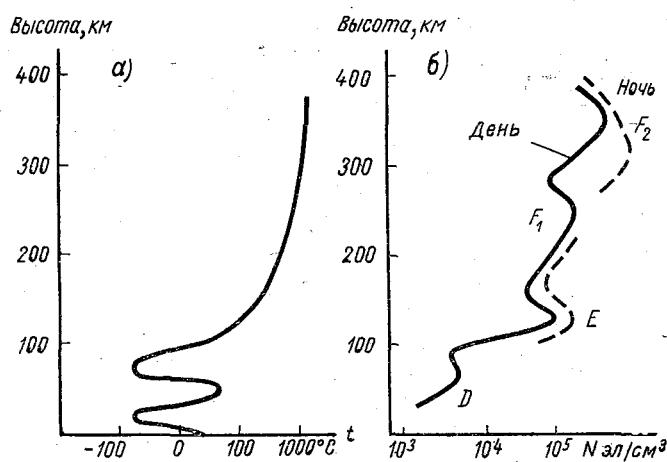


Рис. 4.2. Распределение температуры (а) и плотности электронов (б) в атмосфере.

оставляя за собой ионизированный «след», существующий после столкновения несколько секунд.

Слой F_2 подвергается более сильным дневным и годовым изменениям. Зимой в дневное время он имеет наибольшую концентрацию электронов, нижняя граница его расположена на высоте 220—240 км. Ночью концентрация электронов уменьшается и нижняя граница слоя поднимается до 300—325 км.

Летом суточные изменения концентрации электронов в слое F_2 умереннее, чем зимой. Однако в дневное время летом из слоя F_2 выделяется слой F_1 , простирающийся в пределах высот 200—300 км. С заходом Солнца слой F_1 сливается со слоем F_2 , а зимой он не существует вообще.

¹ Через 11 лет солнечная активность достигает максимума, в это же время концентрация электронов максимальна.

Последние исследования, проведенные с помощью ракет и искусственных спутников, позволили установить, что резкого разделения между слоями ионосферы не существует, они плавно переходят один в другой и имеют несколько максимумов в распределении концентрации электронов по высоте.

Кроме указанных регулярных изменений состояния ионосферы, в ней бывают и нерегулярные изменения — так называемые ионосферные бури. Эти бури возникают под действием солнечного излучения, частицы которого устремляются к магнитным полюсам Земли и вызывают полярные сияния, влияющие на распространение радиоволн.

Рассмотрим подробнее влияние ионосферы на распространение радиоволн, т. е. физические процессы, приводящие к образованию пространственных волн.

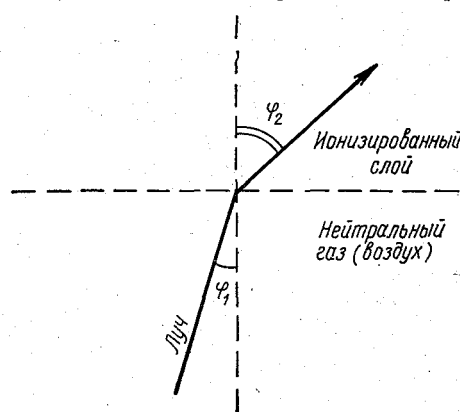


Рис. 4.3. Преломление радиоволн на границе двух сред.

Электрическое поле, создаваемое радиоволнами, приводит в движение свободные электроны ионосферы. Электромагнитное поле, вызываемое этими электронами, взаимодействует с полем радиоволн, изменяя направление их распространения.

Так как плотность слоев ионизированного газа больше, чем плотность слоев нейтрального газа (т. е. обычного воздуха), то угол преломления радиоволн на границе этих слоев больше угла

падения. Сказанное поясняется рис. 4.3, из которого видно, что в ионизированном слое лучи радиоволн идут более полого, чем в нижнем слое атмосферы. Чем выше степень ионизации и чем ниже частота радиоволн, тем меньше проникаемость ионосферы, что приводит к увеличению угла преломления.

В теории распространения радиоволн выведена следующая приближенная формула для коэффициента преломления на границе двух любых сред:

$$n = \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} \approx \sqrt{1 - 80,8 \frac{N}{f^2}}, \quad (4.4)$$

где N — степень ионизации в эл/см³; f — частота радиоволн в килогерцах.

Из этой формулы следует несколько важных выводов: 1) при очень малой степени ионизации ($N \rightarrow 0$) преломления практически нет; 2) длинные волны (малые значения f) преломляются

более сильно, чем короткие; 3) очень короткие волны (большие значения f) вообще не испытывают преломления при любой практически достижимой степени ионизации; 4) при некотором значении частоты f коэффициент преломления n может оказаться равным нулю. Это означает, что радиоволна полностью отразится вниз к земной поверхности. Частота, соответствующая этому, называется *критической частотой ионизированного слоя* $f_{кр}$.

Мы уже отмечали, что степень ионизации слоев ионосферы различна, она имеет максимум. Условно считая, что ионосфера состоит из большого количества тонких «оболочек», степень ионизации которых постепенно возрастает, мы можем предста-

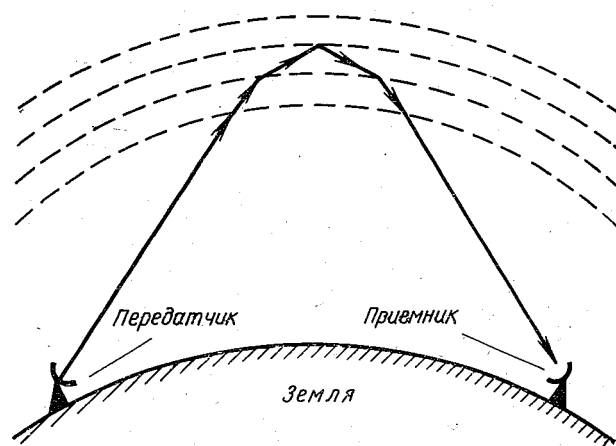


Рис. 4.4. Поворот радиоволны к Земле в результате многократного преломления в ионосфере.

вить себе картину поворота радиоволн к Земле (рис. 4.4). При переходе от оболочки к оболочке радиоволна постепенно преломляется, ее траектория становится все более полой и, наконец, полностью отразившись от какой-то оболочки, возвращается на Землю. Если же ионизация ионосферы окажется недостаточной для поворота радиоволны, то она уйдет в космическое пространство, претерпев только некоторый излом в ионосфере. Кроме искривления пути радиоволн, в ионосфере происходит уменьшение их энергии за счет того, что часть ее расходуется на нагревание газа ионосферы. В результате этого ослабляется напряженность поля радиоволн. Это уменьшение энергии тем сильнее, чем больше степень ионизации и плотность газа. Обычно слой F_2 оказывается отражающим, а слои E и D — поглощающими.

В результате исследований, проведенных с помощью ракет и спутников, были открыты *радиационные пояса Земли* — об-

ласти пространства, содержащие заряженные частицы, которые движутся с большой скоростью. Существуют два пояса, расположение которых в околоземном пространстве схематически изображено на рис. 4.5.

На распространение радиоволн вблизи Земли радиационные пояса не влияют, однако на радиосвязь между Землей и космическими кораблями, находящимися выше радиационных поясов, их влияние обнаружено.

Влияние земной поверхности на распространение радиоволн. Как известно, планета Земля является почти шарообразным телом с радиусом около 6400 км и длиной большого круга (по экватору) около 40 000 км. Поэтому земную поверхность можно считать плоской только для двух точек, находящихся на неболь-

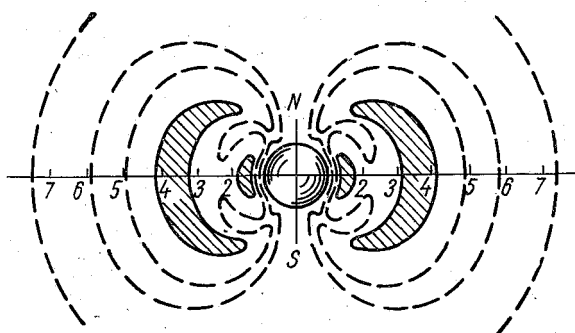


Рис. 4.5. Радиационные пояса Земли.

Расстояния указаны в масштабе радиусов Земли, пунктиром показаны силовые линии магнитного поля Земли.

шом расстоянии друг от друга. При расстоянии в несколько десятков километров пренебрегать кривизной Земли уже нельзя.

Если передатчик и приемник расположить на расстоянии около 250 км друг от друга (рис. 4.6), то высота выпуклости, являющейся сегментом земного шара, будет больше 1000 м и волны из одной точки пространства в другую прямолинейно распространяться не будут. Кроме того, поверхность Земли не гладкая (имеются горы, холмы, леса, впадины, водоемы и т. п.), что еще больше усложняет возможность прямолинейной радиосвязи. Волны, распространяющиеся вдоль поверхности Земли и огибающие ее выпуклость, на своем пути встречают различные препятствия. Если размеры этих препятствий соизмеримы с длиной волны, то волны не преодолевают их, если же размеры препятствий меньше, чем длина волны, то неровности не являются преградой для распространения радиоволн.

На распространение волн влияют и электрические свойства земной поверхности, к которым относят ее диэлектрическую

проницаемость и удельную проводимость. Так как диэлектрическая проницаемость зависит от частоты, то поверхностный слой почвы неодинаково влияет на волны разных частот. Если для сравнительно длинных волн Землю можно рассматривать как хорошо проводящую поверхность, то для коротких волн Земля является диэлектриком.

Величина удельной проводимости увеличивается с увеличением влажности почвы, так что наличие влажной почвы благоприятно для распространения радиоволн.

Рассмотрим физические процессы, приводящие к появлению поверхностных (земных) волн.

Чем длиннее волна, тем более крупные препятствия она способна огибать. Радиоволны намного длиннее световых, поэтому их дифракция проявляется сильнее. Особенно хорошо огибаются препятствия длинными радиоволнами, на которых возможна связь между пунктами, разделенными преградами, к которым

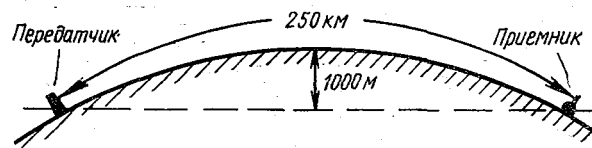


Рис. 4.6. Влияние выпуклости земного шара на распространение радиоволн.

относится и выпуклость Земли. Однако в реальных условиях даже на самых длинных волнах при очень больших мощностях передатчика дальность связи не превышает, как показывают расчеты и практика, 3—4 тыс. км. Поэтому дальняя связь на любых волнах возможна при использовании и земных, и пространственных волн.

Земные волны распространяются по границе воздух—Земля. Поле радиоволн перемещается частично в Земле, создавая в ней токи проводимости и смещения, причем часть энергии расходуется на нагрев почвы. Чем хуже электрические параметры почвы (малая удельная проводимость и большая диэлектрическая проницаемость) и чем короче волна, тем больше потери энергии в почве. Наилучшей в этом смысле поверхностью является поверхность океана, над которой и выгоднее всего осуществлять дальнюю связь на поверхностных волнах.

§ 4.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ МИРИАМЕТРОВЫХ, КИЛОМЕТРОВЫХ И ГЕКТОМЕТРОВЫХ ВОЛН

Волны длиной более 1000 м (частоты ниже 300 кГц). Главная особенность волн этого диапазона заключается, как было указано выше, в том, что они обладают дифракцией, т. е. спо-

способностью огибать препятствия. Однако дальняя связь в этом диапазоне осуществляется все-таки с помощью пространственных волн.

Распространение мириаметровых и километровых волн происходит в результате последовательных отражений от поверхности Земли и нижних границ ионизированных слоев *D* (днем) и *E* (ночью). Благодаря высокой степени ионизации этих слоев отражение радиоволн от них происходит практически при любом угле падения, даже при вертикальном. От земной поверхности радиоволны также отражаются при всяком угле падения, так как водная поверхность океанов и морей, влажная почва оказываются почти идеальными проводниками для этих волн.

Процесс последовательного отражения подобен распространению волн в огромном волноводе, стенками которого являются земная поверхность и ионосфера (рис. 4.7).

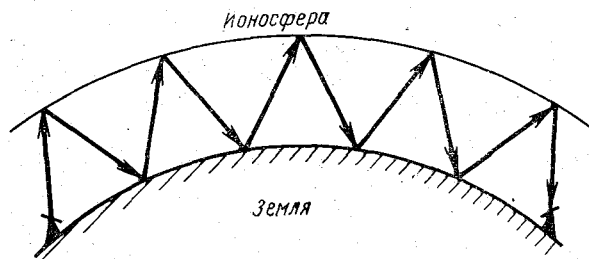


Рис. 4.7. Распространение пространственных волн.

Связь на мириаметровых и километровых волнах (называемая иногда *длинноволновой* связью) оказывается очень выгодной для дальних расстояний, так как влияние на распространение волн времени года и суток, а также 11-летнего периода солнечной активности незначительно. Это объясняется тем, что ионосферный слой *E* очень устойчив, а именно он и является главным «отражателем» волн рассматриваемого диапазона. Длинноволновую связь используют радиостанции, передающие сигналы точного времени, а также метеорологическую информацию (сводки, прогнозы погоды).

Недостатком длинноволновой связи является необходимость сооружения мощных передатчиков (до тысячи киловатт), поскольку энергия этих волн очень сильно поглощается, кроме того при использовании этой связи на приемные устройства оказывают влияние помехи, вызываемые разрядами атмосферного электричества.

Напряженность поля пространственной волны можно рассчитать по формулам, полученным в результате анализа и обобщения

ния большого числа опытов. Одна из наиболее распространенных формул — *формула Остина*:

$$E = \frac{300 \sqrt{P_{\text{в}}}}{R} \sqrt{\frac{\theta}{\sin \theta}} e^{-\frac{0,0014R}{\lambda^{0,6}}} \quad [\text{мВ/м}], \quad (4.5)$$

где $P_{\text{в}}$ — излучаемая передатчиком мощность в киловаттах; R — расстояние в километрах между передатчиком и приемником; λ — длина волны (в километрах); θ — центральный угол в радианах (см., например, рис. 4.10, где $\angle AOB$ — центральный угол).

Волны длиной 1000—100 м (частоты 300 кГц ÷ 3 МГц). Распространение волн этого диапазона (часто называемого *средне-волновым*), так же как и волн длиннее 1000 м, осуществляется как пространственными, так и поверхностными лучами. Однако характер распространения этих волн иной, чем длинных. Прежде всего следует отметить более сильное затухание средних волн, так как потери энергии в Земле пропорциональны квадрату частоты колебаний. По этой причине расстояние, на котором может производиться связь на поверхностных волнах, даже при очень большой мощности передатчика, не превышает 1—1,5 тыс. км.

Вследствие большей частоты колебаний отражение пространственных волн происходит от тех участков ионосферных слоев, в которых концентрация электронов больше. Если в длинноволновом диапазоне отражение радиоволн происходит главным образом от нижней границы слоя E , то средним волнам для отражения необходимо проникнуть в толщу слоя E , что обуславливает их сильное затухание. Затухание увеличивается еще и за счет того, что волны поглощаются слоем D , причем дважды: при подходе к слою E и при отражении от него.

Это затухание особенно велико в дневное время, когда нижняя граница слоя E опускается. При этом поглощение энергии волн становится настолько большим, что пространственные волны почти не распространяются. Поэтому днем радиосвязь возможна только на поверхностных средних волнах.

Ночью слой D отсутствует и волны в нем не поглощаются, а слой E поднимается. Поэтому ночью возможен дальний прием средних пространственных волн. Однако ночью при связи на средних волнах проявляются так называемые *замирения (фединги)*. Эти замирения возникают вследствие того, что в пункте приема поверхностная и пространственная волны могут оказаться в противофазе, тогда результирующее поле ослабляется и происходит интерференция радиоволн.

Для борьбы с замирениями используют специальные (антифединговые) антенны, у которых лепесток диаграммы направленности «прижат» к Земле, что исключает появление пространственных волн. Очень распространенной мерой борьбы

с замираниями является применение в радиоприемниках схемы автоматической регулировки усиления (АРУ), о которой подробно рассказывается в главе 6.

Напряженность поля при использовании средних волн рассчитывается отдельно для пространственной и поверхностной волн. В первом случае достаточную точность обеспечивает формула (4.5). В случае поверхностной волны пользуются выражением

$$E = \frac{300\sqrt{P_{\text{э}}}}{R} F [\text{мВ/м}], \quad (4.6)$$

где $P_{\text{э}}$ и R — те же величины, что и в формуле (4.5); F — множитель, учитывающий электрические свойства земли¹. Формула (4.6) не учитывает кривизны Земли, поэтому она дает верные результаты на следующих расстояниях:

300—400 км	для волн длиной 200—2000 м;
50—100 км	для волн длиной 50—200 м;
Менее 10 км	для волн длиной 10—15 м.

§ 4.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН

Декаметровые волны ($\lambda = 100 \div 10$ м; $f = 3 \div 30$ МГц), часто называемые *короткими*, распространяются пространственными и поверхностными лучами. Однако поглощение волн земной поверхностью здесь настолько велико, что уже на расстоянии в несколько десятков километров обнаруживать можно только пространственные волны.

Степень ионизации слоев E и D не может обеспечить отражение коротких волн. В этих слоях происходит только «вредное» поглощение части энергии радиоволн.

Отражение коротких волн происходит только от слоя F_2 . Так как концентрация электронов в слое F_2 изменяется со временем, то и критическая частота этого слоя непостоянна.

В результате работ на этих волнах были получены следующие выводы о наиболее целесообразном использовании коротких волн для радиосвязи:

1) в дневное время, когда концентрация электронов в слое наибольшая, удобно использовать волны длиной $10 \div 25$ м, которые называются *дневными*;

2) в часы полусвеченности рекомендуется использовать волны длиной $25 \div 35$ м, называемые *промежуточными*;

¹ Множитель F впервые для разных условий был рассчитан в 1923 г. М. В. Шулейкиным и в 1931 г. независимо от него Ван дер Полем, поэтому выражение (4.6) называют формулой Шулейкина — Ван дер Поля.

и того же сигнала, который прошел как «прямой» путь передатчик—приемник (луч 1 на рис. 4.9), так и «кругосветный» путь. При этом возможны два варианта эхо: *прямое кругосветное* (луч 2) и *обратное кругосветное* (луч 3).

При прямом кругосветном эхо запаздывание сигналов составляет 0,13—0,14 сек., что приводит к нарушению связи независимо от рода работы (телефония, телеграфия, фототелеграфия). Обратное кругосветное эхо можно подавить, используя направленные передающие и приемные антенны¹.

Помехами при коротковолновой связи являются волны посторонних передатчиков (в отличие от атмосферных разрядов, являющихся источником основных помех на более длинных волнах). От этих помех можно избавиться, применяя направленные антенны, а также используя специальные схемы в приемных устройствах (см. главу 6).

§ 4.4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН КОРОЧЕ 10 м

Метровые, дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны часто называют *ультракороткими* (УКВ). Эти волны, как правило, от ионосферы не отражаются и распространяются как поверхностные (исключение составляют волны длиной от 7 до 10 м, которые в годы высокой солнечной активности могут отражаться ионизированным слоем F_2).

Дифракции ультракоротких волн вокруг больших препятствий практически нет, поэтому дальность распространения УКВ ограничивается дальностью прямой видимости $D_{пр}$, которая определяется по формуле

$$D_{пр} = 3,57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (4.7)$$

где h_1 и h_2 — высота соответственно передающей и приемной антенн в метрах.

Значение $D_{пр}$ равно стороне треугольника АВО (рис. 4.10), каждая из двух других сторон которого равна $h+R$, где R — радиус Земли (6370 км в предположении, что Земля — правильный шар).

Однако на практике ультракороткие волны распространяются и дальше, чем на расстояние прямой видимости. Это является следствием атмосферной рефракции, вызванной изменением коэффициента преломления, который зависит от состояния тропосферы, т. е. от атмосферного давления, температуры и влажности воздуха. Вследствие рефракции дальность прямой видимости возрастает примерно на 8% и становится равной

$$D'_{пр} = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (4.8)$$

¹ Термином «радиоэхо» в другом значении пользуются в радиолокационной метеорологии, о чем рассказывается в главе 8.

Иногда наблюдается и так называемая *сверхрефракция*, вызванная тем, что траектории радиоволн, излученных под небольшим углом к горизонту, искривляются настолько, что они снова попадают на Землю, отражаются от нее, снова искривляются, опять попадают на Землю и т. д. (рис. 4.11). Область пространства, в которой наблюдается сверхрефракция, называется *волноводным каналом*.

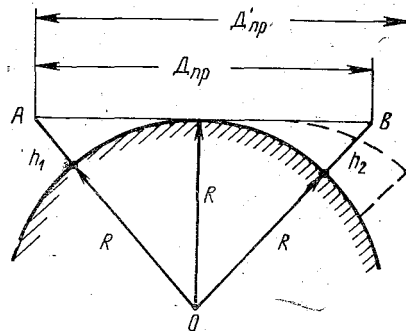


Рис. 4.10. К выводу формулы для дальности прямой видимости.

Наличие волноводных каналов делает возможной радиосвязь на расстояниях, в десятки раз превышающих $D_{пр}$.

Волноводные каналы образуются в атмосфере при резком падении коэффициента преломления с высотой, что происходит в тех случаях, когда с высотой температура воздуха быстро возрастает (инверсия температуры), а влажность падает.

Высота волноводного канала H (рис. 4.11) в сотни раз превышает длину волны, и в реальных условиях значение H достигает десятков или сотен метров. Чаще всего явление сверхрефракции проявляется при распространении волн короче 1 м, хотя при благоприятных условиях волноводный канал возникает и для метровых радиоволн.

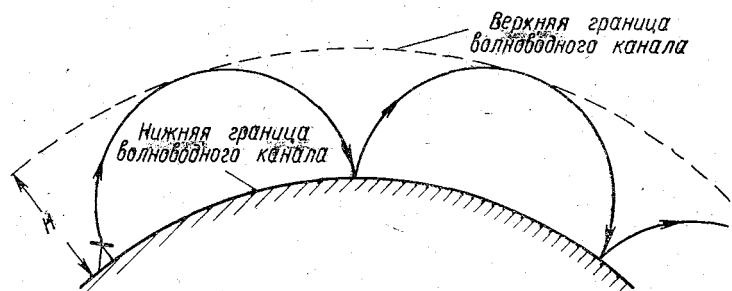


Рис. 4.11. УКВ атмосферный волноводный канал.

Распространение радиоволн по волноводному каналу обычно сопровождается поглощением энергии, т. е. убыванием напряженности поля радиоволн. Иногда на расстояниях, в несколько раз превышающих $D_{пр}$, уменьшение напряженности поля сменяется ее значительным возрастанием. Исследования этого явления показывают, что оно вызывается главным образом отраже-

нием волн от слоистых неоднородностей пространства и рассеянием волн на вихревых неоднородностях пространства.

Слоистые неоднородности свойственны тропосфере и представляют собой инверсионные слои воздуха, в которых коэффициент преломления резко убывает с высотой; при этом создаются условия для отражения радиоволн, падающих под небольшими углами к границе слоя (рис. 4.12). Лучше всего от слоистых неоднородностей отражаются метровые волны. При некоторых условиях дальность передачи на УКВ может достигать 500 км. Однако если слой инверсии возникнет между наземной и самолетной радиостанциями, то связь между ними может оказаться нарушенной (рис. 4.12).

Вихревые неоднородности также возникают в тропосфере и представляют собой восходящие и нисходящие потоки воз-

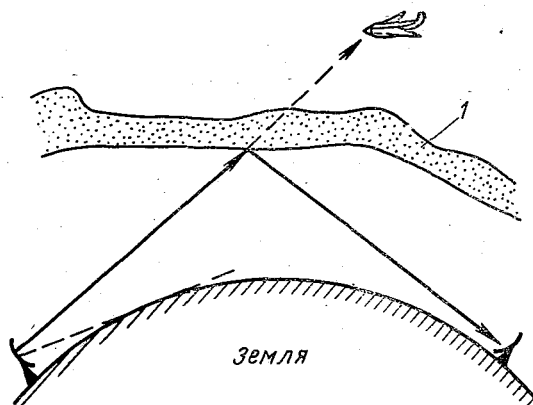


Рис. 4.12. Влияние приподнятого слоя инверсии на распространение ультракоротких волн.

1 — приподнятый слой инверсии.

духа, обусловленные различной степенью нагрева земной поверхности; эти потоки имеют вихревой характер. Наличие вихревых неоднородностей приводит к тому, что тропосфера сама становится электрически неоднородной. При попадании на вихревую неоднородность фронт радиоволны¹ искривляется и в пределах некоторого угла возникает излучение, называемое *рассеянием*. Рассеянная энергия может быть принята далеко за пределами расстояний прямой видимости. Ввиду того что

¹ Фронтом радиоволны называют поверхность, проходящую через точки пространства с одинаковой фазой напряженности электрического или магнитного поля электромагнитной волны и перпендикулярную к направлению распространения волны в каждой точке.

вихревые неоднородности тропосферы существуют практически всегда, связь на рассеянных волнах можно сделать довольно устойчивой. На практике такая связь может осуществляться на расстояниях до 900—1000 км. Еще большие дальности могут быть достигнуты при использовании рассеяния волн от вихревых неоднородностей ионосферы, к которым относятся ионосферные бури, метеорная ионизация и некоторые другие явления.

Ионосферные бури, как указывалось выше, вызываются резким изменением параметров ионизированных слоев вследствие сильного увеличения солнечной активности.

Явление метеорной ионизации заключается в том, что при сгорании метеоров в атмосфере на высоте около 100 км образуются так называемые *столбы ионизации* или *метеорные следы*. Столб ионизации имеет диаметр несколько сотен метров и длину несколько десятков километров. Рассеянные от метеорных следов УКВ могут быть использованы для радиосвязи на расстояниях до 2000 км. Особенностью радиосвязи с использованием рассеяния от метеорных следов является то, что она должна быть прерывистой, т. е. осуществляться только в те интервалы времени, когда на высоте порядка 100 км метеорные следы достаточно интенсивны.

Мы уже упоминали о том, что радиоволны поглощаются в атмосфере. Если при распространении длинных, средних и коротких волн этим поглощением (или, как часто говорят, затуханием) можно было пренебречь, то в диапазоне УКВ, особенно при использовании сантиметровых и миллиметровых волн, пренебрегать затуханием нельзя.

Основным фактором, вызывающим поглощение (затухание) радиоволн в атмосфере, является наличие в ней твердых частиц или капельно-жидких образований (пыли, облаков, дождя, снега, тумана). Затухание радиоволн обусловлено главным образом следующими двумя физическими явлениями:

- 1) высокочастотное электромагнитное поле возбуждает в каплях воды, являющихся полупроводниками, токи, а это значит, что часть энергии волн расходуется на создание этих токов;

- 2) частицы, на которые попадают электромагнитные волны, сами становятся излучателями, рассеивающими энергию во всем направлениям, причем в направлении радиосвязи излучается только часть попадающей на частицы энергии.

Эти явления проявляются тем сильнее, чем короче электромагнитные волны. На использовании этих явлений основаны радиолокационные методы исследования атмосферы, о которых более подробно рассказывается в главе 8.

Другим фактором, приводящим к затуханию радиоволн, является наличие так называемого *резонансного поглощения*. Физический смысл этого явления заключается в том, что частота электромагнитных колебаний может совпасть с собственной ча-

стотой колебаний электронов в атомах газов, входящих в состав атмосферы. При совпадении этих частот и происходит максимальное поглощение электромагнитной энергии. Так, например, водяной пар создает резонансное поглощение на волне 1,3 см, кислород — на волнах 0,25 и 0,5 см, вследствие чего эти волны не используются для связи.

Если длинные, средние и короткие волны используются главным образом для радиосвязи, то ультракороткие волны широко применяются как для радиосвязи, так и в радиолокации, радионавигации, телевидении. При этом основной недостаток УКВ — распространение только в зоне прямой видимости — окупается рядом достоинств: малыми габаритами антенных устройств, способностью проникать сквозь ионосферу и др. Поэтому именно УКВ стали единственными волнами, на которых осуществляется связь между космическими кораблями и Землей.

В настоящее время успешно преодолевается недостаток УКВ, связанный со способностью распространяться только в зоне прямой видимости. Укажем два способа увеличения дальности



Рис. 4.13. Участок радиорелейной линии (между антеннами прямая видимость).

радиосвязи на УКВ: создание радиорелейных линий и применение спутников связи.

Радиорелейная линия — это ряд промежуточных (ретрансляционных) станций, расположенных на интервалах прямой видимости между соседними антеннами (рис. 4.13). Применение радиорелейных линий позволяет вести связь на неограниченном расстоянии.

Наиболее современным видом дальней связи на УКВ считается связь с использованием искусственных спутников Земли, играющих роль ретрансляторов. При этом возможно использование как *активных ретрансляторов* (спутников, имеющих аппаратуру для обеспечения приема и переизлучения сигналов), так и *пассивных ретрансляторов* (пластмассовые баллоны с отражающей металлизированной поверхностью, выводимые на орбиту с помощью ракет и раздувающиеся в космосе).

§ 4.5. СВЕДЕНИЯ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ИНФРАКРАСНЫХ И ВИДИМЫХ ВОЛН

Как следует из табл. 1.1, к видимым (оптическим) лучам относятся волны длиной $0,4—0,76 \text{ мкм}$, а к инфракрасным — волны длиной $0,76—100 \text{ мкм}$ ¹ (для краткости инфракрасные лучи часто называют ИК излучением).

Из курса физики известно, что оптическое излучение возбуждается за счет энергии перехода в атомах и молекулах излучающего тела. ИК излучение является следствием колебательных и вращательных движений атомов и молекул вещества, поэтому источником ИК излучения является практически любое нагретое тело, даже если оно не излучает видимый свет. Оптические и ИК лучи могут фокусироваться линзами и зеркалами, менять направление при отражении и преломлении, разлагаться в спектр с помощью призм.

ИК лучи так же, как и радиоволны, могут проходить сквозь некоторые материалы, непрозрачные для видимых лучей. Однако устройства, основанные на применении видимых и ИК лучей, оказываются дешевле и надежнее, чем основанные на применении радиоволн, так как в конструкциях применяются оптические приборы, детали малых размеров, исключается вредное влияние земли на диаграмму направленности.

Проходя через атмосферу, оптические и ИК лучи, так же как и радиоволны, поглощаются и рассеиваются. Наиболее сильно энергия ИК лучей ослабляется частицами, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Чем больше длина волны ИК лучей по сравнению с диаметром частиц, тем лучше условия «обтекания» частиц лучами. Поэтому ИК лучи, длина волны которых больше, чем длина волны видимого света, лучше распространяются в атмосфере и проходят через дымку и туманы, состоящие из капель воды, диаметр которых менее 1 мкм .

Для ИК лучей ближнего диапазона, так же как и для видимых лучей ($\lambda = 0,76 \div 10,0 \text{ мкм}$), плотные туманы и туманы, состоящие из капель диаметром более 3 мкм , непрозрачны. Однако при распространении ИК и видимых лучей происходит не только их рассеяние, но и поглощение, общее их ослабление определяется этими двумя факторами. Рассмотрим их подробнее.

Поглощение, т. е. процесс перехода лучистой энергии в тепловую, для ИК и видимых лучей неодинаково. В некоторых случаях атмосфера прозрачна для ИК лучей и совершенно непрозрачна для видимых лучей. Энергию ИК лучей поглощают главным образом водяной пар и частично азот, углекислый газ и озон.

¹ В настоящее время четкая граница ИК диапазона еще не установлена; верхним пределом этого диапазона иногда считают длину волны 750 и даже 1000 мкм .

Поглощение водяным паром и газами носит избирательный (так называемый *селективный*) характер, т. е. лучи разных длин волн поглощаются по-разному.

На рис. 4.14 показан график зависимости степени поглощения ИК лучей от длины волны. Как следует из этого графика, водяной пар имеет полосы поглощения на длинах волн 0,94; 1,13; 1,47; 1,89 и 2,51—3,1 мкм. От волн 3,2 до 4,8 мкм идет полоса прозрачности, далее снова следует полоса сильного поглощения (от 4,8 до 7,7 мкм). Волны от 7,7 до 11 мкм опять оказываются в полосе прозрачности, а затем постепенно прозрачность ухудшается, и для волн длиннее 17 мкм водяной пар совершенно непрозрачен.

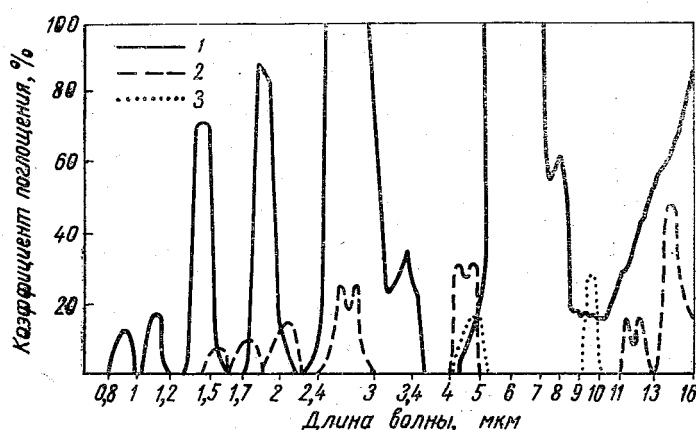


Рис. 4.14. Зависимость коэффициента поглощения инфракрасных лучей от длины волны.

1 — водяной пар; 2 — углекислый газ; 3 — озон.

Углекислый газ сильно поглощает ИК лучи с длинами волн 2,7; 4,27 и 12—16 мкм. Для остальных волн ИК диапазона углекислый газ достаточно прозрачен.

Озон поглощает ИК лучи с длинами волн 4,7 и 9,6 мкм, но так как содержание озона в нижних слоях атмосферы невелико, его поглощением можно пренебречь.

Таким образом, слой воздуха для ИК лучей является своеобразным фильтром, ослабляющим излучение неравномерно по спектру, имеющему области как поглощения, так и прозрачности.

Рассеяние лучей происходит вследствие оптической неоднородности среды. Если оптическая неоднородность среды (по составу или по плотности) значительная, то рассеяние может быть настолько сильным, что лучи не будут проходить сквозь эту среду. Однако рассеяние происходит даже в чистом воздухе, так как в нем имеются молекулы неодинаковой плотности, причем

чем короче длина волны, тем больше рассеивается энергия колебаний. Когда размеры рассеивающих частиц становятся соизмеримыми с длиной волны, рассеяние становится таким, что ИК лучи, так же как и видимые, не проникают сквозь образования таких частиц.

Особенно сильно меняется характер рассеяния в туманах, радиус капель в которых колеблется в пределах от 0,5 до 60 $\mu\text{м}$ (при достижении радиуса более 60 $\mu\text{м}$ капли тумана переходят в капли дождя). Максимальное рассеяние происходит в тех случаях, когда длина волны оказывается равной радиусу рассеивающей частицы.

Изучение распространения инфракрасных и видимых лучей в атмосфере позволило сделать следующие важные выводы:

1) рассеяние ИК лучей значительно меньше рассеяния видимых лучей, если радиус рассеивающих частиц не превышает 0,5 $\mu\text{м}$;

2) ИК лучи дальнего поддиапазона рассеиваются меньше, чем видимые, даже при радиусах частиц до 2 $\mu\text{м}$, т. е. вблизи земной поверхности условия для распространения ИК лучей более благоприятные, чем для распространения видимых;

3) при правильном выборе длин волн для ИК излучения можно обеспечить лучшую прозрачность атмосферы, чем для видимых лучей.

Основные выводы

1. Распространению радиоволн, как и всем иным электромагнитным колебаниям, включая световые, свойственны законы: прямолинейного распространения в однородной среде, рефракции, отражения и преломления, дифракции, интерференции. На распространение радиоволн большое влияние оказывает земная атмосфера и поверхность земли.

2. Связь на мириаметровых и километровых волнах выгодна для дальних расстояний, на гектометровых волнах — для расстояний 1,5 тыс. км.

Декаметровые волны наиболее применимы для связи на дальние расстояния при использовании сравнительно маломощных передатчиков. Однако на надежность связи влияет значительное количество разных факторов.

Волны короче 10 м распространяются только на расстояния прямой видимости.

3. Ультракороткие волны, помимо радиосвязи, широко применяются в специальных областях радиоэлектроники: радиолокации, радионавигации, телевидении и др. При этом основным недостатком УКВ — распространение только в зоне прямой видимости — окупается такими достоинствами, как малые габариты антенных устройств и способность проникать сквозь ионосферу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Назовите основные законы распространения радиоволн в пространстве.
2. Что такое идеальная радиопередача? В чем основные различия между реальной и идеальной радиопередачами?
3. Опишите структуру земной атмосферы.
4. Перечислите ионосферные слои, опишите их свойства и влияние на распространение радиоволн.
5. Определите критическую частоту ионизированного слоя, имеющего $N=10^6 \text{ эл/см}^3$.
6. Какие электрические свойства земной поверхности оказывают наибольшее влияние на распространение радиоволн?
7. В чем различие между поверхностными и пространственными радиоволнами?
8. Как распространяются радиоволны длиной более 1 км?
9. Каковы особенности распространения гектометровых радиоволн?
10. Как возникает замирание при связи на длинных радиоволнах?
11. Как распространяются декаметровые радиоволны?
12. Поясните процессы появления зоны молчания и радиоэхо при связи на декаметровых радиоволнах.
13. Каковы особенности распространения ультракоротких радиоволн?
14. Выведите формулу для определения дальности прямой видимости. Как изменяется $D_{пр}$ вследствие рефракции?
15. Как образуется волноводный канал?
16. Опишите процессы поглощения и рассеяния УКВ в атмосфере.
17. Каковы особенности распространения волн инфракрасного диапазона?
18. Каковы основные различия между распространением инфракрасных и видимых лучей?

ГЛАВА 5

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Основное назначение радиопередающих устройств (передатчиков) обеспечить излучение в пространство электромагнитных волн, с помощью которых и осуществляется передача различных видов информации.

Типовая блок-схема радиопередатчика показана на рис. 5.1. Для получения высокочастотных колебаний в передатчике используется автогенератор — устройство, преобразующее энергию постоянного тока в энергию высокочастотных электромагнитных колебаний. Его называют *возбудителем* или *задающим генератором*. Высокую стабильность частоты легче получить при малой мощности, поэтому мощность задающего генератора не зависит от выходной

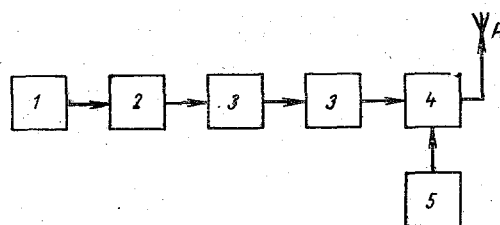


Рис. 5.1. Блок-схема радиопередатчика.

1 — задающий генератор; 2 — буферный каскад;
3 — промежуточные усилители мощности (или
умножители частоты); 4 — выходной усилитель;
5 — модулятор.

мощности передатчика бывает порядка нескольких единиц ватт. В качестве колебательной системы задающего генератора используется колебательный контур.

Так как мощность колебаний задающего генератора мала, то для получения необходимой мощности колебаний применяется *усилитель мощности*. Первый каскад усилителя мощности, который называют *буферным*, представляет собой резонансный усилитель, назначение которого — защитить задающий генератор от влияния последующих каскадов.

Промежуточные усилители предназначены для получения необходимой амплитуды колебаний на входе выходного каскада. Анодные контуры этих усилителей могут быть настроены на частоту, превышающую частоту входного сигнала, и тогда проис-

116

ходит умножение частоты, что позволяет повысить стабильность частоты передатчика, так как генерация и усиление происходят на разных частотах и этим ослабляется паразитное влияние последующих мощных каскадов на частоту задающего генератора.

Выходной каскад предназначен для получения в антенне заданной мощности. Колебания, поступающие в антенну и излучающиеся в пространство, содержат определенную информацию, т. е. являются модулированными, о чем уже упоминалось в § 1.3.

Основными характеристиками передатчика являются: рабочие частоты или диапазоны частот, выходная мощность, тип модуляции.

Рассмотрение работы передатчиков удобнее начать с промежуточных усилителей (генераторов с внешним возбуждением), являющихся разновидностью обычных усилительных схем.

§ 5.1. ГЕНЕРАТОРЫ С ВНЕШНИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Режимы работы ламп в генераторе. В теории радиопередающих устройств усилители, которые включены после задающего генератора, носят название генераторов с внешним (или независимым) возбуждением; собираются они либо на электронных лампах, либо на полупроводниках.

В схемах радиопередатчиков часто используются лампы, созданные специально для генерации колебаний и называемые генераторными лампами.

Различают два режима работы генераторных ламп: без отсечки анодного тока (режим I рода) и с отсечкой (режим II рода).

В режиме I рода (рис. 5.2 а) рабочая точка А находится на середине линейного участка анодно-сеточной характеристики лампы и искажения формы сигнала практически не происходит. Однако режим I рода в генераторах используется очень редко, вследствие того что в этом режиме анодный ток в лампе идет непрерывно, даже в моменты, когда на входе схемы отсутствует управляющий сигнал, а это снижает КПД схемы.

В режиме II рода (рис. 5.2 б) рабочая точка выбирается так, чтобы при отсутствии сигнала на сетке лампы анодного тока не было. Анодный ток идет в течение части периода напряжения сигнала. Если анодный ток идет в течение половины периода, то говорят, что угол отсечки $\theta = 90^\circ$. Углом отсечки θ называют половину части периода, выраженной в градусах, в течение которой лампа открыта и в анодной цепи течет ток. Показанные на рис. 5.2 б импульсы анодного тока имеют углы отсечки $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_3 = 40^\circ$.

В режиме II рода анодный ток представляет собой последовательность импульсов. Это сложное колебание, которое состоит из постоянной и синусоидальных (гармонических) составляющих.

Частоты гармонических составляющих (гармоник) кратны основной частоте. Если частота напряжения или частота импульсов анодного тока ω , то частота первой гармоники будет ω , второй гармоники 2ω , третьей 3ω и т. д. Амплитуда гармоники зависит

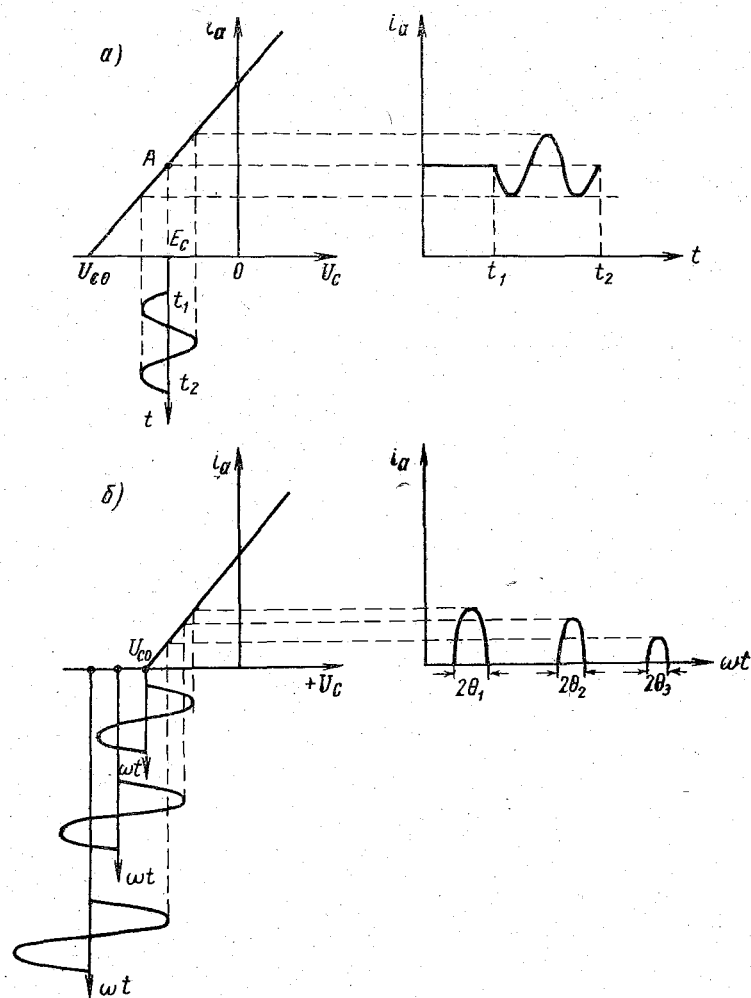


Рис. 5.2. Работа ламп в генераторах.

а — режим I рода; б — режим II рода с различными углами отсечки.

от ее номера, амплитуды импульса и угла отсечки. Чем больше номер гармоники, тем меньше амплитуда этой гармоники.

Расчеты показывают, что первая гармоника имеет максимальную амплитуду при $\theta = 120^\circ$, вторая — при $\theta = 60^\circ$, третья — при $\theta = 40^\circ$. При $\theta = 90^\circ$ третья гармоника исчезает.

Рис. 5.3 иллюстрирует образование импульсов напряжения при сложении колебаний первой и второй гармоник.

Известное из электроники соотношение $I_m = S U_{mc}$, показывающее зависимость амплитуды анодного тока лампы I_{ma} от крутизны характеристики лампы S и напряжения на сетке U_{mc} , для работы в режиме с отсечкой анодного тока, как показывают расчеты, приобретает вид

$$I_{ma} = S U_{mc} (1 - \cos \theta), \quad (5.1)$$

а формула для определения амплитуд гармоник будет

$$I_{ak} = \frac{2I_{ma}}{\pi} \frac{\sin k\theta \cos \theta - k \cos k\theta \sin \theta}{k(k^2 - 1)(1 - \cos \theta)}, \quad (5.2)^1$$

где $k=1, 2, 3, \dots$ — номер гармоники.

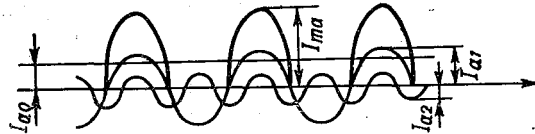


Рис. 5.3. Импульсы тока и их гармонические составляющие.

Например, амплитуда первой гармоники ($k=1$) равна

$$I_{a1} = \frac{I_{ma}}{\pi} \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}.$$

Постоянная составляющая определяется по формуле

$$I_{a0} = \frac{I_{ma}}{\pi} \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}.$$

Если подать на сетку лампы напряжение $u_c = U_{mc} \cos \omega t$, то анодный ток будет изменяться по закону

$$i_a = I_{a0} + I_{a1} \cos \omega t + I_{a2} \cos 2\omega t + I_{a3} \cos 3\omega t + \dots$$

Работа генератора с внешним возбуждением. Процессы, происходящие в генераторах с внешним возбуждением, рассмотрим на примере генератора, собранного на тетроре (рис. 5.4). Это резонансный усилитель, анодный контур которого настроен на заданную частоту. На управляющую сетку лампы подается переменное напряжение и постоянное отрицательное (относительно катода) напряжение от источника E_c . Постоянное отрицательное напряжение (напряжение смещения) смещает рабочую точку

¹ Определение амплитуд гармоник по формуле (5.2) производится методами высшей математики и здесь не приводится. На практике пользуются для этой цели таблицами и графиками, о чем рассказывается в § 5.2.

таким образом, чтобы лампа работала в режиме с отсечкой анодного тока.

Чтобы не было потерь мощности переменной составляющей сеточного тока на внутреннем сопротивлении источника E_c , параллельно источнику включают конденсатор $C_{бл1}$, который оказывает малое сопротивление переменному току высокой частоты.

Постоянное напряжение на анод лампы подается от источника E_a через катушку анодного контура $L_{ка}$. Назначение конденсатора $C_{бл2}$, блокирующего источник питания E_a , аналогично назначению конденсатора $C_{бл1}$.

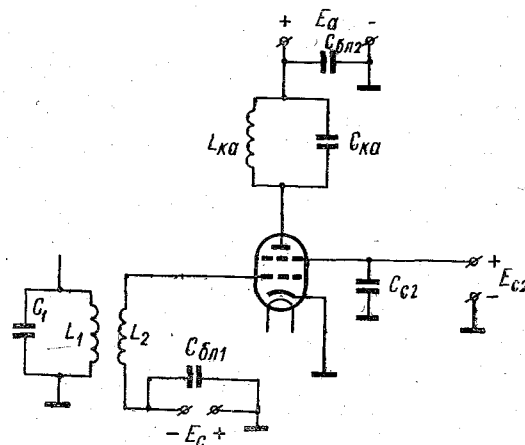


Рис. 5.4. Схема генератора с внешним возбуждением.

На экранирующую сетку лампы подается постоянное напряжение от источника E_{c2} . Переменного напряжения на экранирующей сетке не будет, так как емкость конденсатора C_{c2} выбирается такой, чтобы он представлял малое сопротивление для переменной составляющей тока экранирующей сетки.

Колебательный контур L_1C_1 возбуждает в катушке L_2 напряжение

$$u_c = U_{mc} \cos \omega t,$$

где U_{mc} — амплитуда напряжения на катушке L_2 , ω — угловая частота.

Мгновенное значение напряжения на сетке лампы

$$e_c = E_c + u_c = E_c + U_{mc} \cos \omega t.$$

Первая гармоническая составляющая анодного тока создает падение напряжения на анодном контуре $L_{ка}C_{ка}$, настроенном на частоту переменного напряжения на сетке. Обычно в генераторах используются контуры с высокой добротностью ($Q=50 \div 200$),

а это значит, что эквивалентное сопротивление контура для токов высших гармоник будет в десятки и сотни раз меньше. Поэтому можно считать напряжение на контуре чисто гармоническим.

Мгновенное значение напряжения на аноде лампы складывается из постоянного напряжения источника E_a и переменного напряжения на контуре u_a :

$$e_a = E_a - u_a = E_a - U_{ma} \cos \omega t. \quad (5.3)$$

Рассуждения остаются справедливыми и в том случае, если контур $L_{ка}C_{ка}$ будет настроен на частоту второй, третьей или более высоких гармоник (при этом возникает так называемый режим умножения частоты, который рассматривается ниже).

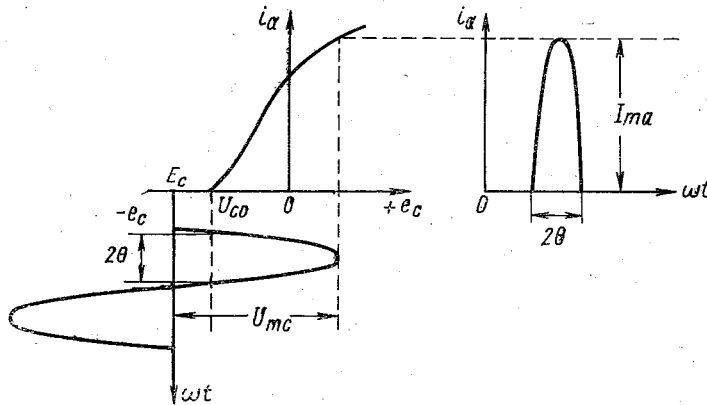


Рис. 5.5. Работа лампы в генераторе с внешним возбуждением.

На рис. 5.5 показаны диаграммы, иллюстрирующие работу лампы в генераторе с внешним возбуждением.

При отсутствии переменного напряжения на входе ($u_c = 0$) лампа заперта, так как $E_c > U_{c0}$, где U_{c0} — напряжение запирающей лампы. В положительные полупериоды переменного напряжения потенциал сетки увеличивается и при $e_c = U_{c0}$ лампа открывается. При $e_c = E_c + U_{mc}$ анодный ток достигает наибольшего значения, затем уменьшается и при $e_c = U_{c0}$ прекращается.

Анодный контур настроен в резонанс и является активным сопротивлением для анодного тока. Поэтому наибольшее напряжение на контуре будет при $i_a = I_{ma}$, а на аноде в этот момент напряжение будет наименьшим

$$U_a = E_a - U_{ma}.$$

Импульсы анодного тока поддерживают в контуре незатухающие колебания. При этом напряжение на контуре меняется от

— U_{ma} до $+U_{ma}$; напряжение на аноде меняется от значения $U_{a\min}=E_a - U_{ma}$ до значения $U_{a\max}=E_a + U_{ma}$, т. е. напряжение на аноде достигает значений, больших, чем E_a . Отношение

$\xi = \frac{U_{ma}}{E_a}$ называют коэффициентом использования анодного напряжения; величина его обычно лежит в пределах 0,8—0,9.

В зависимости от соотношения напряжений на электродах генераторной лампы различают три режима работы генератора: *недонапряженный, критический и перенапряженный*.

Если ток управляющей и экранирующей сеток мал по сравнению с анодным (I_{c1} и $I_{c2} < 0,1I_a$), то режим называется недонапряженным. Режим называется перенапряженным, если токи в цепях сеток велики и ими нельзя пренебречь по сравнению с анодным. Пограничный режим называется критическим.

При работе генератора в недонапряженном режиме форма анодного тока соответствует форме напряжения на сетке (искажения невелики). Однако режим не позволяет получить от генератора максимальную полезную мощность и высокий КПД. Поэтому используется недонапряженный режим редко.

При работе генератора в перенапряженном режиме искажается форма анодного тока и за счет резкого возрастания токов сеток в импульсе анодного тока появляется провал. В перенапряженном режиме КПД максимальный, выходная мощность стабильна, уменьшается мощность рассеяния на аноде, но сетки лампы будут перегружены. Используется перенапряженный режим в усилителях мощности высокочастотных колебаний.

Основным режимом для генераторов с внешним возбуждением является критический. При работе генератора в критическом режиме амплитуда импульса тока максимальна. Коэффициент полезного действия близок к максимальному, искажения формы анодного тока малы, токи сеток малы.

Нужный режим работы генератора можно получить, подобрав напряжение смещения, входное напряжение и сопротивление нагрузки.

Схемы питания генераторов. При построении схем питания генераторов исходя из следующих основных принципов: 1) постоянная составляющая анодного тока должна проходить через источник питания и лампу; цепь, по которой проходит постоянная составляющая от источника питания к лампе, должна иметь близкое к нулю сопротивление для нее; 2) переменная составляющая анодного тока (первая гармоника), источником которой в данной цепи является лампа, должна проходить через анодную нагрузку для передачи колебательной мощности; 3) цепь, соединяющая лампу с анодной нагрузкой, должна иметь близкое к нулю значение сопротивления для переменной составляющей.

Другие пути для переменной или постоянной составляющей следует исключить, так как они будут оказывать шунтирующее действие, уменьшая тем самым КПД генератора.

Используют две схемы питания анодной цепи генераторов: *параллельную* и *последовательную*. На рис. 5.6 *а* показана схема параллельного питания. Постоянное напряжение на анод лампы подано через дроссель L_a , который является малым сопротивлением для постоянной составляющей анодного тока и большим для переменной составляющей ($X_L = 2\pi fL$). Дроссель L_a не пропускает токи высокой частоты через источник питания.

Однако увеличивать индуктивное сопротивление можно только до определенного предела, так как при большом числе витков дросселя межвитковая емкость будет уменьшать сопротивление дросселя. Возможен даже последовательный резонанс контура, состоящего из межвитковой емкости дросселя и катушки анодного контура $L_{ка}$, поэтому ее величина выбирается из условия $L_a = (20 \div 40) L_{ка}$.

Разделительный конденсатор C_p предупреждает попадание постоянного анодного напряжения на контур и свободно пропускает высокочастотный переменный ток, так как емкость C_p выбирается из условия

$$\frac{1}{2\pi f C_p} \leq 0,02 R_a, \quad (5.4)$$

где f — частота в герцах; C_p — емкость разделительного конденсатора в фарадах; R_a — полное сопротивление анодного контура в омах.

Схема параллельного питания используется в тех случаях, когда нежелательно наличие на элементах колебательного контура высокого анодного напряжения, являющегося опасным для оператора, настраивающего генератор.

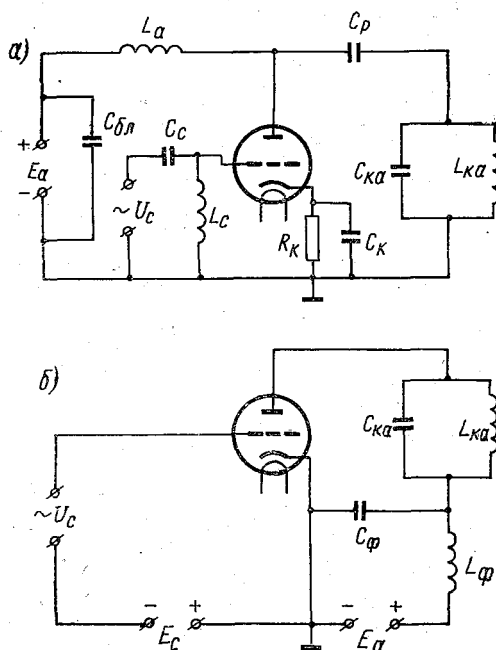


Рис. 5.6 Схемы генераторов с параллельным (а) и последовательным (б) анодным питанием.

В диапазоне коротких и ультракоротких волн большую роль играет шунтирующее действие вспомогательных элементов, поэтому чаще используют схему последовательного питания (рис. 5.6 б).

Постоянная составляющая анодного тока проходит от источника питания через L_ϕ , $L_{ка}$ и лампу. Переменная составляющая, источником которой в данной цепи является лампа, проходит через контур $L_{ка}C_{ка}$ и не проходит через источник питания благодаря фильтру $L_\phi C_\phi$. Значения C_ϕ и L_ϕ выбираются из соотношений:

$$2\pi f C_\phi = (50 \div 100) \frac{1}{R_э}; \quad 2\pi f L_\phi = (500 \div 1000) \frac{1}{2\pi f C_\phi}. \quad (5.5)$$

Отрицательное напряжение (смещение) на управляющую сетку лампы генератора может быть подано от автономного ис-

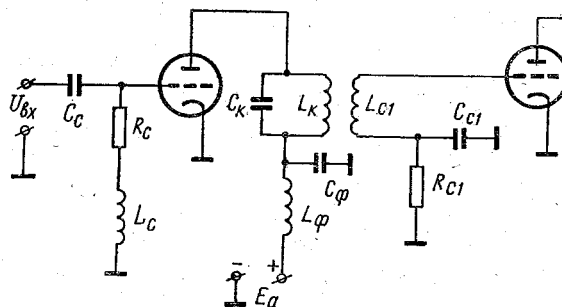


Рис. 5.7. Схема генератора с автоматическим смещением за счет сеточного тока.

точника или автоматически, за счет токов катода или управляющей сетки.

Рассмотрим цепь катода в схеме на рис. 5.6 а. Через сопротивление R_k проходят постоянные составляющие анодного I_{a0} и сеточного I_{c0} токов. Напряжение смещения

$$E_c = (I_{a0} + I_{c0}) R_k = I_{k0} R_k, \quad (5.6)$$

где I_{k0} — ток катода.

Сетка имеет постоянный потенциал, равный нулю, а катод имеет положительный потенциал. Дроссель L_c является большим сопротивлением для токов высокой частоты. Поэтому все напряжение источника сигнала приложено к сетке, а ток высокой частоты близок к нулю.

Иногда в схемах генераторов смещение получается за счет тока управляющей сетки: проходя через сопротивление R_c , ток I_{c0} создает падение напряжения, минус которого приложен к сетке, а плюс — к катоду (рис. 5.7). Для увеличения входного сопротивления генератора в цепь сетки последовательно с R_c ста-

вят дроссель L_c . Этот метод получения автоматического смещения в генераторах используется наиболее часто.

Для передачи колебаний из анодной цепи генератора на сетку следующего каскада используются трансформаторная, автотрансформаторная или емкостная схема связи.

Трансформаторная связь используется на длинных волнах, так как на коротких волнах начинает сказываться входная емкость лампы и связь превращается в двухконтурную с очень малым коэффициентом трансформации.

Наибольшее распространение во всех диапазонах волн получила автотрансформаторная связь.

Емкостная связь используется в диапазоне длинных и средних волн. Преимуществом этой схемы связи является то, что паразитные колебания с частотой, значительно превышающей частоту генерации, срываются вследствие большой емкости сетка—катод, представляющей для них очень малое сопротивление.

§ 5.2. УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ И ВЫХОДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Умножители частоты. Умножителями частоты называют генераторы с внешним возбуждением, частота колебаний в анодном контуре которых в два или три раза больше частоты напряжения возбуждения на сетке лампы. Увеличить частоту можно и в большее число раз (пять-шесть), но это энергетически не выгодно и поэтому используется редко.

Умножители частоты работают всегда в режиме II рода. Угол отсечки выбирают таким, при котором выделяемая гармоническая составляющая имеет максимальную амплитуду.

Для получения большей мощности в нагрузке необходимо увеличить напряжение возбуждения, напряжение смещения (для получения нужного угла отсечки), настроить анодный контур на частоту соответствующей гармоники и увеличить эквивалентное сопротивление анодного контура.

Полезная мощность при удвоении частоты уменьшается на 20—25%, а при утроении — на 35—40% по сравнению с мощностью режима усиления. Коэффициент полезного действия будет при этом порядка 50%.

Зависимость амплитуд гармонических составляющих от угла отсечки анодного тока можно видеть из графиков (рис. 5.8)¹. Если обозначить амплитуду импульса анодного тока I_{ma} , а амплитуду гармоники I_{ak} , то $\alpha_k = \frac{I_{ak}}{I_{ma}}$ (при $k=0, 1, 2, \dots$), где

α_k — коэффициент k -той гармоники.

¹ Эти графики построены по таблицам, рассчитанным А. И. Бергом.

Пусть нужно получить на контуре напряжение U_{a2} при сопротивлении контура R_{a2} в удвоителе частоты. Амплитуда второй гармоники равна $I_{a2} = \frac{U_{a2}}{R_{a2}}$. Выбираем угол отсечки, при котором амплитуда второй гармоники максимальна, т. е. $\theta = 60^\circ$. Находим коэффициент α_2 по графику. Теперь можно определить амплитуду импульса тока: $I_{ma} = \frac{I_{a2}}{\alpha_2}$. Выбираем лампу, способную пропустить такой импульс тока. По характеристике лампы находим параметры S и U_{c0} (U_{c0} — напряжение запирания лампы).

Определим напряжение возбуждения из формулы (5.1):

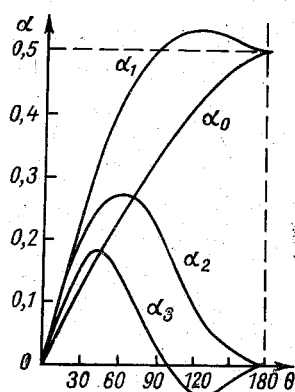


Рис. 5.8. График зависимости амплитуды гармоник анодного тока от угла отсечки.

$$U_{mc} = \frac{I_{ma}}{S(1 - \cos \theta)}.$$

Смещение E_c , способное обеспечить угол отсечки $\theta = 60^\circ$ при данном U_{mc} можно определить из соотношения

$$\cos \theta = \frac{U_{c0} - E_c}{U_{mc}}, \quad (5.7)$$

вывод которого приводится в теории радиопередающих устройств. Из этой формулы находим выражение для E_c :

$$E_c = U_{c0} - U_{mc} \cos \theta. \quad (5.8)$$

Выходные усилители. Выходные усилители предназначены для получения номинальной мощности колебаний в излучателе (антенне).

Различают *простую* и *сложную* схемы выхода. Если антенна (антенный контур) является одновременно анодной нагрузкой, то имеет место простая схема выхода (рис. 5.9 а). В сложной схеме выхода в анодной цепи усилителя стоит промежуточный контур, с которым связан антенный контур (рис. 5.9 б).

Выходные усилители выполняются по одноконтурной и двухконтурной схемам. В двухконтурной схеме, применяемой для получения большой выходной мощности, используются две однотипные лампы, аноды которых подключены к противоположным концам колебательного контура, катоды соединены вместе, а управляющие сетки подключены к противоположным концам катушки связи, средняя точка которой заземлена.

На сетки ламп подаются два напряжения сигнала, одинаковые по амплитуде, но противоположные по фазе. Лампы работают в режиме II рода.

Напряжение на сетках ламп e_c и e'_c равно:

$$\left. \begin{aligned} e_c &= E_c + u_c = E_c + U_{mc} \cos \omega t \\ e'_c &= E_c + u'_c = E_c + U'_{mc} \cos(\omega t + \pi) = E_c - U'_{mc} \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

В этих формулах U_{mc} и U'_{mc} — амплитуды напряжения возбуждения на сетках ламп. Разложение последовательности им-

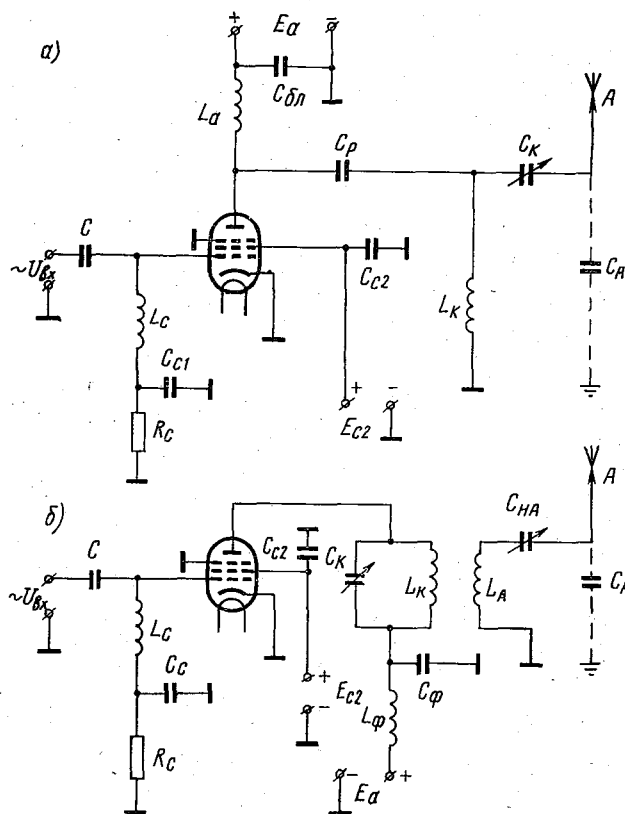


Рис. 5.9. Простая (а) и сложная (б) схемы выхода.

пульсов анодных токов на гармонические составляющие показывает, что четные гармоники токов ламп совпадают по фазе, а нечетные имеют противоположные фазы:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_{a0} + I_{a1} \cos \omega t + I_{a2} \cos 2\omega t + I_{a3} \cos 3\omega t + \dots \\ i'_a &= I'_{a0} + I'_{a1} \cos(\omega t + \pi) + I'_{a2} \cos 2(\omega t + \pi) + \\ &\quad + I'_{a3} \cos 3(\omega t + \pi) + \dots = \\ &= I'_{a0} - I'_{a1} \cos \omega t + I'_{a2} \cos 2\omega t - I'_{a3} \cos 3\omega t + \dots \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

где $I_{a1}, I_{a2}, I_{a3}, I'_{a1}, I'_{a2}, I'_{a3}$ и т. д. — амплитуды гармоник анодного тока. Токи плеч i_a и i'_a подводятся к контуру с противоположных концов, поэтому общий ток контура равен

$$i_k = i_a - i'_a = (I_{a0} - I'_{a0}) + (I_{a1} + I'_{a1}) \cos \omega t + (I_{a2} - I'_{a2}) \cos 2\omega t + (I_{a3} + I'_{a3}) \cos 3\omega t + \dots \quad (5.11)$$

При полной симметрии схемы $I_{a0} = I'_{a0}, I_{a1} = I'_{a1}, I_{a2} = I'_{a2}, I_{a3} = I'_{a3}$ и т. д.; формула (5.11) примет вид

$$i_k = 2I_{a1} \cos \omega t + 2I_{a3} \cos 3\omega t + \dots \quad (5.12)$$

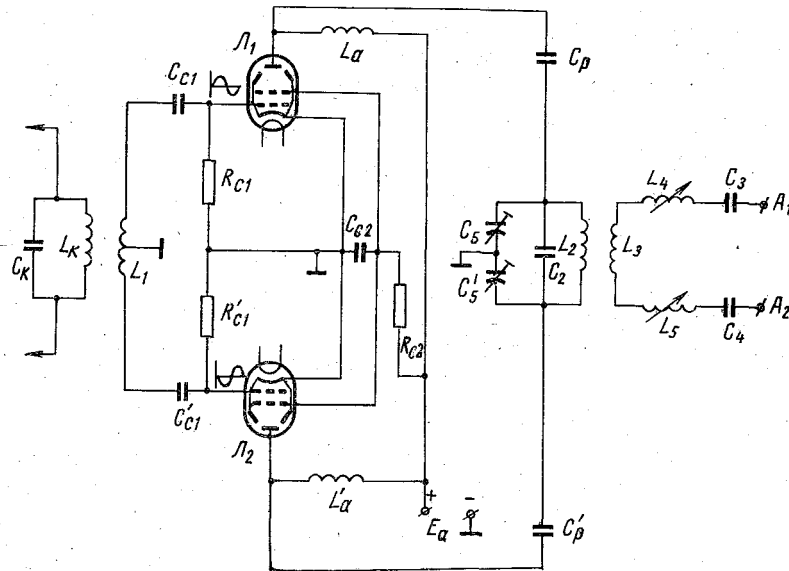


Рис. 5.10. Принципиальная схема выходного усилителя автоматической радиометеорологической станции АРМС-Н.

При $\theta = 90^\circ$ амплитуда третьей гармоники равна нулю. Так как четные гармоники уничтожаются, второй гармоники не будет. Амплитуды высших гармоник настолько малы, что можно считать ток контура равным удвоенному значению тока первой гармоники:

$$i_k = 2I_{a1} \cos \omega t. \quad (5.13)$$

Двухтактная схема выходного усилителя при строгой симметрии дает почти полное удвоение мощности по сравнению с однотактной, обеспечивает фильтрацию четных гармоник, повышает устойчивость работы схемы. Это достигается подбором ламп и тщательностью монтажа и регулировки схемы.

В качестве примера приведем схему выходного усилителя, используемого в радиопередатчике автоматической радиометеорологической станции АРМС-Н (рис. 5.10).

Связь между задающим генератором и усилителем мощности трансформаторная. ($L_k C_k$ — анодный контур задающего генератора). Напряжение сигнала с катушки L_1 подается на сетки ламп L_1 и L_2 через конденсаторы C_{c1} и C'_{c1} в противофазе. Усиленные колебания через конденсаторы C_p и C'_p поступают в промежуточный контур $L_2 C_2$, с которым индуктивно связан антенный контур, состоящий из катушки связи L_3 , элементов настройки (вариометры L_4 и L_5 и конденсаторы C_3 и C_4) и распределенную емкость антенны.

Смещение рабочей точки в данной схеме осуществлено за счет напряжения на сопротивлениях R_{c1} и R'_{c1} от сеточных токов. Экранирующие сетки ламп питаются от анодного источника через гасящее сопротивление R_{c2} .

Передатчик работает на фиксированной частоте. Подстройка промежуточного контура производится подстроечными конденсаторами C_5 и C'_5 .

§ 5.3. ГЕНЕРАТОРЫ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Генератором с самовозбуждением (автогенератором) называют устройство, которое создает колебания напряжения под действием постоянных напряжений. Используются автогенераторы в качестве задающих генераторов в передатчиках. В маломощных передатчиках автогенератор связывается непосредственно с антенной. Автогенераторы могут быть выполнены на базе усилителей, на базе элементов с отрицательным сопротивлением (например, используют падающий участок характеристики тетрода), на взаимодействии электронов и электромагнитных полей (клистронные, магнетронные и другие генераторы).

Автогенератор создает колебания той частоты, на которую настроен контур.

На рис. 5.11 а показана схема обычного резонансного усилителя. Если на сетку лампы подать переменное напряжение $u_1 = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1)$, частота которого равна собственной частоте анодного контура, то в анодном контуре возникнут незатухающие колебания. В катушке $L_{св}$ будет индуцироваться напряжение $u_2 = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$.

Если катушку $L_{св}$ включить в цепь сетки, то на вход усилителя будет подаваться напряжение u_2 , называемое *напряжением обратной связи*.

Здесь возможны два случая: а) напряжение u_2 совпадает по фазе с u_1 ; б) напряжение u_2 противофазно u_1 . Если напряжения U_{m2} и U_{m1} равны, а u_1 и u_2 совпадают по фазе, то источник u_1

можно отключить и усилитель будет усиливать собственные колебания.

Получить незатухающие колебания можно и без постороннего источника напряжения, если катушку $L_{св}$ подключить к сетке лампы (рис. 5.11 б) и включить анодное напряжение. Возникший при этом анодный ток зарядит конденсатор C_K , и в контуре появятся свободные колебания. В катушке $L_{св}$ переменное магнитное поле катушки контура возбудит напряжение, которое будет приложено к сетке лампы. Под действием этого напряжения будет изменяться анодный ток. Переменная составляющая анодного тока будет поддерживать в контуре незатухающие колебания, так как анодный ток будет дозаряжать конденсатор контура каждый период.

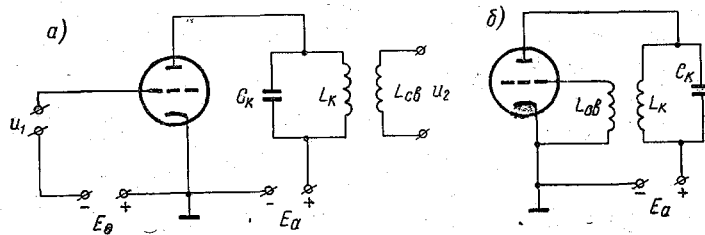


Рис. 5.11. К пояснению работы автогенератора.

а — схема обычного резонансного усилителя; б — схема автогенератора (усилителя собственных колебаний).

Если u_1 и u_2 противофазны, то генерации не будет, так как импульсы анодного тока будут разряжать конденсатор контура, и свободные колебания затухнут.

Таким образом, генерация возможна при следующих условиях:

а) должно быть обеспечено равенство (баланс) фаз входного и выходного напряжений ($\varphi_1 = \varphi_2$);

б) импульсы анодного тока должны быть достаточно велики, чтобы восполнить потери энергии за каждый период колебаний в контуре (баланс амплитуд, т. е. $U_{m1} = U_{m2}$).

График зависимости амплитуды напряжения на выходе генератора U_{m2} от амплитуды напряжения на входе U_{m1} называют *колебательной характеристикой* (кривая 1 на рис. 5.12 а).

Равенство $U_{m2} = U_{m1}$ называют *уравнением обратной связи*; его график имеет вид прямой, идущей из начала координат (прямая 2).

Рассмотрим процесс возбуждения колебаний.

При включении E_a в контуре $L_K C_K$ возникают колебания малой амплитуды и на сетку лампы с катушки $L_{св}$ поступает напряжение U_{m1}^I , которое вызовет на выходе напряжение U_{m2}^I . Это на-

пряжение поступит на вход лампы как величина $U_{m1}^{II} > U_{m1}^I$. Далее процесс увеличения амплитуды колебаний будет происходить таким же образом до тех пор, пока не будет выполнено условие $U_{m1} = U_{m2}$. Это произойдет в точке А. Дальнейшего изменения амплитуды колебаний происходить не будет и схема будет работать в режиме установившихся колебаний.

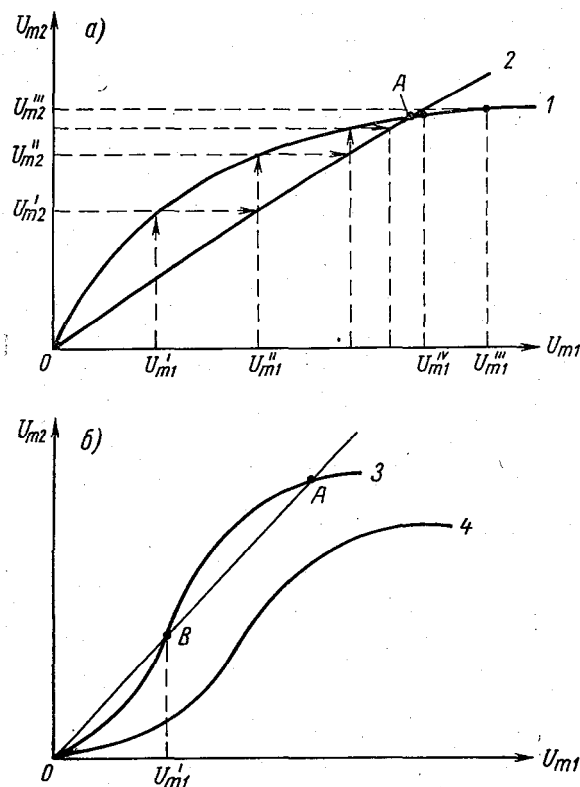


Рис. 5.12. Колебательные характеристики при мягком (а) и жестком (б) режимах работы генератора.

Если по каким-либо причинам на вход будет подано напряжение U_{m1}^{III} , то оно вызовет появление на выходе напряжения U_{m2}^{III} , которое на вход поступит как $U_{m1}^{IV} < U_{m1}^{III}$, т. е. процесс возвратится к точке А.

При уменьшении связи между L_k и $L_{св}$ (см. рис. 5.11 б) амплитуда установившегося напряжения U_{m2} будет уменьшаться и при каком-то (критическом) значении обратной связи колебаний не будет.

Величина обратной связи характеризуется коэффициентом обратной связи

$$K_{oc} = \frac{U_{m2}}{U_{mk}}, \quad (5.14)$$

где U_{m2} — напряжение на катушке связи; U_{mk} — напряжение на контуре.

Режим работы генератора в большой степени определяется величиной K_{oc} и напряжением смещения на сетке. От этих факторов зависит и форма колебательной характеристики.

Различают два основных режима возбуждения колебаний в автогенераторах: мягкий и жесткий.

Колебательную характеристику при *мягком* режиме мы уже рассмотрели (кривая 1 на рис. 5.12 а). При этом режиме измене-

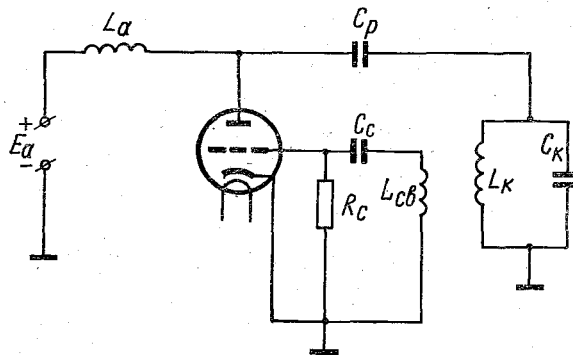


Рис. 5.13. Схема автогенератора с индуктивной обратной связью.

нием коэффициента обратной связи можно регулировать амплитуду установившихся колебаний плавно, от нуля до наибольшего значения. Рабочая точка при этом режиме должна лежать на прямолинейном участке анодно-сеточной характеристики лампы.

Колебательной характеристикой при *жестком* режиме возбуждения является кривая 3 на рис. 5.12 б. Этот режим характеризуется тем, что колебания могут возникнуть только тогда, когда напряжение на входе превысит некоторую величину U_{m1}^I (точка В).

Установиться эти колебания могут в точке А, т. е. колебаний с малой амплитудой при таком режиме получить нельзя.

При некотором значении K_{oc} колебательная характеристика может иметь такой вид (кривая 4 на рис. 5.12 б), что колебания не возникнут ни при какой величине U_{m1} , так как колебательная характеристика не пересекает прямую $U_{m1} = U_{m2}$.

Рассмотрим схему автогенератора, приведенную на рис. 5.13. Эта схема отличается от схемы генератора с внешним возбуждением только тем, что напряжение в катушке $L_{св}$ возбуждает соб-

ственный анодный контур, а не контур предшествующего каскада (возбудителя).

Элементы схемы L_a и C_p выполняют те же функции, что и в генераторе с внешним возбуждением (параллельная схема питания).

Рассмотрим работу $R_c C_c$ -цепочки автоматического смещения. При положительных напряжениях на сетке (при положительных полупериодах переменного напряжения) возникает сеточный ток, который заряжает конденсатор C_c . Заряд происходит в течение малой части периода.

В течение остальной части периода конденсатор разряжается через сопротивление R_c . Сопротивление R_c велико, поэтому напряжение на конденсаторе уменьшается незначительно. На сопротивлении R_c создается напряжение, минус которого приложено к сетке, а плюс — к катоду. Это напряжение и обеспечивает смещение рабочей точки.

При малой амплитуде колебаний сеточный ток слаб и напряжение смещения мало, что необходимо для мягкого самовозбуждения. С увеличением амплитуды растет сеточный ток, увеличивается смещение, и генератор автоматически переходит в режим II рода, который энергетически является более выгодным. Устойчивость колебаний в режиме II рода выше, чем в режиме I рода.

Трехточечные схемы автогенераторов. На практике широкое распространение получили трехточечные схемы автогенераторов с автотрансформаторной и емкостной обратной связью. В этих схемах катод, анод и сетка генераторной лампы соединяются с тремя точками анодного контура. Рассмотрим различные варианты трехточечных схем, которые часто для краткости называют просто трехточками.

Схема индуктивной трехточки показана на рис. 5.14 а. Последовательно с конденсатором контура C_k , используемым также и для настройки, включены конденсаторы C_1 и C_2 большой емкости, которые не влияют на емкость контура, но не пропускают высокое постоянное напряжение на C_k .

Напряжение возбуждения подается на сетку лампы с катушки L_2 . Оно сдвинуто по фазе относительно напряжения на аноде на 180° . Коэффициент обратной связи определяется из выражения

$$K_{ос} = \frac{L_2}{L_1}.$$

Покажем, как выполняется баланс фаз в этой схеме, которую для простоты пояснения изобразим иначе (рис. 5.14 б).

Между катодом и анодом включен контур с индуктивной ветвью L_1 и емкостной $L_2 C_k$. В случае резонанса $X_{L_1} = X_{C_k} - X_{L_2}$.

Если напряжение на сетке U_{m1} изобразить в виде вектора, направленного по горизонтали вправо (рис. 5.14 в), то вектор пе-

ременной составляющей анодного тока I_{ma} будет иметь то же направление, напряжение на аноде U_{ma} будет противофазно, ток в емкостной ветви будет опережать U_{ma} на 90° . Напряжение на катушке U_{L_2} будет опережать ток I_{L_2} на 90° и напряжение U_{ma} на 180° и, следовательно, совпадать по фазе с напряжением U_{m1} .

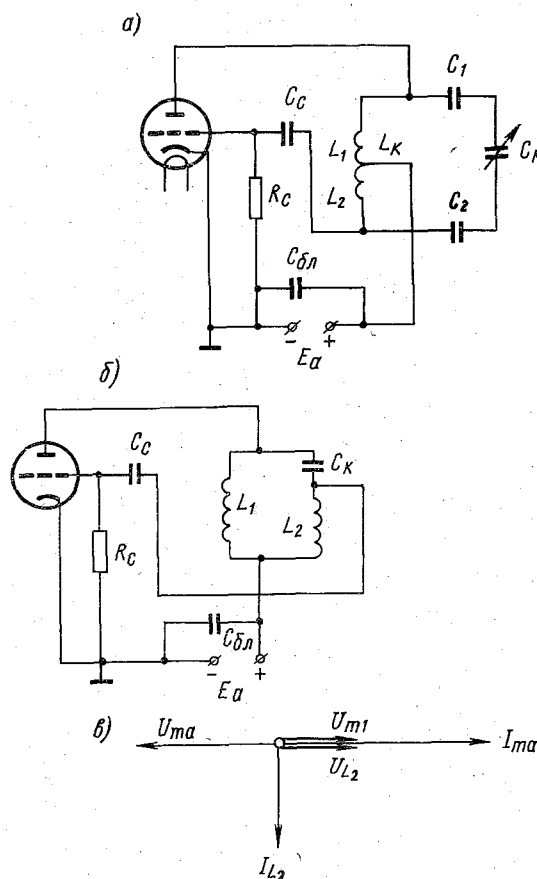


Рис. 5.14. К пояснению работы индуктивной трехточки.

а — принципиальная схема; б — эквивалентная схема; в — векторная диаграмма.

Частота генерации индуктивной трехточки в основном определяется собственной частотой колебательного контура L_1 , L_2 , C_k :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L_2) C_k}}.$$

Регулировка частоты производится изменением емкости C_k .

На рис. 5.15 показана схема емкостной трехточки, которая, так же как и индуктивная, чаще имеет параллельное питание. В приведенной схеме контур автогенератора состоит из катушки L_K и конденсаторов C_K, C_1, C_2 . Напряжение обратной связи снимается с конденсатора C_2 , а коэффициент обратной связи

$$K_{oc} = \frac{C_1}{C_2}.$$

Обычно значение K_{oc} лежит в пределах от 0,1 до 0,3. Частота колебаний автогенератора может быть рассчитана по формуле

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_K C}},$$

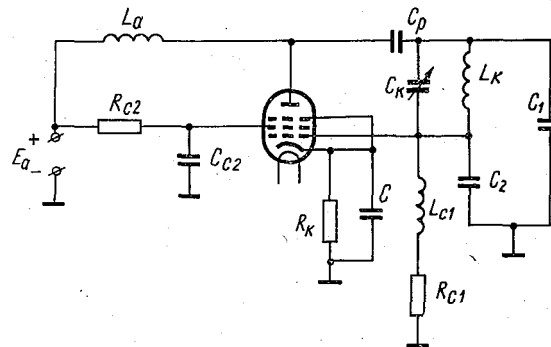


Рис. 5.15. Схема емкостной трехточки с параллельным питанием.

где емкость C — полная емкость контура

$$C = C_K + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Регулирование частоты автогенератора можно производить изменением либо емкости, либо индуктивности контура.

В данной схеме применено комбинированное смещение: за счет тока катода ($I_K R_K$) и за счет тока сетки ($I_{C1} R_{C1}$).

Автогенератор собран на пентоде. Экранирующая сетка питается от источника анодного напряжения через гасящее сопротивление R_{C2} .

В цепь сетки, кроме элементов смещения C_{C1} и R_{C1} , включен дроссель L_{C1} . При больших сеточных токах сопротивление R_{C1} выбирается небольшим (сотни и тысячи ом); оно будет шунтировать контур. L_{C1} увеличивает сопротивление в цепи сетки для токов высокой частоты.

Колебательный контур, определяющий частоту автогенератора, можно включить и в цепь сетки. Колебания в таком контуре

будут поддерживаться за счет обратной связи (индуктивной или емкостной) с анодной цепью.

Автогенераторы часто собираются по так называемым двухконтурным схемам (рис. 5.16), где контуры включены в цепь анода и в цепь управляющей сетки. Связь между контурами обеспечивается конденсатором $C_{ос}$, роль которого на коротких волнах выполняет емкость анод—сетка. В двухконтурных генераторах на частоту генерации, как показано в теории радиопередающих устройств, большее влияние оказывает сеточный контур. Поэтому нестабильность собственной частоты анодного контура несущественно влияет на частоту генерации, что особенно важно, так как нагрузкой для анодного контура может быть либо контур антенны, либо цепь сетки последующего каскада. В обоих случаях параметры нагрузки нестабильны.

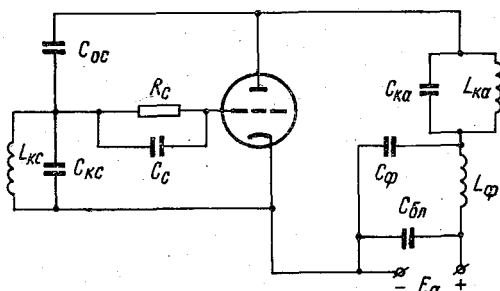


Рис. 5.16. Схема двухконтурного генератора с емкостной обратной связью.

чаях параметры нагрузки нестабильны.

Схема Шембеля. Рассмотрим схему автогенератора, обладающего высокой стабильностью частоты даже при значительной нестабильности параметров нагрузки (рис. 5.17). Схема имеет два контура. Контур, определяющий частоту генерации включен в цепь сетки. В анодную цепь

включен контур, который связан с антенным контуром или с сеточной цепью усилителя мощности. Подобная схема называется схемой Шембеля.¹

Чтобы изменения параметров анодного контура не влияли на параметры сеточного контура, контуры не должны быть связаны. Для этого нужно устранить паразитные связи, возникающие при монтаже, тщательным экранированием, а в качестве генераторной лампы использовать пентоды или тетроды, имеющие малые значения емкости анод—сетка.

Приведенная на рис. 5.17 схема генератора собрана на тетроде. Анодная цепь включена по схеме параллельного питания. Напряжение на экранирующую сетку подается с сопротивления R_2 делителя R_1R_2 . Катод по постоянному току подключен к минусу источника E_a через часть L_1 катушки $L_{кс}$ сеточного контура. В схеме используется автоматическое смещение от RC -цепочки, включенной в цепь сетки.

Переменная составляющая анодного тока проходит через конденсатор C_p , контур $C_{ка}L_{ка}$, часть катушки сеточного контура L_1 ,

¹ Б. К. Шембель — советский ученый, разработавший рассматриваемую схему в 30-х годах.

включенного между катодом и корпусом. Сопротивление анодного контура значительно больше сеточного, поэтому в анодный контур будет отдаваться почти вся мощность переменной составляющей анодного тока. Через сеточный же контур проходит переменная составляющая тока экранирующей сетки. Этот ток и будет возбуждать колебания в сеточном контуре $L_{KC}C_{KC}$. Таким образом, описываемый автогенератор является трехточкой, в которой три точки сеточного контура подключены по высокой частоте к трем электродам лампы: катоду, управляющей сетке и экранирующей сетке.

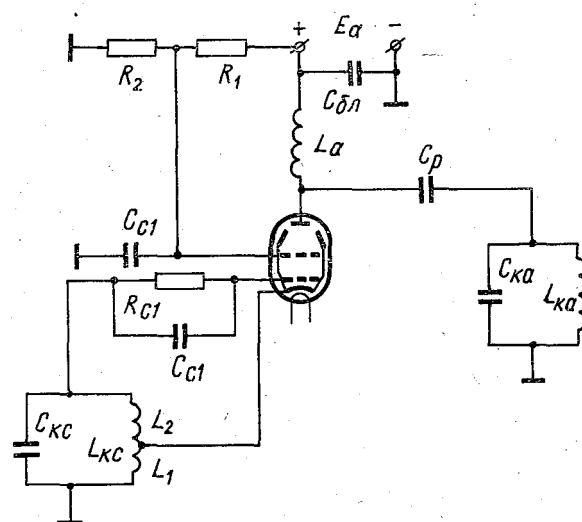


Рис. 5.17. Схема Шембеля.

Автогенераторы, работающие в режиме прерывистой генерации. Если в цепь автоматического смещения поставить большое сопротивление и емкость, то будет иметь место следующий процесс. При малом смещении генератор мягко возбуждается, амплитуда колебаний нарастает, увеличивается сеточный ток, увеличивается напряжение смещения, лампа начинает работать в режиме II рода, генератор переходит в жесткий режим. При некотором отрицательном напряжении колебания срываются. Возникнуть вновь колебания могут только тогда, когда напряжение на сетке уменьшится до первоначального значения.

Частоту прерываний колебаний можно оценить по приближенной формуле

$$F = \frac{1}{R_c C_c},$$

где R_c и C_c — параметры сеточной цепи.

Изменение частоты автоколебаний генератора с течением времени называется *нестабильностью*. Характеризуют генераторы относительной нестabilityностью $\frac{\Delta f}{f_0}$, где $\Delta f = |f_T - f_0|$ — отклонение частоты генерации f_T от начальной f_0 .

Причины отклонения частоты — изменение емкости и индуктивности контуров, определяющих частоту. Изменения значений параметров контура могут быть вызваны изменением температуры окружающей среды, давления и влажности, вибрацией деталей и т. п. Причиной ухода частоты может явиться также нестabilityность питающих напряжений и влияние последующих каскадов.

Стабильность частоты является важным показателем качества передатчика. При большой нестabilityности частоты расширяется спектр сигнала, создаются помехи станциям, работающим на соседних каналах, происходит потеря части информации, уменьшается надежность связи.

Влияние дестабилизирующих факторов на частоту генерации уменьшают различными способами.

При изменении *температуры* меняются геометрические размеры катушек, диэлектрическая проницаемость диэлектрика, поэтому ее влияние уменьшают, используя катушки индуктивности на керамическом каркасе с намоткой из инвара (материал с малым температурным коэффициентом расширения), применяя конденсаторы с малым температурным коэффициентом емкости (ТКЕ), вводя в контур генератора термокомпенсирующий конденсатор с отрицательным ТКЕ (для этой цели служат конденсаторы с титано диэлектриками).

Изменение *межэлектродных емкостей лампы* при разогреве также оказывает влияние на частоту генератора. Для устранения влияния этих емкостей стараются их уменьшить и сделать как можно стабильнее. Влияние этих емкостей тем меньше, чем больше емкость контура, поэтому выполнить стабильный автогенератор на небольшие частоты легче.

Влияние *влажности* на частоту генератора выражается в том, что при изменении влажности меняется диэлектрическая проницаемость воздуха и, следовательно, емкость. При повышении влажности увеличивается влияние температуры на диэлектрическую проницаемость. Поэтому в генераторах рекомендуется использовать конденсаторы с керамическим диэлектриком, а регулировать частоту с помощью вариометра.

Передвижные передатчики часто работают в условиях сильных *механических перегрузок (вибраций)*. Изменение взаимного расположения монтажных проводов, зазоров в воздушных конденсаторах, расстояний между электродами ламп и т. д. может сильно расстроить передатчик. Для ослабления вибраций передающую аппаратуру располагают на амортизаторах. Используют конденсаторы с массивными пластинами и фиксаторами поло-

жения ротора, жесткий монтаж, лампы специальной конструкции.

Непостоянство напряжения питания вызывает изменение баланса фаз и частоты. Для устранения этого рекомендуется применять стабилизацию накала с помощью бареттеров и анодного напряжения с помощью стабилизаторов. Включение развязывающих фильтров уменьшает действие наводок в проводах питания.

В передатчиках для устранения влияния мощных каскадов применяется экранирование деталей задающего генератора от воздействия внешних магнитных и электрических полей.

Умножение частоты приводит к тому, что мощные ступени передатчика генерируют более высокие частоты, и влияние их на задающий генератор ослабляется.

Наиболее высокую стабильность можно получить, если в автогенераторе в качестве контура использовать кварц, замечательным свойством которого является пьезоэлектрический эффект, заключающийся в том, что при механических сжатиях и растяжениях на гранях кварцевой пластины появляются электрические заряды (прямой пьезоэффект). Внешнее же электрическое поле вызывает механические деформации (обратный пьезоэффект).

Электрические колебания вызывают упругие механические колебания пластины, при которых на гранях создаются колебания электрического поля. Следовательно, кварц можно сравнить с колебательным контуром. Преимущества кварца как контура в том, что его легко защитить от влияний дестабилизирующих факторов благодаря малым размерам. Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) кварца (пластины с косым срезом) близок к нулю, добротность кварца как контура достигает нескольких десятков тысяч.

Автогенераторы, частота которых стабилизируется кварцем, часто называют *кварцевыми*. Кварц может быть включен между сеткой и анодом, сеткой и катодом или между анодом и катодом (последнее включение используется редко из-за сложности схемы питания).

Схемы кварцевых генераторов обычно представляют собой разновидности индуктивной или емкостной трехточек, в которых сопротивление кварца имеет индуктивный характер, а это возможно в очень узком интервале частот. Этим и объясняется свойство кварцевых генераторов обеспечивать стабильность частоты.

Часто кварц используется в двухконтурных схемах со слабой связью в качестве колебательного контура, определяющего частоту генератора. Связь осуществляется через межэлектродную емкость сетка—катод или анод—сетка. Однако двухконтурные схемы с кварцем обладают недостатком, свойственным двухконтурным схемам вообще. При большой мощности в анодном контуре частота генерации сильно зависит от изменения его параметров. Этот недостаток не имеет места в автогенераторах с кварцем, собранных по схеме Шембеля.

Рассмотрим один из вариантов схемы Шембеля с кварцем (рис. 5.18 а). Подобная схема использована в радиопередатчиках автоматических метеорологических станций, радиоветромеров и радиоосадкомеров. Сеточный контур генератора включен по схеме емкостной трехточки, кварц — между управляющей и экранирующей сетками.

Анод лампы включен по схеме последовательного питания. Анодный контур состоит из катушки $L_{ка}$, постоянных конденсато-

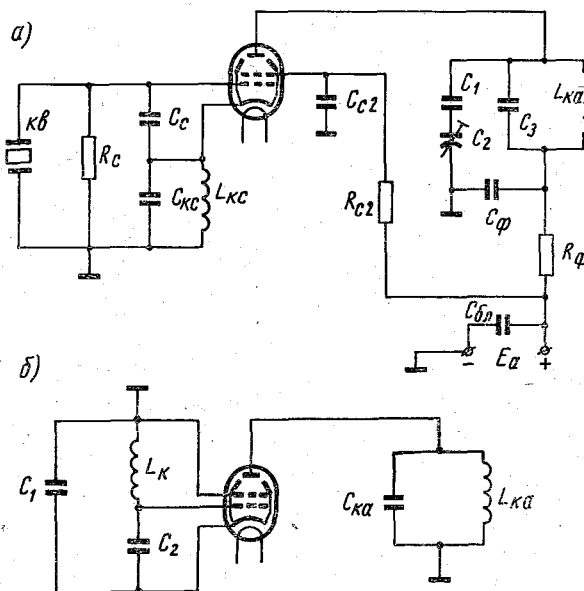


Рис. 5.18. Схема Шембеля с кварцем (а) и эквивалентная ей емкостная трехточка (б).

ров C_3 и C_1 и подстроечного конденсатора C_2 . Полная емкость контура

$$C_{ка} = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Конденсатор C_2 служит для подстройки анодного контура. По высокой частоте он включен параллельно C_3 , но чтобы на нем не было высокого напряжения, опасного при регулировке, последовательно с ним включен конденсатор C_1 . Ротор конденсатора C_2 соединен с корпусом, чтобы исключить влияние руки настройщика. Экранирующая сетка подключена к анодному источнику питания через гасящее сопротивление $R_{с2}$, а по переменной составляющей соединена с корпусом через конденсатор $C_{с2}$.

Пояснить работу сеточного контура удобнее на эквивалентной схеме генератора (рис. 5.18 б). Кварц эквивалентен некоторой

индуктивности L_K . Контур $L_{KC}C_{KC}$ настроен на частоту, которая ниже генерируемой, и является для токов данной частоты некоторой емкостью C_1 . Емкость C_2 , с которой в емкостной трехточке снимается напряжение обратной связи, может служить конденсатор или межэлектродная емкость катод—сетка.

Таким образом, эта эквивалентная схема представляет собой емкостную трехточку, в которой возможна генерация колебаний только тогда, когда сопротивление кварца будет иметь индуктивный характер, а это, как упоминалось выше, возможно лишь в очень узком интервале частот.

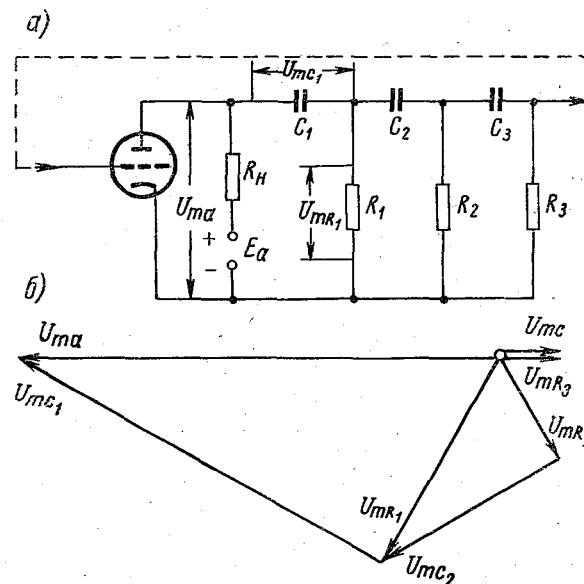


Рис. 5.19. RC -генератор с фазовращающими ячейками (а) и векторная диаграмма напряжений (б).

RC -генераторы синусоидальных колебаний. Задающие генераторы часто собираются по схемам, не содержащим колебательного контура. Такие генераторы называют RC -генераторами. Применяются две разновидности RC -генераторов: с фазовращающими ячейками и с мостом Вина.

Автогенератор с фазовращающими ячейками строится на базе однокаскадного усилителя (рис. 5.19 а). Как известно, напряжение на аноде сдвинуто по фазе относительно напряжения на сетке на 180° . Если параллельно анодной нагрузке включить R_1C_1 -цепочку, то напряжение на сопротивлении R_1 будет опережать U_a (рис. 5.19 б). Если параллельно сопротивлению R_1 подключить R_2C_2 -цепочку, то напряжение на R_2 будет опережать U_{R1} . То же будет и с третьей цепью. Можно взять $R_1=R_2=R_3$, $C_1=C_2=C_3$; на какой-то частоте три RC -цепочки дадут

сдвиг фаз относительно U_a на 180° (каждая RC -цепочка сдвинет фазу на 60°) и полученное напряжение будет совпадать по фазе с напряжением на сетке. Баланс фаз выполняется при частоте генерации

$$\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{6}}, \quad (5.15)$$

где $R=R_1=R_2=R_3$ и $C=C_1=C_2=C_3$ — параметры RC -цепочки.

Чтобы амплитуда напряжения на выходе $U_{m\text{вых}}$ равнялась амплитуде напряжения на входе U_{mc} , должно выполняться условие $U_{ma} \geq 8U_{mc}$.

Принцип работы данной схемы основан на том, что условие баланса фаз выполняется только на одной частоте. Фазовращающие ячейки играют роль избирательного элемента.

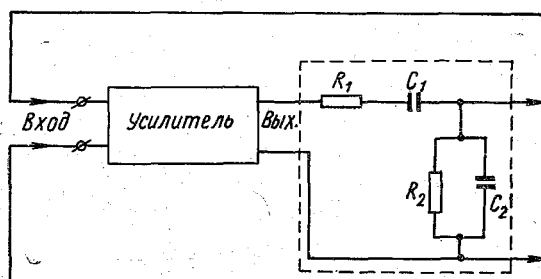


Рис. 5.20. RC -генератор с мостом Вина (пунктирной линией обведена схема моста Вина).

Автогенератор с мостом Вина собран по схеме (рис. 5.20), в которой $R_1=R_2=R$; $C_1=C_2=C$. Генерация в такой схеме возможна лишь на той частоте, на которой мост Вина не вносит сдвига фаз. Генератор строится на базе двухкаскадного усилителя (чтобы усилитель не давал сдвига фазы) с коэффициентом усиления $K_0 \geq 3$. Тогда на частоте $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ будет выполнен баланс фаз и баланс амплитуд.

RC -генераторы применяются преимущественно для получения низкочастотных колебаний. Они просты по конструкции, но получить чисто гармонические колебания трудно из-за нелинейных искажений усилителя.

Особенности генераторов на транзисторах. Генераторы с внешним возбуждением, собранные на транзисторах, имеют в цепи коллектора контур, настроенный на частоту генерации. Напряжение сигнала от возбудителя подается на базу. Генераторы работают в режиме II рода, и переменное напряжение на базе вызовет возникновение импульсов коллекторного тока, которые

возбуждают колебания в коллекторном контуре. Режим работы генератора может быть недонапряженным, критическим или перенапряженным.

Рассмотрим работу генератора на транзисторах, изображенного на рис. 5.21. Так как входное сопротивление транзистора невелико, то для согласования выходного сопротивления возбуждателя с входным сопротивлением генератора в данной схеме используется понижающий трансформатор Tr . Напряжение смещения на базу транзистора подается автоматически, за счет падения напряжения на сопротивлении R_6 от токов базы. Дроссель L_3 уменьшает потери мощности тока высокой частоты в сопротивлении. Нагрузкой генератора является контур $C_K L_K$. Здесь используется последовательное питание. С коллекторного вывода

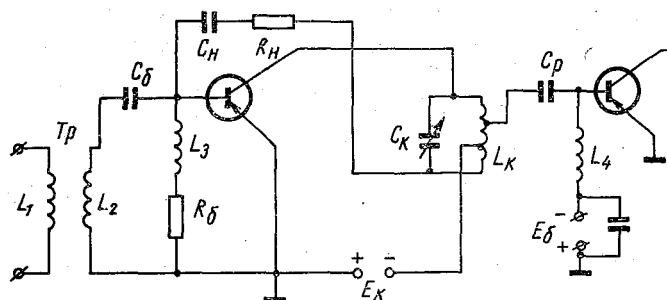


Рис. 5.21. Схема генератора на транзисторах с внешним возбуждением.

катушки контура L_K через емкость коллектор—база $C_{кб}$ на базу поступает переменное напряжение, т. е. возникает отрицательная обратная связь. Для устранения влияния (нейтрализации) этой обратной связи вводится положительная обратная связь. Для этого с противоположного вывода катушки на базу через сопротивление $R_н$ и конденсатор $C_н$ подается напряжение, находящееся в фазе с входным сигналом. На следующий каскад усиления (выходной усилитель мощности) напряжение снимается с части витков катушки контура $C_K L_K$, чем обеспечивается автотрансформаторная связь между каскадами.

Автогенераторы на транзисторах, так же как и на лампах, представляют собой усилители мощности с положительной обратной связью.

В качестве примера рассмотрим схему автогенератора с индуктивной обратной связью (рис. 5.22). При включении питания в контуре $C_K L_K$ возникают свободные колебания. Магнитное поле катушки L_K возбуждает э. д. с. индукции в катушке связи $L_{св}$. На базу подается переменное напряжение, частота которого равна частоте свободных колебаний в контуре.

В отрицательные полупериоды напряжения на базе создаются импульсы тока коллектора и тока базы. Импульсы тока коллектора пополняют энергию колебаний в контуре. Импульсы тока в базе заряжают конденсатор C_6 , а при его разрядке через сопротивление R_6 создается напряжение на базе, которое смещает рабочую точку в область положительных напряжений на базе. Это значит, что генератор работает с отсечкой коллекторного тока.

Известно, что генерация возможна лишь при выполнении баланса амплитуд и баланса фаз. В транзисторных автогенераторах, в отличие от ламповых, баланс фаз выполняется при условии, что частота генерации будет ниже, чем собственная частота контура. Чем выше частота генерации, тем разница должна быть больше.

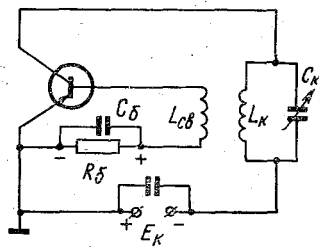


Рис. 5.22. Схема автогенератора на транзисторах.

Автогенераторы на транзисторах собираются по схемам, аналогичным ламповым. Автоматическое смещение применяют за счет токов базы и за счет тока эмиттера. Фиксированное напряжение смещения подается от источника E_k через гасящее сопротивление или с помощью делителя напряжения.

§ 5.4. ГЕНЕРАТОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Работа ламп в диапазоне СВЧ имеет ряд особенностей по сравнению с работой в диапазоне волн длиннее 30 м. На сверхвысоких частотах малые межэлектродные емкости $C_{ас}$, $C_{ск}$, $C_{ак}$ становятся небольшими сопротивлениями, зато заметным становится сопротивление малых индуктивностей вводов электронных ламп. Время пролета электронов в межэлектродном пространстве соизмеримо с периодом изменения напряжения на сетке. По этим причинам ухудшаются параметры лампы, а на частотах свыше 1000 Мгц применение обычных электронных ламп становится вообще невозможным. Поэтому в диапазоне длин волн от 10 м до 10 см используются специальные электронные лампы, а на еще более коротких волнах применяют особые электронные приборы (клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны, лампы обратной волны).

Влияние межэлектродных емкостей и индуктивностей вводов лампы выражается прежде всего в том, что уменьшается входное сопротивление лампы $R_{вх}$, т. е. сопротивление между сеткой и катодом:

$$R_{вх} = \frac{U_{m\text{ вх}}}{I_{m\text{ вх}}},$$

где $U_{m \text{ вх}}$ — амплитуда напряжения сигнала на входе; $I_{m \text{ вх}}$ — амплитуда тока управляющей сетки.

Наибольшее влияние оказывает индуктивность катодного ввода. При конструировании ламп, работающих на СВЧ, межэлектродные емкости снижают путем уменьшения размеров электродов. Индуктивность вводов уменьшают, применяя толстые проводники или диски.

Большое влияние на входное сопротивление лампы оказывает инерция электронов. Когда время пролета электронов от катода к аноду становится соизмеримым с периодом переменного напряжения на сетке, появляется отставание по фазе анодного тока от напряжения на сетке. На сетке появляется «наведенный ток». Время пролета электронов от катода к аноду составляет величину порядка 10^{-9} сек, тогда как период колебаний с частотой $f = 3 \cdot 10^8$ гц ($\lambda = 1$ м)

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \approx \approx 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ сек.}$$

Когда напряжение на сетке станет положительным, от катода к аноду полетит большое количество (сгусток) электронов (уплотненный объемный заряд). Когда электроны подойдут к сетке, то напряжение на ней станет отрицательным, и они практически мгновенно долетят до анода.

Приближаясь к сетке, объемный заряд наводит на ней заряды и в цепи сетки появляется ток. Удаляясь от сетки к аноду, объемный заряд вызовет в цепи сетки ток обратного направления. Таким образом, в цепи сетки появляется наведенный ток, совпадающий по фазе с напряжением, что приводит к потере мощности входного сигнала и уменьшению входного сопротивления.

Генераторы метровых волн. В качестве генераторных ламп в диапазоне метровых волн используются ультракоротковолновые триоды, лучевые тетроды и пентоды. В качестве колебательной системы применяют отрезки двухпроводной линии. Колебательные системы с сосредоточенными параметрами могут быть использованы только на волнах длиннее 5 м.

Для примера рассмотрим схему одного из генераторов, предназначенных для передачи сигналов радиозонда (рис. 5.23).

Работает этот генератор на волне 1,5—2 м. Вместо катушек индуктивности здесь использован отрезок длинной линии $L_{\text{д}}$. Такой контур имеет высокую добротность и легко настраивается

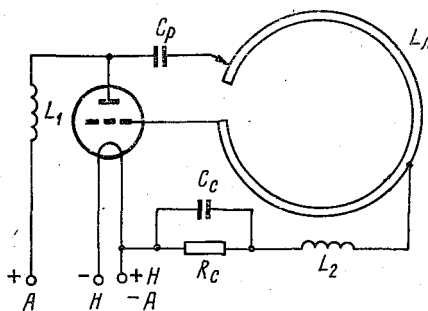


Рис. 5.23. Схема генератора УКВ.

в результате изменения длины линии. Частота генерации такой схемы определяется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L_a + L_c + L_n) \left(\frac{C_{ck} C_{ak}}{C_{ck} + C_{ak}} + C_{ac} \right)}}, \quad (5.16)$$

где L_a и L_c — индуктивность анодного и сеточного вводов лампы.

Дроссели L_1 и L_2 не пропускают токи высокой частоты на источник питания. $R_c C_c$ -цепочка служит для получения автоматического смещения за счет токов сетки. Параметры RC -цепочки подобраны так, чтобы передатчик работал в режиме прерывистой генерации (автомодуляции).

Сопротивление конденсатора $C_p \approx 510 \text{ пф}$ (разделительного) является малым для токов генерируемой частоты ($f \approx 216 \text{ МГц}$).

Клистроны. Для устранения влияния инерции электронов сконструированы принципиально новые электронные приборы — клистроны. В клистронах время пролета электронов может быть равным или больше периода колебаний T . Различают *пролетные* клистроны, предназначенные для генерации и усиления колебаний, и *отражательные*, используемые только для генерации.

Схема устройства и включения пролетного клистрона, работающего в режиме усиления, показана на рис. 5.24 а.

Электронный поток от катода после фокусировки проходит через две пары сеток к коллектору (аноду). Сетки являются продолжением стенок объемных резонаторов P_1 и P_2 .

Если на вход подать напряжение сигнала с частотой f , то петля связи возбудит в резонаторе P_1 колебания. Между сетками 3 и 4 возникнет переменное электрическое поле, которое будет влиять на скорость движения электронов: скорость одних электронов увеличится, а скорость других уменьшится. В пространстве между сетками 4 и 5 (пространство дрейфа) электроны летят по инерции. Так как скорость электронов неодинакова, то быстрые электроны догоняют медленные и электронный поток перестает быть непрерывным: он разбивается на отдельные более или менее плотные группы электронов — электронные сгустки. Через сетки 5 и 6 проходят электронные сгустки, следующие друг за другом также с частотой f . Они в резонаторе P_2 наводят токи и возбуждают в нем колебания. Для получения наибольшего усиления резонаторы P_1 и P_2 должны быть настроены на частоту f , так как они играют роль колебательных контуров. Усиление происходит за счет энергии источника постоянного тока E_p , который создает ускоряющее поле. Для выполнения в клистронном генераторе баланса фаз нужно, чтобы электронные сгустки проходили между сетками 5 и 6 в то время, когда поле между ними тормозящее, и электроны отдают ему энергию. Электроны, пролетевшие сетки 5 и 6, попадают на анод.

Настройка клистрона производится подбором напряжения E_p .

В передатчиках СВЧ пролетные клистроны используют в качестве усилителей мощности, умножителей частоты и автогенераторов. Работают пролетные клистроны преимущественно в диапазоне длин волн от 4 до 10 см. Высокая стабильность частоты клистронных передатчиков является их преимуществом. К недостаткам относятся: узкая полоса частот, трудности перестройки, высокие рабочие напряжения (до 400 кВ), сравнительно большие габариты и вес, низкий КПД.

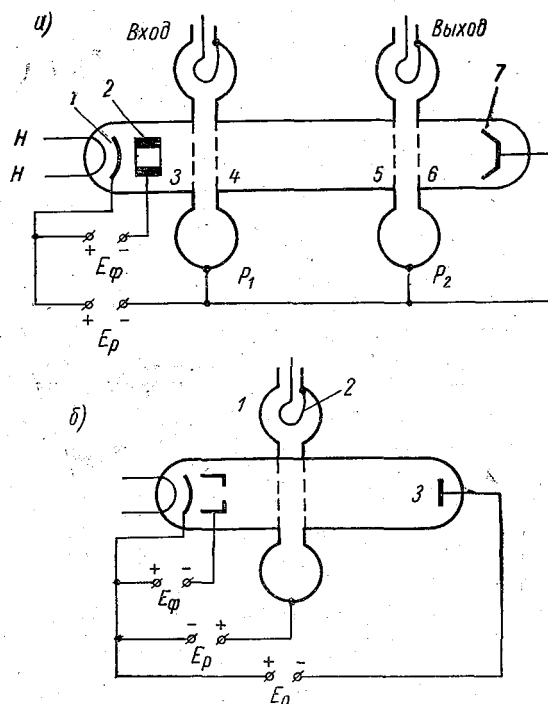


Рис. 5.24. Схема включения клистронов.

а — пролетный клистрон: 1 — катод, 2 — фокусирующий электрод, 3, 4, 5, 6 — сетки, 7 — коллектор; б — отражательный клистрон: 1 — резонатор, 2 — виток связи, 3 — отражатель.

Для генерации колебаний в диапазоне длин волн от 10 см до нескольких миллиметров применяют отражательные клистроны (рис. 5.24 б). Они имеют малые габариты и вес и позволяют производить перестройку в широком диапазоне частот. Используются отражательные клистроны только в маломощных (мощностью до нескольких ватт) передатчиках.

Отражательный клистрон имеет один объемный резонатор, на который подано высокое постоянное напряжение E_ρ для ускорения электронов. За резонатором помещен отражатель — электрод,

находящийся под отрицательным потенциалом E_0 относительно катода. Для фокусировки электронного потока используется дополнительный электрод, на который подается отрицательное напряжение E_ϕ . Вывод энергии от резонатора осуществляется с помощью витка связи и коаксиальной линии.

Рассмотрим подробнее процесс возбуждения колебаний в отражательном клистроне. При включении напряжения поток электронов, влетающих в резонатор, наводит в нем токи, под действием которых в резонаторе возникают свободные колебания. Между сетками создается переменное электрическое поле, которое изменяет скорость электронов (одни электроны ускоряются, другие замедляются в зависимости от фазы электрического поля). Из резонатора в пространство между резонатором и отражателем электроны вылетают с различной скоростью. На них действует тормозящее поле, поэтому они тормозятся, а затем с ускорением летят обратно в резонатор. Режим питания подбирается так, чтобы быстрые и медленные электроны возвратились в резонатор одновременно. Это возможно потому, что быстрые электроны проходят больший путь, а медленные — меньший. Сгустки электронов возвращаются в резонатор тогда, когда на них будет действовать тормозящее переменное электрическое поле и электроны будут отдавать полю часть кинетической энергии. За счет этой энергии поддерживаются незатухающие колебания в резонаторе. Если электронный сгусток влетит в резонатор в момент, когда поле будет для него ускоряющим, то он отберет энергию у поля и колебания затухнут.

Отметим, что основная область применения клистронов — это не передатчики, а приемники, где клистроны играют роль гетеродинов (см. § 6.6).

Лампы бегущей и обратной волны. Большой уровень собственных шумов, узкая полоса пропускания колебаний, недостаточное усиление и сравнительно низкий КПД клистрона как усилителя мощности устранены в лампах бегущей волны (ЛБВ). В ЛБВ можно получить большое усиление и довольно высокий КПД (до 50%) при низком уровне собственных шумов и широкой полосе пропускаемых частот (до сотен мегагерц).

Устройство ЛБВ показано на рис. 5.25 а. Электронная пушка, состоящая из катода и двух анодов, между которыми создается фокусирующее поле, создает электронный луч, который проходит внутри проволочной спирали. Чтобы поперечные размеры луча не увеличивались вследствие взаимного «расталкивания» электронов, используется фокусирующая катушка, питаемая постоянным током. Колебания, которые нужно усилить, подаются с помощью входного волновода и возбуждают колебания в спирали через приемный штырь $Ш_1$. Штырь $Ш_2$ возбуждает колебания в выходном волноводе. Спираль является замедляющей системой, поэтому фазовая скорость распространения электромагнитной

волны вдоль оси спирали примерно в десять раз меньше, чем обычная скорость электромагнитных волн.

Электроны будут длительное время находиться либо в тормозящем, либо в ускоряющем поле волны, и даже слабое поле создаст плотные сгустки и разрежения электронов. Опережая волну, сгустки попадают в тормозящую полуволну и отдают ей энергию.

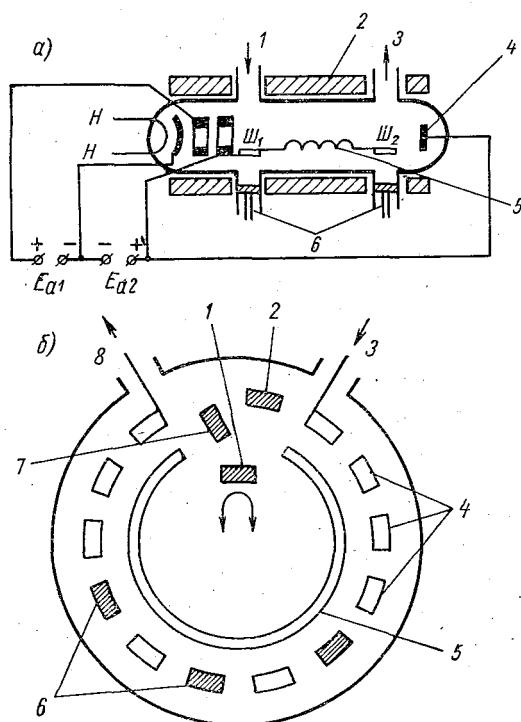


Рис. 5.25. Лампы бегущей волны (ЛБВ).

а) ЛБВ: 1 — волноводный вход, 2 — фокусирующая катушка, 3 — волноводный выход, 4 — коллектор, 5 — замедляющая спираль, 6 — согласующие элементы;
б) ЛБВ типа М: 1 — катод, 2 — анод, 3 — волноводный вход, 4 — стержни гребенчатой замедляющей системы, 5 — холодный катод, 6 — поглотитель, 7 — коллектор, 8 — волноводный выход.

ЛБВ обеспечивают коэффициент усиления до нескольких сотен тысяч. При работе в импульсном режиме они могут дать мощность импульсов до 10 Мвт и более. ЛБВ используют в качестве генераторов, преобразователей, умножителей частоты.

Для генерирования сантиметровых и более коротких волн используют лампы обратной волны (ЛОВ). Они отличаются от ЛБВ тем, что в них волна и электронный луч движутся навстречу друг

другу. В качестве замедляющих систем в ЛОВ чаще всего используют двухзаходные спирали, гребенчатые линии или встречные стержни. Коэффициент полезного действия ЛОВ при использовании ее в качестве автогенератора невелик, но она имеет широкий диапазон перестройки.

Для получения высокого КПД созданы принципиально новые устройства, в которых замедляющая система свернута в кольцо, но не замкнута. В них электроны движутся во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. Называются эти устройства ЛБВ типа М.

На вход замедляющей системы ЛБВ типа М (рис. 5.25 б) подаются СВЧ колебания, которые распространяются к выходу си-

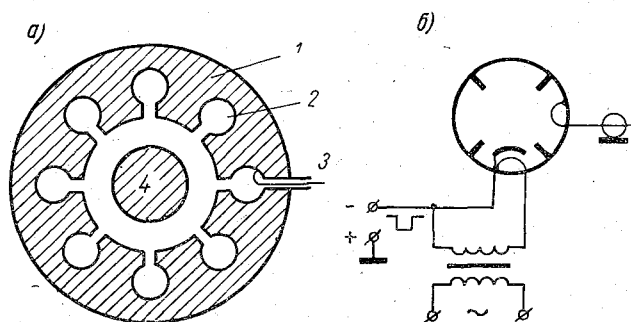


Рис. 5.26. К пояснению работы магнетрона.

а) конструкция: 1 — анод, 2 — резонатор, 3 — волноводный выход, 4 — катод; б) схема включения.

стемы с меньшей скоростью, чем скорость света. Электроны, вылетающие из электронной пушки, под действием сильного магнитного поля изменяют свои траектории. Они становятся подобными траектории, которую описывают точки окружности катящегося колеса. Радиус этой мнимой окружности определяется соотношением между напряженностью электрического и магнитного полей.

Скорость перемещения центра окружности называют переносной скоростью. Если переносная скорость электронного потока равна фазовой скорости электромагнитных волн вдоль замедляющей системы, то в пространстве между холодным катодом и замедляющей системой (пространство взаимодействия) будет происходить взаимодействие электронов и переменного электрического поля. В результате образуются сгустки электронов, имеющие вид «спиц», которые отдают часть энергии волне, в результате чего увеличивается амплитуда колебаний.

Магнетроны. Основным типом генератора мощных СВЧ колебаний является *многорезонаторный магнетрон*.

Магнетрон представляет собой разновидность ЛБВ типа М, замедляющая система которой состоит из цепочки резонаторов. Цилиндрический подогревный катод помещен в центр (рис. 5.26 а) медного блока (анода), в котором имеется четное число резонаторов со щелями. Магнитное поле создается внешним постоянным магнитом.

На рис. 5.26 б показана схема включения магнетрона. Генерирование колебаний в магнетроне происходит в тот промежуток времени, когда между анодом и катодом существует сильное электрическое поле, создаваемое импульсом напряжения, поданного от модулятора. Обычно анод соединен с корпусом, а на катод подается отрицательный импульс.

Постоянное электрическое поле анода, постоянное магнитное поле и переменное электромагнитное поле резонаторов взаимодействуют с движущимся от катода к аноду электронным потоком и группируют объемный заряд. Создается ряд уплотнений, имеющих вид спиц. Спицы движутся с угловой частотой электромагнитного поля резонаторов и проходят мимо щелей в моменты, когда тормозящее электрическое поле щелей достигает максимального значения. Происходит отдача энергии электронов полю резонаторов, в которых поддерживаются незатухающие колебания. Энергия высокочастотных колебаний с помощью петли передается в антенно-фидерную систему.

Магнетроны используются для генерирования колебаний с длинами волн от 30 см до 3 мм.

§ 5.5. МОДУЛЯЦИЯ

Модуляцией называется видоизменение высокочастотных (несущих) колебаний в соответствии с подлежащим передаче сигналом. Как известно, колебания характеризуются следующими параметрами: амплитудой (I_m , U_m), частотой (f) и фазой (φ). При модуляции изменяют один из этих параметров, в связи с чем различают следующие виды модуляции: амплитудная, частотная, фазовая, импульсная и др.

Амплитудная модуляция (АМ). Это изменение амплитуды напряжения (тока) высокой частоты в соответствии с напряжением модулирующего сигнала.

Колебания высокой частоты называют несущими колебаниями. Если амплитуда несущих колебаний до модуляции была U_m , то при модуляции напряжением U_F она будет меняться от $U_{m \min}$ до $U_{m \max}$ (рис. 5.27). Отношение наибольшего изменения амплитуды модулированного колебания к амплитуде несущего колебания, бывшего до модуляции, называют *коэффициентом модуляции (глубиной модуляции) m* :

$$m = \frac{U_{m \max} - U_m}{U_m} 100\%_0 = \frac{\Delta U_m}{U_m} 100\%_0. \quad (5.17)$$

Коэффициент модуляции равен 100% в том случае, если при модуляции амплитуда достигает удвоенного значения амплитуды до модуляции. Режим, при котором $\Delta U_m > U_m$, т. е. $m > 100\%$ называют *перемодуляцией*. При перемодуляции происходит искажение сигнала.

При работе передатчика стремятся к тому, чтобы глубина модуляции не превышала 90—100% при наибольшем напряжении модулирующего сигнала и выполнялось условие так называемой *симметричной модуляции*

$$U_{m \max} - U_m = U_m - U_{m \min}. \quad (5.18)$$

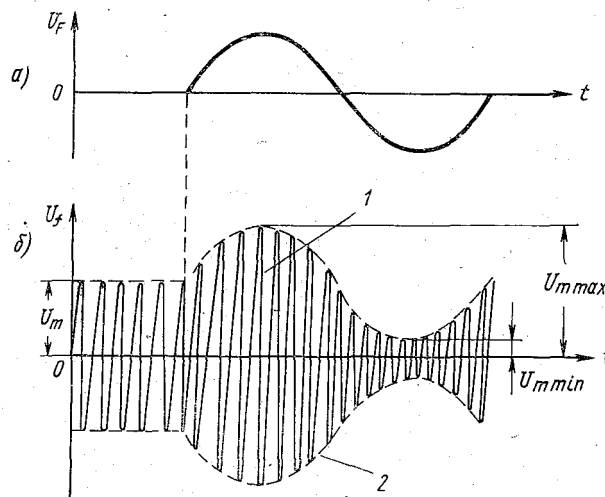


Рис. 5.27. Графики модулирующего напряжения (а) и амплитудно-модулированных колебаний (б).

1 — несущая (частота $f_{\text{н}}$), 2 — огибающая (частота F).

Если на несущие колебания $u = U_m \cos \omega t$ воздействует модулирующий сигнал с угловой частотой Ω , то амплитуда колебаний будет меняться по закону

$$U_m = U_m + \Delta U_m \cos \Omega t, \quad (5.19)$$

где U_m — амплитуда немодулированного несущего колебания; $\Delta U_m = U_{m \max} - U_m$ — наибольшее приращение амплитуды колебаний при модуляции; U_m — амплитуда модулированных колебаний; Ω — угловая частота модулирующего напряжения; t — время.

Закон изменения модулированного напряжения можно записать так:

$$\begin{aligned} u_m &= (U_m + \Delta U_m \cos \Omega t) \cos \omega t = \\ &= U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \end{aligned} \quad (5.20)$$

где u_m — мгновенные значения модулированного высокочастотного напряжения.

Амплитудно-модулированное колебание является сложным (в отличие от простого колебания, каким является, например, гармоническое колебание с постоянной амплитудой $u = U_m \cos \omega t$). Разложим это сложное колебание на простые (гармонические) составляющие. Преобразуем уравнение модулированных колебаний так, чтобы оно включало в себя только гармонические слагаемые. С учетом известной из тригонометрии формулы $\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$ уравнение (5.20) можно видоизменить так:

$$\begin{aligned} u_m &= U_m \cos^2 \omega t + m U_m \cos \Omega t \cdot \cos \omega t = U_m \cos \omega t + \\ &+ \frac{1}{2} m U_m \cos(\omega + \Omega) t + \frac{1}{2} m U_m \cos(\omega - \Omega) t = \\ &= U_m \cos 2\pi f t + \frac{1}{2} m U_m \cos 2\pi(f + F) t + \\ &+ \frac{1}{2} m U_m \cos 2\pi(f - F) t. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Из уравнения (5.21) видно, что если амплитуда колебания с частотой ω меняется с частотой Ω , то это сложное колебание состоит из трех гармонических составляющих: колебаний с частотой ω (их называют несущими), колебаний с частотой $\omega + \Omega$ (их называют *верхними боковыми*) и колебаний с частотой $\omega - \Omega$ (их называют *нижними боковыми*).

Например, если колебания с частотой $f_n = 500$ кГц модулированы колебаниями звуковой частоты $F = 1000$ Гц, то модулированные колебания содержат колебания трех частот: 500, 501 и 499 кГц.

Реальный сигнал звуковой частоты содержит большое число различных колебаний с частотой от нижней звуковой F_n до верхней F_v . Каждой составляющей частоте при модуляции соответствует две боковые частоты. Поэтому реальный сигнал состоит из несущего колебания и боковых полос — верхней и нижней. Полоса частот, излучаемых передатчиком, состоит из дискретных частот и лежит в интервале от нижней боковой частоты $f_{nb} = f_n - F_v$ до верхней боковой частоты $f_{vb} = f_n + F_v$ (рис. 5.28).

Искажения при модуляции. При осуществлении модуляции появляются частотные и нелинейные искажения. *Частотные искажения* появляются из-за того, что колебания различных частот сигнала усиливаются по-разному. Соотношение между амплитудами составляющих частот меняется, и форма сигнала искажается. Например, если колебательный контур имеет неравномерную частотную характеристику в пределах полосы пропускания

ния, то верхние и нижние боковые частоты будут ослаблены по сравнению с другими частотами, а это приведет в конечном итоге к искажению сигнала при его воспроизведении.

Нелинейные искажения проявляются в том, что огибающая модулированных колебаний изменяется по иному закону, чем модулирующий сигнал, что приводит к появлению в составе огибающей новых гармоник, а в модулированном колебании новых боковых частот, соответствующих этим гармоникам.

Ширина полосы частот, занимаемой, например, радиовещательной станцией, равна удвоенному значению наибольшей частоты модуляции. На средних волнах каждой радиостанции отведена полоса в 9 кГц, поэтому наибольшая частота передаваемого звукового сигнала не должна превышать 4,5 кГц.

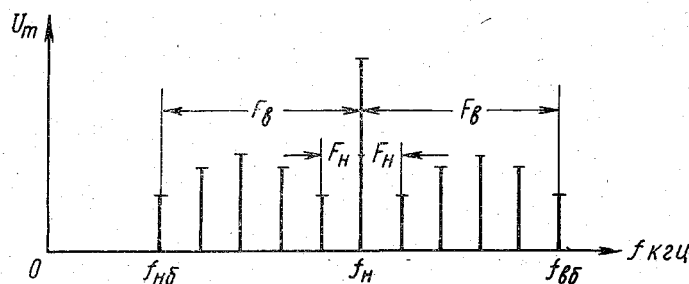


Рис. 5.28. Спектральный состав модулированного колебания.

В последнее время стали использовать так называемую однополосную модуляцию, при которой излучаются колебания одной боковой полосы, а несущие колебания создаются в приемнике. Этот вид модуляции рассматривается в § 7.1 и 7.2.

Способы амплитудной модуляции. Наиболее распространены модуляция смещением (сеточная), анодная и анодно-экранная.

Модуляция смещением заключается в том, что на управляющую сетку генератора с внешним возбуждением, работающего в режиме II рода, подается напряжение смещения, изменяющееся в соответствии с передаваемым сигналом. Амплитуда импульсов анодного тока зависит от угла отсечки, а угол отсечки — от напряжения смещения. Напряжение низкой частоты подается на сетку лампы от микрофонного трансформатора или от усилителя низкой частоты, который называют модулятором. На рис. 5.29 а показана схема сеточной модуляции.

В цепи сетки последовательно с источником постоянного смещения E_c включен источник переменного напряжения — трансформатор, который при подаче на него напряжения низкой частоты будет увеличивать или уменьшать угол отсечки анодного тока. На катушку L_c подается высокочастотное напряжение не-

сущей частоты. Напряжение источника смещения E_c выбирается обычно так, чтобы угол отсечки был равен $70-80^\circ$. Для получения неискаженных модулированных колебаний угол отсечки в процессе работы должен изменяться в пределах от 60 до 120° . Глубина модуляции при сеточной модуляции получается не более $50-70\%$.

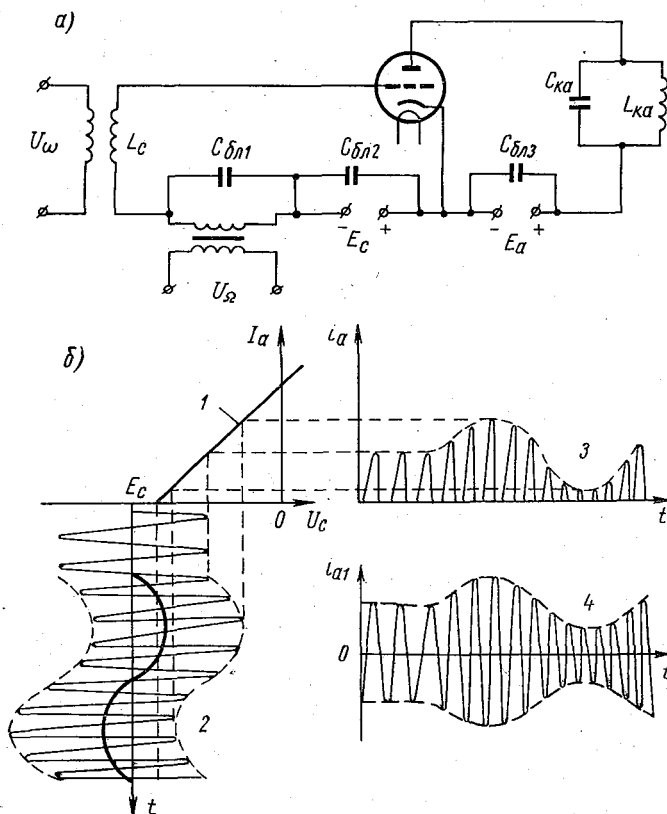


Рис. 5.29. К пояснению сеточной модуляции.

a — принципиальная схема; b — характеристика лампы (I), диаграммы напряжения (2) и токов (3 и 4).

На рис. 5.29 b показаны диаграммы токов и напряжений при сеточной модуляции, идеализированная анодно-сеточная характеристика лампы (I) и график напряжения на сетке (2). На рисунке видно, как меняются анодный ток i_a (кривая 3) и ток в анодном контуре генератора i_{a1} (кривая 4).

Сеточная модуляция позволяет использовать маломощный модулятор (источник модулирующего напряжения), но применение ее ограничено, так как КПД схемы не превышает $30-35\%$.

При *анодной модуляции* модулирующее напряжение воздействует на анод лампы генератора с внешним возбуждением. Здесь от модулятора требуется большая мощность и высокое напряжение. Анодная модуляция позволяет получить КПД порядка 70—80%, что вдвое превышает КПД схемы сеточной модуляции.

Генераторы с анодной модуляцией работают в перенапряженном режиме. В схеме применяется автоматическое смещение, что позволяет уменьшить искажения. В генераторах с анодной модуляцией используются двухтактные модуляторы, так как мощность модулятора должна вдвое превышать мощность генератора.

На рис. 5.30 а приведена схема анодной модуляции. Модулятором является усилитель низкой частоты, собранный на лампе L_1 . Вторичная обмотка выходного трансформатора Tr_2 модулятора включена последовательно с источником питания анода генератора (L_2).

Если напряжение на выходе модулятора будет меняться от $-E_a$ до $+E_a$, то напряжение на аноде лампы генератора будет меняться от 0 до $2E_a$, т. е. будет осуществляться 100%-ная модуляция.

На рис. 5.30 б приведены диаграммы напряжения и токов при анодной модуляции. Угол отсечки при отсутствии модуляции выбирается обычно равным 70—90°.

Для осуществления глубокой модуляции в лампах с экранными сетками следует одновременно с изменением напряжения на аноде изменять напряжение на экранирующей сетке. Это можно осуществить, питая экранирующую сетку от анодного источника через гасящее сопротивление.

Частотная модуляция (ЧМ) — это изменение частоты несущего колебания пропорционально напряжению модулирующего сигнала при неизменной амплитуде. Частотная модуляция используется в диапазоне метровых волн в радиовещании (УКВ ЧМ) и телевидении (звуковое сопровождение). Частотно-модулированные колебания помехоустойчивы и позволяют получать высокое качество воспроизведения, однако в диапазоне длинных и средних волн применение ЧМ нецелесообразно, так как ширина полосы частот при ЧМ значительно больше, чем при АМ.

Наибольшему значению (амплитуде) модулирующего напряжения $U_{m\Omega}$ соответствует наибольшее отклонение частоты $\Delta\omega$ от среднего значения ω_0 . Наибольшее отклонение частоты $\Delta\omega$ называется *девиацией*.

Из теории известно, что напряжение при частотной модуляции изменяется по закону

$$u_c = U_m \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t), \quad (5.22)$$

где u_c — мгновенное значение напряжения; U_m — амплитуда напряжения; ω — угловая частота несущего колебания; Ω — угло-

вая частота модулирующего колебания; t — время; m — индекс модуляции, который в случае ЧМ определяется как отношение девиации частоты к частоте модуляции:

$$m = \frac{\Delta\omega}{\Omega}. \quad (5.23)$$

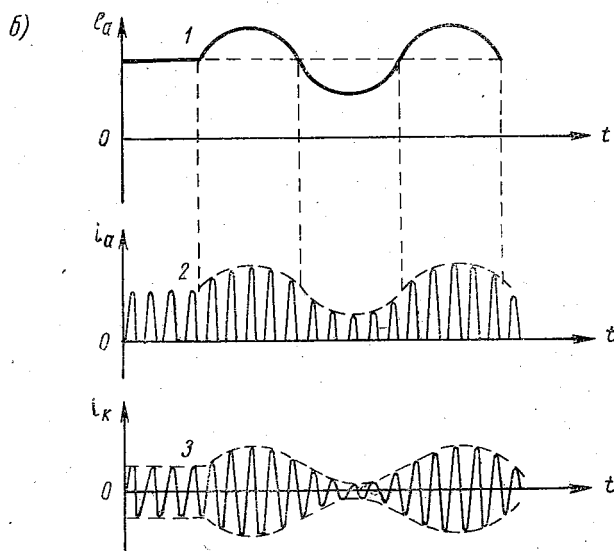
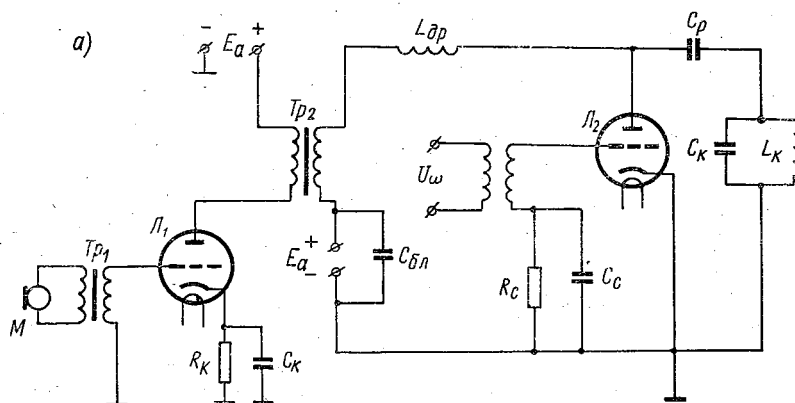


Рис. 5.30. К пояснению анодной модуляции.

a — принципиальная схема; *б* — диаграммы напряжения на аноде (1), анодного тока (2) и тока в контуре (3).

На рис. 5.31 показаны графики модулирующего напряжения U_{Ω} (кривая 1), частотно-модулированного напряжения u_m (кривая 2) и частоты ω (кривая 3).

Разновидностью частотной модуляции является *фазовая модуляция (ФМ)*. При ФМ пропорционально модулирующему напряжению изменяется фаза колебания. При этом изменяется и частота, но не по закону изменения частоты модулирующего напряжения.

Для получения ЧМ используются прямые и косвенные методы. При косвенных методах частотной модуляции воздействие на несущую частоту производится в промежуточных каскадах.

При прямых методах частотной модуляции изменение частоты производится изменением параметров контура задающего генератора.

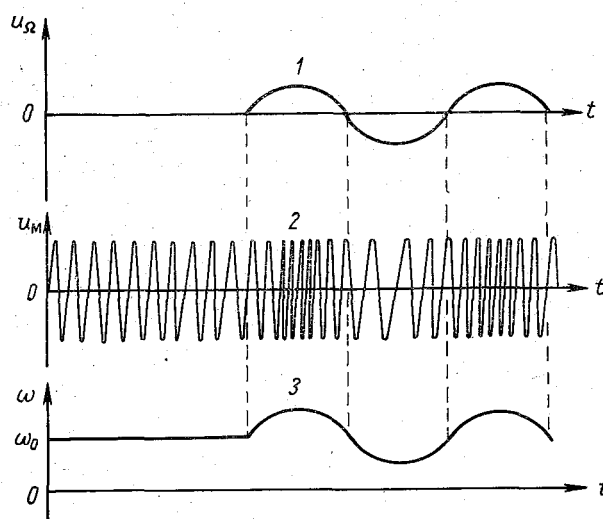


Рис. 5.31. Диаграммы напряжений (1 и 2) и диаграмма частоты (3) при частотной модуляции.

Схема с реактивной лампой. Как пример прямого метода, рассмотрим одну из схем генератора с частотной модуляцией, собранную на электронной лампе, которая в данном включении (рис. 5.32) называется *реактивной*, т. е. она действует как управляемая емкость или индуктивность. Она присоединяется параллельно колебательному контуру. Если изменять смещение на сетке этой лампы по закону модулирующего напряжения, то будет меняться крутизна характеристики лампы и емкость или индуктивность контура.

Покажем, каким образом лампа, включенная по схеме, показанной на рис. 5.32 а, оказывается эквивалентной индуктивности. Вспомним, что индуктивность характеризуется тем, что протекающий по ней ток по фазе отстает от напряжения на 90° .

Сопротивление и емкость в цепи сетки выбираются из условия

$R \gg \frac{1}{\omega C}$, в результате чего выполняется условие $I_{RC} \ll I_{ma}$. Построим векторную диаграмму (рис. 5.32 б). Если вектор напряжения U_m отложить вверх, то вектор тока I_{RC} будет направлен тоже вверх, так как сопротивление RC -цепочки можно считать активным. Напряжение на конденсаторе C будет отставать от тока на 90° . Анодный ток I_{ma} (переменная составляющая) совпадает по фазе с напряжением на сетке и, следовательно, отстает от анодного напряжения на 90° . Общий ток I_m определяется в основном анодным током, и можно считать, что угол сдвига фаз

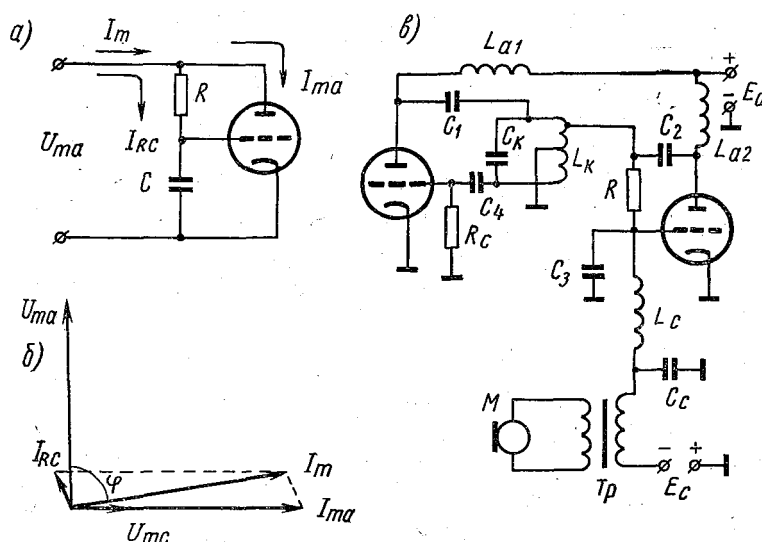


Рис. 5.32. К пояснению работы схемы с реактивной лампой.

а — упрощенная схема; б — векторная диаграмма; в — автогенератор с реактивной лампой.

между током I_m и напряжением U_m равен 90° (как в катушке индуктивности).

Эквивалентная индуктивность определяется из формулы $L_a = \frac{RC}{S}$, где L_a — эквивалентная индуктивность, R и C — параметры RC -цепочки, S — крутизна характеристики лампы.

На рис. 5.32 в показана практическая схема подключения реактивной лампы к автогенератору. Низкочастотное напряжение от микрофонного трансформатора воздействует на сетку лампы, смещая рабочую точку, изменяя тем самым крутизну характеристики на рабочем участке и индуктивность реактивной лампы, включенной по высокой частоте параллельно части катушки контура L_K трехточечного автогенератора.

Реактивная лампа может быть эквивалентна и емкости. Для этого нужно включить конденсатор C между анодом и сеткой, а сопротивление R между сеткой и катодом. При условии $\frac{1}{\omega C} \gg R$ реактивная лампа будет эквивалентна емкости.

Амплитудная манипуляция. При передаче телеграфных сигналов по радио используется режим амплитудной манипуляции. Излучение электромагнитных волн происходит при замкнутом ключе и отсутствует при разомкнутом.

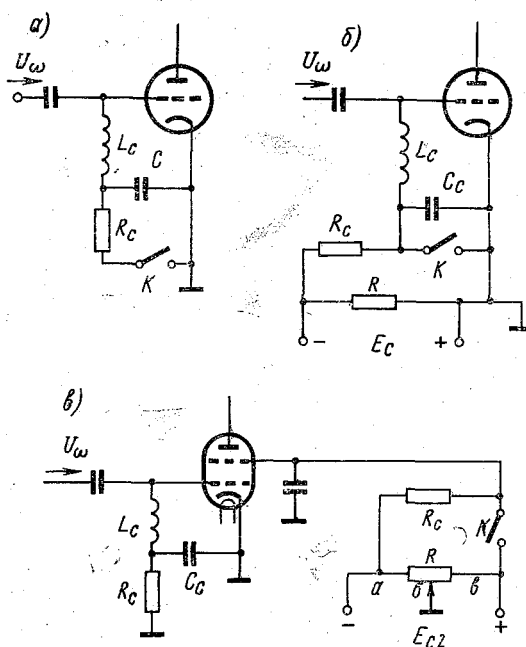


Рис. 5.33. Схемы манипуляции на управляющую сетку (а и б) и на экранирующую сетку (в).

Рассмотрим схемы, с помощью которых можно осуществить манипуляцию. Наибольшее распространение получили схемы манипуляции на управляющую и экранирующую сетки. На рис. 5.33 а приведена схема манипуляции на управляющую сетку путем размыкания цепи постоянной составляющей тока сетки. Сеточный ток зарядит конденсатор, и лампа запрется. Некоторым недостатком этой схемы является то, что полного запираения лампы получить нельзя. Однако в ряде случаев она применяется, так как не требует дополнительного источника смещения. Полное запираение можно получить в схеме, показанной на рис. 5.33 б, так

как здесь при разомкнутом ключе K (или контактах реле) на сетку подается большое отрицательное напряжение E_c .

На рис. 5.33 в приведена схема манипуляции на экранирующую сетку. При разомкнутом ключе на экранирующую сетку подается отрицательное напряжение с участка потенциометра ab , а при замкнутом — нормальное положительное напряжение с участка $бв$.

Сопротивление R_c в двух последних схемах служит для уменьшения тока, протекающего через ключ при его замыкании.

Подробнее о модуляции при радиотелеграфной работе рассказывается в главе 7.

Импульсная модуляция. В радиолокационных передатчиках используется импульсная модуляция. Излучение СВЧ колебаний

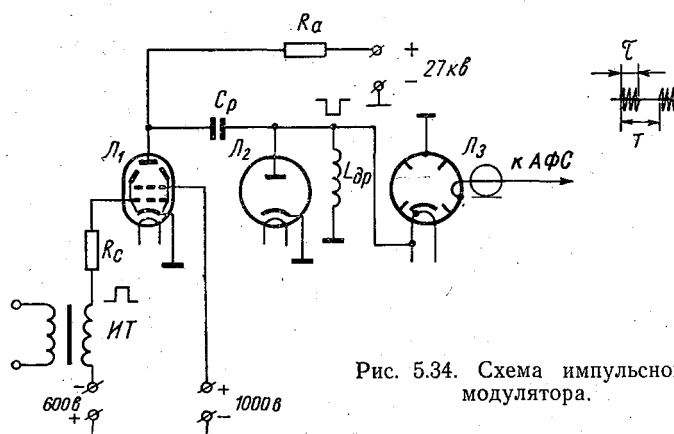


Рис. 5.34. Схема импульсного модулятора.

происходит в течение короткого времени $\tau_{\text{и}}$ (длительность импульса), после чего следует пауза.

В радиолокации используются импульсы длительностью $\tau_{\text{и}} = 0,25 \div 2$ мксек с частотой повторения в пределах $500 \div 4000$ имп/сек. В большинстве случаев генератор высокой частоты радиолокационного передатчика содержит один каскад — автогенератор, чаще всего магнетрон. Модулировать колебания, вырабатываемые магнетроном, можно только изменением анодного напряжения. Модулятор вырабатывает мощные импульсы постоянного напряжения, которые подаются или на катод магнетрона, или на анод, или на сетку лампы. Для примера рассмотрим схему импульсного модулятора радиолокатора РМС-1 (рис. 5.34). На анод лампы Л_1 через сопротивление R_a подается напряжение 27 кВ. На управляющую сетку от независимого источника смещения через обмотку трансформатора и сопротивление R_c подается напряжение $E_c = -600$ в, запирающее лампу. Конденсатор C_p (накопитель) заряжен до напряжения 27 кВ.

Заряжается он от источника анодного напряжения через зарядное сопротивление R_a и зарядный дроссель $L_{др}$.

При подаче через импульсный трансформатор ИТ положительного импульса напряжения (900—1000 в) на сетку лампы модулятора лампа отпирается и накопительный конденсатор начинает разряжаться через лампу L_1 и магнетрон L_3 . Открытая лампа имеет небольшое сопротивление, поэтому практически все напряжение конденсатора оказывается приложенным к катоду магнетрона (анод заземлен). Под действием высокого напряжения магнетрон генерирует колебания с частотой порядка 1800 МГц. Напряжение на магнетроне во время генерации остается практически постоянным, так как емкость накопительных конденсаторов велика, а время импульса мало, и они не успевают заметно уменьшить напряжение. Для обеспечения устойчивой работы магнетрона форма импульса на катode магнетрона должна быть близкой к прямоугольной. Для этого в схему модулятора введены корректирующие элементы. Для увеличения крутизны заднего фронта импульса параллельно магнетрону включен дроссель $L_{др}$. Для гашения последующих выбросов напряжения отрицательной полярности, приводящих к возникновению паразитной генерации, параллельно магнетрону включен подавляющий диод L_2 .

Сверхгенеративный режим работы передатчиков. В некоторых передатчиках используется так называемый *сверхрегенеративный режим*, при котором амплитуда генерируемых высокочастотных колебаний возрастает при воздействии на схему высокочастотного сигнала.

Если на сетку автогенератора, работающего на частоте, например, 2000 МГц, подавать переменное напряжение с более низкой частотой (порядка 1 МГц), то генерация СВЧ колебаний будет зависеть от напряжения на сетке.

При нарастании положительного напряжения амплитуда генерируемых колебаний увеличивается и достигает максимально возможного значения для данного автогенератора, с уменьшением положительного напряжения амплитуда уменьшается, а при определенном отрицательном напряжении условия генерации не выполняются. Следует короткая пауза, а затем вновь повышается потенциал сетки, выполняются условия самовозбуждения, колебания нарастают.

Использование этого режима в радиозондовых передатчиках-ответчиках описывается в главе 6.

Основные выводы

1. Наиболее приемлемым для работы генераторов с внешним возбуждением является режим II рода (с отсечкой анодного тока). Появляющиеся в анодной цепи импульсы тока являются

колебаниями сложной формы, состоящими из ряда простых составляющих (гармоник). Число и амплитуда гармоник зависят от величины угла отсечки. С энергетической точки зрения наиболее выгодным для генераторной лампы оказывается критический режим. Режим, при котором выходной контур генератора с внешним возбуждением настроен на частоту гармоники выше первой, называется режимом умножения частоты.

2. Оконечным каскадом передатчика является выходной усилитель, нагрузкой которого служит антенна. Наиболее выгодной оказывается двухтактная схема выходного усилителя, которая обеспечивает удвоение мощности, фильтрацию четных гармоник и устойчивость в работе.

3. В качестве задающих генераторов в радиопередатчиках используются усилители с положительной обратной связью — автогенераторы. Колебания в автогенераторах возникают только в результате преобразования постоянного напряжения питания без постороннего источника переменного напряжения.

Наиболее распространены трехточечные схемы автогенераторов, при которых катод, анод и сетка генераторной лампы соединены по переменной составляющей тока с тремя точками анодного контура. Среди двухконтурных схем автогенератора наибольшее распространение получила схема Шембеля. В качестве генераторов низкой частоты часто применяются *RC*-генераторы.

4. Наибольшую стабилизацию частоты передатчика обеспечивает включение кварца, который используется либо в качестве колебательного контура, либо в качестве реактивного элемента контура.

5. В диапазоне сверхвысоких частот применение обычных ламп становится невозможным из-за влияния собственных емкостей и индуктивностей элементов ламп, а также из-за того, что время пролета электронов становится соизмеримым с периодом колебаний. В связи с этим для работы в диапазоне СВЧ применяются специальные генераторные приборы: лампы бегущей и обратной волны, клистроны, магнетроны.

6. Для того чтобы несущие электромагнитные колебания содержали полезную информацию, их необходимо модулировать. В зависимости от предъявляемых требований применяются различные виды модуляции (амплитудная, частотная, импульсная и т. д.). Амплитудная модуляция чаще всего осуществляется в результате воздействия модулирующего напряжения на сеточную или анодную цепь лампы, а частотная — вследствие применения специальной схемы с реактивной лампой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Из каких блоков состоит многокаскадный радиопередатчик?
2. Почему в генераторах с независимым возбуждением используется преимущественно режим II рода?

3. Что называется углом отсечки? Какой угол отсечки следует выбрать при работе генератора в режиме удвоителя, утроителя?
4. Почему основным режимом для генераторов с посторонним возбуждением является критический?
5. Какие способы смещения рабочей точки используют в генераторах?
6. Какова роль задающего генератора в передатчике?
7. Что такое колебательная характеристика?
8. От чего зависит жесткий или мягкий режим автогенератора?
9. Каковы условия самовозбуждения автогенератора?
10. Изобразите схему индуктивной трехточки.
11. Объясните принцип работы схемы Шембеля.
12. В каком случае возможна прерывистая генерация и от чего зависит частота прерываний?
13. Почему кварц повышает стабильность частоты автогенератора?
14. Изобразите схему транзисторного автогенератора и поясните принцип его работы.
15. Какие особенности имеют лампы, используемые для генерации и усиления СВЧ колебаний?
16. Опишите принцип действия клистрона и магнетрона.
17. Какие виды модуляции используются в передатчиках?
18. Какую полосу частот занимает сигнал, модулированный по амплитуде, если высшая частота модуляции равна 5 кГц?
19. Изобразите схему сеточной модуляции.
20. Объясните работу реактивной лампы.
21. Приведите схемы телеграфной манипуляции.
22. Объясните работу RC-генератора с фазовращающими ячейками.
23. Начертите схему передатчика, имеющего задающий генератор, собранный по схеме емкостной трехточки, одноконтурный усилитель мощности на лучевом тетроде и одноконтурный модулятор. Модуляция сеточная.
24. В чем сущность импульсной модуляции?

ГЛАВА 6

РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

Об основном назначении радиоприемных устройств (радиоприемников) — принимать и преобразовывать энергию электромагнитных волн уже упоминалось в главе 1. В данной главе рассматриваются основные характеристики и схемы наиболее распространенных типов радиоприемников.

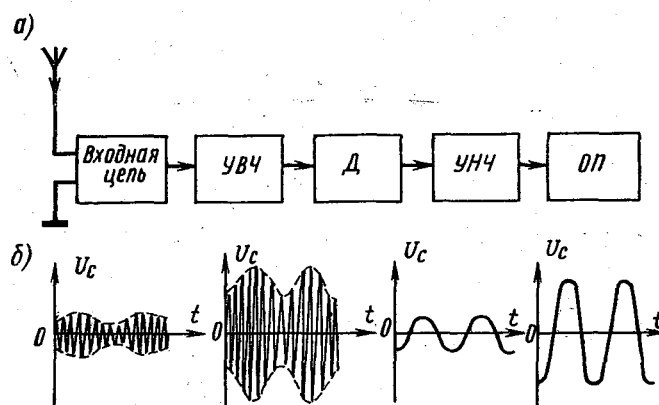


Рис. 6.1. Блок-схема приемника прямого усиления (а) и диаграммы сигналов на выходе отдельных блоков (б).

Для получения общего представления о радиоприемных устройствах рассмотрим типовую схему *радиоприемника прямого усиления* (рис. 6.1 а).

В антенне радиоволны всех частот возбуждают электродвижущие силы, под действием которых во входной цепи возникает ток. Из множества колебаний входная цепь выделяет колебания нужной частоты. Усилитель высокой частоты (УВЧ) увеличивает амплитуду колебаний выделенного (полезного) сигнала.

Детектор (Д) преобразует модулированные колебания высокой частоты в колебания низкой частоты, которые усиливаются

в усилителе низкой частоты (УНЧ) и поступают в оконечный прибор (ОП). В качестве оконечного прибора в зависимости от назначения радиоприемного устройства используются телефон, громкоговоритель, электроннолучевая трубка и т. п.

Если в качестве оконечного прибора использован динамический громкоговоритель, то в нем происходит преобразование электрических колебаний низкой частоты в звуковые колебания, т. е. воспроизводится звук, поступивший в микрофон радиопередатчика. Графики изменений напряжений в описанной схеме показаны на рис. 6.1 б.

§ 6.1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Основными техническими характеристиками радиоприемников являются чувствительность, избирательность, полоса пропускания, выходная мощность, диапазоны волн и др.

Чувствительностью приемника называют наименьшее значение э. д. с. или мощности сигнала в антенне, при которой обеспечивается нормальная работа оконечного прибора. Различают чувствительность по напряжению, которая измеряется в микровольтах (мкв), и по мощности, которая измеряется в микроваттах (мквт). Современные приемники имеют чувствительность до нескольких микровольт.

Избирательностью приемника называют способность выделить сигналы нужной радиостанции из множества сигналов других радиостанций, работающих на иной частоте. Избирательность можно характеризовать частотной характеристикой приемника. Частотная характеристика приемника (рис. 6.2) представляет собой график зависимости напряжения на выходе прием-

ника $U_{\text{вых}}$ (или коэффициента усиления приемника $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$) от частоты f напряжения на входе (при $U_{\text{вх}} = \text{const}$). Если напряжение сигнала на выходе $U_{\text{вых}}$ меньше, чем $\frac{U_{\text{вых max}}}{\sqrt{2}}$ (что

соответствует ослаблению сигнала по мощности в два раза), то считается, что этот сигнал приемник не пропускает. Полосу частот от f_1 до f_2 называют *полосой пропускания* приемника. Для улучшения избирательности приемника полосу пропускания следовало бы выбрать возможно более узкой, но при этом получатся большие искажения сигнала. Например, для неискаженной передачи речи или музыки при амплитудной модуляции необходима полоса пропускания, равная 10 кГц. Для приема импульсных сигналов нужна полоса значительно более широкая (при длительности импульса порядка 1 мксек полоса пропускания расширяется до 2—5 МГц).

Выходной мощностью приемника называют наибольшую мощность, отдаваемую приемником в нагрузку при максимально допустимом уровне искажений принимаемой передачи. Выходная мощность вещательного приемника определяется произведением тока в катушке динамического громкоговорителя на напряжение на катушке: $P_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} U_{\text{вых}}$. Отношение выходной мощности к мощности сигнала на входе приемника называют коэффициентом усиления приемника по мощности: $K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$. При работе

приемника на нагрузку с малыми токами (телевизионные и радиолокационные приемники) задаются величиной выходного напряжения. Коэффициентом усиления приемника по напряжению¹ называют отношение напряжения на выходе (на нагрузке) к напряжению на входе: $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$.

Диапазон волн приемника характеризует способность приемника принимать сигналы радиостанций, работающих на различных частотах. Радиовещательные приемники имеют диапазоны длинных волн 2000—723 м (150—415 кГц), средних волн 577—187,5 м (520—1600 кГц) и коротких волн 75—25 м (4—12 МГц), а также УКВ диапазон 5,65—4,1 м (64,5—73 МГц) для приема частотно-модулированных колебаний. Приемники пеленгаторов и радиолокационных станций обычно работают на фиксированных частотах.

Качество воспроизведения сигнала определяется степенью искажений: чем меньше искажения, тем выше качество воспроизведения. В приемниках имеют место частотные и нелинейные искажения. Частотные искажения определяются частотной характеристикой. Нелинейные искажения вызываются нелинейностью характеристик ламп и других элементов. При этом возникают новые частоты, отсутствующие в передаваемом сигнале. На качество воспроизведения сигнала влияют и различного рода помехи, которые принято подразделять на внешние и внутренние.

Внешние помехи разделяют на атмосферные (грозовые разряды, полярные сияния, космическое излучение, массовые удары заряженных частиц в антенну при выпадении осадков) и промышленные (коллекторные генераторы и двигатели, электросвароч-

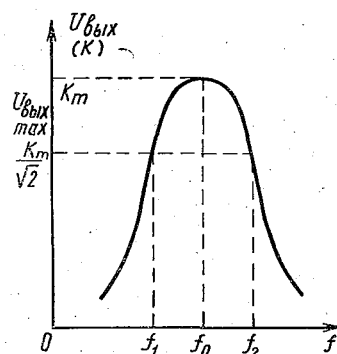


Рис. 6.2. Частотная характеристика приемника (диапазон частот от f_1 до f_2 — полоса пропускания).
 $K_m = U_{\text{вых max}} / U_{\text{вх}}$

¹ Значение коэффициентов усиления приемника часто выражают в децибелах (см. стр. 69—70).

ные аппараты, дуговые электропечи и осветительные приборы, системы зажигания двигателей внутреннего сгорания и другие источники, работа которых сопровождается возникновением искр). К внешним радиопомехам также относится излучение приемников регенеративного или суперрегенеративного типа.

Внутренние радиопомехи — это собственные шумы приемника. Источниками внутренних шумов в радиоприемнике являются резисторы, катушки индуктивности, электронные лампы, полупроводниковые приборы. Причина шумов резисторов и катушек — тепловое хаотическое движение электронов в проводнике, которое создает на концах резистора или катушки беспорядочно изменяющееся напряжение. Это напряжение мало, но если оно попадает на вход системы с большим усилением, то на выходе может создаться значительное напряжение.

Причиной шумов электронных ламп является хаотичность процесса испускания электронов, приводящая к тому, что отдельные электроны вылетают с катода не в равноотстоящие друг от друга промежутки времени. Изменения анодного тока создают соответствующее шумовое напряжение на анодной нагрузке лампы.

Шум полупроводниковых приборов обусловлен тепловым шумом объемных сопротивлений, шумом контактного происхождения, возникающим в неметаллических проводниках, и др.

Следует отметить, что внешние помехи убывают с повышением частоты и на СВЧ практически отсутствуют. Внутренние шумы имеют очень широкий спектр частот и проявляются в приемниках, работающих в диапазоне от самых длинных до самых коротких волн.

§ 6.2. ВХОДНЫЕ ЦЕПИ

Разновидности схем входных цепей. Входная цепь связывает приемную антенну с входом первого каскада. Основной задачей входной цепи является выделение сигнала нужной частоты, поэтому во входной цепи используются, как правило, колебательные системы (контуры, полосовые фильтры и др.), настроенные на частоту принимаемой станции.

Работу входной цепи характеризует *коэффициент передачи напряжения* входной цепи, который равен отношению напряжения на входе первого каскада U_c к э.д.с. E_A , подводимой из антенны, т. е. $K_{вх.ц} = \frac{U_c}{E_A}$. Величина коэффициента передачи за-

висит от частоты и типа схемы.

На рис. 6.3 показаны схемы входных цепей с одноконтурными колебательными системами.

Схема с емкостной связью между антенным и входным контурами (рис. 6.3 а) проста по конструкции, но дает непостоянство величины $K_{вх.ц}$ по диапазону. На нижней границе

диапазона полоса пропускания минимальная, избирательность входной цепи максимальная, а на верхней границе, наоборот, полоса пропускания максимальна, а избирательность минимальна. Емкостная связь применяется в основном в приемниках с фиксированной настройкой. Емкость связи $C_{св}$ выбирается в пределах 15—30 пф. При малой емкости связи уменьшается коэффициент передачи напряжения входной цепи, но зато уменьшается и влияние антенного контура на входной.

Схема с индуктивной связью (рис. 6.3 б) обеспечивает большее постоянство коэффициента передачи во всем диапазоне частот. Достигается это следующим образом. В антенный

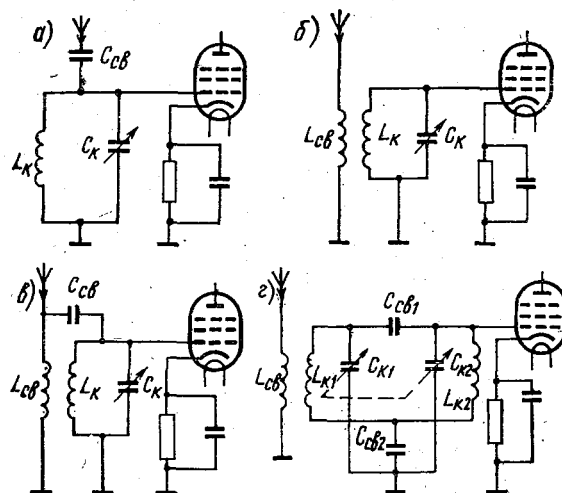


Рис. 6.3. Схемы входных цепей:

а — с емкостной связью; б — с индуктивной связью; в — с индуктивно-емкостной связью; г — с полосовым фильтром.

контур включают катушку связи $L_{св}$ с большой индуктивностью для того, чтобы собственная длина волны антенны была больше длины волны принимаемой станции. В этом случае ток сигнала в антенном контуре в зависимости от частоты изменяется незначительно, т. е. коэффициент передачи относительно постоянен.

Наиболее равномерный коэффициент передачи в одноконтурных входных цепях получается при использовании схемы с индуктивно-емкостной связью (рис. 6.3 в).

В высококачественных приемниках используется входная цепь с полосовым фильтром (рис. 6.3 г), которая отличается постоянством полосы пропускания во всем диапазоне и обеспечивает высокую избирательность.

Несколько отличается входная цепь, к выходу которой включен транзистор, обладающий, как известно, значительно меньшим

входным сопротивлением, чем лампа. Максимум мощности передается в транзисторный каскад в том случае, когда выходное сопротивление контура будет равно входному сопротивлению усилителя, что достигается при тщательном их согласовании.

На рис. 6.4 показана входная цепь транзисторного приемника с магнитной (ферритовой) антенной. С контура $L_K C_K$ колебания подаются на вход усилителя. Для уменьшения шунтирующего действия на контур малого входного сопротивления транзистора применена схема с неполным (автотрансформаторным) включением контура в цепь база—эмиттер.

Входные цепи усложняются, если в приемнике нужно подавить сигналы заданной частоты (например, близко расположенной станции). Один из методов подавления — включение во входную цепь контура (так называемого фильтра-пробки), настроенного на частоту, которую нежелательно пропустить в приемник. При высокой добротности контура (50—100) его сопротивление будет значительным и мощность мешающей станции будет рассеиваться в этом контуре, не попадая на вход приемника. Для токов других частот контур будет представлять малое сопротивление.

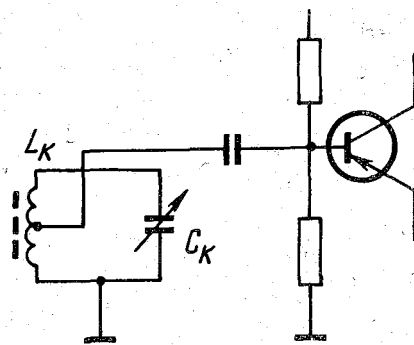


Рис. 6.4. Входная цепь транзисторного приемника с магнитной антенной.

Входные цепи усложняются, если в приемнике нужно подавить сигналы заданной частоты (например, близко расположенной станции). Один из методов подавления — включение во входную цепь контура (так называемого фильтра-пробки), настроенного на частоту, которую нежелательно пропустить в приемник. При высокой добротности контура (50—100) его сопротивление будет значительным и мощность мешающей станции будет рассеиваться в этом контуре, не попадая на вход приемника. Для токов других частот контур будет представлять малое сопротивление.

Особенности входных цепей на сверхвысоких частотах.

Входные цепи на сверхвысоких частотах служат для согласования волнового сопротивления антенного фидера с входным сопротивлением приемника. Входная цепь помогает получить большее превышение напряжения сигнала над уровнем внутренних шумов на входе первого каскада приемника. На СВЧ используется автотрансформаторная, трансформаторная и емкостная связь между фидером и входным контуром. Если фидер несимметричный (коаксиальный), то используется автотрансформаторная связь. При этом для получения в фидере бегущей волны нужно, чтобы сопротивление контура между точкой включения внутренней жилы фидера и корпусом было активным и равным волновому сопротивлению фидера. На СВЧ применяют неполное присоединение лампы к контуру (аналогично рассмотренному выше для транзисторных приемников) для уменьшения шунтирующего действия на контур входной проводимости лампы, которая на СВЧ велика. Если фидер представляет собой симметричную двухпроводную линию, то используется симметричная входная цепь. При этом к линии присоединяется катушка связи, индуктивно связанная

с катушкой входного контура. На дециметровых волнах роль входного контура играет резонансная коаксиальная линия. На сантиметровых волнах входная цепь выполняется в виде объемного резонатора.

§ 6.3. УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Входная цепь приемника передает напряжение, которое превышает э. д. с., наведенную в антенне, не более чем в 10 раз. Мощность полезного сигнала на выходе входной цепи обычно составляет от 10^{-9} до 10^{-12} вт. Этой мощности недостаточно для детектирования и тем более для работы оконечного прибора.

Усилитель напряжения высокой частоты (УВЧ) увеличивает амплитуду колебаний напряжения полезного сигнала и ослабляет помехи и посторонние сигналы. При этом мощность полезного сигнала увеличивается за счет энергии источника постоянного тока. На рис. 6.5 работа УВЧ поясняется с помощью графиков. Он усиливает колебания в полосе частот, близких к несущей частоте f_{H2} , на которую настроен контур, а сигналы с частотой f_{H1} и f_{H3} вследствие резонансных свойств контура, включаемого в анодную цепь усилителя, ослабляет.

УВЧ выполняются на электронных лампах (пентодах) и транзисторах. Пентоды имеют большую крутизну характеристик и низкий уровень внутренних шумов. В диапазоне метровых и дециметровых волн в УВЧ применяются пентоды, на частотах свыше 350 Мгц используются триоды. В сантиметровом диапазоне наибольшее применение нашли лампы бегущей волны (ЛБВ). В последние годы шире стали использоваться маломощные безламповые (параметрические и молекулярные) высокочастотные усилители.

УВЧ на электронных лампах. Резонансные усилители. Простейшей является схема с последовательным питанием, которая показана на рис. 6.6 а. Лампа на эквивалентной схеме (рис. 6.6 б) изображена как генератор переменного напряжения с э. д. с. $E_r = \mu U_{вх}$ (μ — коэффициент усиления лампы, $U_{вх}$ — напряжение на сетке лампы) и внутренним сопротивлением R_i , равным внутреннему сопротивлению лампы. На эквива-

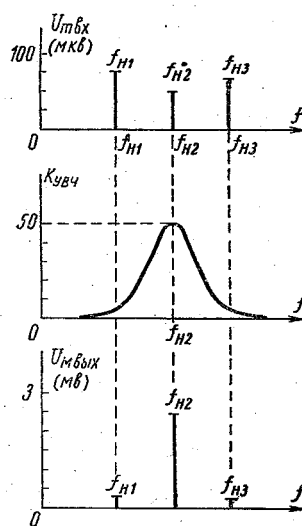


Рис. 6.5. К пояснению избирательности усилителя высокой частоты.

лентной схеме показаны паразитная емкость монтажа C_m , входная емкость ($C_{вх}$) и входное сопротивление ($R_{вх}$) лампы последующего каскада.

Общая емкость в анодной цепи лампы $C'_a = C_a + C_m + C_{вх}$, а резонансная частота анодного контура определяется по формуле $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C'_a}}$. Значение эквивалентного сопротивления

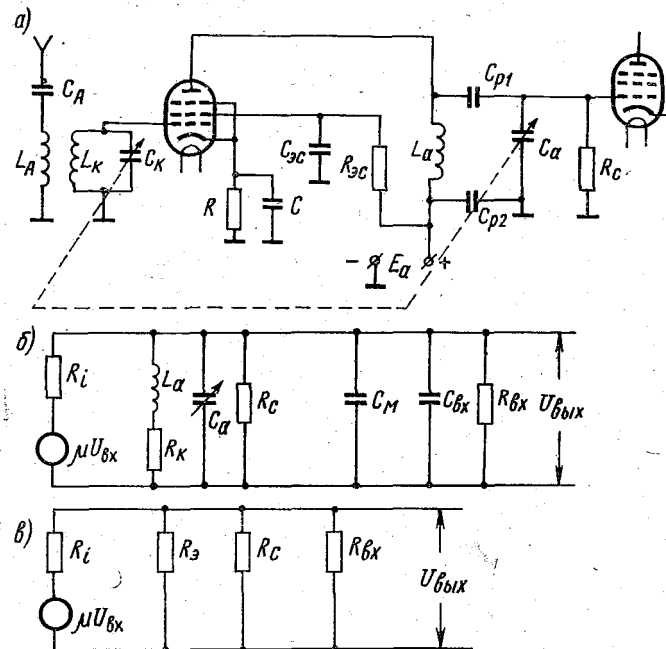


Рис. 6.6. Принципиальная (а) и эквивалентные (б, в) схемы УВЧ.

анодного контура R_3 , настроенного в резонанс, лежит в пределах от нескольких десятков до сотен килоом. Для случая резонанса эквивалентная схема усилителя имеет вид, показанный на рис. 6.6 в. Напряжение на выходе усилителя можно определить, считая, что генератор нагружен на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_i и R'_3 ; R'_3 — полное сопротивление анодной цепи с учетом шунтирующего действия R_C и $R_{вх}$, т. е.

$$R'_3 = \frac{R_3 R_{вх} R_C}{R_3 R_{вх} + R_{вх} R_C + R_3 R_C}. \quad (6.1)$$

Заметим, что обычно $R_{вх} \gg R_0$, $R_c \gg R_0$, поэтому в большинстве случаев можно считать, что $R'_0 \approx R_0$. Приведенные выше рассуждения позволяют считать, что напряжение на выходе

$$U_{вых} = \mu U_{вх} \frac{R'_0}{R_i + R'_0},$$

тогда коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\mu R'_0}{R_i + R'_0}.$$

Так как $R'_0 \ll R_i$, то пренебрегая в знаменателе величиной R'_0 , получим, что коэффициент усиления

$$K = \frac{\mu R'_0}{R_i} = S R'_0, \quad (6.2)$$

где $S = \frac{\mu}{R_i}$ — крутизна характеристики лампы. Напряжение на выходе можно определить по формуле

$$U_{вых} = S U_{вх} R'_0, \quad (6.3)$$

где R'_0 — сопротивление анодной цепи усилителя, которое приближенно равно эквивалентному сопротивлению контура R_0 .

Пример. На вход усилителя, собранного на лампе 6К4П с крутизной характеристики $S = 4,4$ ма/в, подано напряжение $U_{вх} = 20$ мкв (сопротивление контура $R_0 = 30$ ком, входное сопротивление последующего каскада $R_{вх} = 2$ Мом, сопротивление в цепи сетки $R_c = 0,5$ Мом, внутреннее сопротивление лампы 6К4П $R_i = 0,5$ Мом). Полное сопротивление анодной цепи, рассчитанное по формуле (6.1), будет

$$R'_0 = \frac{30 \times 2000 \times 500}{30 \times 2000 + 2000 \times 500 + 30 \times 500} \approx 28 \text{ ком.}$$

Коэффициент усиления определяется по формуле (6.2)

$$K = 4,4 \times 28 = 123,2.$$

Напряжение на выходе можно вычислить по формуле (6.3)

$$U_{вых} = 4,4 \times 20 \times 28 = 2460 \text{ мкв} \approx 2,5 \text{ мв.}$$

Недостаток схемы УВЧ с последовательным питанием в том, что пульсации напряжения питания подаются на сетку лампы второго каскада, что может привести к вторичной модуляции.

В схеме с параллельным питанием (рис. 6.7 а) колебательный контур включается в цепь сетки, поэтому вход второго каскада благодаря катушке L_a имеет малое сопротивление для токов низ-

кой частоты и пульсации напряжения питания значения не имеют. Постоянное напряжение на анод лампы подается через сопротивление или через дроссель ($L_{др} \approx 10 \div 20 L_a$). Наличие дросселя в анодной цепи приводит к непостоянству коэффициента усиления по диапазону частот, кроме того, он вносит в анодный контур дополнительные потери, сокращает диапазон частот, перекрываемый контуром.

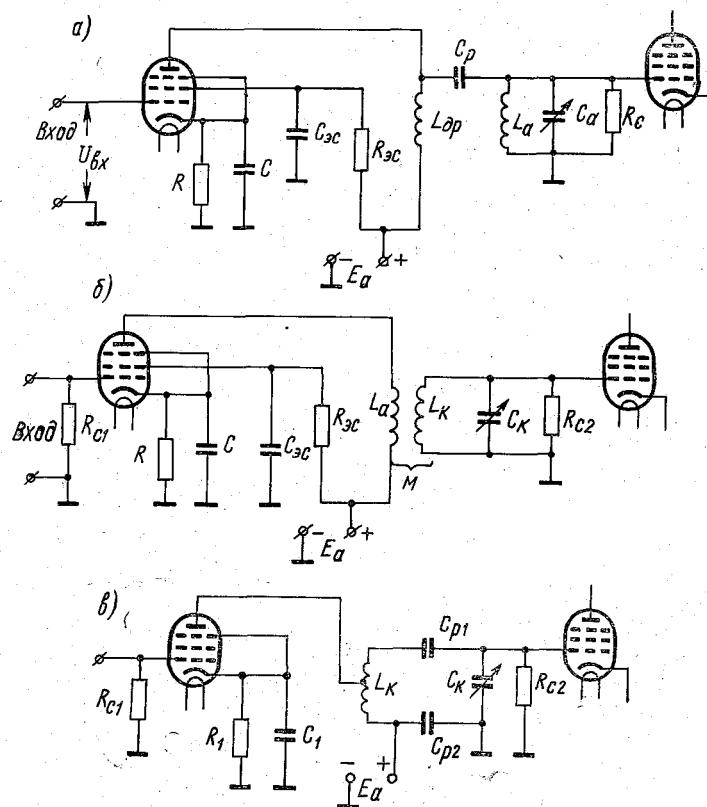


Рис. 6.7. Схема УВЧ с параллельным питанием (а), трансформаторная (б) и автотрансформаторная (в).

Более распространенной является схема УВЧ с трансформаторной связью (рис. 6.7 б). В анодной цепи имеется катушка, индуктивно связанная с катушкой контура $L_k C_k$, включенного в цепь сетки следующего каскада. Эта схема нечувствительна к пульсациям анодного напряжения и дает возможность заземлить ротор конденсатора переменной емкости. Недостатком трансформаторной схемы является несколько меньшее усиление. Кроме того, в анодной цепи имеет место паразитный резонанс, ухудшающий избирательность каскада.

В УВЧ, работающих на сверхвысоких частотах, входное и выходное сопротивления становятся соизмеримыми с резонансным сопротивлением контура, поэтому для получения наибольшего усиления каскады УВЧ работают в режиме согласования (когда входное сопротивление лампы следующего каскада равно выходному сопротивлению предыдущего каскада).

На частотах до 100 МГц используется *автотрансформаторная* схема включения (рис. 6.7 в) с применением пентодов на частотах до 30 МГц и триодов на частотах более 30 МГц. У триодов, имеющих меньшие собственные шумы, значительная проходная емкость C_{ac} , поэтому применяют так называемую каскодную (катодно-сеточную) схему, которая приведена на рис. 6.8. Первый каскод собран по схеме усилителя с общим катодом, второй — по схеме с общей сеткой. Первый каскод обеспечивает усиление

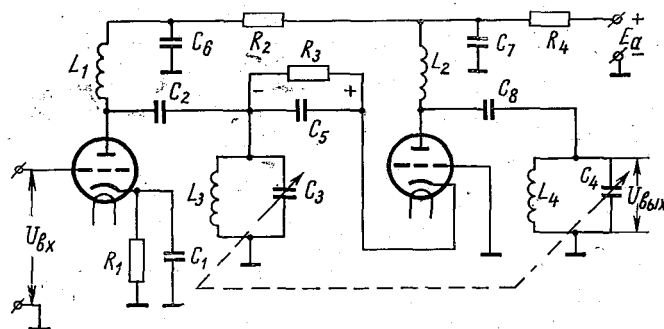


Рис. 6.8. Каскодная схема усилителя высокой частоты.

по мощности, а второй дает значительное усиление по напряжению. В целом схема работает как усилитель мощности и напряжения и обладает малым коэффициентом шума. Детали схемы следующие: L_1 и L_2 — дроссели, являющиеся анодной нагрузкой первого и второго каскадов; R_1C_1 — цепочка смещения; L_3C_3 и L_4C_4 — анодные контуры первого и второго каскадов; R_3C_5 — цепочка смещения второго каскада; R_2C_6 и R_4C_7 — развязывающие фильтры; C_2 и C_8 — разделительные конденсаторы.

Полосовые усилители. Эти УВЧ, в отличие от резонансных, имеют в анодной цепи связанные контуры и используются в тех случаях, когда не надо настраивать контур, т. е. в системах с фиксированной настройкой (например, в усилителях промежуточной частоты, о которых речь пойдет ниже).

Резонансный усилитель может превратиться в автогенератор, если в нем по каким-либо причинам возникнут условия самовозбуждения. Из анодной цепи колебания в цепь сетки могут попасть через проходную емкость лампы C_{ac} и емкость монтажа. Амплитуда сигнала обратной связи зависит от величины емкости

C_{ac} и коэффициента усиления усилителя. При определенных условиях это может привести к самовозбуждению усилителя. Так как проходная емкость не может быть уменьшена до нуля, то коэффициент усиления каскада не должен превышать некоторую величину, при которой усилитель работает устойчиво. Из теории известно, что максимальный коэффициент усиления, обеспечивающий устойчивую работу усилителя, может быть рассчитан по формуле

$$K_{m \text{ уст.}} \leq 5,35 \sqrt{\frac{S}{f_0 C_{ac}}}, \quad (6.4)$$

где S — крутизна характеристики лампы (ma/v); f_0 — частота настройки контура ($Mгц$), C_{ac} — проходная емкость лампы ($nф$) (монтаж считается идеальным). Обычно значение коэффициента усиления берут в несколько ($3 \div 4$) раз меньше, чем получаемое по формуле (6.4). Режим работы усилителя подбирается выбором лампы (S и C_{ac}) и сопротивления нагрузки R_n .

Например, максимальный устойчивый коэффициент усиления лампы 6К4П ($S=4,4 \text{ ма/в}$, $C_{ac}=0,0045 \text{ нф}$) на частоте $f_0=10 \text{ Мгц}$, рассчитанный по формуле (6.4), равен

$$K_{m \text{ уст.}} = 5,35 \sqrt{\frac{4,4}{10 \cdot 0,0045}} \approx 170.$$

Для создания достаточного запаса устойчивости коэффициент усиления выбираем в 3 раза меньше, т. е. $K \approx 55$. Сопротивление нагрузки при этом

$$R'_n \leq \frac{K}{S} = \frac{55}{4,4} = 12,5 \text{ ком.}$$

В многокаскадных усилителях обратная связь может возникнуть через общие источники питания. Для уменьшения таких связей применяются развязывающие цепи.

УВЧ на транзисторах. Транзисторные усилители высокой частоты, так же как и ламповые, разделяются на резонансные и полосовые. Обычно используется схема с общим эмиттером. Как уже отмечалось, усилители на транзисторах имеют некоторые особенности: малое входное и выходное сопротивления, большую проходную емкость. Схемы усилителей строят так, чтобы получить наибольший коэффициент усиления. Это достигается неполным (автотрансформаторным) подключением контура. Число витков части катушки подбирается так, чтобы сопротивление контура было равно выходному сопротивлению транзистора, а число витков связи (при автотрансформаторной связи между каскадами) должно быть таким, чтобы сопротивление контура было близко к входному сопротивлению транзистора (так же как и при согласовании во входных цепях).

Резонансные усилители. На рис. 6.9 а приведена схема усилителя высокой частоты с автотрансформаторной свя-

зью. Сигнал через разделительный конденсатор C_{p1} подается на базу первого транзистора. На контуре $L_K C_K$, включенном в цепь коллектора, создается напряжение, которое через разделительный конденсатор C_{p2} подается на вход второго транзистора. Постоянное напряжение на коллектор первого транзистора подается через катушку контура L_K , на базу от коллекторного источника через делитель $R_1 R_2$. Сопротивление R_3 включено для температурной стабилизации режима работы транзистора (отрицательная

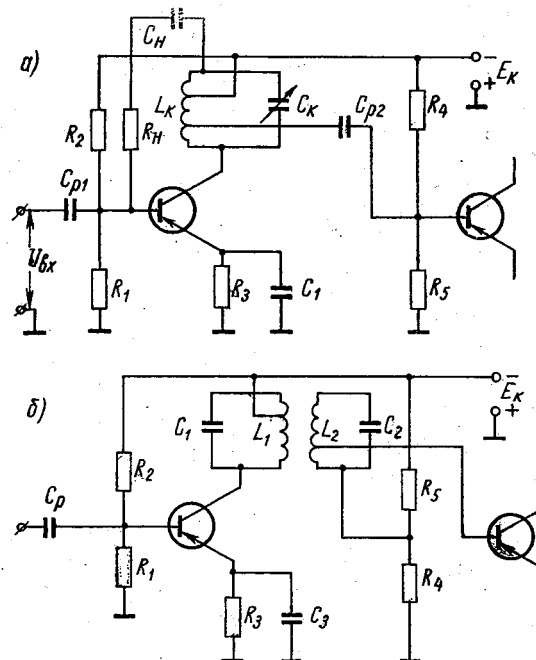


Рис. 6.9. Транзисторные усилители высокой частоты.

а — с автотрансформаторной связью; б — полосовой.

обратная связь по постоянному току). Конденсатор C_1 включен параллельно R_3 для того, чтобы исключить отрицательную обратную связь по переменному току. Для уменьшения влияния проходной емкости в транзисторных схемах применяют цепь нейтрализации, состоящую из конденсатора C_H и сопротивления R_H .

Полосовые транзисторные усилители применяются в схемах усилителей промежуточной частоты в радиоприемниках. Здесь также используется неполное включение контуров (рис. 6.9 б).

Высокий уровень внутренних шумов и узкая полоса пропускания ограничивают применение вышеприведенных схем усилите-

лей высокой частоты в приемниках СВЧ, предназначенных для приема радиоимпульсов (напомним, что для усиления радиоимпульсов необходима очень широкая полоса пропускания). Одним из малошумящих усилителей высокой частоты является усилитель с рассмотренной в главе 5 лампой бегущей волны (ЛБВ). Усилители с ЛБВ получили наибольшее распространение в диапазоне сантиметровых волн. ЛБВ не имеет резонансных систем, поэтому ширина полосы пропускания может достигать 15÷30%

основной частоты диапазона. Работают ЛБВ в диапазоне от 100 МГц до 90 ГГц. Следует отметить большой коэффициент усиления мощности ЛБВ (от 100 до 10 000). Недостатками усилителей с ЛБВ являются большие габариты и вес.

Параметрические и молекулярные усилители. Наиболее малошумящими из разработанных в настоящее время усилителей СВЧ являются параметрические и молекулярные усилители. Уменьшение шума в этих усилителях получают за счет охлаждения элементов схем до очень низких температур и отказа от электронных ламп.

Параметрические усилители (рис. 6.10 а). При колебательном процессе конденсатор контура дважды за период имеет

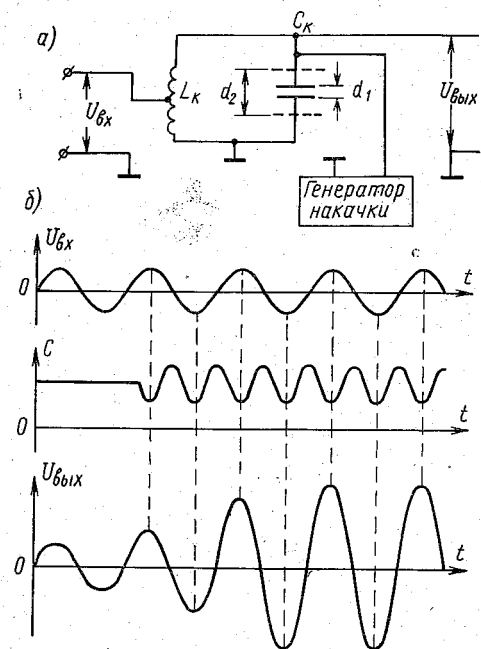


Рис. 6.10. Простейшая схема параметрического усилителя (а) и графики, поясняющие процесс усиления сигнала (б).

максимальный заряд. Известно, что напряжение на обкладках заряженного конденсатора $U = \frac{q}{C}$, где C — емкость конденсатора, q — заряд. Емкость конденсатора зависит от площади пластин S , расстояния между пластинами d и диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ , т. е. $C = \epsilon \frac{S}{d}$. Зависимость напряжения от параметров конденсатора можно выразить формулой

$$U = \frac{qd}{\epsilon S}. \quad (6.5)$$

Если в момент, когда заряд конденсатора максимален, раздвинуть пластины, то напряжение на конденсаторе увеличится, так как заряд остался прежним. Увеличение амплитуды колебаний происходит за счет энергии той системы, которая уменьшает емкость. Такой системой является генератор накачки. Практически в качестве конденсатора используется запертый полупроводниковый диод, емкость между электродами которого зависит от величины запирающего напряжения. На рис. 6.10 б показан процесс усиления сигнала в параметрическом усилителе. Из графиков видно, что минимальной емкость конденсатора должна быть дважды за период (в моменты, когда заряд конденсатора максимален), а максимальной емкость должна быть в моменты, когда заряд равен нулю. Изменение емкости обеспечивается путем подачи на полупроводниковый диод колебаний от так называемого генератора накачки, причем частота этих колебаний должна быть вдвое больше, чем частота сигнала.

Подобным же образом работают параметрические усилители, в схемах которых переменным параметром является индуктивность. В этих схемах применяются ферриты, помещенные в переменное магнитное поле. Изменение магнитной проницаемости сердечника приводит к изменению индуктивности катушки контура с частотой генератора накачки.

Иногда используются электронные параметрические усилители, в которых усиление колебаний в полном резонаторе получается при пересечении его электронным потоком, модулированным по плотности с частотой генератора накачки.

Благодаря простоте конструкции и малому уровню шумов параметрические усилители получают в настоящее время все большее распространение.

Молекулярные усилители (мазеры) обладают самым низким уровнем шумов. Принцип работы молекулярных усилителей основан на том, что внутренняя энергия молекулы (энергия движения атомов относительно центра масс молекулы) может иметь лишь определенные значения, например W_n , W_{cp} и W_v . W_n — это наименьшее значение внутренней энергии молекулы, которое она имеет при температуре, близкой к абсолютному нулю (-273°C). Будем считать W_n нижним энергетическим уровнем, W_{cp} — средним энергетическим уровнем, W_v — верхним. При переходе с нижнего энергетического уровня на верхний молекула поглощает энергию, при переходе с верхнего уровня на средний или нижний — излучает электромагнитную энергию. Из физики известно, что частота f излучаемых колебаний при переходе молекулы с верхнего уровня на средний равна

$$f = \frac{W_v - W_{cp}}{h}, \quad (6.6)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек — постоянная Планка. При очень низких температурах большинство молекул находится на нижнем энергетическом уровне.

В молекулярных усилителях роль усилителя играет кристалл.

Генератор накачки на частоте $f_H = \frac{W_B - W_H}{h}$ сообщает молекулам энергию, за счет которой они переходят на верхний энергетический уровень (кристалл находится в возбужденном состоянии). Если теперь через кристалл пропустить колебания с частотой f , то это вызовет переход молекул с верхнего энергетического уровня на средний, что приведет к излучению молекулами энергии на частоте f , т. е. к усилению сигнала. Молекулярные усилители применяются для усиления очень малых сигналов (мощностью $< 10^{-9}$ Вт). При этом коэффициент усиления весьма значителен (до 10 000). Недостатком мазеров является узкая полоса пропускания.

§ 6.4. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ДЕТЕКТОРЫ

Детектирование — это процесс, противоположный модуляции, сущность которого заключается в выделении модулирующего сигнала из высокочастотных колебаний. Схемы, в которых осуществляется процесс детектирования, называются детекторами. Рассмотрим основные схемы детекторов.

Диодные детекторы. Диодные детекторы выполняют по последовательной и параллельной схемам.

В последовательной схеме (рис. 6.11 а) сопротивление нагрузки включено последовательно с диодом. Как видно из вольт-амперной характеристики диода (рис. 6.11 б), при малых напряжениях на аноде U_a ток диода I_a мал. При увеличении напряжения на аноде анодный ток возрастает и может быть определен из равенства $I_a = S U_a$.

Ток, проходящий через индуктивность L , наводит в катушке L_K э. д. с., которая возбуждает колебания в контуре $L_K C_K$. Под действием напряжения на контуре, которое для детектора является входным ($U_{вх}$), в цепи возникает ток. При положительном напряжении на аноде ток проходит через диод и заряжает конденсатор C_H , при отрицательном — диод заперт и конденсатор C_H разряжается через сопротивление R_H . В следующий положительный полупериод конденсатор дозаряжается и вновь разряжается. Процесс при детектировании немодулированных колебаний можно сравнить с процессом в однополупериодном выпрямителе с конденсатором в качестве фильтра. Если бы не было конденсатора C_H , то через сопротивление нагрузки R_H проходил бы ток в одном направлении в течение одного полупериода. Благодаря конденсатору C_H , емкость которого выбирается из условия

$\frac{1}{\omega C_H} \ll R_H$, практически все напряжение контура оказывается приложенным к диоду. Заряженный конденсатор имеет напряже-

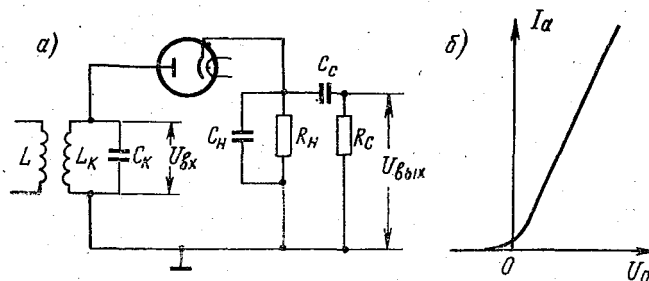


Рис. 6.11. Последовательная схема диодного детектора (а) и вольт-амперная характеристика диода (б).

ние, плюс которого приложен к катоду. Между катодом и анодом, помимо высокочастотного переменного напряжения, будет постоянное напряжение, запирающее диод. Полностью диод заперт быть не может, но работает он с отсечкой анодного тока. В практических схемах сопротивление R_H обычно составляет сотни килоом. При этом угол отсечки анодного тока очень мал (единицы градуса).

На рис. 6.12 показаны графики напряжений и тока при диодном детектировании амплитудно-модулированных колебаний.

На рис. 6.12 а показано напряжение на контуре или на входе детектора. Это колебания напряжения несущей частоты f_H , модулированные частотой F_M . При положительном полупериоде напряжения на аноде в течение части полупериода, когда потенциал анода выше потенциала катода, через диод проходит ток. График этого тока i_d показан на рис. 6.12 б. Потенциал анода будет положительным, если $U_{вх} > U_{R_H}$, так как по второму закону Кирх-

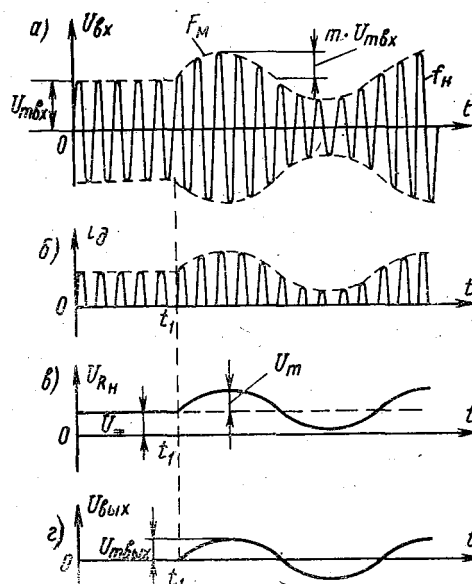


Рис. 6.12. Графики процессов в диодном детекторе.

гофа $u_a = u_{вх} - u_{R_n}$, где u_a , $u_{вх}$ и u_{R_n} — мгновенные значения напряжений на аноде, на входе и на сопротивлении нагрузки соответственно. До момента t_1 амплитуда напряжения высокочастотных колебаний постоянна, импульсы тока одинаковой величины, на сопротивлении R_n создается постоянное напряжение, на выходе детектора напряжение равно нулю, так как конденсатор C_c (см. рис. 6.11 а) не пропускает постоянный ток. С момента t_1 амплитуда колебаний изменяется, амплитуды импульсов тока диода изменяются, напряжение на R_n (рис. 6.12 в) меняется в соответствии с изменением амплитуды импульсов анодного тока. Напряжение на нагрузке имеет постоянную составляющую U_{-} и переменную составляющую с амплитудой U_m . Переменная составляющая напряжения проходит через конденсатор C_c и выделяется на сопротивлении R_c , являясь выходным напряжением детектора $U_{вых}$ (рис. 6.12 г). Анодный ток имеет три составляющие: постоянную, низкочастотную и высокочастотную, но принято считать, что на R_n напряжение имеет лишь две составляющие, так как сопротивление конденсатора C_n для высокочастотной составляющей выбирается очень малым ($X_c \ll R_n$). Значения емкостей и сопротивлений, используемых в практических схемах, лежат в пределах: $C_n = 50 \div 200$ пф, $C_c = 0,01 \div 0,1$ мкф, $R_n = 0,5 \div 2$ Мом, $R_c = 0,5 \div 20$ Мом.

Пример. В схему диодного детектора включены элементы: $C_n = 100$ пф, $R_n = 0,5$ Мом, $C_c = 0,01$ мкф и $R_c = 2$ Мом. Требуется рассчитать сопротивление для всех составляющих тока диода, если на вход подано модулированное напряжение, несущая частота которого $f_n = 1$ МГц, а частота колебаний огибающей (частота модуляции) $F_m = 1$ кГц.

Сопротивление для постоянной составляющей равно $R_n = 0,5$ Мом.

Сопротивление для переменной составляющей низкой частоты можно определить, зная сопротивление трех ветвей: $C_n R_n$ и $C_c R_c$.

Вначале определим X_{C_n} — сопротивление ветви с конденсатором C_n .

$$X_{C_n} = \frac{1}{2\pi F_m C_n} = \frac{1}{2\pi 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 1,6 \text{ Мом.}$$

Сопротивление R_n для переменной составляющей, как и для постоянной, равно $0,5$ Мом.

Полное сопротивление последовательно соединенных сопротивлений C_c и R_c будет

$$\begin{aligned} Z_c &= \sqrt{X_{C_c}^2 + R_c^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi F_m C_c}\right)^2 + R_c^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + 2^2} \approx 2 \text{ Мом.} \end{aligned}$$

т. е. оно практически равно активному сопротивлению R_c .

Для переменной составляющей общее сопротивление трех ветвей будет меньше $0,5 \text{ Мом}$, поэтому проводимость ветви C_H можно не учитывать и общее сопротивление вычислить как параллельное соединение R_H и R_C , т. е.

$$R = \frac{R_H R_C}{R_H + R_C} = \frac{0,5 \cdot 2}{0,5 + 2} = 0,4 \text{ Мом}.$$

Сопротивление X_{C_H} для высокочастотной составляющей равно:

$$X_{C_H} = \frac{1}{2\pi f_H C_H} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = \frac{10^4}{2\pi} = 1,6 \text{ ком}.$$

Общее сопротивление для высокочастотной составляющей практически будет равно сопротивлению конденсатора C_H и является очень малым по сравнению с сопротивлением для низкочастотной составляющей.

Если общее сопротивление для низкочастотной составляющей будет значительно меньше R_H (а это возможно при малом вход-

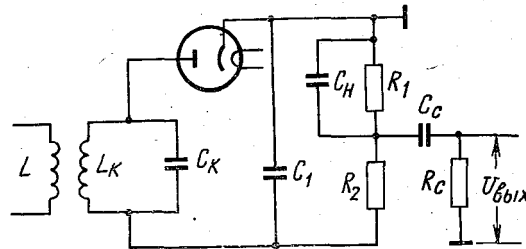


Рис. 6.13. Схема детектора с разделенной нагрузкой.

ном сопротивлении УНЧ), то применяют разделенную нагрузку для постоянной и переменной составляющих (рис. 6.13). Для постоянной составляющей сопротивление $R_+ = R_1 + R_2$, а для низ-

кочастотной $R_F = \frac{R_2 R_C}{R_2 + R_C}$.

Основные характеристики детектора — коэффициент передачи и входное сопротивление.

Коэффициентом передачи детектора K_d называют отношение амплитуды выходного напряжения $U_{m \text{ вых}}$ к амплитуде огибающей входного напряжения.

$$K_d = \frac{U_{m \text{ вых}}}{m U_{m \text{ вх}}}, \quad (6.7)$$

где m — коэффициент модуляции, $U_{m \text{ вх}}$ — амплитуда входного напряжения.

В обычных приемниках значение K_d лежит в пределах $0,7—0,9$.

Входное сопротивление детектора $R_{вх}$ — это отношение входного напряжения $U_{m \text{ вх}}$ к входному току $I_{m \text{ вх}}$. Рассчитать его

можно следующим образом. Мощность предыдущего каскада, отдаваемая в детектор,

$$P_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}^2}{R_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{м вх}}^2}{2R_{\text{вх}}}, \quad (6.8)$$

где $U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{м вх}}}{\sqrt{2}}$ — действующее значение напряжения. Эта мощность

рассеивается на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$ и внутреннем сопротивлении лампы. Потерями в лампе можно пренебречь, ввиду того, что $R_i \ll R_{\text{н}}$. Тогда можно записать, что мощность $P_{\text{вых}}$, выделяющаяся на $R_{\text{н}}$, равна $P_{\text{вх}}$, т. е. $P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}} =$

$= \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_{\text{н}}}$. Подставляя вместо $P_{\text{вх}}$ его значение из формулы

$$(6.8), \text{ получим } \frac{U_{\text{м вх}}^2}{2R_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_{\text{н}}}, \text{ откуда следует}$$

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{н}}/2. \quad (6.9)$$

При выводе этой формулы мы считали, что коэффициент передачи детектора равен единице, а $R_i \ll R_{\text{н}}$. Более точной является формула:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{н}}}{2} + 2R_i. \quad (6.10)$$

Диодный детектор, собранный по последовательной схеме, имеет большое входное сопротивление и при достаточно больших значениях входного напряжения ($U_{\text{вх}} > 1$ в) не дает искажений. Недостатком его являются малая величина коэффициента передачи ($K_d < 1$) и значительные искажения при слабых сигналах.

Параллельная схема диодного детектора (рис. 6.14)

имеет меньшее входное сопротивление ($R_{\text{вх}} \approx \frac{R_{\text{н}}}{3}$), но она удобна

тем, что детектор можно подключать непосредственно к аноду лампы предыдущего усилительного каскада. Высокочастотное напряжение через конденсатор C_p подается на диод. При положительном напряжении на аноде конденсатор C_p заряжается, а при отрицательном — разряжается через сопротивление $R_{\text{н}}$. Процессы в схеме аналогичны процессам в схеме последовательного детектора. Схема параллельного детектора часто используется в цепи автоматической регулировки усиления (см. § 6.7).

Широкое распространение получили детекторы с использованием полупроводниковых диодов, которые по принципу действия аналогичны ламповым. Преимуществами таких детекторов являются: очень малая проходная емкость, малый уровень собствен-

ных шумов, малое внутреннее сопротивление в прямом направлении, малые габариты и отсутствие источников питания. Недостатком детекторов на полупроводниковых диодах является небольшое входное сопротивление, обусловленное наличием обратной проводимости.

Сеточное, анодное и катодное детектирование. Сеточный детектор (рис. 6.15) обладает наиболее высокой чувствительностью по сравнению с другими детекторами. Модулированное высокочастотное напряжение через конденсатор C_c подается на сетку лампы. При положительном напряжении на сетке заряжается конденсатор C_c , который, разряжаясь через сопротивление R_c , создает на нем падение напряжения. Процесс аналогичен процессу в последовательной схеме диодного детектора, только роль диода выполняет промежуток сетка—катод. На сопротивлении R_c получается пульсирующее напряжение u_c , имеющее постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая напряжения на R_c играет роль смещения. Переменная составляющая низкой частоты управляет анодным током. Анодный ток лампы имеет постоянную составляющую и переменные низкочастотную и высокочастотную составляющие. Высокочастотная составляющая анодного тока отфильтровывается с помощью емкости $C_a = 100 \div 200$ пф, имеющей малое сопротивление для высокочастотной составляющей. Через сопротивление

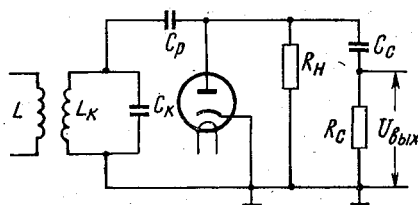


Рис. 6.14. Параллельная схема диодного детектора.

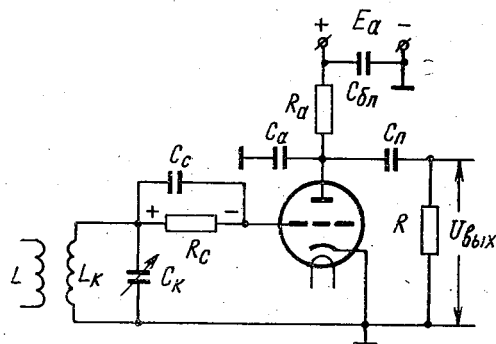


Рис. 6.15. Сеточный детектор.

нагрузки R_a пройдет постоянная и низкочастотная составляющие. Низкочастотное выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ подается на вход усилителя низкой частоты через переходный конденсатор $C_{\text{п}}$.

Недостатком сеточного детектора являются большие нелинейные искажения, имеющие место при слабых и сильных сигналах. При слабых сигналах причиной искажений является нелинейность начального участка характеристики сеточного тока, при больших сигналах работа лампы происходит на нелинейном участке анодно-сеточной характеристики.

Анодный детектор (рис. 6.16 а) имеет большое входное сопротивление и высокую чувствительность. Анодный детектор представляет собой реостатный усилитель, работающий с отсечкой анодного тока. При положительном напряжении сигнала анодный ток меняется в соответствии с изменением напряжения

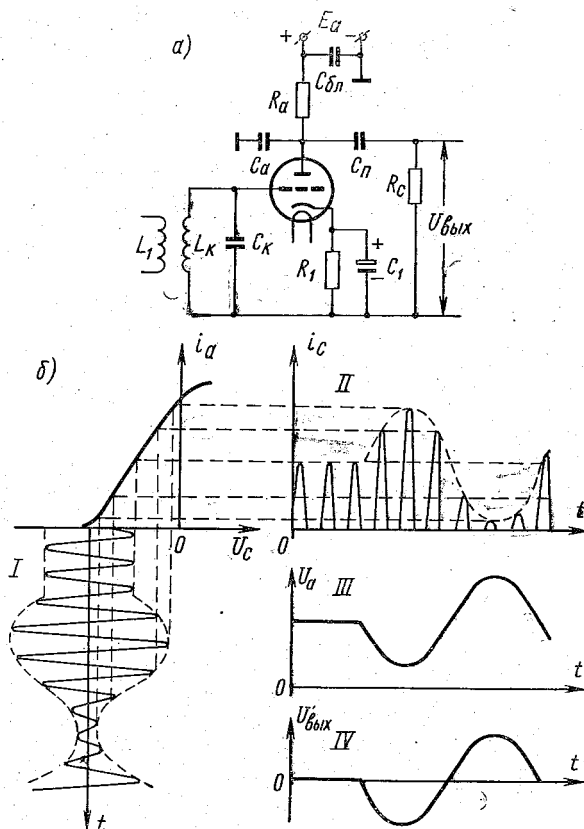


Рис. 6.16. Анодный детектор:

а — принципиальная схема; б — диаграммы токов и напряжений: I — динамическая анодно-сеточная характеристика лампы и входное модулированное высокочастотное напряжение $U_{вх}$, II — анодный ток, III — анодное напряжение, IV — выходное напряжение.

сигнала. При отрицательном напряжении сигнала тока нет. Через лампу проходит анодный ток, пульсирующий с высокой частотой. Амплитуда пульсаций изменяется по закону модуляции. Таким образом, анодный ток имеет переменные высокочастотную и низкочастотную составляющие и постоянную составляющую. Через сопротивление R_a проходят постоянная и низкочастотная составляющие и создают на нем падение напряжения. Низкоча-

стотное напряжение через C_{π} подается на вход УНЧ. Высокочастотная составляющая отфильтровывается через конденсатор C_a . На рис. 6.16 б показаны диаграммы токов и напряжений в схеме анодного детектора.

Анодный детектор обладает большим входным сопротивлением, повышенной чувствительностью, меньшими нелинейными искажениями при больших сигналах, меньшими собственными шумами, чем сеточный.

Отметим, что при сеточном и анодном детектировании сигнал после детектирования усиливается.

Катодный детектор (рис. 6.17), так же как и анодный, имеет большое входное сопротивление, детектирует без искажений сильные сигналы, но усиления не дает. Отличие его от анодного детектора в том,

что сопротивление нагрузки включено не в анодную цепь, а в цепь катода. Анод по переменной составляющей заземлен. Высоко-

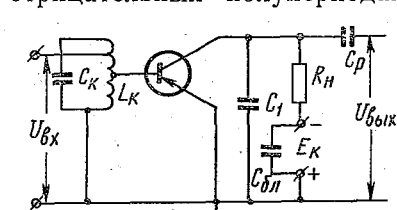


Рис. 6.17. Катодный детектор.

Рис. 6.18. Детектор на полупроводниковом триоде.

В транзисторных приемниках детекторы собираются на полупроводниковых диодах или триодах. О детекторах на полупроводниковых диодах говорилось выше. Детекторы на транзисторах в отличие от диодного имеют большое входное сопротивление, с меньшими искажениями детектируют слабые сигналы, дают усиление сигнала низкой частоты. В схеме детектора, приведенной на рис. 6.18, применено, как и в большинстве других транзисторных схем, неполное включение контура. Смещение в схеме детектора обязательно. Конденсатор C_1 служит для фильтрации высокочастотной составляющей, $C_{бл}$ блокирует источник питания по переменной составляющей.

Анод по переменной составляющей заземлен. Высоко-

частотное напряжение через конденсатор C_K подается с контура $L_C C_C$ на промежуток сетка—катод лампы. За счет нелинейности характеристики изменения анодного тока при положительных и отрицательных полупериодах будут неодинаковы. В анодном токе появится переменная составляющая низкой частоты, которая создаст падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_K . Это напряжение приложено между сеткой и катодом в противо-

фазе с огибающей высокочастотного сигнала, что приводит к уменьшению коэффициента передачи, из-за чего катодные детекторы применяются довольно редко.

§ 6.5. УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Основные характеристики и схемы усилителей низкой частоты (УНЧ). В радиоприемных устройствах усилители низкой частоты (УНЧ) используются для усиления колебаний низкой (звуковой) частоты. Если усилитель предназначен для получения наибольшего напряжения на выходе, то его называют усилителем напряжения. Если усилитель предназначен для получения наибольшей мощности в нагрузке (например, в громкоговорителе), то усилитель называют усилителем мощности.

УНЧ характеризуется следующими основными параметрами:

- 1) коэффициентом усиления по напряжению $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ и коэффициентом усиления по мощности $K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$; 2) номинальной выходной мощностью P_n (наибольшей мощностью, отдаваемой нагрузке при заданном значении искажений); 3) полосой пропускания частот (диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз); 4) искажениями (изменениями формы сигналов, возникающими при прохождении сигналов через каскады усилителя: нелинейные, частотные, фазовые).

Процесс усиления в УНЧ (рис. 6.19 а), как и у всех других усилителей, заключается в том, что источник низкочастотного сигнала управляет энергией источника питания, отдающего свою мощность в нагрузку усилителя.

На рис. 6.19 б показаны диаграммы токов и напряжений в схеме усилителя, нагрузкой которого является резистор R_a . Амплитуда переменной составляющей анодного тока I_{ma} равна произведению напряжения на сетке U_{mc} и крутизны динамической характеристики S_d , т. е. $I_{ma} = U_{mc} S_d$, а амплитуда напряжения на аноде

$$U_{ma} = I_{ma} R_a = U_{mc} S_d R_a = U_{mc} R_a \frac{\mu}{R_i + R_a} \quad (6.11)$$

где R_i — внутреннее сопротивление лампы; μ — коэффициент усиления лампы. Коэффициент усиления каскада K можно определить из формулы (6.11), считая, что $U_{ma} = U_{\text{м.вых}}$:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{mc} R_a \mu}{U_{mc} (R_i + R_a)} = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a}. \quad (6.12)$$

Соотношения (6.11) и (6.12) справедливы для *средних* частот диапазона. При расчете усилителя C_k , C , $C_{бл}$ выбирают так, чтобы их сопротивлениями можно было пренебречь. На нижних частотах емкостное сопротивление конденсатора C увеличивается. RC -цепочка подключена параллельно анодной нагрузке

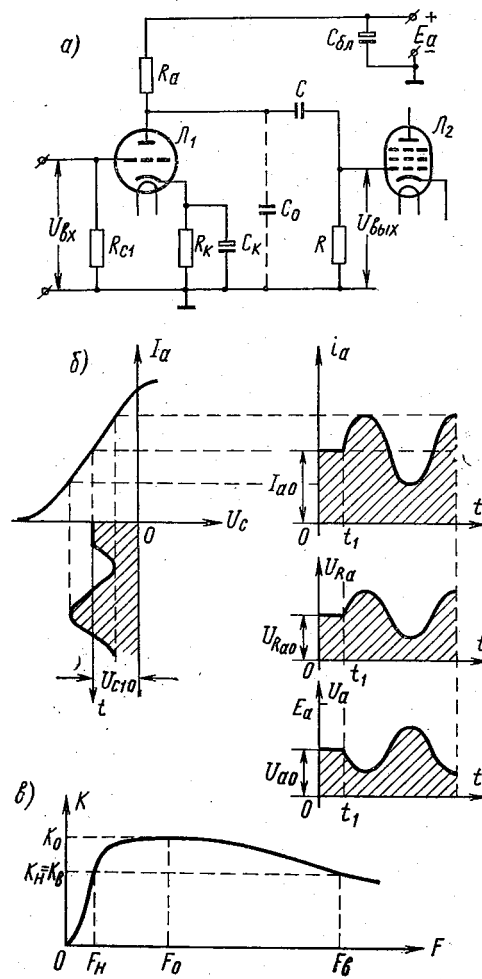


Рис. 6.19. УНЧ на сопротивлениях.

а — схема; б — графики токов и напряжений; в — частотная характеристика.

R_a по переменной составляющей. При $X_C \approx 0$ переменное напряжение на аноде лампы оказывается полностью приложенным к сопротивлению R . На нижних частотах сопротивление конденсатора C велико и на сопротивлении R будет только часть напряжения U_a . Поэтому коэффициент усиления на нижних частотах будет меньше. На верхних частотах сказывается паразитная емкость C_0 анодной цепи лампы L_1 и сеточной цепи лампы L_2 . Эта емкость невелика, но она включена параллельно анодной нагрузке и уменьшает сопротивление анодной цепи для переменной составляющей. Это является причиной того, что на верхних частотах коэффициент усиления уменьшается. Вид типичной частотной характеристики УНЧ показан на рис. 6.19 в. Полосой пропускания усилителя принято называть область от нижней (F_H) до верхней (F_B) частоты, усиление на которых удовлетворяет условию $K_H =$

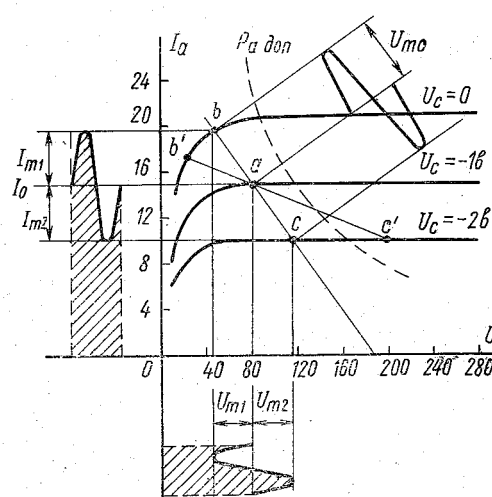


Рис. 6.20. Графический расчет УНЧ на пентоде.

очень широкую полосу пропускания частот, то используют пентоды. При расчете усилителя на пентоде удобно применять графический метод (рис. 6.20). Из справочника берут семейство анодных характеристик, выбирают рабочую точку на одной из них, проводят отрезок нагрузочной прямой так, чтобы отрезки ab и ac были одинаковы. Сопротивление анодной нагрузки можно определить из отношения $R_a = \frac{U_{m1}}{I_{m1}}$. В нашем примере для лампы 6Ф1П ток покоя $I_0 = 14,8$ мА, напряжение на аноде $U_{a0} = 80$ в, э. д. с. источника анодного питания $E_a = 188$ в. Равенство отрезков ab и ac означает, что $I_{m1} = I_{m2}$, $U_{m1} = U_{m2}$.

Если эти равенства не выполняются, то в схеме будут нелинейные искажения. Например, если нагрузочная прямая пройдет через точки b' и c' , то при положительном напряжении сигнала на сетке изменение анодного тока будет гораздо меньше, чем при отрицательном. Изменение формы сигнала свидетельствует о по-

сигналах коэффициент усиления уменьшается. Вид типичной частотной характеристики УНЧ показан на рис. 6.19 в. Полосой пропускания усилителя принято называть область от нижней (F_H) до верхней (F_B) частоты, усиление на которых удовлетворяет условию $K_H =$

$$K_H = K_B = \frac{K_0}{\sqrt{2}}, \text{ где } K_0 \text{ — наи-}$$

больший коэффициент усиления на частоте F_0 .

Усилители напряжения низкой частоты обычно выполняются на триодах, но если нужно получить большое усиление или

явлении на выходе гармонических составляющих, которых не было на входе, т. е. к искажению сигнала.

В качестве анодной нагрузки в УНЧ иногда используют дроссели. Однако такие схемы приводят к неравномерной частотной характеристике, так как индуктивное сопротивление дросселя зависит от частоты.

В усилителях напряжения иногда, а в усилителях мощности очень часто в качестве анодной нагрузки используют трансформатор. В усилителях напряжения это позволяет получить коэффициент усиления схемы больше, чем μ , что невозможно в других типах усилителей. В то же время трансформатор в усилителе является дополнительным источником нелинейных искажений. При отсутствии сигнала через первичную обмотку трансформатора проходит постоянный ток. В сердечнике трансформатора создается постоянный магнитный поток, напряжение во вторичной обмотке отсутствует. Когда на сетку лампы будет подано переменное напряжение, анодный ток будет меняться по величине, магнитный поток тоже будет меняться. Зависимость магнитного потока от тока является нелинейной. При больших значениях тока наступает магнитное насыщение сердечника, при котором магнитный поток не меняется при изменении тока, в результате чего во вторичной обмотке появятся новые частоты (гармоники). Значительные искажения, высокая стоимость и габариты трансформатора явились причиной того, что используют такие схемы для усиления напряжения довольно редко.

Значительно чаще используют трансформаторный усилитель в качестве оконечного усилителя мощности (рис. 6.21 а). На сетку лампы подается значительное напряжение. Сопротивление нагрузки каскада (телефон, громкоговоритель и т. п.) невелико. В усилителях мощности обычно используют триоды (6Н6П), лучевые тетроды (6П6С, 6П1П, Г-807 и др.), пентоды (6П14П, 6П18П и др.). Эти лампы имеют мощные катоды, небольшое внутреннее сопротивление и большую крутизну характеристики по сравнению с лампами, применяемыми в усилителях напряжения. Трансформатор в схеме применяется понижающий, чем достигается согласование внутреннего сопротивления лампы с сопротивлением нагрузки, а это обеспечивает отдачу максимальной мощности в нагрузку.

Например, при использовании триода 6Н6П с внутренним сопротивлением $R_i = 1,8 \text{ ком}$ и динамика с сопротивлением $R_n = 10 \text{ ом}$ следует выбрать трансформатор с коэффициентом трансформации

$$n = \sqrt{\frac{R_a}{R_n}} = \sqrt{\frac{R_i}{R_n}} = \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^3}{10}} \approx 13,4.$$

Чтобы нелинейные искажения были меньше, лампы в УНЧ обычно работают без отсечки анодного тока. При мощности уси-

лителя больше 5 вт используются двухтактные схемы, лампы в которых работают с отсечкой анодного тока ($\theta=90^\circ$). Для обеспечения нужного режима двухтактного усилителя на сетки ламп напряжение сигнала подается в противофазе. Получение этих двух напряжений обеспечивает применение так называемых фазоинверсных схем. Простейшей схемой фазоинверсного каскада является схема усилителя на трансформаторе, у которого средняя точка вторичной обмотки соединена с катодами ламп, а край-

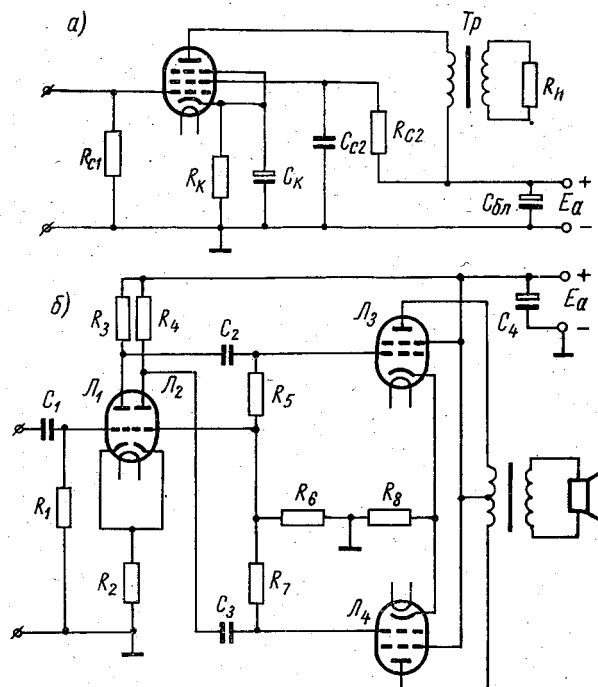


Рис. 6.21. Схемы усилителей на трансформаторе.

а — однотактная; б — двухтактная с фазоинверсным каскадом.

ние выводы этой обмотки присоединяются к сеткам ламп, однако, как указывалось выше, трансформатор является причиной нелинейных искажений. Поэтому применяют более сложные инверсные схемы.

На рис. 6.21 б показана схема фазоинвертора на двойном триоде. Если на сетку левого триода $Л_1$ подать сигнал, то с анода этой лампы усиленное напряжение с амплитудой U_{m1} будет через конденсатор C_2 подано на сетку лампы двухтактного каскада $Л_3$. Одновременно с делителя напряжения R_5R_6 часть напряжения будет подана на сетку правого триода $Л_2$, который усилит это на-

напряжение до значения $U_{m2}=U_{m1}$. При этом фазу напряжения он изменит на обратную. С анода лампы L_2 напряжение u_2 , равное по величине u_1 , но обратное по фазе, будет подано на сетку лампы L_4 . Сопротивление R_6 балансирует схему. Если в какой-то момент u_1 превысит u_2 , то увеличится напряжение на сетке L_2 , возрастет u_2 . Часть напряжения u_2 приложена к сопротивлению R_6 в противофазе с напряжением u_1 . Таким образом, напряжения на сетках ламп, всегда оказываются одинаковыми, а это значит, что напряжение на нагрузке двухтактного каскада не будет искажено.

Сопротивления автоматического смещения R_2 и R_8 не шунтируются конденсаторами (что делается в обычных схемах усилителей), так как по ним проходят переменные составляющие токов катодов, одинаковые по амплитуде, но противоположные по фазе. Поэтому на резисторах R_2 и R_8 будет только постоянное напряжение смещения. Сопротивления R_3 и R_4 являются анодными нагрузками ламп L_1 и L_2 .

Обратная связь в усилителях низкой частоты. Обратные связи в УНЧ очень широко используют для стабилизации параметров усилителей. Дестабилизирующими факторами являются старение ламп, нестабильность источников питания, климатические условия и т. д.

Обратная связь — это процесс передачи энергии с выхода на вход. Наиболее широко применяют отрицательную обратную связь, при которой колебания с выхода на вход подаются в противофазе с входным сигналом и ослабляют его. При этом уменьшаются частотные и нелинейные искажения, что особенно важно для усилителей мощности, и увеличивается входное сопротивление.

Положительные обратные связи используют в усилителях очень редко, так как такой усилитель может легко перейти от режима усиления к режиму генерации. Однако паразитные положительные обратные связи всегда имеют место (например, через емкость монтажа или общий источник анодного питания). Режим работы усилителя, при котором невозможна генерация, называется устойчивым. Для повышения устойчивости усилителя стараются уменьшить паразитные положительные обратные связи, применяя развязывающие фильтры, блокировочные конденсаторы, тщательное экранирование проводников, ламп и других элементов, а также вводя отрицательную обратную связь. На примере трехкаскадного усилителя (рис. 6.22) покажем, как осуществляется положительная обратная связь через источник анодного питания. Если на сетку лампы L_1 подано напряжение сигнала u_1 , то на аноде L_1 создается переменное напряжение $u'_2=K_1u_1$, где K_1 — коэффициент усиления первого каскада, u'_2 — переменное напряжение на сетке лампы L_2 без учета напряжения

обратной связи. Оно будет противофазно u_1 . Второй каскад изменит фазу еще раз, и на вход третьего каскада поступит напряжение $u'_3 = K_1 K_2 u_1 = K_2 u'_2$, где K_2 — коэффициент усиления второго каскада. Напряжение u'_3 вызовет в анодном токе лампы $\mathcal{L}_3$ появление переменной составляющей, которая пройдет через источник питания E_a и создаст падение напряжения u_{oc} на внутреннем сопротивлении источника. Напряжение на зажимах источника будет равно $E_a + u_{oc}$. Мы учитываем падение напряжения только от тока лампы $\mathcal{L}_3$, потому что выходная лампа наиболее мощная и сигнал на ее сетке наибольший. Токи других ламп можно не учитывать. Часть напряжения u_{oc} через сопротивление R_{a1} и конденсатор C_{p1} подается на сетку лампы $\mathcal{L}_2$ в фазе с напряжением u'_2 . Результирующее напряжение на сетке

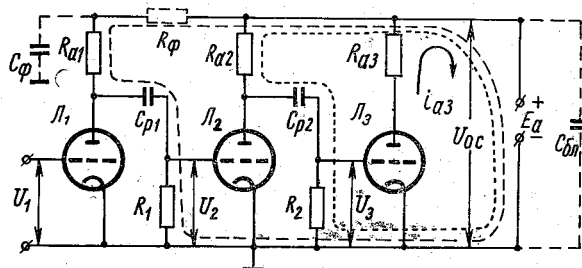


Рис. 6.22. Схема трехкаскадного УНЧ с обратной связью.

Пунктиром показана петля положительной обратной связи, точками — петля отрицательной обратной связи.

лампы $\mathcal{L}_2$ равно $u_2 = u'_2 + u'_{oc}$, а на сетке лампы $\mathcal{L}_3$ $u_3 = u'_3 - u''_{oc}$. Если $u'_2 = u'_{oc}$, то усилитель возбуждётся и превратится в генератор. В цепи сетки лампы $\mathcal{L}_3$ имеет место отрицательная обратная связь. Здесь возбуждение невозможно. Следовательно, двухкаскадный усилитель устойчив, а трехкаскадный — неустойчив. Чтобы уменьшить величину напряжения обратной связи u'_{oc} , в анодную цепь лампы $\mathcal{L}_1$ включают развязывающий фильтр $R_{\phi}C_{\phi}$. Напряжение u_{oc} приложено к делителю напряжения, состоящему из сопротивления R_{ϕ} и конденсатора C_{ϕ} , причем $R_{\phi} \gg X_{C_{\phi}}$. К конденсатору будет приложена лишь малая часть напряжения u_{oc} , которая равна $u_c = u_{oc} \frac{X_{C_{\phi}}}{R_{\phi}}$. Во столько же раз уменьшится и напряжение u'_{oc} на входе лампы $\mathcal{L}_2$ и таким образом повысится устойчивость усилителя. Для уменьшения u_{oc} следует шунтировать источник питания конденсатором $C_{бл}$ большой емкости.

Обратная связь характеризуется коэффициентом обратной связи β , равным отношению напряжения обратной связи U_{oc} к напряжению на выходе усилителя $U_{вых}$:

$$\beta = \frac{U_{oc}}{U_{вых}}. \quad (6.13)$$

Напряжение обратной связи может меняться пропорционально напряжению на выходе (обратная связь по напряжению) или пропорционально току в нагрузке (обратная связь по току).

Если при отключении нагрузки обратная связь в схеме исче-

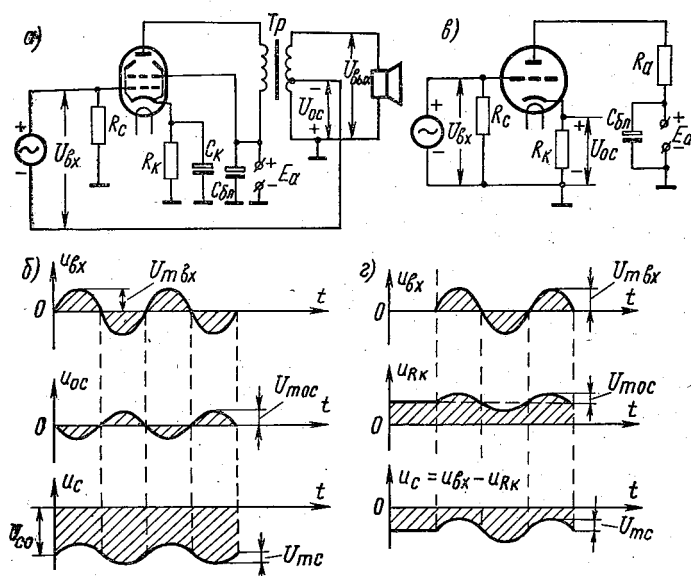


Рис. 6.23. Схемы УНЧ с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению (а и б) и по току (в и г).

а, в — схема; б, г — графики напряжений.

зает, то говорят об обратной связи по току, если она не исчезает, то говорят об обратной связи по напряжению. Если при коротком замыкании входных зажимов обратная связь остается, то имеет место последовательная связь, если она не остается, то связь параллельная.

Рассмотрим две схемы, в которых введена последовательная отрицательная обратная связь по напряжению и по току. Если на вход трансформаторного усилителя (рис. 6.23 а) подано напряжение с амплитудой $U_{мвх}$, то появится переменная составляющая анодного тока с амплитудой $I_{ма}$. Эта составляющая, проходя по первичной обмотке трансформатора, возбудит во вторичной обмотке э.д.с. Напряжение u_{oc} с части витков вторичной

обмотки трансформатора будет подано на сетку лампы через источник сигнала. Включение катушки производится так, чтобы переменное напряжение u_{oc} было противофазно входному напряжению $u_{вх}$. Тогда в любой момент напряжение на сетке будет $u_c = U_{co} + u_{вх} - u_{oc}$, а его амплитуда $U_{mc} = U_{mвх} - U_{moc}$ (рис. 6.23 б). Если на какой-то частоте усиление будет больше, чем на других частотах, то больше будет и U_{moc} , но меньше будет U_{mc} . Таким образом, усиление сигналов разных частот до некоторой степени автоматически уравнивается, т. е. уменьшаются частотные искажения усилителя. То же будет и с нелинейными искажениями.

Принимая во внимание, что $U_{moc} = U_{mвх}\beta$, можно записать $U_{mc} = U_{mвх} - U_{mвх}\beta$, откуда

$$U_{mвх} = U_{mc} + \beta U_{mвх} = U_{mc}(1 + \beta K'), \quad (6.14)$$

где β — коэффициент обратной связи; K' — коэффициент усиления усилителя без обратной связи; $U_{mвх}$ — амплитуда напряжения на выходе усилителя. Коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K = \frac{U_{mвх}}{U_{mc}} = \frac{U_{mвх}}{U_{mc}(1 + \beta K')} = \frac{K'}{1 + \beta K'} = \frac{K'}{\gamma}. \quad (6.15)$$

Из формулы видно, что усиление уменьшается в $\gamma = 1 + \beta K'$ раз. Величину γ называют *фактором обратной связи*. Например, если $K' = 60$, $\beta = 0,1$, то фактор обратной связи $\gamma = 1 + 0,1 \times 60 = 7$, а коэффициент усиления каскада $K = \frac{K'}{\gamma} = \frac{60}{7} = 8,57$. Коэффициент обратной связи в усилителях обычно берут в пределах от 0,05 до 0,2.

В схеме усилителя на сопротивлении (рис. 6.23 в) имеет место последовательная обратная связь по току. Если нет сигнала на сетке, то в схеме проходит постоянный ток от источника E_a через сопротивление нагрузки R_a , лампы и сопротивление в цепи катода R_k . На сопротивлении R_k создается падение напряжения, плюс которого приложен к катоду, а минус через сопротивление R_c — к сетке лампы (напряжение смещения). Когда на сетку поступает переменное напряжение $U_{вх}$ от источника сигнала, то переменная составляющая анодного тока создает падение напряжения на сопротивлении нагрузки $U_{вх}$ и на катодном сопротивлении $U_{oc} = I_a R_k$.

Положительная полуволна входного напряжения (рис. 6.23 г) уменьшает отрицательное напряжение на сетке, но возросший ток катода увеличит напряжение на R_k и отрицательное напряжение на сетке. Результирующее изменение напряжения на сетке будет меньше амплитудного значения напряжения на входе $U_{mвх}$ на

величину $U_{m \text{ о.с.}}$. Иначе говоря, переменная составляющая напряжения на R_K будет подаваться на сетку лампы последовательно с $U_{\text{вх}}$, но в противофазе, т. е. будет осуществляться отрицательная обратная связь. Коэффициент обратной связи в этой схеме

$$\beta = \frac{U_{m \text{ о.с.}}}{U_{m \text{ вых}}} = \frac{I_m R_K}{I_m R_a} = \frac{R_K}{R_a}. \quad (6.16)$$

Такого рода обратная связь возникает на низких частотах в усилителях с катодным автоматическим смещением, когда сопротивление конденсатора, шунтирующего R_K , становится большим. Обычно конденсатор для цепи смещения рассчитывают из условия $X_{C_K} < 0,1 R_K$ для средней частоты диапазона.

Рассмотрим схему усилителя со 100%-ной ($\beta=1$) отрицательной обратной связью. Его называют *катодным повторителем* (рис. 6.24). Нагрузка включена в цепь катода, и напряжение обратной связи $U_{\text{ос}}$ равно выходному напряжению $U_{\text{вых}}$. Коэффициент обратной связи, как упоминалось, равен единице, а коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{K'}{1 + K'}. \quad (6.17)$$

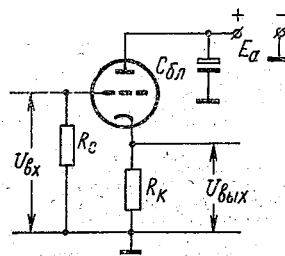


Рис. 6.24. Катодный повторитель.

Из равенства (6.17) следует, что коэффициент усиления катодного повторителя не может быть больше единицы, т. е. он не усиливает напряжение. Вторым свойством, отличающим его от обычных реостатных усилителей, является то, что выходное напряжение совпадает по фазе с входным, т. е. повторяет входной сигнал по амплитуде и фазе. Катодный повторитель имеет очень большое входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ и малое выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$. Поэтому его используют для согласования усилителя с большим выходным сопротивлением с низкоомной нагрузкой.

УНЧ на транзисторах. Усилители низкой частоты, в которых в качестве усиливающего элемента используются транзисторы, широко применяются в транзисторных радиоприемниках. По типу нагрузки усилители делятся на реостатные, трансформаторные и дроссельные. По схеме включения транзистора различают усилители с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

Рассмотрим схему реостатного усилителя с ОЭ (I каскад схемы, показанной на рис. 6.25). Эта схема аналогична схеме лампового усилителя на сопротивлении.

Недостатком транзисторных усилителей является неустойчивость рабочей точки при изменении температуры. Для стабилиза-

ции рабочей точки применяют термокомпенсацию и отрицательную обратную связь по постоянному току.

В схемах термокомпенсации в цепь питания вводят элементы с большим температурным коэффициентом. Например, если в схеме, изображенной на рис. 6.25, вместо резистора R_2 поставить терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом (сопротивление уменьшается с увеличением температуры), то при увеличении температуры ток коллектора I_{K0} будет расти, но уменьшается смещение $U_{бэ0}$, и результирующее изменение тока будет незначительным.

В схемах эмиттерной стабилизации, которая используется наиболее часто, применяется отрицательная обратная связь по постоянному току. С ростом температуры и постоянной составляющей тока коллектора I_{K0} увеличивается падение напря-

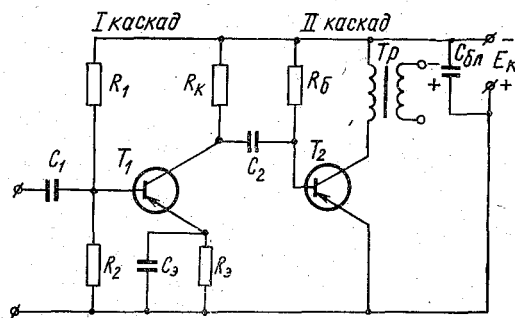


Рис. 6.25. Схема двухкаскадного УНЧ на транзисторах.

жения на сопротивлении R_3 (рис. 6.25) и на такую же величину уменьшается смещение $U_{бэ0}$. Чтобы не было отрицательной обратной связи по переменному току R_3 шунтируют конденсатором C_3 , емкость которого выбирается из условия $X_{C_3} < 0,1R_3$.

Схемы с ОБ в УНЧ применяются редко из-за малого входного и большого выходного сопротивлений, а также сравнительно малого усиления.

Схема с ОК (эмиттерный повторитель) вообще не дает усиления, но она имеет большое входное сопротивление $R_{вх}$ (десятки и сотни килоом) и малое выходное сопротивление $R_{вых}$ (десятки и сотни ом) и применяется в УНЧ для согласования каскадов.

На рис. 6.26 показана практическая схема четырехкаскадного транзисторного УНЧ. Выходной каскад собран по схеме с ОЭ на трансформаторе. Понижающий трансформатор Tr_2 предназначен для согласования большого выходного сопротивления усилителя с малым сопротивлением динамического громкоговорителя.

Входной сигнал звуковой частоты подается на потенциометр R_1 , который выполняет функции регулятора громкости. С движка

потенциометра сигнал через конденсатор C_1 поступает на вход эмиттерного повторителя. С сопротивления нагрузки R_2 , включенного в цепь эмиттера, напряжение сигнала подается на базу транзистора T_2 второго каскада, собранного по схеме с ОЭ. В качестве нагрузки в цепь коллектора включен резистор R_6 . С коллектора T_2 сигнал через конденсатор C_5 поступает на базу транзистора T_3 . Между третьим и четвертым каскадами включен переходный трансформатор Tr_1 . Резистор R_3 в первом каскаде играет роль гасящего сопротивления в цепи базы. Его значение выбирается в пределах от 200 до 470 ком. Резисторы R_4 и R_5 составляют делитель напряжения, с помощью которого на базу подается напряжение смещения.

Значение напряжения смещения у маломощных транзисторов $U_{бэ0} = 0,1 \div 0,3$ в. Значение сопротивления R_4 лежит в пределах

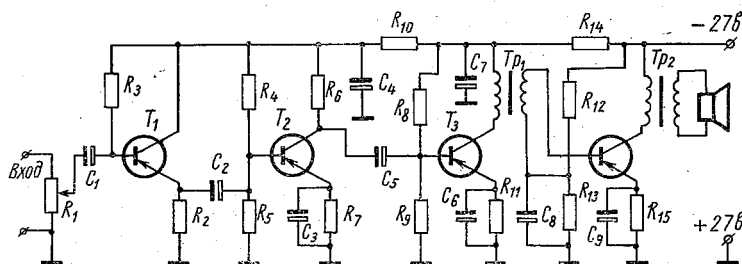


Рис. 6.26. Схема четырехкаскадного УНЧ на транзисторах.

10—12 ком, и $R_5 = 1,5 \div 4,7$ ком. Ориентировочные значения номиналов остальных деталей такие: $C_1 = 0,01 \div 0,05$ мкф; $C_2 \approx C_3 \approx C_4 \approx C_5 \approx C_6 \approx C_7 \approx C_8 = 10 \div 50$ мкф; $R_8 \approx R_{12} \approx R_4$; $R_9 \approx R_{13} \approx R_5$; R_6 равно от нескольких десятков до нескольких сотен килоом; R_{10} , R_{14} составляют несколько килоом; R_7 , R_{11} , R_{15} равны от нескольких десятков ом до нескольких килоом; R_2 достигает величины от нескольких единиц до десятков килоом.

§ 6.6. СХЕМЫ РАДИОПРИЕМНИКОВ

Приемники прямого усиления. Приемниками прямого усиления называют приемники, в которых усиление до детектора производится только на частоте принимаемого сигнала (см. рис. 6.1). Познакомившись со схемами каждого блока, вновь проследим прохождение сигнала через весь приемник. Отметим, прежде всего, что несмотря на простоту устройства и надежность в работе, ламповые приемники прямого усиления применяются весьма редко из-за малой чувствительности и избирательности, особенно в диапазоне коротких и ультракоротких волн.

Чувствительность и избирательность приемника прямого усиления можно повысить, применив положительную обратную

связь по высокой частоте в детекторе или УВЧ. Такие приемники называют *регенеративными* и *сверхрегенеративными*. На рис. 6.27 показана схема трехкаскадного приемника прямого усиления с *регенеративным каскадом*. Сигнал с антенны поступает на контур L_1C_1 , индуктивно связанный с антенным контуром и настраиваемый на частоту принимаемой станции с помощью переменного конденсатора C_1 . Напряжение с контура подается на сетку лампы Π_1 . Переменная составляющая анодного тока Π_1 , проходя через катушку L_2 , возбуждает колебания в контуре L_3C_3 . Напряжение высокой частоты через конденсатор C_4 подается на сетку лампы Π_2 , и по катушке L_4 пойдет переменная составляющая анодного тока высокой частоты, которая возбудит э. д. с. индукции в катушке контура L_3 . При определенном включении катушки L_4 напряжение, возбуждаемое током этой катушки

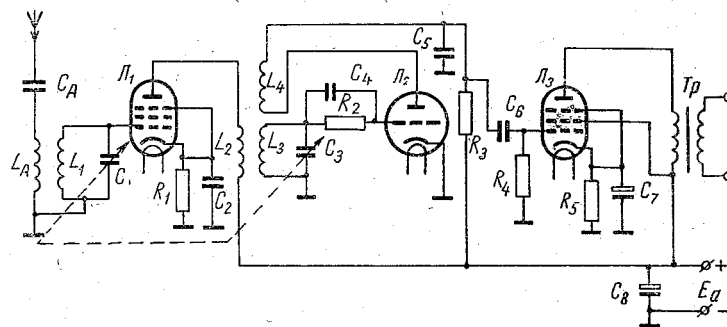


Рис. 6.27. Схема приемника прямого усиления с регенеративным каскадом.

в контуре, будет в фазе с э. д. с., возбуждаемой катушкой L_2 , что вызовет усиление колебаний. В схеме обеспечивается положительная обратная связь по току, которая выбирается такой, чтобы не выполнялось условие баланса амплитуд и усилитель не превратился в генератор. Положительная обратная связь позволяет получить на сетке детектора значительно большее напряжение сигнала высокой частоты. При положительном напряжении на сетке сеточный ток будет заряжать конденсатор C_4 , который, разряжаясь затем через сопротивление R_2 , создаст на нем падение напряжения низкой частоты. Это напряжение вызовет в анодном токе переменную составляющую низкой частоты, которая создаст падение напряжения на нагрузке R_3 (напряжения высокой частоты на сопротивлении не будет, так как конденсатор $C_5 = 100 \div 200 \text{ пф}$ является очень малым сопротивлением для тока высокой частоты). Затем напряжение усиливается каскадом на лампе Π_3 и через выходной трансформатор Tr подается на окончательный прибор (динамический громкоговоритель).

Регенеративный приемник даст наибольшее усиление при связи, близкой к критической. Однако работа в таком режиме неустойчива: приемник возбуждается и излучает в эфир собственные колебания, создавая помехи для других приемников.

Более устойчивую работу обеспечивает применение в приемнике *сверхрегенеративного каскада*, представляющего собой усилитель высокой частоты или детектор (сеточный или анодный) с положительной обратной связью, близкой к критической.

На рис. 6.28 а показана схема анодного детектора, работающего в сверхрегенеративном режиме. Катушка

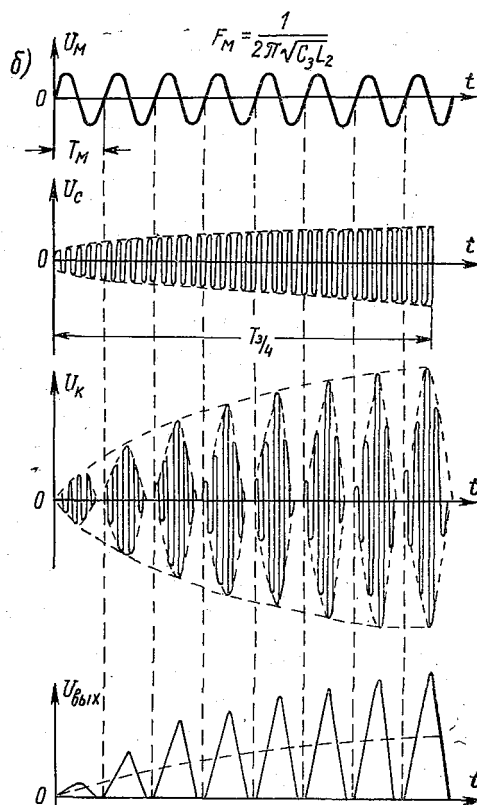
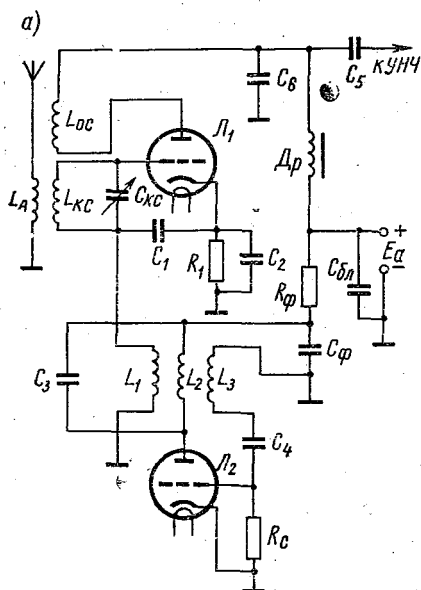


Рис. 6.28. Схема сверхрегенеративного каскада (а) и графики процессов в схеме (б).

$L_{ос}$ обеспечивает положительную обратную связь. На лампе Π_2 собран автогенератор (модулятор), который подает на сетку лампы детектора вспомогательное напряжение с частотой F_m . На рис. 6.28 б изображены графики напряжения U_m , подаваемого от модулятора, напряжения сигнала U_c , поступающего из антенны, импульсы высокочастотного напряжения, возбуждаемые в контуре U_k , импульсы напряжения после детектирования и огибающая этих импульсов $U_{вых}$, которая поступает в УНЧ.

Сопrotивление конденсатора C_6 является малым для токов с частотами f_c и F_m , но большим для токов со звуковой частотой $F_{зв}$.

При положительных значениях модулирующего напряжения выполняются условия самовозбуждения и каскад мягко возбуждается. Причиной возбуждения является напряжение шумов. Амплитуда этого напряжения (начальный толчок) мала и непостоянна в разные моменты времени. Каскад работает в режиме автогенератора, амплитуда колебаний нарастает, но после окончания положительного полупериода условия генерации не выполняются и колебания срываются. В следующий положительный полупериод они возбуждаются вновь.

Максимальная амплитуда, до которой могут дойти колебания, определяется начальным напряжением возбуждения. При отсутствии сигнала этими напряжениями являются неравномерные напряжения шумов. Если каскад является усилителем высокой частоты, то на выходе усилителя сигнал имеет вид высокочастотных импульсов, частота следования которых равна F_m , а амплитуда высокочастотных колебаний в импульсе сначала нарастает до какого-то максимального значения, а затем уменьшается до нуля.

После детектирования получаются остpоконечные импульсы, частота которых равна F_m , а амплитуда неодинакова, т. е. импульсы промодулированы напряжением шумов. На выходе приемника этот шум воспринимается. Его называют суперным шумом. Когда на вход усилителя поступает немодулированный внешний сигнал, то он служит лишь для того, чтобы возбуждать собственные колебания усилителя. Теперь начальное напряжение возбуждения будет все время одинаковым, импульсы будут иметь равную амплитуду и суперный шум пропадает. Если входящий сигнал модулирован звуковой частотой $F_{зв}$, то напряжение возбуждения будет меняться с частотой $F_{зв}$ и с этой же частотой будет меняться амплитуда импульсов.

При детектировании частота F_m отфильтровывается и на выходе прослушиваются только сигналы звуковой частоты.

Супергетеродинные приемники. В отличие от приемников прямого усиления, в супергетеродинных приемниках имеется каскад преобразования колебаний несущей частоты в колебания более низкой частоты при сохранении закона модуляции. Дело в том, что получить значительное усиление на частоте принимаемого сигнала f_c трудно из-за большого влияния паразитных обратных связей. Это влияние значительно ослабляется, если до детектора произвести преобразование частоты. Тогда усиление будет производиться на частоте принимаемого сигнала f_c в УВЧ и на промежуточной частоте $f_{п}$ в усилителе промежуточной частоты (УПЧ).

Приемник с преобразованием частоты до детектора назы-

вається *супергетеродинним*. Его блок-схема показана на рис. 6.29. Рассмотрим работу входящих в схему каскадов.

В каскаде приемника, называемом *преобразователем частоты*, модулированное напряжение приходящего сигнала с частотой f_c преобразуется в новое высокочастотное напряжение с частотой f_{π} без изменения вида и характера модуляции. Эту новую частоту f_{π} называют промежуточной частотой. Промежуточная частота постоянна, что позволяет иметь в приемнике большое число резонансных усилительных каскадов, контуры которых не нужно перестраивать в процессе эксплуатации. Благодаря этому супергетеродинные приемники могут обладать очень высокой чувствительностью, хорошей избирательностью, равномерным усилением в пределах требуемой полосы пропускания частот.

Из физики известно, что при сложении двух колебаний с разными амплитудами U_1 и U_2 и частотами f_1 и f_2 получаются коле-

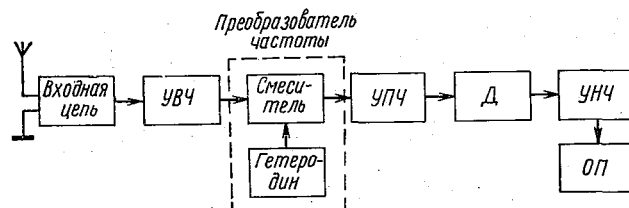
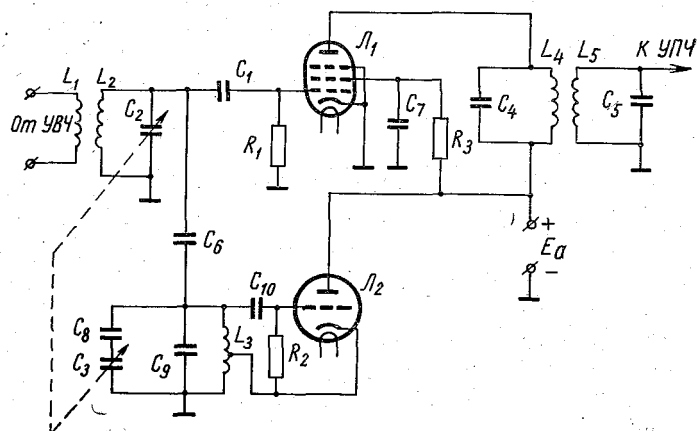


Рис. 6.29. Блок-схема супергетеродинного приемника.

бания, амплитуда которых будет меняться от $U_{\min} = |U_1 - U_2|$ до $U_{\max} = U_1 + U_2$ с частотой, равной $f_6 = |f_1 - f_2|$. Эти колебания называют *биениями*. Если биения подать на нелинейный элемент (электронную лампу, диод, транзистор и др.), то результирующий ток будет содержать следующие составляющие частоты: f_1 ; f_2 ; $f_1 + f_2$; $f_1 - f_2$; $f_1 + 2f_2$; $f_1 - 2f_2$ и т. д. Контур преобразователя настроен на самую низкую из всех частот $f_{\pi} = f_6 = f_1 - f_2$, и в нем будет выделяться напряжение этой частоты. Для остальных частотных составляющих контур будет представлять собой малое сопротивление.

Для радиовещательных приемников стандартной промежуточной частотой является $f_{\pi} = 465$ кГц, в других приемниках промежуточная частота выбирается равной 110, 1100, 1600 кГц, 8,4 МГц и др. Преобразователь состоит из смесителя и маломощного генератора высокой частоты, называемого гетеродином. В смеситель поступают два переменных напряжения: напряжение сигнала с частотой f_c и напряжение гетеродина с частотой f_r . На выходе смесителя получается напряжение с частотой $f_{\pi} = f_r - f_c$. Если, например, принимаемая станция работает на частоте 600 кГц, а промежуточная частота выбрана равной 465 кГц, то гетеродин генерирует колебания с частотой $f_r = f_c + f_{\pi} = 600 + 465 = 1065$ кГц.

1)



2)

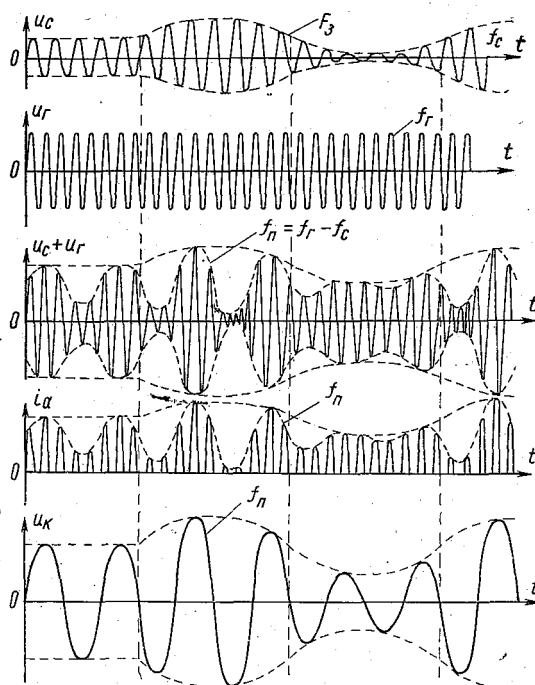


Рис. 6.30а. Односеточный преобразователь частоты.
1 — схема; 2 — графики процессов.

Преобразователи частоты делят на *односеточные* и *двухсеточные*. Рассмотрим схему односеточного преобразователя частоты на пентоде (рис. 6.30а). На лампе Π_1 собран сеточный детектор, на вход которого подается напряжение с контура L_2C_2 , а нагрузкой служит полосовой фильтр, состоящий из контуров L_4C_4 и L_5C_5 , настроенных на промежуточную частоту. На лампе Π_2 по схеме индуктивной трехточки собран автогенератор (так называемый гетеродин). С контура гетеродина L_3C_3 напряжение U_T через конденсатор C_6 подается на контур L_2C_2 . На этот же контур приходит напряжение сигнала от УВЧ или из входной цепи. Оба напряжения поступают на сетку лампы Π_1 . Происходит детектирование этого напряжения, в результате чего в анодном токе появляется переменная составляющая с частотой биений, являющейся промежуточной частотой. Амплитуда биений изме-

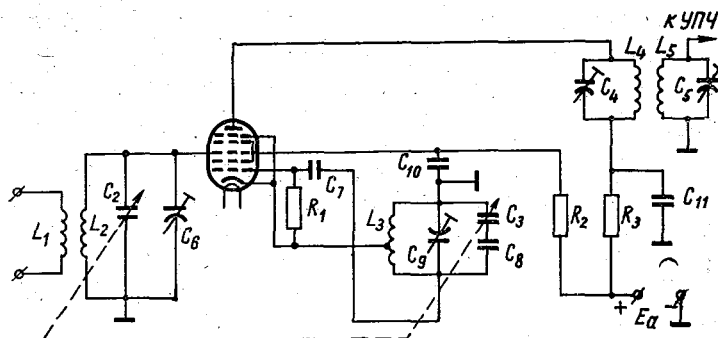


Рис. 6.30 б. Двухсеточный преобразователь частоты.

няется по тому же закону, по которому изменялась амплитуда напряжения сигнала. Таким образом, на выходе смесителя (на контуре) получаем амплитудно-модулированные колебания промежуточной частоты. Эти колебания поступают в тракт усилителей промежуточной частоты (УПЧ). На рис. 6.30а показаны графики процессов в односеточном преобразователе частоты. В приемнике, предназначенном для работы в определенном диапазоне волн, необходимо перестраиваться с одной волны на другую, что достигается вращением ручки управления, связанной с конденсаторами переменной емкости C_2 и C_3 . Чтобы при любом положении ротора блока конденсатора переменной емкости разность частот контуров L_2C_2 и L_3C_3 была постоянна и равна промежуточной частоте, в контур гетеродина включают так называемые сопрягающие конденсаторы C_8 и C_9 . Преимуществом схемы односеточного преобразования является простота. Но она имеет серьезный недостаток: контуры L_2C_2 и L_3C_3 оказываются связанными. Во-первых, это ухудшает стабильность частоты гетеродина, так как нестабильный контур L_2C_2 вносит расстройку в контур L_3C_3 гетеро-

дина; во-вторых, часть энергии гетеродина с входного контура попадает (при отсутствии УВЧ) в антенну приемника и излучается, создавая помехи соседним приемникам.

В двухсеточном преобразователе паразитная связь между контурами сигнала и гетеродина значительно меньше. Напряжения сигнала и гетеродина подводятся не к одной, а к двум различным сеткам лампы. В смесителях на пентоде для этого используют управляющую и антидинаatronную сетки. Для преобразования частоты созданы и специальные многосеточные лампы с двумя управляющими сетками (гексоды, гептоды, октоды).

Рассмотрим схему двухсеточного преобразователя, показанную на рис. 6.30б. Гетеродин собран по схеме индуктивной трехточки с заземленным анодом. Роль анода в этой схеме играет вторая (экранирующая) сетка, на которую через гасящее сопротивление R_2 подано постоянное положительное напряжение. По высокой частоте эта сетка заземлена ($X_{C_7} \approx 0$) через конденсатор C_7 . Напряжение сигнала поступает на третью (управляющую) сетку. Четвертая сетка соединена со второй. Она экранирует третью сетку от анода. Пятая сетка антидинаatronная. Цепочка R_3C_{11} является развязывающим фильтром. Нагрузкой лампы служит полосовой фильтр. Конденсаторы C_8 и C_9 нужны для подстройки контуров сигнала и гетеродина при регулировке (сопряжении контуров).

Электронный поток внутри лампы пульсирует с частотой гетеродина и с частотой сигнала. Сложение колебаний и получение биений происходит в самом электронном потоке. Благодаря нелинейности характеристики лампы в анодном токе возникает переменная составляющая разностной частоты, которая создает напряжение на контурах L_4C_4 и L_5L_5 .

В высококачественных преобразователях гетеродин собирают на отдельной лампе. Общим недостатком многосеточных преобразователей является высокий уровень собственных шумов.

В транзисторных приемниках супергетеродинного типа применяются смесители, принцип действия которых аналогичен ламповым смесителям на триоде. Напряжение сигнала и напряжение гетеродина подаются на базу транзисторного смесителя, а контур в цепи коллектора настраивается на промежуточную частоту. Для лучшей развязки входного и гетеродинного контуров напряжение от гетеродина подается в цепь эмиттера.

В малогабаритных транзисторных приемниках для уменьшения габаритов, упрощения схемы и повышения экономичности используют преобразователи частоты с совмещенным гетеродином. В преобразователях такого типа (рис. 6.31) один транзистор одновременно выполняет функции смесителя и гетеродина. С катушки L_2 напряжение сигнала U_c приложено к базе, напряжение гетеродина U_r с части витков катушки L_4 через C_3 приложено к эмиттерному сопротивлению R_3 . Можно считать, что по высо-

кой частоте между базой и эмиттером последовательно включены источники напряжения сигнала (L_2) и гетеродина (часть L_4). Контур гетеродина включает в себя катушку L_4 и конденсаторы C_4 , C_6 , C_7 . Конденсаторы C_6 и C_7 являются сопрягающими, C_4 — конденсатор настройки. Катушка L_3 обеспечивает обратную связь в гетеродине. L_5C_5 — контур коллекторной нагрузки, настроенный на промежуточную частоту, R_4C_8 — развязывающий фильтр, R_1R_2 — делитель напряжения питания цепи базы.

Преобразование частоты значительно повышает избирательность приемника благодаря тому, что усиление напряжений заданной полосы частот велико, а за пределами полосы ничтожно мало. Вместе с тем в супергетеродинных приемниках появляются так называемые *паразитные каналы*, которые рассматриваются ниже.

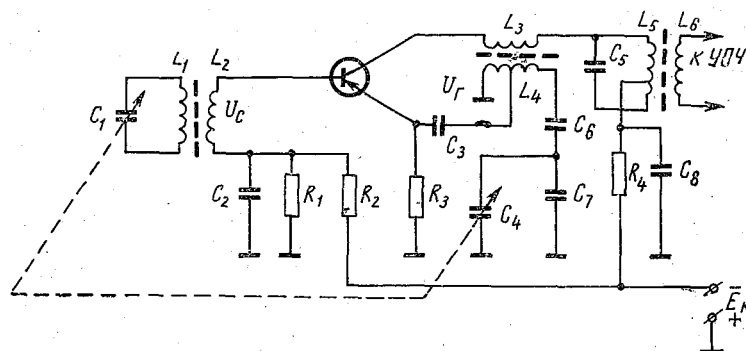


Рис. 6.31. Схема преобразователя на транзисторе с совмещенным гетеродином.

Канал прямого прохождения образуется, если на сетку лампы одновременно с напряжением сигнала попадает напряжение от станции, работающей на частоте, равной промежуточной или близкой к ней. Сигналы этой станции усиливаются вместе с полезным сигналом и на выходе создают помехи приему. Кроме того, проникновение частот, близких к промежуточной, опасно тем, что они при сложении с промежуточной частотой создадут биения звуковой частоты, которые после детектирования будут воспроизводиться на выходе в виде свистов. Для устранения помехи по каналу прямого прохождения промежуточную частоту выбирают в наименее «загруженном» участке диапазона, повышают избирательность входной цепи и УВЧ, применяют на входе фильтр-пробку — параллельный контур, настроенный на промежуточную частоту.

Зеркальный канал образуется, если на сигнальную сетку смесителя из входной цепи одновременно с напряжением сигнала с частотой f_c попадает модулированное напряжение с частотой

f_3 , которая выше, чем f_c на величину $2f_{\Pi}$. При сложении этих колебаний с колебаниями гетеродина f_{Γ} получаются колебания с частотами $f_{\Gamma} - f_c$ и $f_3 - f_{\Gamma}$; каждая из этих частот равна f_{Π} . Естественно, фильтр смесителя (анодный контур) не различит эти частоты, они попадут в УПЧ, и на выходе будет одновременно два сигнала: полезный и мешающий. Частота сигнала, проходящего по зеркальному каналу, выше частоты гетеродина на величину f_{Π} (она как бы симметрична частоте сигнала, из-за чего помеху такого рода называют симметричной или зеркальной). Для борьбы с зеркальной помехой следует повышать промежуточную частоту и избирательность входной цепи и УВЧ приемника.

Соседний канал возникает при широкой полосе пропускания приемника, когда наряду с полезным сигналом через тракт усиления приемника проходит сигнал станции, работающей на частоте, близкой к частоте принимаемой станции. На выходе приемника прослушиваются сигнал и помеха. Для устранения этой помехи стремятся полосу пропускания приемника сделать возможно уже, что и осуществляется в усилителе промежуточной частоты.

В супергетеродинных приемниках, предназначенных для приема немодулированных сигналов (радиотелеграфия), применяется двойное преобразование частоты. Немодулированное напряжение сигнала при сложении с напряжением гетеродина вызовет на выходе смесителя немодулированные колебания промежуточной частоты f_{Π} . Если эти колебания подать на детектор, то на выходе детектора сигнала не будет. Для приема немоделированных сигналов на детектор, играющий в данном случае роль второго смесителя, подают от второго гетеродина напряжение с частотой $f_{\Gamma 2}$, отличающейся от промежуточной частоты на 1 кГц. Например, если $f_{\Pi} = 465$ кГц, то $f_{\Gamma 2} = 465 \pm 1$ кГц, тогда при сложении этих колебаний образуются биения с частотой $|f_{\Pi} - f_{\Gamma 2}|$, которые и получаются на выходе детектора. Звуковая частота на выходе детектора будет лишь в том случае, если на вход приемника придет высокочастотный сигнал и образуется сигнал с промежуточной частотой. Наличие второго гетеродина усложняет схему, поэтому в радиовещательных приемниках второй гетеродин обычно не ставят.

Усилители промежуточной частоты (УПЧ). Каскады УПЧ являются резонансными усилителями высокой частоты, настроенными на фиксированную (промежуточную) частоту, на которой происходит основное усиление сигнала. Схема радиоприемника обычно содержит от 2 до 12 каскадов УПЧ с результирующим коэффициентом усиления, равным нескольким десяткам и сотням тысяч. УПЧ обеспечивает высокую чувствительность и избирательность приемника в заданной полосе частот. Для получения равномерного усиления в заданной полосе частот нужно, чтобы форма частотной характеристики УПЧ была близка к прямо-

угольной. Так как в УПЧ происходит равномерное усиление в полосе частот, их часто называют *полосовыми усилителями*.

В радиовещательных и связных приемниках используются каскады УПЧ, в анодную цепь которых включаются по два связанных контура (рис. 6.32). Оба контура настраиваются на промежуточную частоту и имеют одинаковые параметры. Такие каскады называют усилителями на полосовых фильтрах. Форма частотной характеристики и коэффициент усиления каскада зависят от величины связи между контурами. Как известно из § 2.4, при критической связи между контурами частотная характеристика имеет плоскую вершину и крутые скаты. Эквивалентное сопротивление полосового фильтра при критической связи, как показывают расчеты, в два раза меньше сопротивления одиночного контура. Тогда напряжение на контуре L_2C_2 равно $U_{\text{вых}} = \frac{1}{2} SR_0 U_{\text{вх}}$, где S — крутизна характеристики лампы; R_0 — эквивалентное сопротивление одиночного резонансного контура; $U_{\text{вх}}$ — напряжение на сетке лампы. Коэффициент усиления кас-

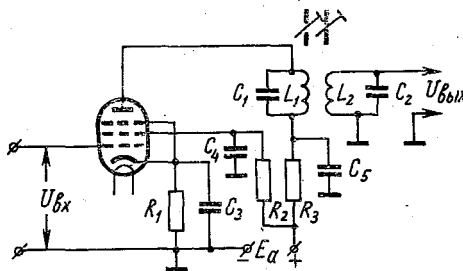


Рис. 6.32. Схема каскада полосового УПЧ.

када $K = \frac{1}{2} SR_0$. Полоса пропускания (Π_1) каскада при критической связи между контурами может быть рассчитана по формуле $\Pi_1 = 1,41 \frac{f_0}{Q}$ (см. стр. 44). При включении n каскадов с полосовыми фильтрами коэффициенты усиления перемножаются, а ширина результирующей частотной характеристики Π будет уже и приближенно равна

$$\Pi_n \approx \Pi_1 \frac{1}{1,1 \sqrt[n]{n}}. \quad (6.18)$$

Например, если один каскад пятикаскадного усилителя имеет полосу пропускания $\Pi_1 = 10$ кГц, то полоса всего усилителя

$$\Pi_5 = 10 \frac{1}{1,1 \sqrt[5]{5}} \approx 6,1 \text{ кГц}.$$

Для получения широкой полосы пропускания применяют УПЧ с одиночными контурами в каждом каскаде, настроенными на различные частоты. Обычно настраивают на разные частоты по два или по три контура.

Приемники частотно-модулированных колебаний. Большая помехоустойчивость ЧМ сигнала позволяет улучшить качество воспроизведения сигнала и реальную чувствительность прием-

ника. Серьезным недостатком ЧМ следует считать широкополосность (в радиовещании $\Delta f = 160 \text{ кГц}$), что позволяет использовать ЧМ главным образом в диапазоне УКВ, в котором практически отсутствуют атмосферные и промышленные помехи и сравнительно несложно обеспечить высокую (1—2 мкВ) чувствительность приемников.

Блок-схема приемника ЧМ сигналов показана на рис. 6.33. Сигнал от антенны через входную цепь попадает на УВЧ, имеющий 1—2 каскада, а затем на преобразователь частоты. На выходе преобразователя получается частотно-модулированное напряжение промежуточной частоты, которое попадает в тракт УПЧ, имеющий от 2 до 4 каскадов. Чтобы в ЧМ сигнале не было паразитной амплитудной модуляции, сигнал с УПЧ поступает на ограничитель, на выходе которого получается частотно-модулированное напряжение с постоянной амплитудой. Это напряжение попадает на частотный детектор, который состоит из преобра-

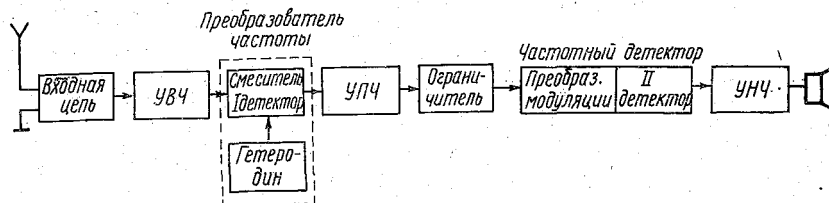


Рис. 6.33. Блок-схема приемника ЧМ сигналов.

зователя модуляции и амплитудного детектора. Преобразователь модуляции преобразует частотно-модулированный сигнал в амплитудно-модулированный. АМ колебания поступают на амплитудный детектор, а оттуда колебания низкой частоты идут в УНЧ.

Остановимся на работе тех каскадов, которыми приемник ЧМ сигналов отличается от приемника АМ сигналов.

Ограничитель представляет собой резонансный усилитель промежуточной частоты, лампа которого работает при малых постоянных напряжениях на аноде и экранирующей сетке (5—50 в). При небольшом отрицательном напряжении на управляющей сетке происходит запираение лампы, а при небольшом положительном напряжении на сетке перестает расти анодный ток. На рис. 6.34 а приведена схема ограничителя, а на рис. 6.34 б анодно-сеточная характеристика лампы и графики напряжения на сетке лампы и анодного тока лампы. Из рисунка видно, что при переменной амплитуде напряжения на сетке амплитуда анодного тока и, следовательно, амплитуда напряжения на контуре будут постоянны. Амплитуда сигнала, подаваемого на вход ограничителя, должна при этом быть не менее 4—6 в.

Частотный детектор включает в себя два каскада: преобразователь модуляции и амплитудный детектор. Если с выхода огра-

нителя частотно-модулированное напряжение с постоянной амплитудой подать на амплитудный детектор (диодный, сеточный и т. д.), то на выходе детектора частота модуляции, т. е. низкая частота, выделяться не будет, так как напряжение на выходе детектора пропорционально изменению амплитуды высокочастотных колебаний и не зависит от частоты. В преобразователе модуляции амплитуда напряжения на выходе пропорциональна частоте, т. е. колебания с постоянной амплитудой и переменной частотой преобразуются в колебания с переменной амплитудой и

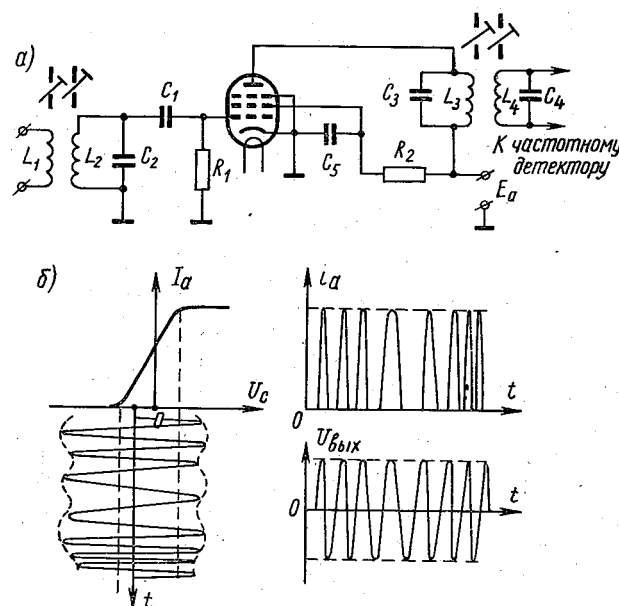


Рис. 6.34. Схема амплитудного ограничителя (а) и графики процессов в схеме (б).

переменной частотой. Теперь уже амплитудно-модулированные колебания поступают на детектор. На рис. 6.35 а показана схема простейшего частотного детектора. На лампе L_1 собран преобразователь модуляции. Он представляет собой резонансный усилитель, анодный контур которого расстроен относительно промежуточной частоты (точнее ее среднего значения $f_{п0}$, так как промежуточная частота при ЧМ меняется от $f_{п\min}$ до $f_{п\max}$). Напряжение на сетке вызовет изменение анодного тока, амплитуда переменной составляющей которого для разных частот будет одинакова: $I_{та} = S U_{т\text{ вх}}$. Напряжение на анодном контуре будет тем больше, чем выше частота. На рис. 6.35 б изображены графики процессов в преобразователе модуляции. На контуре получают амплитудно-модулированные колебания, которые подаются на

диодный детектор, собранный на диоде $\mathcal{L}_2$. Таким образом, в частотном детекторе ЧМ колебания преобразуются в колебания низкой частоты. Пропорциональность между изменением частоты и изменением амплитуды будет лишь на линейном участке частотной характеристики контура, а это возможно в довольно узкой полосе частот.

При широкополосной частотной модуляции в качестве частотного детектора применяется так называемый *дискриминатор*

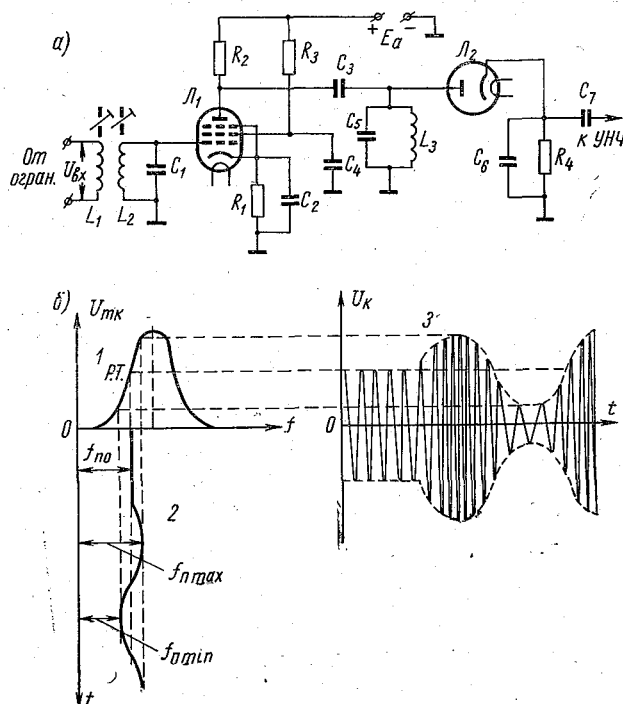


Рис. 6.35. Схема частотного детектора (а); процесс преобразования модуляции (б).

1 — частотная характеристика контура, 2 — график изменения промежуточной частоты; 3 — график напряжения на контуре.

(различитель), схема которого показана на рис. 6.36 а. На лампе $\mathcal{L}_1$ собран ограничитель, анодный контур которого L_3C_3 индуктивно связан с контуром дискриминатора L_4C_4 ($L_4 = L'_4 + L''_4$). Оба контура настроены в резонанс на частоту $f_{по}$. Дискриминатор представляет собой два амплитудных детектора, нагрузкой которых служат сопротивления R_4 и R_5 . Напряжение на выходе $U_{вых}$ равно разности напряжений на R_4 и R_5 . Если частота напряжения на входе равна средней промежуточной частоте $f_{по}$, то $U_{1вых} = U_{2вых}$ и напряжение на выходе равно нулю, так как

$U_{\text{вых}} = U_{1\text{вых}} - U_{2\text{вых}}$. Если частота входного сигнала будет возрастать, то напряжение $U_{1\text{вых}}$ будет увеличиваться, а $U_{2\text{вых}}$ будет уменьшаться, $U_{\text{вых}}$ будет возрастать. Если частота входного сигнала будет уменьшаться, то будет увеличиваться $U_{2\text{вых}}$ и уменьшаться $U_{1\text{вых}}$, а $U_{\text{вых}}$ (противоположной полярности) будет

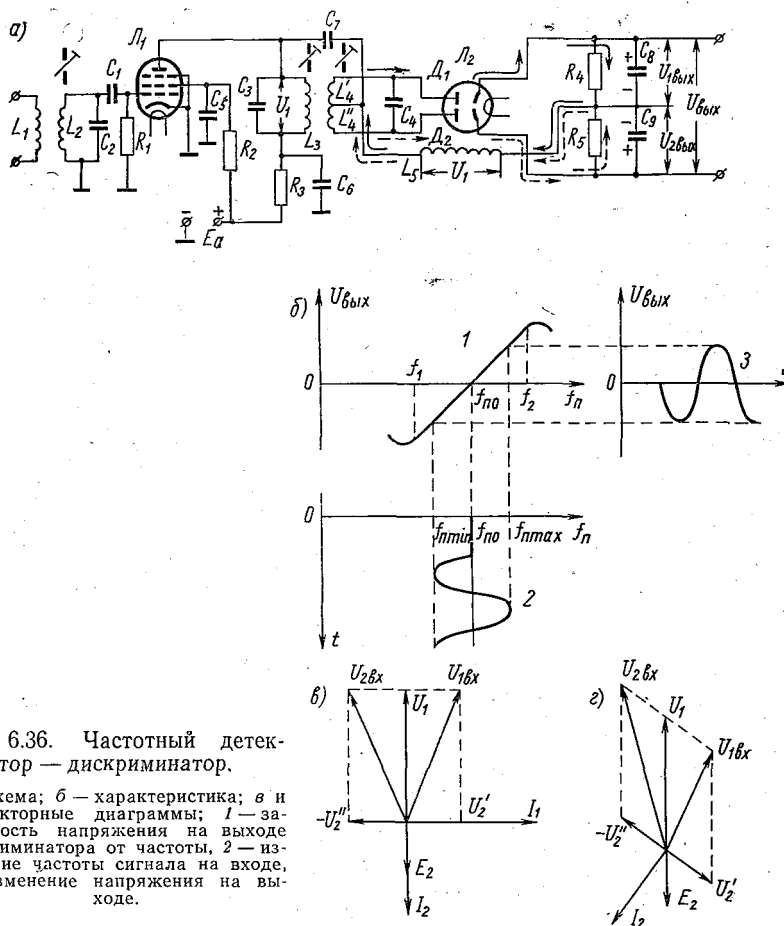


Рис. 6.36. Частотный детектор — дискриминатор.

α — схема; δ — характеристика; ϵ и ζ — векторные диаграммы; 1 — зависимость напряжения на выходе дискриминатора от частоты, 2 — изменение частоты сигнала на входе, 3 — изменение напряжения на выходе.

возрастать. Таким образом, напряжение на выходе будет меняться пропорционально изменению частоты, и частотно-модулированные колебания преобразуются в колебания низкой частоты. На рис. 6.36 б показана частотная характеристика дискриминатора, т. е. зависимость напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$ дискриминатора от изменения частоты. Из графика видно, что на участке от f_1 до f_2 напряжение $U_{\text{вых}}$ прямо пропорционально изменению частоты.

Рассмотрим подробнее, что происходит в дискриминаторе при $f_{\pi} = f_{\pi 0}$. Если напряжение на контуре $L_3 C_3$ равно U_1 , то таким же будет и напряжение на дросселе L_5 , так как сопротивления конденсаторов C_6 и C_9 малы для токов промежуточной частоты. Это напряжение подается на дроссель через конденсатор C_7 . В двух половинах катушки L_4 ($L_4 = L'_4 + L''_4$) будут индуцироваться напряжения U'_2 и U''_2 , так как контуры $L_3 C_3$ и $L_4 C_4$ индуктивно связаны. Ток I_1 в катушке L_3 отстает по фазе от напряжения U_1 на 90° . Магнитный поток, возбуждаемый этим током, совпадает по фазе с током, э. д. с. индукции в катушке L_4 отстает от магнитного потока на 90° . Ток в контуре $L_4 C_4$ совпадает по фазе с э. д. с. E_2 , так как контур настроен в резонанс и является активным сопротивлением. Напряжение U_2 на катушке L_4 опережает ток на 90° . Вектор напряжения $U_{1\text{вх}}$, подаваемого на диод D_1 , будет равен геометрической сумме напряжений $U_1 + U'_2$, а на диод D_2 подается напряжение $U_{2\text{вх}}$, вектор которого равен геометрической разности $U_1 - U''_2$. Когда на анод диода D_1 поступает «плюс» напряжения с катушки L'_4 , то на анод диода D_2 подается «минус» напряжения с катушки L''_4 . Из векторной диаграммы (рис. 6.36 в) видно, что напряжения высокой частоты на входах детекторов $U_{1\text{вх}}$ и $U_{2\text{вх}}$ одинаковы по величине. Следовательно, через диоды пойдут одинаковые токи i_1 (на рис. 6.36 а показан сплошными стрелками) и i_2 (пунктирные стрелки). На нагрузках детекторов R_4 и R_5 при этом будут одинаковые напряжения $U_{1\text{вых}} = U_{2\text{вых}}$, а на выходе напряжение будет равно нулю.

При частоте $f_{\pi} > f_{\pi 0}$ картина меняется (рис. 6.36 г). Контур $L_4 C_4$ окажется расстроенным относительно э. д. с. E_2 . Ток I_2 будет отставать по фазе от э. д. с. на какой-то угол φ_2 . Напряжение U_2 будет опережать ток I_2 на угол 90° . Теперь геометрическая сумма $U_{1\text{вх}} = U_1 + U'_2$ не равна геометрической разности $U_{2\text{вх}} = U_1 - U''_2$. Напряжения на выходах детекторов будут неодинаковы, и выходное напряжение отрицательной полярности. При частоте $f_{\pi} < f_{\pi 0}$ напряжение на выходе имеет положительную полярность.

В рассмотренной схеме изменение частоты входного сигнала вызывает изменение фаз напряжений U'_2 и U''_2 относительно напряжения U_1 на дросселе L_5 . Напряжение U_1 называется опорным, а такое детектирование называется фазовым.

§ 6.7. РЕГУЛИРОВКИ В РАДИОПРИЕМНИКАХ

В радиоприемниках, работающих в широком диапазоне волн, имеются устройства для настройки приемника на частоту принимаемой станции. Диапазон волн разбит на поддиапазоны. Одновременно в приемнике настраиваются контуры входной цепи, ге-

теродина и УВЧ. Внутри поддиапазона настройка производится вращением ротора (изменением емкости) конденсатора переменной емкости. Обычно используется многосекционный конденсатор (двух-, трех-, четырехсекционный), в котором роторы конденсаторов всех контуров находятся на одной оси и поворачиваются одной рукояткой¹. Переход с одного поддиапазона на другой осуществляется переключением индуктивностей всех контуров одновременно.

Для получения нормального сигнала на выходе приемника при различных значениях напряжения сигнала на входе применяют *ручную регулировку усиления* (регулятор громкости). В радиовещательных приемниках регулятор громкости ставится на входе УНЧ (рис. 6.37 а). Потенциометр R_2 , включенный в нагрузку детектора, играет роль делителя напряжения с переменным коэффициентом деления. Применяют также ручную регулировку уси-

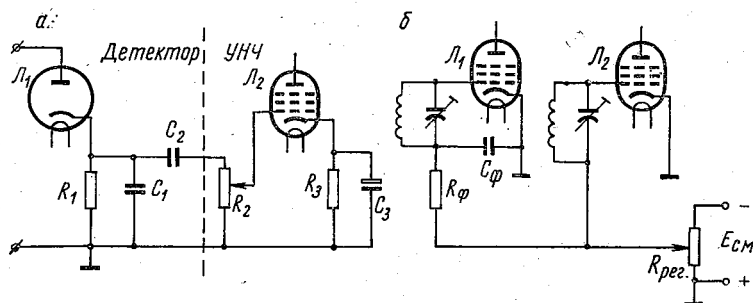


Рис. 6.37. Ручная регулировка усиления делением напряжения сигнала (а) и смещением (б).

ления смещением. В этом случае используются лампы с переменной крутизной характеристики (типа «варимю»), у которых значение крутизны может изменяться в десятки раз. Для более глубокой регулировки увеличивают число регулируемых каскадов. На рис. 6.37 б изображена схема двухкаскадного УНЧ с регулировкой усиления смещением.

Помимо ручной регулировки усиления, в современных приемниках используют *автоматическую регулировку усиления* (АРУ), служащую для того, чтобы при кратковременных изменениях напряжения сигнала на входе напряжение на выходе оставалось постоянным. Принцип действия АРУ заключается в следующем. Постоянная составляющая напряжения на нагрузке детектора пропорциональна амплитуде сигнала на входе приемника. С нагрузки детектора постоянная составляющая подается на сетки ламп усилителей высокой и промежуточной частот и преобразователя. Чем больше сигнал, тем большее смещение будет подано

¹ Такой конденсатор показан на рис. 11.5.

на лампы усилителей, тем меньше крутизна характеристики и коэффициент усиления. Таким образом, при слабых сигналах на входе усиление будет больше, при больших сигналах — меньше, а на выходе амплитуда напряжения будет почти постоянной.

Рассмотрим схему простого автоматического регулятора усиления (рис. 6.38 а). С сопротивления нагрузки детектора R_H постоянная составляющая через фильтр $R_\Phi C_\Phi$ подается на сетки ламп УВЧ, ПЧ и УПЧ. $R_\Phi C_\Phi$ представляет собой делитель напря-

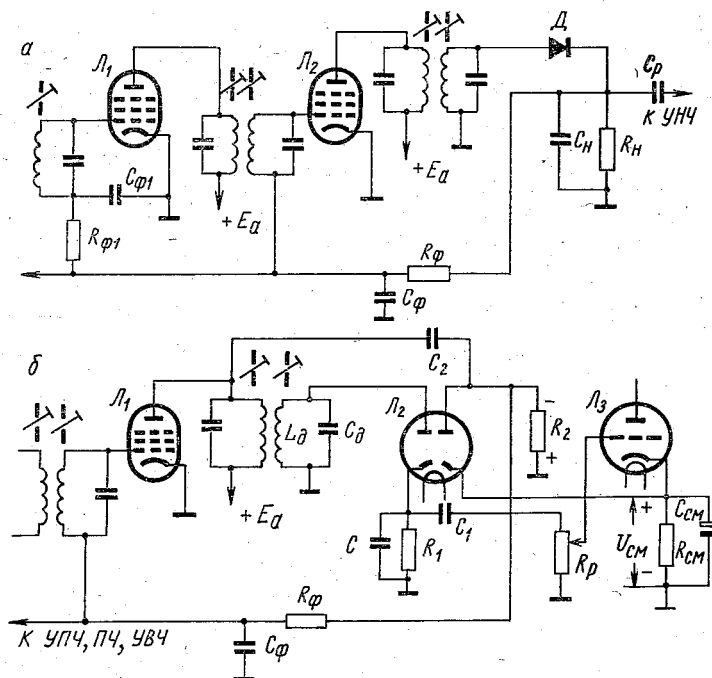


Рис. 6.38. Схема простой АРУ (а) и схема АРУ с задержкой (б).

жения, в котором $X_{C_\Phi} \ll R_\Phi$ для самых низких звуковых частот (например, $R_\Phi = 1 \text{ Мом}$, $C_\Phi = 0,1 \text{ мкф}$). Однако возможно проникновение переменного напряжения на сетки ламп УПЧ, что может вызвать паразитную модуляцию сигнала. Опасно и проникновение напряжения промежуточной частоты, в результате чего может произойти самовозбуждение приемника на промежуточной частоте. Другим недостатком этой схемы является уменьшение усиления даже при слабых сигналах.

Более совершенной является АРУ с задержкой, при которой усиление регулируется лишь тогда, когда напряжение на входе приемника превысит некоторую начальную величину $U_{вх.н.}$. В этом случае схема усложняется: ставится отдельный детектор

АРУ, на анод которого подается такое отрицательное напряжение, при котором детектор остается запертым до тех пор, пока входное напряжение не превысит величину $U_{\text{вх. н.}}$.

На рис. 6.38 б приведена схема АРУ с задержкой. Левая часть двойного диода L_2 используется в детекторе основного канала, правая — в детекторе АРУ. Напряжение сигнала на детектор основного канала подается с контура $L_d C_d$, а на детектор АРУ — с анода лампы L_1 УПЧ через конденсатор C_2 . Детектор АРУ собран по параллельной схеме диодного детектора. При отсутствии сигнала между анодом и катодом правого диода L_2 приложено (отрицательное на аноде) напряжение смещения $U_{\text{см}}$, снимаемое с цепочки катодного автоматического смещения первого каскада УНЧ. Когда на диод поступает сигнал $U_{\text{мд}} < U_{\text{см}}$, то анод остается под отрицательным потенциалом и напряжение на выходе приемника пропорционально напряжению на входе. Авторегулировка отсутствует. При сигналах $U_{\text{мд}} > U_{\text{см}}$, т. е. при напряжении на входе приемника $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх. н.}}$, в моменты, когда $u_a > U_{\text{см}}$ через правый диод L_2 пойдет ток. Он создает на сопротивлении нагрузки R_2 падение напряжения. Постоянная составляющая этого напряжения через $R_{\text{ф}} C_{\text{ф}}$ -цепочку подается на сетки регулируемых ламп. Сопротивление R_1 является нагрузкой детектора основного канала, R_p — ручной регулятор усиления, C_1 — разделительный конденсатор, $R_{\text{см}} C_{\text{см}}$ — цепочка смещения, $R_{\text{ф}} C_{\text{ф}}$ — фильтр, не пропускающий на сетки регулируемых ламп переменные составляющие напряжения с сопротивления R_2 .

Переход от простой авторегулировки к АРУ с задержкой повышает усиление приемника и увеличивает напряжение на детекторе. Изменение напряжения на выходе приемника получается меньше в схеме с задержкой, так как АРУ регулирует лучше, если небольшим изменениям напряжения на входе соответствуют большие изменения смещения на сетке, а это будет тогда, когда напряжение на детекторе больше.

§ 6.8. СВЕДЕНИЯ О ПРИЕМНИКАХ СВЧ

Приемники СВЧ ($f > 30 \text{ МГц}$, $\lambda < 10 \text{ м}$) применяются в радиолокационных установках, на линиях радиосвязи, в телевидении и т. п. Они существенно отличаются от рассмотренных выше приемников.

Приемники СВЧ имеют широкую полосу пропускания (от сотен до десятков тысяч килогерц), так как обычно они предназначены для приема импульсных сигналов, а спектр частот импульсных сигналов тем шире, чем короче импульс.

Усилители сверхвысокой частоты выполняются на лампах с дисковыми вводами и лампах бегущей волны (ЛБВ); применяются также малошумящие усилители (параметрические, квантовые, на туннельных диодах). В качестве гетеродина

широко используются отражательные клистроны. Свойство клистронов плавно изменять частоту генерации при изменении потенциала отражателя используется для автоматической подстройки частоты (АПЧ).

В диапазоне СВЧ используются преимущественно супергетеродинные приемники, но в некоторых случаях, когда допустима низкая чувствительность и избирательность, а высокие требования предъявляются к простоте и компактности конструкции, применяют детекторные приемники. Суперрегенеративные приемники используют в переносных радиолокационных маяках, где большую роль играет компактность и простота осуществления приема и передачи.

Как бы мы ни увеличивали усиление приемника, чувствительность его не может быть больше некоторой предельной мощности $P_{\text{ш}}$. Причиной этого являются внутренние шумы приемника. Напряжение шумов усиливается и попадает на оконечный прибор приемника наряду с полезным сигналом. Отличить сигнал от шума можно лишь в том случае, если амплитуда сигнала превышает амплитуды шумовых всплесков. Наибольшее влияние на работу приемника оказывают напряжения шумов, действующие на входе приемника и усиливающиеся всеми каскадами приемника. Кроме того, каждый каскад добавляет свои шумы, так что удельный вес шумов на выходе всегда больше, чем на входе. Величина, показывающая во сколько раз отношение мощности сигнала P_c к мощности шумов $P_{\text{ш}}$ на входе больше, чем на выходе, называется коэффициентом шума приемника N

$$N = \frac{\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{вх}}}{\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{вых}}} \quad (6.19)$$

Остановимся подробнее на источниках шума. В каждом проводнике электроны находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении, создавая на концах проводника случайные значения напряжения. Амплитуда напряжения шума на концах резистора тем больше, чем выше температура проводника и больше величина сопротивления. В приемнике напряжение шума зависит от ширины полосы пропускания: чем шире полоса, тем больше напряжение шума. Напряжение шума имеет составляющие всех частот примерно равной амплитуды.

В электронных лампах шум создается за счет неравномерного (случайного) распределения тока катода между анодом и сетками. Чем больше сеток в лампе, тем больше амплитуда шума. Поэтому в первых каскадах усиления высокой и промежуточной частоты в ущерб усилению ставят триоды вместо пентодов.

В главе 5 при анализе работы ламп на СВЧ указывалось, что межэлектродные емкости, индуктивности выводов и, наконец,

время пролета электронов являются причинами сравнительно низкого входного сопротивления ламп. Например, входное сопротивление лампы 6Ж1П для частоты $f=10$ Мгц равно 70 ом, а для частоты $f=2000$ Мгц значение $R_{вх}$ уменьшается до 1,7 ом. Поэтому необходимо согласование большого выходного сопротивления усилителя с малым входным сопротивлением лампы.

Приведем некоторые сведения о радиолокационных приемниках.

Входная цепь в радиолокационном приемнике служит для согласования волнового сопротивления фидера с входным сопротивлением усилительной лампы.

Для передачи сигнала от антенны на вход приемника применяют коаксиальный фидер или волновод. Входной контур может быть выполнен в виде отрезка длинной линии или объемного резонатора. В радиолокационных приемниках сантиметрового диапазона каскады УВЧ используются редко и сигнал из входного резонатора поступает на кристаллический смеситель. На частотах свыше 1000 Мгц применяют преимущественно кристаллические смесители. Они имеют малый уровень шумов, небольшие потери мощности сигнала, малые размеры и не нуждаются в источниках питания.

От смесителя по коаксиальному фидеру колебания промежуточной частоты подаются на вход УПЧ. УПЧ выполняются с полосовыми фильтрами и одиночными настроенными и расстроенными контурами в зависимости от требуемой полосы пропускания частот. Входная емкость лампы часто является единственной емкостью контура. Полоса пропускания УПЧ для получения прямоугольных импульсов длительностью $\tau_{и}$ обычно выбирается по формуле

$$2\Delta f = \frac{1+3}{\tau_{и}}. \quad (6.20)$$

Например, при $\tau_{и}=0,8$ мксек полоса пропускания

$$2\Delta f = \frac{2}{0,8} = 2,5 \text{ Мгц}.$$

С выхода УПЧ высокочастотные импульсы поступают на видеодетектор. На рис. 6.39 а представлена схема видеодетектора (импульсного диодного детектора). На рис. 6.39 б показаны напряжения на входе детектора (радиоимпульсы) и на нагрузке (видеоимпульсы). Напряжение на вход детектора подается с контура последнего каскада УПЧ $L_{к}$ (емкостью контура является емкость монтажа $C_{м}$). Нагрузкой служат сопротивление $R_{н}$ и емкость $C_{н}$, включенные параллельно. Чтобы на вход УНЧ не проникало напряжение промежуточной частоты, в схеме имеется фильтр, состоящий из индуктивности $L_{др}$ и входной емкости лампы $C_{ф}$.

Все напряжение промежуточной частоты будет приложено к контуру $L_{др} C_{ф}$, его не будет на входе видеоусилителя (ВУ).

Видеоусилителем (ВУ) называют каскады между выходом детектора и входами электроннолучевых трубок. ВУ предназначен для увеличения амплитуды прямоугольных импульсов до нескольких десятков вольт с минимальными искажениями формы импульсов. ВУ представляет собой усилитель низкой частоты с широкой полосой пропускания. Например, для импульсов с $\tau_{и}=0,8$ мксек требуемая верхняя граничная частота равна 442,5 кГц, а нижняя граничная частота составляет 2 кГц.

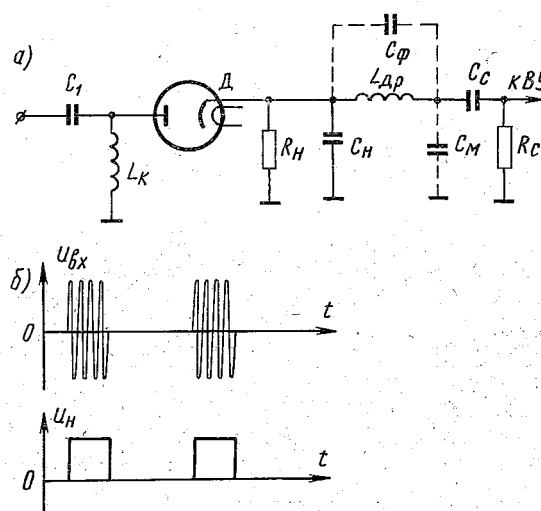


Рис. 6.39. Схема видеодетектора (а) и графики изменения напряжения на входе и выходе детектора (б).

Для получения широкой полосы пропускания и достаточно большого усиления в ВУ применяют частотную коррекцию по высокой и низкой частоте. ВУ часто бывает нагружен на кабель, по которому напряжение поступает на электроннолучевую трубку. Кабель имеет малое входное сопротивление. Для согласования выхода ВУ со входом кабеля последний каскад ВУ обычно представляет собой катодный повторитель.

Основные выводы

1. Основная задача входной цепи радиоприемника заключается в выделении частоты сигнала выбранной радиостанции. Входные цепи, как правило, представляют собой колебательные системы, выполненные в виде одного или двух контуров.

2. Усилители высокой частоты (УВЧ) предназначены для увеличения амплитуды колебаний полезного сигнала, поступившего из входной цепи, и ослабления всех посторонних сигналов (в том числе помех). УВЧ выполняются на электронных лампах или транзисторах. В сантиметровом диапазоне используются специальные УВЧ (лампы бегущей волны, параметрические и молекулярные усилители), обладающие малыми собственными шумами.

3. Сущность детектирования — процесса, противоположного модуляции, заключается в выделении полезной информации из модулированных высокочастотных колебаний. После детектирования сигналы подаются на усилитель низкой частоты (УНЧ), основная задача которого обеспечить усиление полезного сигнала до величины, необходимой для работы оконечного прибора приемника.

4. Из всех схем радиоприемников наиболее совершенной является супергетеродинная. Сущность супергетеродинной схемы заключается в том, что основное усиление полезного сигнала производится не на несущей, а на промежуточной частоте, что достигается применением маломощного генератора — гетеродина — и преобразователя, обеспечивающего получение промежуточной частоты из частот сигнала и гетеродина. Для усиления получившегося сигнала применяют усилители промежуточной частоты (УПЧ).

5. В приемниках СВЧ, использующихся главным образом в радиолокационной аппаратуре, применяются схемы, обеспечивающие прием слабых импульсно-модулированных сигналов. Особенности приемников СВЧ является применение специальных усилителей высокой частоты и наличие видеодетекторов и видеоусилителей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Каково назначение блоков приемника прямого усиления и супергетеродинного приемника?
2. Почему во входной цепи приемника не используют колебательные контуры с высокой добротностью?
3. Чем отличается входная цепь транзисторного приемника от входной цепи лампового приемника?
4. Почему нецелесообразно применять приемник прямого усиления с большим количеством каскадов УНЧ?
5. В каких случаях используется неполное включение контуров в УВЧ?
6. Каков принцип работы параметрического усилителя?
7. Начертите схему диодного детектора с разделенной нагрузкой?
8. Определите входное сопротивление диодного детектора, если $R_H = 500 \text{ ком.}$
9. Почему смеситель часто называют первым детектором?

10. Каково назначение второго гетеродина в приемниках немодулированных колебаний?
11. На какой частоте работает станция, создающая зеркальную помеху, если $f_c = 935$ кГц, а $f_r = 1400$ кГц?
12. Начертите схему катодного повторителя.
13. Зачем в приемниках ЧМ сигналов нужен ограничитель?
14. Начертите схему АРУ с задержкой (напряжение задержки подается от анодного источника питания).
15. Как осуществляется ручная регулировка усиления в приемнике?
16. Начертите принципиальную схему приемника прямого усиления, содержащего УВЧ, детектор и УНЧ.
17. Объясните причину возникновения напряжения шумов в схеме приемника.
18. Начертите схему дискриминатора.
19. Каковы основные особенности приемников СВЧ?
20. Перечислите основные преимущества супергетеродинных приемников.

ГЛАВА 7

СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ

§ 7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОСВЯЗИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЕ

Организация радиосвязи в гидрометеорологической службе. Электросвязь в гидрометслужбе предназначена для передачи результатов гидрометеорологических наблюдений в центры сбора, для обмена информацией между центрами сбора и для распространения информации в оперативно-прогностические органы. В соответствии с этим в гидрометслужбе можно выделить три сети: *сеть сбора информации, сеть обмена информацией и сеть распространения информации.*

Основой сети электросвязи гидрометслужбы являются каналы общегосударственной сети электросвязи (каналы Министерства связи СССР, арендуемые органами Гидрометеорологической службы). В районах, где отсутствует или слабо развита общегосударственная сеть электросвязи, органы Гидрометслужбы СССР организуют свои каналы проводной связи и радиосвязи.

Сеть сбора объединяет пункты гидрометеорологических наблюдений (гидрометеорологические станции и посты, пункты аэрологических наблюдений) и центры сбора. Последние, как правило, совмещены с центрами обмена и входят в состав узлов связи территориальных управлений Гидрометеорологической службы СССР.

В некоторых крупных узлах связи организуются центры распространения, передающие гидрометеорологическую информацию во многие оперативно-прогностические органы.

Являясь самостоятельным видом электросвязи, одно из самых широких применений в гидрометслужбе нашла радиосвязь.

Широкое внедрение аппаратуры радиосвязи в гидрометслужбе стало возможным благодаря общему развитию методов

и технических средств радиосвязи в нашей стране. Особо важно применение радиосвязи в арктических, антарктических и других труднодоступных районах. Еще в начале 30-х годов был создан первый радиометеорологический центр на Диксоне. В последующие годы радиосвязь прочно вошла в практику полярных метеостанций и центров.

Связь между пунктом гидрометеорологических наблюдений и центром сбора может быть односторонней: от пункта наблюдений к центру сбора. Однако для повышения оперативности, надежности и обеспечения достоверности передачи эта связь часто оборудуется двумя встречными каналами, причем передача может осуществляться одновременно только в одном направлении. Такая связь называется *симплексной*.

Передача информации между центрами обмена осуществляется одновременно в обоих направлениях. Поэтому сеть обмена состоит из двухсторонних, так называемых *дуплексных* каналов.

Сеть распространения предусматривает передачу информации из малого числа центров распространения в большое число приемных пунктов — оперативно-прогностические органы. В таких случаях организуются так называемые *циркулярные* передачи, которые могут быть только симплексными.

Виды радиосвязи в гидрометеорологической службе. Применение того или иного вида радиосвязи зависит от типа информации, предназначенной для передачи. В сетях сбора и обмена информация представляет собой главным образом буквенно-цифровые сообщения, поэтому здесь применяется так называемая *телеграфная радиосвязь*. В сети сбора, кроме этого, иногда (на коротких расстояниях) используют *телефонную радиосвязь*. В связи с ростом требований к достоверности буквенно-цифровой информации, предназначенной для обработки электронными вычислительными машинами, в последнее время начинает применяться новый вид радиосвязи — так называемая *передача данных*.

Значительную часть гидрометеорологической информации составляют различные карты и фотоснимки. Поэтому, кроме телеграфной радиосвязи, применяется *факсимильная радиосвязь* и ее разновидность — *фототелеграфная радиосвязь*.

Рассмотрим подробнее каждый вид радиосвязи.

Телеграфная радиосвязь обеспечивает передачу информации в виде *телеграфных сигналов*. В гидрометслужбе эти сигналы передаются кодом Морзе или международным телеграфным кодом МТК-2. Модуляция при этом может быть либо амплитудной, либо частотной. Рассмотрим вначале амплитудную модуляцию.

Телеграфные сигналы, передаваемые кодом Морзе, представляют собой токовые послышки различной длительности (t — наи-

меньшая длительность посылки), так называемые точки и тире (рис. 7.1 а), причем отдельным буквам соответствуют определенные комбинации из точек и тире. Токовые посылки могут быть промодулированы низкой частотой (от 500 до 5000 гц); в этом случае они называются *тональными* (рис. 7.1 б). В соответствии с этими посылками работает передатчик (рис. 7.1 в); в паузах между посылками излучения энергии не происходит (передатчик заперт).

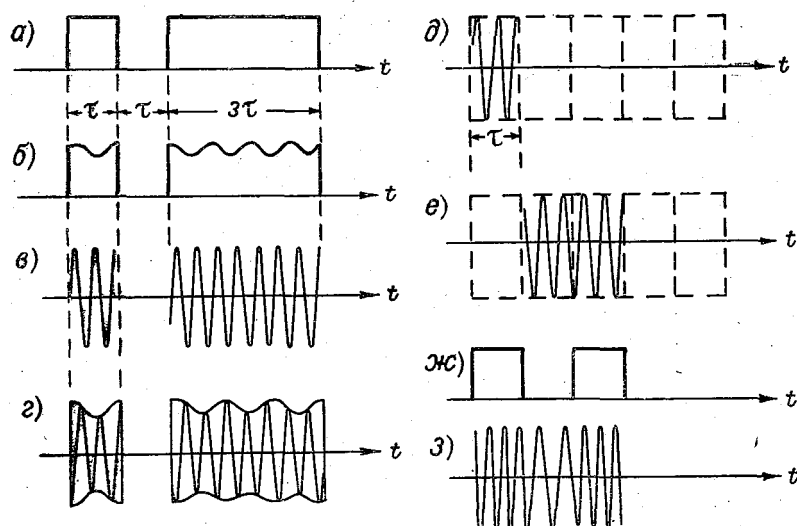


Рис. 7.1. Сигналы при телеграфной радиосвязи.

а, б, в, г — точки и тире кода Морзе; д, е — посылки кода МТК-2 (д — буква «А», е — знак «?»); ж, з — сигналы при частотной модуляции.

Способ передачи телеграфных сигналов, показанный на рис. 7.1 в, называют *телеграфной работой незатухающими колебаниями*. При этом в пределах одного телеграфного знака не происходит изменения амплитуды высокочастотных колебаний, и такую телеграфную передачу нельзя принимать на слух на обычные приемники.

Применяется также *телеграфная работа тональными колебаниями* (рис. 7.1 г). В этом случае амплитуда колебаний изменяется так же, как и при амплитудной модуляции. Такие сигналы могут быть приняты на слух на обычные приемники. Дополнительная амплитудная модуляция осуществляется сигналом звуковой частоты.

Модуляция при использовании кода Морзе может осуществляться вручную, нажатием и отжатием ключа, включающего

и выключающего радиопередатчик. В месте приема оператор на слух принимает сигналы и записывает их. Возможно применение и специального аппарата, где запись точек и тире на телеграфной ленте осуществляется автоматически.

Код МТК-2, в отличие от кода Морзе, является равномерным. В этом коде каждый знак (буква, цифра, знак препинания и т. п.) состоит из пяти элементарных посылок одинаковой продолжительности. Знак, соответствующий букве «А», показанный на рис. 7.1 *д*, означает, что в течение отрезка времени, равного длительности (τ) одной элементарной посылки, передатчик излучает энергию, а в течение времени, равного длительности четырех элементарных посылок, он заперт.

Передача при использовании кода МТК-2 может быть как ручной (используется непосредственно буквопечатающий телеграфный аппарат), так и автоматической (используется автоматический ленточный трансмиттер, протягивающий бумажную ленту с комбинацией отверстий, соответствующей коду МТК-2).

Скорость телеграфирования определяется числом элементарных посылок в 1 сек и измеряется в бодах. Буквопечатающие телеграфные аппараты работают обычно со скоростью 50 бод, а длительность одной элементарной посылки, следовательно, будет составлять $1/50 \text{ сек} = 20 \text{ мсек}$.

При телеграфной радиосвязи используется также и частотная модуляция, при которой во время передачи посылок передатчик излучает одну частоту, а во время пауз между посылками — другую (рис. 7.1 *ж, з*).

Частотное телеграфирование позволяет повысить устойчивость работы линии радиосвязи (повышается помехозащищенность связи, т. е. связь меньше подвергается влиянию различного рода помех). Кроме того, сама система связи оказывается более простой, чем при амплитудном телеграфировании. Благодаря этим преимуществам частотное телеграфирование сейчас широко применяется на линиях радиосвязи. К недостаткам частотного телеграфирования следует отнести более широкую полосу частот, занимаемую при передаче.

Сигналы кода МТК-2 (полученные вручную или автоматически) модулируют колебания несущей частоты. Прием радиотелеграфных сигналов осуществляется с помощью автоматического буквопечатающего аппарата (телетайпа), подключаемого к выходу радиоприемника. Один и тот же телеграфный буквопечатающий аппарат (телетайп) может работать как в режиме передачи, так и в режиме приема.

Отметим некоторые особенности приемников амплитудно-модулированных колебаний, работающих в системе радиотелеграфии. Тональные колебания, принятые приемником, приводят к появлению на выходе детектора посылок низкой частоты. Если передача ведется ключом, то оператор на слух (по длительности

посылок) определяет точки и тире кода Морзе. Для приема на слух незатухающих колебаний приемник снабжают вторым гетеродином, представляющим собой обычный генератор с самовозбуждением, причем его частота $f_{г2}$ отличается от промежуточной частоты $f_{п}$ приемника примерно на 1000 гц. К детектору приемника подводятся колебания промежуточной частоты и колебания второго гетеродина. В результате детектирования на выходе детектора появляются колебания, частота которых равна $F = f_{п} - f_{г2}$ и составляет примерно 1000 гц, т. е. лежит в диапазоне звуковых частот и может быть воспринята на слух. Когда приемник используется для приема тональных колебаний или телефонной передачи, второй гетеродин отключается.

Для приема частотно-модулированных телеграфных радиосигналов в приемники вводятся два преобразователя частоты. После первого преобразования получаются сигналы двух частот (частоты посылок и частоты пауз). Во втором преобразователе эти сигналы преобразуются в сигналы двух низких частот (подобно тому, как это делается при приеме на слух незатухающих колебаний). Затем эти частоты используются для управления работой печатающего устройства.

Телефонная радиосвязь обеспечивает передачу человеческой речи на расстояние. Передающим телефонным прибором является микрофон, а приемным — телефон. Сущность процессов, протекающих в цепях передатчика и приемника, пояснена в предыдущих главах, а принцип действия окончательных приборов — микрофона и телефона — учащимся известен из курсов физики и общей электротехники. При телефонной радиосвязи используется как амплитудная, так и частотная модуляция.

Факсимильная радиосвязь предназначена для передачи на расстояние графических материалов, например синоптических карт. Элементами факсимильной радиосвязи являются передающий факсимильный аппарат, радиоканал и приемный факсимильный аппарат. Блок-схема факсимильной связи представлена на рис. 7.2. Рассмотрим принцип действия факсимильной аппаратуры «Ладога».

Бланк карты 3, подлежащей передаче, вкладывается между протяжными валиками 1 и 2. Луч света от осветителя с конденсатором 14 отражается от качающегося зеркала 10 и падает на бланк карты. Сила света луча, отраженного от карты, зависит от оптической плотности освещаемой элементарной площадки карты.

Отраженный бланком луч отражается от зеркал 10, 13 и падает на анод фотоэлемента 11, в цепи которого возникает ток. Величина этого тока зависит от освещенности анода фотоэлемента, т. е. она пропорциональна оптической плотности объекта передачи.

В схеме формирования сигнала 12 имеются два тракта: с частотной модуляцией (для передачи по радио) и с амплитудно-частотной модуляцией (для передачи по проводным каналам).

Тракт с частотной модуляцией обеспечивает на своем выходе сигнал, частота которого меняется в соответствии с оптической плотностью передаваемых участков бланка. Например, при передаче черного поля выдается частота 1500 гц, при передаче белого поля — частота 2300 гц. Частотно-модулированный сигнал подается по соединительной линии на передающий радицентр,

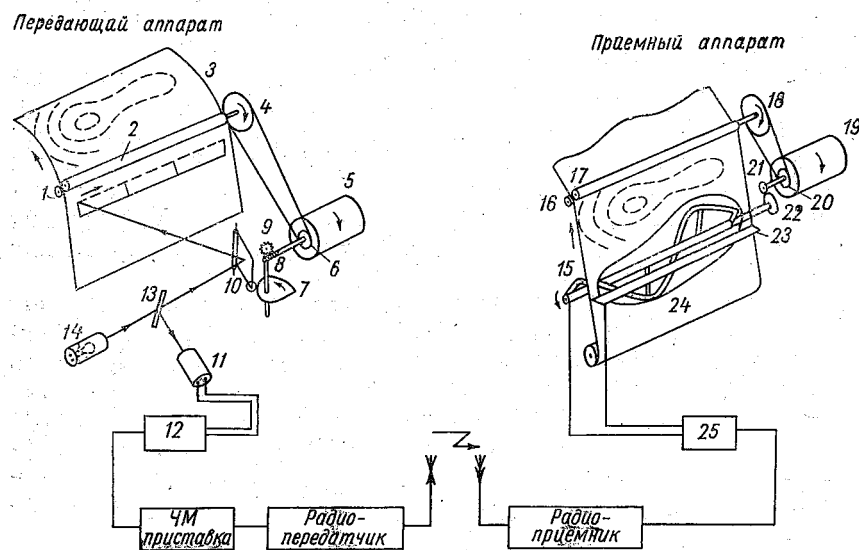


Рис. 7.2. Блок-схема факсимильной радиосвязи.

где частотно-модулирующая приставка (ЧМ приставка), содержащая усилитель, ограничитель, дискриминатор и детектор, преобразует этот сигнал в сигнал, форма которого подобна форме сигнала в цепи фотоэлемента 11.

Далее сигнал поступает на реактивную лампу возбудителя, за счет чего частота, вырабатываемая возбудителем, изменяется пропорционально амплитуде сигнала.

Для приема частотно-модулированных колебаний применяется высокостабильный радиоприемник с двойным преобразованием частоты.

Сигнал с выхода радиоприемника поступает в электронную схему приемного аппарата 25, преобразуется в сигнал, форма которого подобна форме сигнала в цепи фотоэлемента 11, и подается на пишущие электроды: спираль 15 и линейку 23. В точке

соприкосновения спирали и линейки при прохождении тока большой амплитуды (соответствующего сигналу черного поля передаваемого бланка) электрохимическая бумага 24 темнеет, причем оптическая плотность потемневшего участка пропорциональна оптической плотности соответствующего участка передаваемого бланка, освещаемого в соответствующий момент осветителем передающего аппарата. При поступлении сигнала белого поля малой амплитуды бумага не темнеет и данный участок копии остается белым.

Электродвигатель 5 передающего аппарата обеспечивает с помощью передачи 6, 4 протягивание передаваемого бланка со скоростью 16, 24 или 32 мм/мин и одновременно с помощью передачи 8, 9 и эксцентрического кулачка 7 приводит качающееся зеркало 10 в колебательное движение с частотой 60, 90 или 120 гц. При этом за каждый оборот эксцентрика луч света проходит строку развертки от левого до правого обреза бланка карты. Таким образом обеспечивается передача изображения со скоростью 60, 90 или 120 строк в минуту. Толщина строк развертки обычно составляет 0,265 мм. Синхронно с передающим аппаратом электродвигатель 19 приемного аппарата с помощью передачи 18, 20 и протяжных валиков 16, 17 протягивает электрохимическую бумагу 24 со скоростью 16, 24 или 32 мм/мин, а с помощью передачи 21, 22 приводит во вращение пишущую спираль, которая может вращаться со скоростью 60, 90 или 120 оборотов в минуту. При этом точка соприкосновения спирали 15 и электрохимической бумаги 24 с линейкой 23 будет перемещаться слева направо, и на бумаге будет записываться строка за строкой со скоростью 60, 90 или 120 строк в минуту. Факсимильная аппаратура, применяемая в Гидрометслужбе СССР, позволяет осуществлять передачу крупноформатных изображений (шириной до 480 мм и длиной свыше 700 мм).

Фототелеграфная радиосвязь является разновидностью факсимильной связи и характеризуется тем, что обеспечивает передачу значительного числа полутонов передаваемого изображения. Запись изображения на приеме осуществляется на фотографическую бумагу. Принцип действия фототелеграфной аппаратуры «Нева» и блок-схема радиотелеграфной связи показаны на рис. 7.3. Предназначенный для передачи бланк закрепляется на барабане 2, который одновременно с ходовым винтом 5 приводится во вращение электродвигателем 1. При этом помещенная на ходовом винте каретка 6 с осветителем 4 и фотоэлементом 3 приходит в поступательное движение параллельно образующей барабана. За один оборот барабана осветитель освещает последовательно точку за точкой целую строку изображения по окружности барабана, а каретка перемещает осветитель на следующую строку. Фотоэлемент, воспринимающий отраженный от изображения луч света, создает на входе

схемы формирования 7 ток с амплитудой, обратно пропорциональной оптической плотности участков передаваемого изображения. Схема формирования сигнала обеспечивает амплитудную модуляцию.

При фототелеграфной радиосвязи часто используется так называемый метод ЧМ—АМ. При этом на выход передающего аппарата включается приставка АМ—ЧМ, преобразующая амплитудно-модулированный сигнал в частотно-модулированный. Последний по соединительной линии поступает на телефонный вход радиопередатчика, который обеспечивает излучение спектра амплитудно-модулированных колебаний: несущей частоты и двух боковых полос.

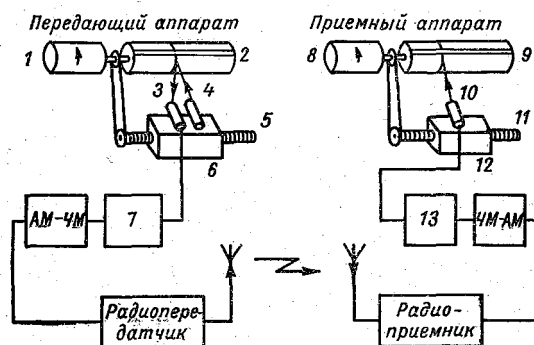


Рис. 7.3. Блок-схема фототелеграфной радиосвязи с помощью аппаратуры «Нева».

С выхода радиоприемника частотно-модулированный сигнал подается на приставку ЧМ—АМ, которая осуществляет частотное детектирование. Полученный амплитудно-модулированный сигнал детектируется по амплитуде в приемнике фототелеграфного сигнала 13 и подается в осветитель 10. Электродвигатель 8, вращая приемный барабан 9 и с помощью ходового винта 11 перемещающая каретку 12, обеспечивает освещение осветителем 10 всей площади фотографической бумаги, закрепленной на барабане, по винтовой линии (внешний свет на бумагу не поступает). За счет изменения величины тока осветителя экспозиция фотографической бумаги производится в соответствии с оптической плотностью передаваемого изображения. Обработка принятого изображения в принципе не отличается от обработки обычных фотографий.

Передача данных — новейший из видов электросвязи, обеспечивающий передачу информации для обработки ее на вычислительных машинах или информации, уже обработанной ими. Так же как и в телеграфной связи, при передаче данных

используются двоичные сигналы¹, однако, в отличие от телеграфной связи передача данных характеризуется повышенной достоверностью и повышенной пропускной способностью.

В качестве примера аппаратуры передачи данных (АПД) рассмотрим АПД с обратной связью (рис. 7.4).

В качестве оконечной аппаратуры 1, 4 и 5, 8 применяются трансмиттеры и телеграфные аппараты или специальные быстродействующие устройства. Сама АПД состоит из передающих (2, 6) и приемных (3, 7) устройств, объединенных обратной связью.

При передаче, например, со станции А информация поступает из оконечного аппарата 1 в передающее устройство 2, где производится кодирование, и с помощью радиопередатчика РПРД-1 передается на станцию Б. Принятые радиоприемником

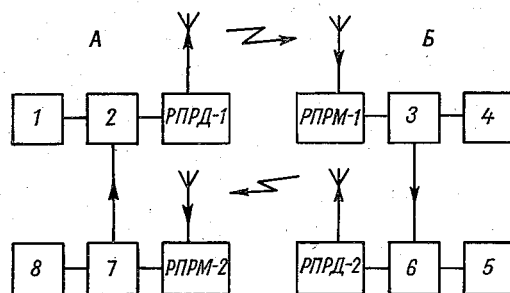


Рис. 7.4. Блок-схема аппаратуры передачи данных по радио.

РПРМ-1 сигналы декодируются приемным устройством 3 и регистрируются оконечным аппаратом 4.

При обнаружении в принятом сообщении ошибок автоматически вырабатывается определенный сигнал, посылаемый в передающее устройство 6, которое с помощью радиопередатчика РПРД-2 посылает на станцию А сигнал запроса.

Приемное устройство 7 на станции А, получив сигнал запроса, останавливает передачу нового и повторяет передачу уже посланного сообщения. Повторение производится до тех пор, пока поступают сигналы запроса.

Сведения о радиосвязи на одной боковой полосе частот. В § 5.5 было показано, что при передаче модулированных колебаний часть мощности передатчика приходится на несущую частоту, а другая часть — на боковые полосы частот. Так как передаваемая информация содержится только в боковых полосах, а несущая частота играет лишь вспомога-

¹ Двоичными называют сигналы, которые могут принимать только два значения. Двоичные сигналы в передаче данных обозначают 1 и 0.

тельную («транспортную») роль, то желательно, чтобы основная часть мощности передатчика расходовалась на создание боковых полос частот. Достичь этого можно, подавив в передатчике несущую частоту.

В месте приема передаваемое сообщение может быть воспроизведено при наличии в приходящем сигнале обеих или даже одной боковой полосы частот. Передача на одной боковой полосе частот, как показывают расчеты, равносильна повышению мощности передатчика примерно в 16 раз.

Для приема радиопередачи на одной боковой полосе нужны приемники, в которых с помощью гетеродина приемника с высокой точностью восстанавливалась бы несущая частота. Такие приемники довольно сложны в эксплуатации, поэтому в обыч-

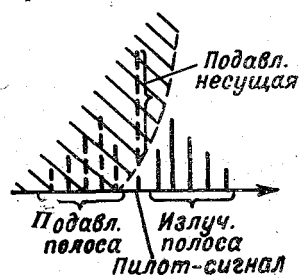


Рис. 7.5. Спектр сигнала при передаче на одной боковой полосе частот.

ном радиовещании метод передачи на одной боковой полосе широкого распространения пока не получил. В профессиональной же радиосвязи, в том числе и в гидрометслужбе, радиосвязь на одной боковой полосе используется довольно часто.

Для обеспечения стабильности работы гетеродина приемника передатчик излучает колебания несущей частоты очень малой мощности — так называемый *пилот-сигнал* (рис. 7.5). При наличии высокостабильных гетеродинов колебания несущей частоты в приемнике могут быть

получены и без пилот-сигнала.

Однополосный сигнал в передатчике получают с помощью балансного модулятора (где происходит подавление колебаний несущей частоты) и фильтров (где выделяется одна боковая полоса частот). Однополосная модуляция осуществляется обычно в маломощных каскадах передатчика, в последующих же каскадах происходит усиление колебаний одной боковой полосы.

Более подробно о схемах передатчика и приемника, работающих в системе однополосной радиосвязи, рассказывается в § 7.2 на примере конкретной радиостанции. В заключение отметим, что фундаментальные исследования в области теории однополосной радиосвязи проведены советскими учеными М. В. Шулейкиным и П. В. Шмаковым.

§ 7.2. АППАРАТУРА РАДИОСВЯЗИ СЕТИ СБОРА

Пункты гидрометеорологических наблюдений размещены по всей территории СССР на самых различных расстояниях от центров сбора. Выбор средств связи пунктов наблюдений с цен-

тром сбора зависит от степени развития общегосударственной сети электросвязи в данном географическом районе, от расстояний между пунктами и объема информации, подлежащей передаче. На Европейской территории СССР и во многих других районах передача информации в центры сбора осуществляется по проводным каналам Министерства связи, в северных и восточных районах СССР используется преимущественно радиосвязь, при этом в центрах сбора оборудуются *центральные радиостанции* (ЦРС). Метеорологические станции [которые в случае использования ими радиосвязи называются *радиометстанциями* (РМС)] в обжитых районах имеют приемно-передающие радиостанции мощностью 5—100 *вт* (типа РС-5, РС-30, РС-25, ПАРКС-0,08 и др.), применяемые для связи на расстояниях до 300 *км*; при больших расстояниях пунктов наблюдений от центров сбора используются радиопередатчики мощностью до 250 *вт* и радиоприемники Р-311.

Центры сбора для опроса радиометстанций используют радиопередатчики мощностью до 5 *квт*.

В районах, где расстояния между РМС и ЦРС велики, организуются промежуточные, так называемые *кустовые радиостанции* (КРС), которые располагаются таким образом, чтобы обеспечивать надежную связь с сетью закрепленных РМС и с ЦРС.

Связь между РМС и ЦРС (или КРС) осуществляется методом амплитудной или однополосной модуляции с использованием кода Морзе при ручной передаче и приеме на слух. Связь между КРС и ЦРС, как правило, осуществляется методом частотной модуляции с использованием кода МТК-2 при автоматической передаче и буквопечатающем приеме. Исходя из особенностей распространения радиоволн, в северных районах радиосвязь, как правило, организуется на средних волнах, в средних и южных районах — на коротких.

Гидрометеорологические станции, расположенные на небольшом удалении от других подразделений Гидрометслужбы СССР или от подразделений Министерства связи, при отсутствии проводных линий связи передают гидрометеорологические данные по телефонным связям с помощью маломощных приемно-передающих радиостанций («Недра-П» и др.).

Ниже приводится краткое описание наиболее распространенных в Гидрометслужбе СССР радиосредств.

Радиостанция «Недра-П». Радиостанция обеспечивает двухстороннюю симплексную телефонную связь на одной фиксированной частоте в диапазоне 1,6—2,0 *Мгц*. Стабильность рабочей частоты $\pm 200 \cdot 10^{-6}$ достигается применением кварцевых резонаторов. В радиостанции используется однополосная модуляция. Выходная мощность передатчика не менее 0,25 *вт*, чувствительность приемника не хуже 1 *мкв*, дальность связи при работе с антенной типа «наклонный луч» достигает 30 *км*. Питание

радиостанции осуществляется от источника постоянного тока напряжением 12 в.

Все элементы приемо-передатчика (рис. 7.6а) собраны в корпусе, выполненном в виде микротелефонной трубки. Радиостанция выполнена по схеме, в которой часть элементов используется попеременно в тракте передачи и приема, переключение радиостанции с приема на передачу осуществляется с помощью кнопки *K*, которая коммутирует питание каскадов, а также вход электромеханического фильтра¹ и антенны (рис. 7.6б).

При передаче токи тональных частот от микрофона 1 через усилитель низкой частоты 2 идут на балансный модулятор 3, который с помощью напряжения, поступающего от задающего генератора 4, преобразует низкочастотный спектр в спектр промежуточных частот. Сигналы промежуточных частот после усиления в каскаде 5 подвергаются формированию с помощью электромеханического фильтра 6 и второго усилителя промежуточной частоты 7. Однополосный сигнал промежуточной частоты с помощью смесителя 8 и генератора 9 «переносится» в область частот 1,6—2,0 Мгц и после усиления в предоконечном (10) и окончательном (11) каскадах излучается в пространство. Настройка антенны при передаче и приеме осуществляется вариометром в каскаде настройки 12.

При приеме используются усилитель высокой частоты 13, смеситель 14, генератор 9, первый усилитель промежуточной частоты 15, электромеханический фильтр 6 и второй усилитель промежуточной частоты 7, однополосный детектор 16, усилитель низкой частоты 17 и телефон 18.

Со штыревой антенной радиостанция обеспечивает связь на расстояниях до 5 км, а с антенной типа «наклонный луч» — до 30 км.

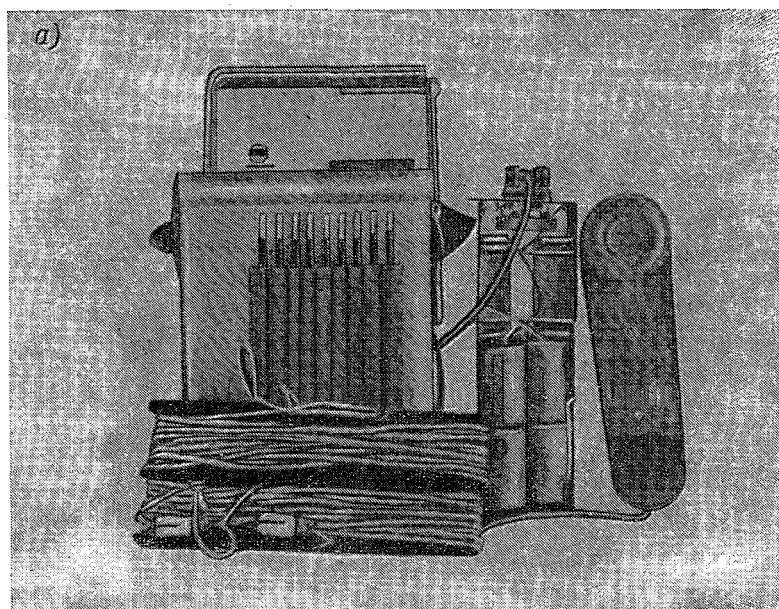
Радиостанция РСО-5. Радиостанция обеспечивает симплексную телефонную и телеграфную радиосвязь с использованием однополосной модуляции. Работа осуществляется на одной из четырех фиксированных частот в диапазоне 1—6 Мгц. Стабилизация частот обеспечивается применением кварцевых резонаторов. Радиостанция выполнена так, что задающие генераторы передатчика и гетеродина приемника являются общими при приеме и передаче, так же как электромеханический фильтр, входные контуры и контуры смесителя. Мощность в антенне при передаче не менее 5 вт, стабильность частоты $1,5 \cdot 10^{-4}$. Чувствительность приемника не хуже 8 мкв.

Радиостанция состоит из блока приемо-передатчика и блока питания. Электропитание радиостанции осуществляется от сети

¹ Электромеханический фильтр — устройство, предназначенное для выделения электрических колебаний нужной частоты с помощью специальной электромеханической системы, обладающей резонансными свойствами.

переменного тока или от батареи аккумуляторов с напряжением 12 в.

Блок-схема радиостанции показана на рис. 7.7.



б)

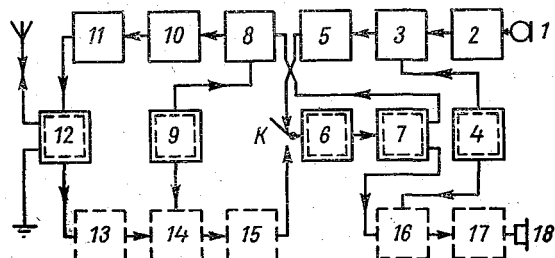


Рис. 7.6. Радиостанция «Недра-II».

а — внешний вид; б — блок-схема (сплошной линией показаны блоки передатчика, пунктирной — блоки приемника; сплошной и пунктирной — блоки, работающие при передаче и приеме).

Формирование однополосного сигнала в тракте передачи происходит следующим образом.

При подаче на балансный модулятор 1 напряжения с частотой 503,7 кГц, от первого задающего генератора 9 и напряжения

The diagram shows a radio relay station with the following components and connections:

- Antennas:** A transmitting antenna (21) and a receiving antenna (22) are connected to a circulator (20).
- Transmitting Path:**
 - Signal from the circulator (20) goes to block 1.
 - Block 1 is connected to block 2.
 - Block 2 is connected to block 4.
 - Block 4 is connected to block 5.
 - Block 5 is connected to block 6.
 - Block 6 is connected to block 7.
 - Block 7 is connected to block 8.
 - Block 8 is connected to the transmitting antenna (21) via the circulator (20).
- Receiving Path:**
 - Signal from the receiving antenna (22) goes to block 11.
 - Block 11 is connected to block 10.
 - Block 10 is connected to block 13.
 - Block 13 is connected to block 12.
 - Block 12 is connected to block 14.
 - Block 14 is connected to block 15.
 - Block 15 is connected to block 16.
 - Block 16 is connected to block 17.
 - Block 17 is connected to block 18.
 - Block 18 is connected to block 19.
- Frequency Conversion and Division:**
 - Block 3 is a frequency converter that receives input from block 2 and block 4, and outputs to block 11.
 - Block 9 is a frequency divider that receives input from block 1 and block 11, and outputs to block 16.

соответствующих рабочим частотам передатчика и переключаемых с помощью барабанного переключателя. Затем сигнал усиливается буферным усилителем 6, схема анодной нагрузки которого аналогична схеме анодной нагрузки второго балансного модулятора. Усилитель мощности 7 обеспечивает при соответствующей настройке выходного контура отдачу в антенну номинальной мощности.

Связь антенны с усилителем высокой частоты 12 осуществляется с помощью выходного контура передатчика 8. С выхода усилителя высокой частоты сигнал подается на первый преобразователь 13, который с помощью напряжения, поступающего от задающего кварцевого гетеродина 10 через буфер 11, «переносит» принятый сигнал в область частоты 500 кц, на которой

и происходит основное усиление в каскадах 14 и 15. Избирательность этих каскадов обеспечивается электромеханическим фильтром 3. При подаче на управляющую сетку второго преобразователя (однополосного детектора) 16 напряжения сигнала, а на защитную сетку напряжения частотой 503,7 кГц от гетеродина 9 на выходе преобразователя получается сигнал низкой частоты. Усилители напряжения 17 и мощности 18 низкой частоты обеспечивают нормальную работу головных телефонов 19.

Радиостанция рассчитана на применение антенны типа «наклонный луч».

Радиостанция РСО-30. Радиостанция обеспечивает симплексную или дуплексную телефонную и телеграфную связь, а также ретрансляцию сигналов проводной связи. Радиостанция работает без пилот-сигнала, т. е. в режиме однополосной модуляции с полностью подавленной несущей частотой в передатчике и независимым восстановлением несущей частоты в приемнике. Радиостанция имеет кварцевую стабилизацию рабочей частоты и может работать на любой из четырех фиксированных частот (одной в диапазоне 300—600 кГц и трех в диапазоне 1—8 МГц). Ширина полосы телефонного канала радиостанции 300—3000 Гц.

Электропитание радиостанции производится от сети переменного тока или от аккумуляторной батареи напряжением 24 в.

Конструктивно радиостанция выполнена в виде двух автономных блоков: радиопередатчика и радиоприемника, причем каждый блок имеет отдельный комплект питания.

Радиопередатчик РСО-30 обеспечивает выходную мощность в телеграфном режиме 30—50 Вт и пиковую мощность в режиме однополосной телефонии не менее 50—80 Вт. Суммарная нестабильность рабочей частоты радиопередатчика не выше $\pm 6 \cdot 10^{-6}$.

Радиоприемник РСО-30 супергетеродинного типа с фиксированной настройкой на рабочие частоты обеспечивает бесперебойную связь. Чувствительность приемника не хуже 3 мкВ при отношении сигнал/шум 10 дБ. Избирательность по соседнему и зеркальному каналам не менее 60 дБ. Выходная мощность приемника 10 Вт.

Рассмотрим принципиальные схемы передатчика и приемника радиостанции РСО-30.

Формирование однополосного сигнала в радиопередатчике РСО-30 (рис. 7.8) осуществляется методом последовательных преобразований. Первый преобразователь выполнен по балансной схеме на полупроводниковых диодах типа Д-2 (D_1 и D_2). На входной трансформатор Tr_1 с помощью переключателя рода работы P_1 через телеграфный ключ от генератора тональной частоты или с линии подается низкочастотный сигнал от микрофона. Генератор тональной частоты выполнен на полупроводниковом триоде П-15 (ПП₁) по схеме RC-генератора ($C_1—C_4$, $R_1—R_7$).

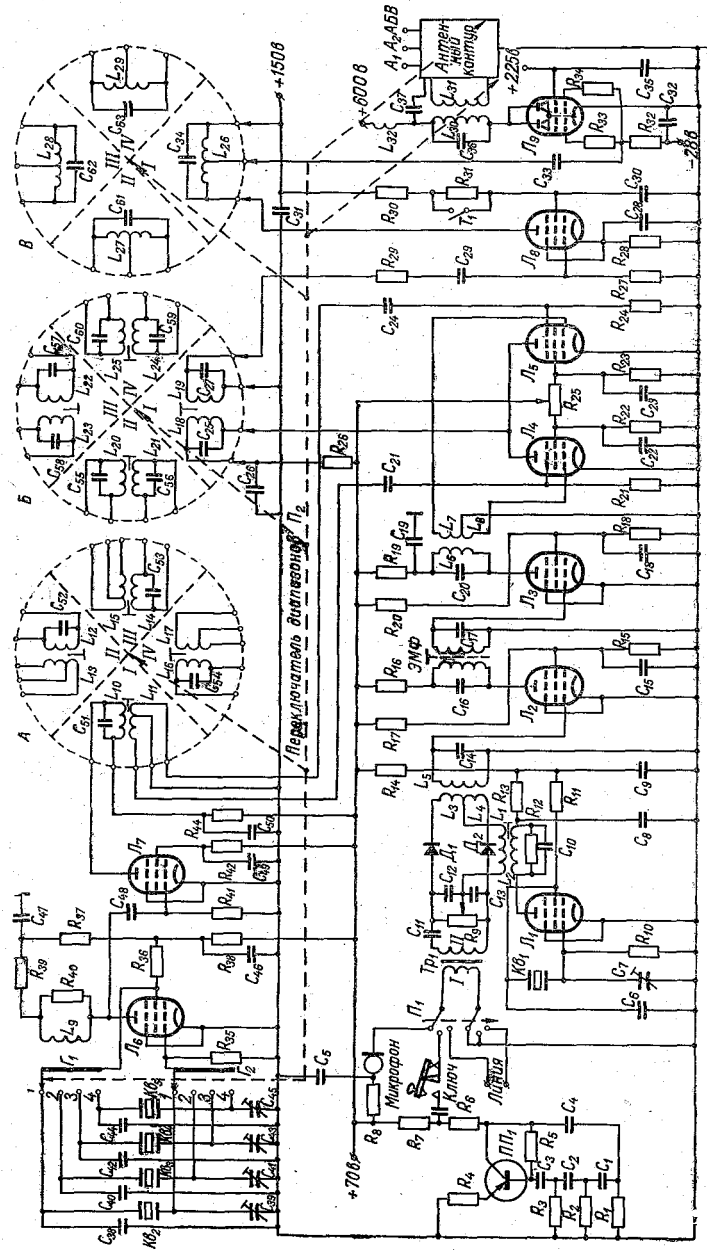


Рис. 7.8. Упрощенная принципиальная схема передатчика радиостанции РСО-30.

В диагональ балансного преобразователя (движок потенциометра R_9 — средняя точка индуктивностей L_3L_4) через индуктивности L_1L_2 подается сигнал промежуточной частоты 503,7 кГц, вырабатываемый кварцевым генератором Π_1 . Кварцевый резонатор ($K\theta_1$) включен между экранной и управляющей сетками лампы $\mathcal{L}_1$ (1Ж24Б). Напряжение питания анодной цепи +70 в подается через фильтры питания $R_{14}C_9$, $R_{13}C_8$ и анодный контур $L_2C_{10}R_{12}$. При одновременной подаче низкочастотного сигнала и колебаний кварцевого генератора на балансный преобразователь на его выходе получают значительно ослабленную частоту кварцевого генератора и две боковые полосы. Балансировка схемы осуществляется потенциометром R_9 . Двухполосный сигнал с ослабленной частотой кварцевого генератора выделяется на контуре L_5C_{14} и подается на управляющую сетку лампы 1Ж24Б ($\mathcal{L}_2$), на которой собран первый усилитель промежуточной частоты. В анодной цепи этого усилителя включен электромеханический фильтр ЭМФ, выделяющий одну боковую полосу частот. Полученный таким образом однополосный сигнал затем усиливается вторым усилителем промежуточной частоты (лампа $\mathcal{L}_3$ —1Ж24Б), выделяется контуром L_6C_{20} и с помощью индуктивностей L_7L_8 подается на второй балансный преобразователь частоты (лампы $\mathcal{L}_4$, $\mathcal{L}_5$ — 1Ж24Б). Сюда же подается напряжение от диапазонного кварцевого генератора, собранного на лампе ($\mathcal{L}_6$) (1Ж24Б).

Диапазонный кварцевый генератор с помощью переключаемых переключателем диапазонов Π_2 (секция $\Gamma_1\Gamma_2$) кварцевых резонаторов $K\theta_2$ — $K\theta_5$ генерирует несущие частоты, расположенные в диапазонах 300—600 и 1000—8000 кГц. С анодной нагрузки $L_9R_{40}R_{39}$ напряжение несущих частот подается на буферный усилитель (лампа $\mathcal{L}_5$ — 1Ж24Б), в анодной цепи которого с помощью переключателя Π_2 (секция А) включаются диапазонные контуры $L_{10}C_{51}$, $L_{12}C_{52}$, $L_{14}C_{53}$, $L_{16}C_{54}$.

С помощью индуктивностей связи L_{11} , L_{13} , L_{15} , L_{17} напряжение несущих частот подается через конденсаторы $C_{21}C_{24}$ на защитные сетки ламп $\mathcal{L}_4$ и $\mathcal{L}_5$ второго балансного преобразователя в противофазе. На управляющие сетки этих ламп, также в противофазе, поступает напряжение однополосного промежуточного сигнала с индуктивностью связи L_7L_8 . Балансировка схемы осуществляется потенциометром R_{25} . Однополосный сигнал рабочей частоты с помощью переключаемых переключателем Π_2 (секция Б) контуров L_{18} — L_{25} , C_{27} , C_{55} — C_{60} выделяется и подается на вход предоконечного каскада передатчика.

Предоконечный каскад передатчика, помимо усиления однополосного сигнала, предотвращает влияние выходного каскада передатчика на схему формирования однополосного сигнала. В анодной цепи предоконечного каскада, выполненного на лампе $\mathcal{L}_8$ 6Ж1Б, включены переключаемые секцией В переключателя

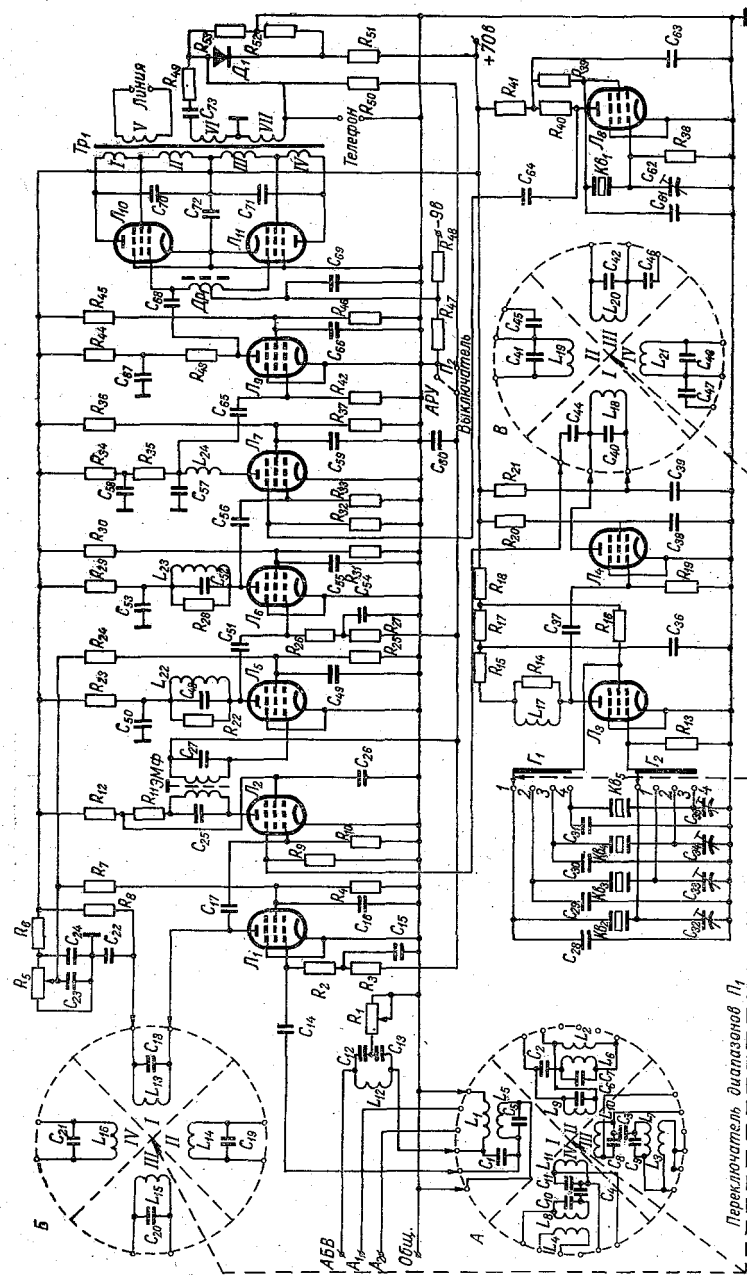


Рис. 7.9. Упрощенная принципиальная схема приемника радиостанции PCO-30.

Π_2 диапазонные контуры $L_{26}-L_{29}$, C_{34} , $C_{61}-C_{63}$. В цепи экранирующей сетки лампы $\mathcal{L}_8$ установлен тумблер T_1 , при помощи которого выходная мощность передатчика может быть уменьшена вдвое.

Оконечный каскад передатчика выполнен на лампе $\mathcal{L}_9$ (ГУ-29) по схеме последовательного питания на частотах 1000—8000 кГц или схеме параллельного питания на частотах 300—600 кГц. Схемы анодного контура оконечного каскада и антенного контура на рисунке показаны условно. На частотах 300—600 кГц схема оконечного каскада и антенного контура обеспечивает работу на антенну бегущей волны (выход $АБВ$), на частотах 1000—8000 кГц передатчик работает на симметричную антенну (выходы A_1 , A_2). С помощью имеющегося в передатчике переключателя симметричная антенна может быть включена как Т-образная.

На вход радиоприемника (рис. 7.9) может быть включена антенна бегущей волны (клемма $АБВ$) или симметричная антенна (клеммы A_1A_2). Переключение антенн, так же как и переключение элементов входной цепи осуществляется переключателем диапазонов Π_1 (секция A). Принятый антенной сигнал через катушку связи L_1 (L_2-L_4 на диапазонах $II-IV$) подается на колебательный контур $L_5C_1C_5$ (L_6-L_{11} , C_2-C_{11}). Для ослабления мешающих сигналов с частотой, равной промежуточной, на первом диапазоне включен фильтр-пробка, состоящий из индуктивности L_{12} , конденсаторов C_{12} , C_{13} и потенциометра R_1 .

Усилитель высокой частоты ($\mathcal{L}_1-1Ж24Б$) в анодной цепи имеет переключаемый секцией B переключателя Π_1 резонансный контур $C_{13}L_{13}$ ($C_{19}-C_{21}$, $L_{14}-L_{16}$), с помощью которого УВЧ усиливает частоты сигнала. В цепь экранной сетки включен потенциометр R_5 , которым осуществляется ручная регулировка усиления.

Для дальнейшего усиления высокочастотный сигнал с помощью преобразователя частоты и первого гетеродина преобразуется в промежуточный.

Преобразователь частоты ($\mathcal{L}_2-1Ж24Б$) при одновременном поступлении высокочастотного сигнала и колебаний первого гетеродина (соответственно на управляющую и защитную сетки), играющего роль восстанавливаемой несущей частоты, переносит сигнал в область 500 кГц.

Выделение сигнала промежуточной частоты осуществляется электромеханическим фильтром ЭМФ, включенным в анодную цепь преобразователя частоты.

Первый гетеродин $\mathcal{L}_3$ (1Ж24Б) и его буферный каскад $\mathcal{L}_4$ (1Ж24Б) выполнены по схеме, идентичной схеме диапазонного генератора передатчика и его буферного каскада. В анодной цепи буферного каскада переключателем Π_1 (секция B) вклю-

чается один из колебательных контуров $C_{40}-C_{43}$, $L_{18}-R_{21}$, настроенный на соответствующую несущую частоту.

Выделенный ЭМФ сигнал промежуточной частоты усиливается двухкаскадным усилителем промежуточной частоты, собранным на лампах L_5 , L_6 (1Ж24Б). В анодную цепь первого каскада УПЧ включен контур L_{22} , C_{48} , R_{22} , в анодную цепь второго — контур L_{23} , C_{52} , R_{28} .

Перенос сигнала промежуточной частоты в область исходного низкочастотного сигнала осуществляется однополосным детектором L_7 (1Ж24Б) и кварцевым генератором L_8 (1Ж24Б), играющим роль второго гетеродина. Схема второго гетеродина идентична схеме кварцевого генератора приемника; гетеродин подает на защитную сетку однополосного детектора колебания частотой 503,7 кГц.

При одновременном поступлении (соответственно на управляющую и защитную сетки) сигнала промежуточной частоты и колебаний второго гетеродина однополосный детектор выделяет на анодной нагрузке R_{35} сигнал низкой частоты; высокочастотные составляющие сигнала блокируются фильтром $L_{24}C_{57}$. Усилитель низкой частоты двухкаскадный. Первый каскад — усилитель напряжения — выполнен по реостатно-дрессельной схеме на лампе L_9 (1Ж24Б), второй — усилитель мощности — по двухтактной схеме на стержневых лампах L_{10} , L_{11} (1Ж29Б). В анодной цепи мощного каскада включен низкочастотный трансформатор Tr_1 , имеющий три вторичные обмотки: с обмотки V снимается напряжение для симметричной нагрузки (телефонная линия), обмотка VII предназначена для подключения несимметричной нагрузки (головные телефоны), с обмотки VI снимается напряжение сигнала для работы цепи автоматической регулировки усиления, собранной по схеме АРУ с задержкой и охватывающей три каскада. Детектор АРУ выполнен на полупроводниковом диоде D_1 (Д-2Д). Напряжение задержки подается на диод D_1 через делитель напряжения $R_{51}R_{52}$. Напряжение АРУ поступает на управляющие сетки ламп УВЧ и УПЧ через выключатель АРУ P_2 и фильтры R_3C_{15} , $R_{27}C_{54}$, $R_{50}C_{60}$.

Радиопередатчик мощностью 250 вт. Радиопередатчик обеспечивает работу в режимах: 1) ручного телеграфа незатухающими колебаниями с амплитудной манипуляцией, тонально-модулированными или частотно-манипулированными колебаниями; 2) автоматического телеграфа частотно-манипулированными колебаниями; 3) телефона.

В диапазоне рабочих частот 1,5—12 МГц мощность, отдаваемая радиопередатчиком в антенну, составляет около 250 вт.

Питание радиопередатчика осуществляется либо от сети трехфазного переменного тока с напряжением 220/380 в, либо от источников индивидуального питания.

Блок-схема передатчика показана на рис. 7.10 а.

Задающее устройство плавного диапазона состоит из каскадов 1 и 2, работающих на пентодах ГУ-50.

Задающий генератор 1 собран по схеме с электронной связью, в которой внутренний контур представляет собой вариометр и переключаемые конденсаторы. Вариометр обеспечивает плавность настройки, а переключение конденсаторов обеспечивает работу возбuditеля в четырех поддиапазонах: 1) 1,5—1,75 МГц, 2) 1,75—2,1 МГц, 3) 2,1—2,5 МГц, 4) 2,5—3,0 МГц.

Каскад 2 на лампе ГУ-50 является усилителем на всем диапазоне возбуждения. Каскад 3 имеет две параллельно включенные лампы ГУ-50. Переключателем поддиапазонов изменяется схема включения вариометра и емкость анодного контура, в результате чего на первом поддиапазоне каскад работает усилителем (1,5—3,0 МГц), на втором поддиапазоне — удвоителем частоты (3,0—6,0 МГц), на третьем поддиапазоне — учетверителем частоты (6,0—12 МГц), в результате чего обеспечивается перекрытие всего рабочего диапазона частот передатчика.

Выходной каскад 4 работает на двух параллельно включенных лампах типа ГК-71. Антенный контур 5 обеспечивает последовательное и параллельное питание антенны.

Симметрирующая приставка 6 обеспечивает возможность работы передатчика, имеющего несимметричный выход, на симметричную антенно-фидерную систему. Принцип действия симметрирующей приставки поясняет рис. 7.10 б.

Если к точкам A_2 и O подвести от передатчика несимметричное напряжение, то при определенных соотношениях L и C схемы симметрирующего контура между точками A_2 и O можно получить такое же по величине напряжение, как и между точками A_2 и O , но сдвинутое по фазе на 180° .

Для работы на фиксированных частотах с высокой стабильностью радиопередатчик имеет частотно-манипулируемый возбуждатель с кварцевой стабилизацией, состоящий из кварцевого генератора 7 на лампе 6Ж7 и буферного усилителя 8 на лампе

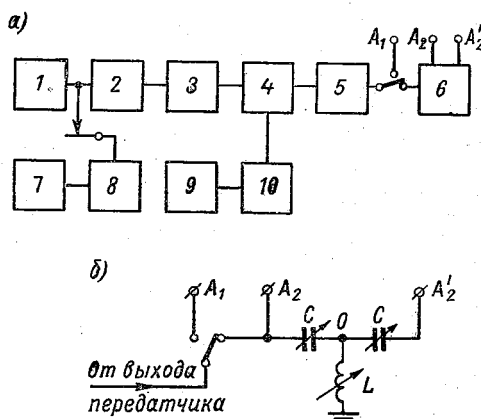


Рис. 7.10. Радиопередатчик мощностью 250 вт.

а — блок-схема; б — упрощенная схема симметрирующей приставки.

ГУ-50. Переход с одной частоты на другую осуществляется сменой колебательного контура.

Низкочастотная часть передатчика содержит тонгенератор 9 и четырехкаскадный модулятор 10. Модуляция осуществляется подачей модулирующего напряжения на антидинаatronные сетки ламп ГК-71 выходного каскада 4.

Радиопередатчики мощностью 1 квт. Эти передатчики обеспечивают работу в тех же режимах, что и радиопередатчик мощностью 250 вт. Один из передатчиков работает в диапазоне 3—24 Мгц, второй — в диапазоне 1,5—12 Мгц, третий — в диапазоне 100—600 кгц.

Конструктивно каждый из передатчиков представляет собой пятиблочный корпус, устанавливаемый на корпус выпрямителя.

Радиоприемник Р-311. На радиолиниях, оборудованных радиопередатчиками, работающими на двух боковых полосах,

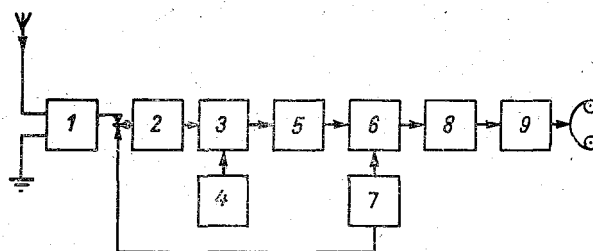


Рис. 7.11. Блок-схема радиоприемника Р-311.

используются радиоприемники Р-311, предназначенные для приема телеграфных и телефонных радиопередач на слух в диапазоне частот от 1,0 до 15 Мгц. Этот диапазон разбит на пять поддиапазонов.

Чувствительность приемника в телефонном режиме не хуже 7,5 мкв, в телеграфном — не хуже 3 мкв. Радиоприемник имеет регулируемую полосу пропускания частот.

Радиоприемник рассчитан на работу с антеннами типа «наклонный луч» и штыревыми. Трансформаторный выход радиоприемника позволяет подключать одну или две пары низкоомных телефонов и проводную линию с сопротивлением 1500 ом.

Питание радиоприемника может осуществляться от аккумулятора и вибропреобразователя¹ или от аккумулятора и анодной батареи.

Радиоприемник собран по супергетеродинной схеме, показанной на рис. 7.11. Эта схема характеризуется наличием кварцевого фильтра в тракте усиления промежуточной частоты.

¹ Вибропреобразователь — электромеханический прибор, служащий для получения высокого постоянного напряжения от источника постоянного тока низкого напряжения.

Входной контур 1 содержит конденсатор переменной емкости и переключаемые с помощью барабана индуктивности и конденсаторы постоянной емкости.

Анодный контур усилителя высокой частоты 2 также содержит конденсатор переменной емкости и переключаемые тем же барабаном индуктивности и конденсаторы постоянной емкости. Конденсаторы переменной емкости входного контура и каскада УВЧ спарены.

Смеситель 3 выполнен по схеме с катодной связью, которая обеспечивает независимость частоты первого гетеродина 4 от настройки контуров УВЧ. В результате переключения барабаном величины индуктивности и изменения ручкой настройки емкости переменного конденсатора внутреннего контура первый гетеродин генерирует в каждом поддиапазоне частоту на 465 кГц выше частоты принимаемого сигнала. Высокая стабильность частоты первого гетеродина обеспечивается высоким качеством деталей и специальной температурной компенсацией.

Усилитель промежуточной частоты содержит два каскада 5 и 6 и три полосовых фильтра, причем первый фильтр содержит кварцевый резонатор, работающий на частоте 465,5 кГц, он является элементом связи между контурами фильтра. Первый контур фильтра является анодной нагрузкой смесителя, а второй включен в сеточную цепь первого каскада УПЧ. Наличие кварцевого фильтра позволяет получить высокую избирательность и полосу пропускания частот в пределах от 300 до 4000 Гц. Второй гетеродин 7 выполнен по схеме с кварцем в цепи сетки. Вторая гармоника его колебаний (464 кГц) через второй каскад УПЧ подается на детектор 8.

Усиление напряжения низкой частоты осуществляется той же лампой, которая производит детектирование. Оконченный каскад УНЧ 9 обеспечивает одновременную работу двух пар телефонов и проводной линии.

§ 7.3. АППАРАТУРА РАДИОСВЯЗИ СЕТИ ОБМЕНА

Большой объем метеорологической информации, регулярно поступающей в центры сбора, в сжатые сроки должен быть передан в соседние центры. В связи с этим центры сбора должны иметь надежные каналы связи достаточно большой пропускной способности. Это требование вызывается также и тем, что центры должны обмениваться графической гидрометеорологической информацией, а ее объем превышает объем буквенно-цифровой информации. Поэтому в сети обмена, как правило, используются проводные или радиорелейные каналы тональной частоты (каналы ТЧ), арендуемые у Министерства связи¹. Ка-

¹ Каналы тональной частоты (называемые иногда телефонными каналами) рассчитаны на передачу частот от 300 до 3400 Гц.

налы тональной частоты могут быть организованы на линиях связи через искусственные спутники связи.

При отсутствии проводных, радиорелейных или спутниковых каналов общегосударственной сети связи организуются телеграфные радиоканалы с помощью магистральных радиопередатчиков мощностью 5—25 кВт и магистральных радиоприемников.

В зависимости от протяженности радиотрасс, местоположения конечных пунктов и условий распространения радиоволн связь осуществляется на средних, коротких или ультракоротких волнах.

В настоящее время в Гидрометеорологической службе СССР каналы ТЧ с помощью специальной аппаратуры используются для одновременной передачи графической и буквенно-цифровой информации.

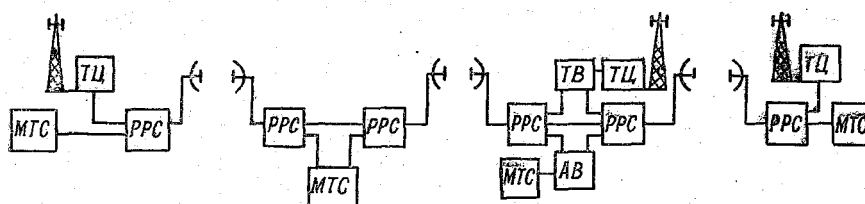


Рис. 7.12. Схема радиорелейной линии.

МТС — междугородная телефонная станция; ТЦ — телевизионный центр; PPC — радиорелейная станция; АВ — аппаратура выделения телефонных каналов; ТВ — аппаратура выделения телевизионной программы.

Радиорелейная аппаратура Р-60/120. Аппаратура Р-60/120 предназначена для организации многоканальной телефонной связи и передачи телевизионных программ. Аппаратура работает в диапазоне частот 1600—2000 МГц. Этот диапазон обеспечивает работу трех высокочастотных трактов¹. Каждый тракт может быть рассчитан на организацию 60—120 каналов тональной частоты. Ширина полосы частот телефонного тракта 0,3—552 кГц. Отдельные каналы тональной частоты могут в свою очередь обеспечивать организацию нескольких каналов тонального телеграфирования, фототелеграфирования или радиовещания.

Разнос между частотами приема и передачи одного тракта составляет 213 МГц, а между частотами соседних трактов одного направления 58 МГц.

В аппаратуре применена частотная модуляция. Мощность передатчика 3 Вт, чувствительность приемника 200 мкВ. Аппаратура обеспечивает нормальную радиосвязь на расстояниях до 2500 км и телевизионные передачи на расстояниях до 1000 км.

¹ Высокочастотный радиорелейный тракт, организуемый на одной несущей частоте, в литературе часто называется стволем.

На радиорелейной линии, оборудованной аппаратурой типа Р-60/120 (рис. 7.12), выделяются оконечные, главные и промежуточные станции. Для их оборудования в составе аппаратуры Р-60/120 имеются: стойка СВЧ с приемо-передающим устройством, рассчитанная на одно направление связи, стойка НЧ с оконечными устройствами телевизионного и служебного каналов, стойка автоматики, обеспечивающая автоматическое резервирование, телесигнализацию и телеуправление, антенно-фидерные устройства с параболическими антеннами.

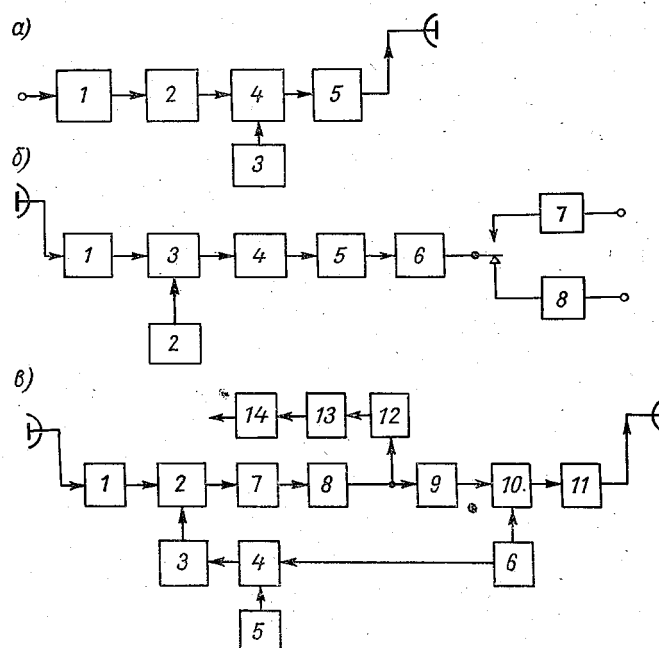


Рис. 7.13. Блок-схемы основных устройств радиорелейной аппаратуры Р-60/120.

a — передатчик; *б* — приемник; *в* — промежуточная станция.

Блок-схема передатчика одного тракта показана на рис. 7.13 *a*. Колебания исходного сигнала подаются на генератор ЧМ колебаний 1, работающий на частоте 70 Мгц. Полученные колебания промежуточной частоты усиливаются четырехкаскадным усилителем промежуточной частоты 2. С помощью задающего генератора 3 смеситель 4 преобразует полосу промежуточных частот в полосу СВЧ. Полосовой фильтр 5 выделяет из модулированных колебаний верхнюю или нижнюю боковую полосу частот и направляет ее в антенну. Смеситель выполнен на объем-

ных контурах и металло-керамическом триоде. Задающий генератор собран на тех же элементах, что и смеситель.

Блок-схема приемника показана на рис. 7.13 б. Сигналы, принятые антенной, через полосовой фильтр 1 подаются совместно с колебаниями гетеродина 2 на смеситель 3, где полоса СВЧ преобразуется в полосу промежуточных частот (70 МГц).

Промежуточные частоты усиливаются усилителем промежуточных частот 4, ограничиваются по амплитуде ограничителем 5 и демодулируются частотным детектором 6. Далее в зависимости от назначения данного тракта демодулированный сигнал усиливается усилителем 7 (при радиотелефонии) или видеоусилителем 8 (при телевидении). Гетеродин 2 собран на отражательном клистроне.

Блок-схема приемо-передатчика промежуточной станции радиолинии Р-60/120 показана на рис. 7.13 в. СВЧ сигнал из антенны через приемный полосовой фильтр 1 совместно с колебаниями гетеродина поступает в смеситель приема 2. Роль гетеродина выполняет смеситель 4, на который подаются колебания от так называемого генератора сдвига 5 и задающего генератора 6 передатчика. Полосовой фильтр 3 выделяет верхнюю или нижнюю боковую частоту.

Колебания промежуточной частоты усиливаются первым УПЧ 7, ограничиваются по амплитуде ограничителем 8, усиливаются вторым УПЧ 9 и подаются на смеситель передатчика 10. Преобразование промежуточной частоты в сверхвысокую частоту в смесителе производится при подаче на него колебаний от задающего генератора 6. Сигнал СВЧ в антенну подается через полосовой фильтр передачи 11.

С целью выделения сигнала для данного промежуточного пункта параллельно основному тракту включается демодулятор, состоящий из ограничителя 12, частотного детектора 13 и усилителя 14.

Нормальная работа трех трактов на одну антенну обеспечивается применением специальных разделительных фильтров.

Магистральный радиопередатчик. Передатчик предназначен для телефонной и телеграфной работы в диапазоне коротких волн от 3,0 до 22,4 МГц на трассах большой протяженности.

В радиопередатчике предусмотрены следующие режимы работы: телеграфный с амплитудной и частотной манипуляцией, фототелеграфный с амплитудной и (при наличии специальной приставки) с частотной модуляцией, телефонный с амплитудной модуляцией.

Во всем диапазоне частот радиопередатчик обеспечивает отдачу в антенну при телеграфном режиме работы мощности 25 кВт, при телефонном режиме работы мощности 15 кВт. Выход радиопередатчика рассчитан на симметричную антенну с волновым сопротивлением фидера 120, 300 и 600 ом.

Частотная характеристика тракта радиопередачи в полосе 50—8000 гц имеет отклонения относительно частоты 1000 гц не более $\pm 1,5 \text{ дб}$. Питание радиопередатчика осуществляется от трехфазной сети переменного тока.

Блок-схема радиопередатчика показана на рис. 7.14.

Высокочастотная часть передатчика состоит из типового возбuditеля 1 и четырех каскадов умножения и усиления частоты.

Первый каскад 2 собран по однотоктной схеме на лампе ГУ-50 и обеспечивает усиление частот в поддиапазоне 3,0—5,6 Мгц и удвоение в поддиапазонах 5,6—11,2 Мгц и 11,2—22,4 Мгц . Второй каскад 3 с аналогичной схемой, но на двух лампах ГУ-50, производит усиление частот в поддиапазонах 3,0—5,6 Мгц и 5,6—11,2 Мгц и удвоение в поддиапазоне 11,2—22,4 Мгц . Третий (4) и четвертый (5) каскады собраны по двух-

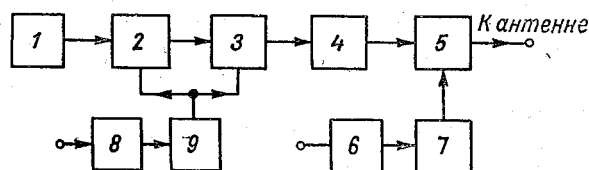


Рис. 7.14. Блок-схема магистрального радиопередатчика.

тактной схеме соответственно на лампах ГУ-80 и ГУ-28А (ГУ-39А).

Низкочастотный тракт передатчика состоит из усилителя низкой частоты 6 и модулятора 7.

Манипуляция производится при помощи манипулятора 8 и электронного реле 9 путем заперания и отпирания первого и второго каскадов высокочастотного тракта.

Магистральный радиоприемник. Радиоприемник предназначен для приема сигналов радиопередающих станций, работающих в телеграфном и телефонном режимах с амплитудной модуляцией. При наличии специальных приставок обеспечивается прием буквенных и фототелеграфных сигналов.

Высокая точность градуировки и высокая стабильность частоты, достаточная чувствительность и хорошая избирательность приемника обеспечивают быстрое и надежное вхождение в связь. Схема приемника обеспечивает возможность работы с автоматической подстройкой частоты.

Радиоприемник имеет диапазон плавно перекрываемых частот от 1,5 до 25,5 Мгц , разбитый на 12 поддиапазонов. Он может работать с симметричными, несимметричными и штыревыми антеннами и антенной типа «наклонный луч». Чувствительность радиоприемника в телеграфном режиме при отноше-

нии сигнал/шум, равно 3 , и полосе 3 кГц не хуже $0,6$ мкВ. Питание радиоприемника осуществляется от сети переменного тока.

Блок-схема магистрального радиоприемника показана на рис. 7.15. Радиоприемник собран по супергетеродинной схеме с двукратным преобразованием частоты (за исключением первого поддиапазона).

Входной каскад 1 рассчитан на работу с несимметричными, симметричными или штыревыми антеннами. Связь симметричных и несимметричных антенн с контуром индуктивная, штыревых — емкостная. Элементы контуров по поддиапазонам сменные.

Усилитель высокой частоты 2 двухкаскадный, $6Ж4$ и $6К3$, выполнен по трансформаторной схеме.

Первый смеситель 3 на лампе $6А7$ имеет анодный контур, настроенный на первую промежуточную частоту (от $1,5$ до

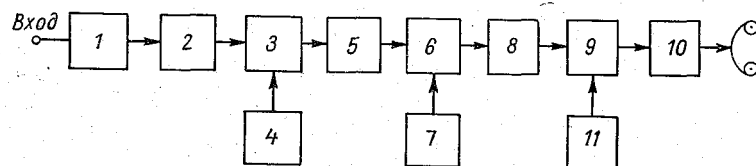


Рис. 7.15. Блок-схема магистрального радиоприемника.

$3,5$ МГц). На первом поддиапазоне смеситель работает как усилитель (первый гетеродин выключается).

Первый гетеродин 4 ($6Ж4$) работает на кварцевом резонаторе, его частота по поддиапазонам изменяется от 2 до 22 МГц.

Усилитель первой промежуточной частоты 5 однокаскадный (лампа $6К3$) с двухконтурным диапазонным фильтром в анодной цепи.

Второй смеситель 6 на лампе $6А7$ имеет в анодной цепи фильтр, настроенный на вторую промежуточную частоту 215 кГц. На первом поддиапазоне второй смеситель играет роль первого.

Второй гетеродин 7 работает в плавном диапазоне частот от $1,715$ до $3,715$ МГц (две лампы $6К3$). Таким образом, вторая промежуточная частота постоянна и равна разности частот второго гетеродина и первой промежуточной частоты. Усилитель второй промежуточной частоты 8 трехкаскадный; первый каскад нагружен на избирательный фильтр, второй и третий — на резонансные контуры.

Детектор 9 имеет на выходе фильтр, состоящий из дросселей высокой частоты и конденсаторов. Усилитель низкой частоты 10 трехкаскадный, рассчитанный на три полосы пропускания: $8,5$, $2,5$ и $0,3$ кГц. Третий каскад рассчитан для работы на головные телефоны или линию с волновым сопротивлением 600 Ом.

Третий гетеродин 11 предназначен для обеспечения приема в режиме телеграфном с незатухающими колебаниями. Частота гетеродина может меняться в пределах ± 5 кГц. АРУ собрана по схеме с задержкой.

Радиосвязь через искусственные спутники. С запуском в СССР 4 октября 1957 г. первого в мире искусственного спутника Земли появилась возможность реализовать идею советского ученого П. В. Шмакова об увеличении дальности связи на ультракоротких волнах, используя искусственный спутник Земли в качестве ретранслятора. Ретранслятор может быть пассивным или активным. В первом случае на Земле необходимы мощный радиопередатчик, который посылает радиоволны по направлению к спутнику, и чувствительный радиоприемник, который принимает их после отражения от спутника. Во втором случае на спутнике оборудуется приемо-передающая радиостанция, которая принимает сигнал от сравнительно маломощного наземного радиопередатчика, усиливает его и передает наземной радиоприемной станции. По ряду причин системы спутниковой связи с пассивной ретрансляцией пока не нашли практического применения.

Время суток, в течение которого может осуществляться связь наземных пунктов через данный спутниковый ретранслятор, в значительной степени зависит от орбиты спутника. Так, американский спутник «Телстар», имея сравнительно низкую орбиту (высота в апогее около 10 000 км), обеспечивал длительность связи не более 1 часа, спутник «Эрли Бэрд», работая на синхронной орбите¹, может обеспечить (при наличии энергетических возможностей) круглосуточную связь.

Советский спутник «Молния-1», входящий в систему «Орбита», которая предназначена для связи в северном полушарии, имеет эллиптическую орбиту. При этом за счет большой высоты и малой скорости полета спутника относительно выбранных точек земной поверхности обеспечивается радиовидимость, например, между Москвой и Владивостоком в течение 9—10 час. Два таких спутника смогут обеспечить практически круглосуточную связь.

Спутниковая радиосвязь осуществляется на частотах, которые определяются из условий распространения волн через атмосферу, уровня допустимых космических шумов, тепловых шумов атмосферы и Земли, шумов Солнца, внутренних шумов радиоприемных устройств и др. Международный консультативный комитет по радиосвязи рекомендует частоту 6 ГГц для направления Земля—спутник и 4 ГГц для направления спутник—Земля.

¹ Синхронной называют орбиту спутника, период обращения которого равен периоду обращения Земли вокруг своей оси. При этом спутник (высота которого над Землей составляет около 36 тыс. км как бы «висит» над определенной точкой Земли.

Связь, организуемая на указанных частотах, обладает достаточной широкополосностью и может обеспечить двухстороннюю передачу телевизионных программ или многих сотен телефонных разговоров.

Схема связи двух пунктов через спутник показана на рис. 7.16. Телевизионные центры и междугородные телефонные станции, как правило, размещаются на территориях городов, а наземные приемо-передающие станции спутниковой связи выносятся за город, в места, не подверженные влиянию городских помех. Связь между приемо-передающими станциями и междугородными телефонными станциями (МТС) или телевизионными центрами (ТЦ) может осуществляться по кабелям дальней связи или по радиорелейным линиям. Приемо-передающая станция

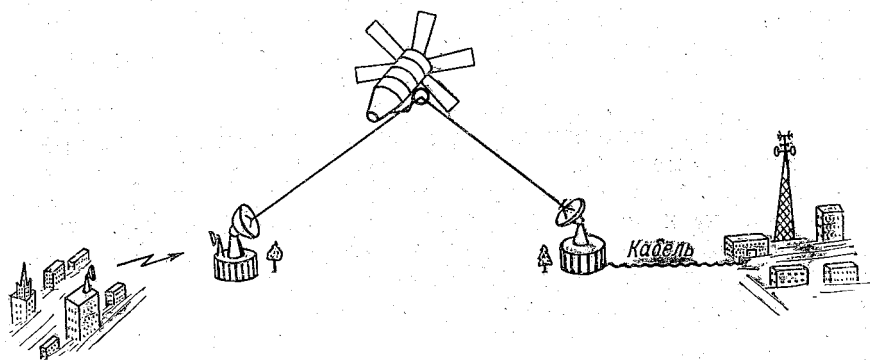


Рис. 7.16. Схема радиосвязи через искусственный спутник.

космической связи состоит из антенно-фидерного устройства и приемо-передающего радиооборудования. Конструкция антенно-фидерного устройства допускает вращение антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях для автоматического слежения за летящим спутником.

Упрощенная блок-схема наземной станции космической радиосвязи «Орбита» показана на рис. 7.17.

Телевизионный сигнал или сигнал многоканальной телефонии по соединительной линии от телецентра или от междугородной телефонной станции поступает на линейное оборудование 1, затем на усилитель 2 и частотный модулятор 3.

Напряжение промежуточной частоты после усилителя промежуточной частоты 4 и напряжение от возбуждателя 5 подаются на смеситель 6, где преобразуются в напряжение сверхвысокой частоты. СВЧ сигнал, сформированный фильтром 7 и усиленный усилителем мощности 8, собранном на клистроне, подается через фильтр 9 в волновод антенного фидера.

Аппаратура наведения 10 с помощью радиомаяка обеспечивает на спутнике поворот антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях так, что излучение СВЧ сигнала антенной производится всегда в направлении спутника связи.

Мощность, излучаемая антенной, может регулироваться в пределах до 10 кВт.

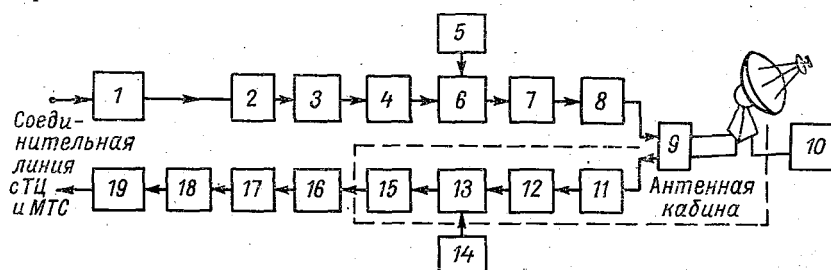


Рис. 7.17. Упрощенная блок-схема наземной станции «Орбита».

Сигнал обратного направления, принятый антенной от спутника связи, очень слаб, так как мощность бортового передатчика спутника мала, а затухание электромагнитной волны на участке спутник—Земля достаточно велико. Поэтому решающим оказывается требование к высокой чувствительности приемного устройства наземной станции, сводящееся к необходимости обеспечения нужного отношения сигнал/шум. Источниками шума на входе приемного устройства аппаратуры космической радиосвязи, как и в других приемниках СВЧ, являются внешние шумы, внутренние шумы приемника и шумы, вносимые антенно-фидерным трактом. Все эти шумы, за исключением атмосферных помех, имеют тепловое происхождение.

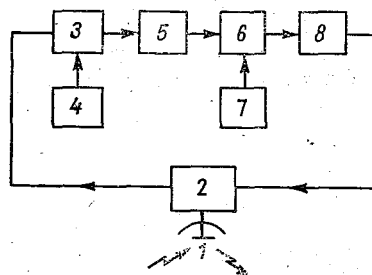


Рис. 7.18. Упрощенная блок-схема ретрансляционной аппаратуры советского спутника связи «Молния-1».

С целью снижения потерь в волноводном тракте предварительный усилитель приемника выносится в антенную кабину, а для снижения шумов в усилителях использованы охлаждаемые и неохлаждаемые параметрические усилители. Тракт приема наземной станции в антенной кабине содержит фильтр 11, параметрический усилитель 12, смеситель 13, на который подается напряжение от гетеродина 14, и предварительный усилитель промежуточной частоты 15. В помещении наземной станции тракт приема содержит усилитель промежуточной частоты

с автоматической регулировкой усиления 16; демодулятор 17, видеоусилитель 18 и комплект аппаратуры для согласования с линией связи 19.

Упрощенная блок-схема ретранслятора на спутнике связи «Молния-1» показана на рис. 7.18.

Радиоприемник ретранслятора выполнен по супергетеродинной схеме. Сигнал, принятый антенной 1 от наземной станции, через фильтр развязки 2 подается на первый смеситель 3, где с помощью колебаний от первого гетеродина 4 происходит преобразование частоты сигнала в промежуточную частоту. Усилитель промежуточной частоты 5 усиливает преобразованный сигнал, после чего последний преобразуется с помощью второго смесителя 6 и второго гетеродина 7. Выходной каскад передатчика 8 собран на лампах бегущей волны. С выхода передатчика сигнал на частоте, отличной от принятой, подается через фильтр 2 на антенну и излучается в направлении наземной станции. На спутнике установлена параболическая антенна с круговой поляризацией.

С помощью описанной системы космической связи, обеспечивающей организацию десятков дуплексных телефонных каналов, можно осуществлять передачу факсимильных карт погоды во многие отдаленные пункты Советского Союза.

§ 7.4. АППАРАТУРА РАДИОСВЯЗИ СЕТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Сеть распространения гидрометеорологических данных предназначена для доведения до многих оперативно-прогностических органов гидрометеорологических данных в графическом или буквенно-цифровом виде.

Для этого используются такие же каналы, как и в сети обмена, и, кроме того, большое количество коротковолновых и длинноволновых *циркулярных радиопередатчиков* мощностью до 80 кВт.

Циркулярность передач обеспечивается применением специальных антенн с круговой диаграммой направленности. Прием этих передач осуществляется в оперативно-прогностических органах Гидрометслужбы с помощью простейших антенн и радиоприемников «Волна».

Широкое применение при распространении гидрометеорологических данных могут получить ретрансляторы на спутниках связи.

Длинноволновый радиопередатчик мощностью 70 кВт. Радиопередатчик разработан специально для организации циркулярных факсимильных и буквенных телеграфных радиопередач в Гидрометслужбе СССР. Отдавая в антенную систему мощность 70 кВт в длинноволновом диапазоне, радиопередатчик мо-

жет обеспечить уверенный круглосуточный прием на площади круга с радиусом до 2000 км. Радиопередатчик работает на любой из пяти фиксированных частот в диапазоне 50—150 кГц. Стабильность рабочих частот (до 10^{-5}) обеспечивается применением кварцевого генератора.

Упрощенная блок-схема радиопередатчика показана на рис. 7.19.

Манипулятор 1 представляет собой управляемый LC-генератор, работающий на частоте 500 кГц. Кварцевый задающий генератор 2 собран по схеме с катодной связью и содержит шесть переключаемых кварцевых резонаторов, настроенных на частоты от 350 до 450 кГц.

Смеситель 3, собранный по балансной схеме, при подаче на его входы колебаний от задающего и управляемого генераторов дает на выходе две боковые полосы частот, одна из которых (150 кГц) выделяется фильтром нижних частот 4.

Усилитель 5 усиливает сигнал до 15 в для подачи на вход первого трехкаскадного высокочастотного тракта радиопередатчика 6.

Использование длинных волн при мощности радиопередатчика 70 кВт накладывает жесткие требования к антенной системе.

Кроме этого, для обеспечения факсимильных радиопередач необходимо обеспечить полосу пропускания антенны не менее ± 2 кГц. Эти требования можно выполнить, применив крупногабаритную сложную антенную систему, подвешенную на высоких мачтах. Один из вариантов такой системы состоит из горизонтального полотна, четырех боковых мачт и центрального снижения, выполненного в виде мачты, окруженной несколькими вертикальными проводами. Горизонтальное полотно состоит из нескольких десятков проводов, радиально расходящихся от центральной мачты к канатам, натянутым между боковыми мачтами. Боковые мачты заземлены через катушки индуктивности, соединены с горизонтальным полотном и поэтому участвуют в излучении радиоволн. Общая высота антенной системы около 250 м, боковые мачты расположены по углам квадрата, длина стороны которого равна 350 м. Питание антенны осуществляется через коаксиальный фидер с волновым сопротивлением 150 ом. Система имеет заземление, выполненное из 120 проводов, расходящихся радиально от каждой мачты и образующих квадрат со стороной 750 м.

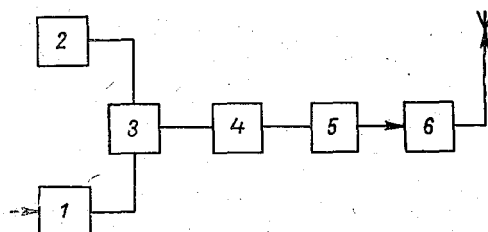


Рис. 7.19. Упрощенная блок-схема длинноволнового радиопередатчика.

Радиоприемник «Волна». Радиоприемник предназначен для приема телеграфных, телефонных и факсимильных радиопередач в диапазоне от 12 до 5000 кГц. Телеграфная радиосвязь может осуществляться кодом Морзе (тональными и незатухающими колебаниями) или кодом МТК-2. Радиоприемник собран по супергетеродинной схеме с одним преобразованием частоты на поддиапазонах с первого по шестой и с двойным преобразованием на поддиапазонах с седьмого по девятый. Промежуточные частоты 915 и 85 кГц. Входные цепи рассчитаны на включение антенн с волновым сопротивлением 200 ом. Ширина полосы пропускания радиоприемника может быть 0,5; 1,5 и 6,0 кГц. Приемник собран по блок-схеме, показанной на рис. 7.20. Назначение входящих в него блоков ясно из подписи к рисунку.

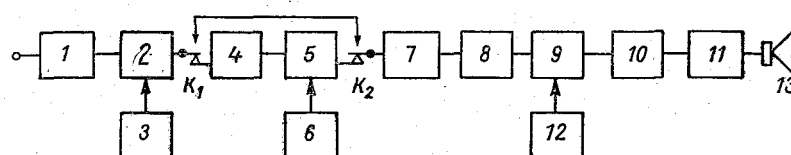


Рис. 7.20. Блок-схема радиоприемника «Волна».

1 — УВЧ; 2 — первый смеситель; 3 — первый гетеродин; 4 — первый УПЧ; 5 — второй смеситель; 6 — второй гетеродин; 7 — второй УПЧ; 8 — схема АРУ; 9 — детектор; 10 — УНЧ; 11 — усилитель мощности низкой частоты; 12 — третий гетеродин; 13 — громкоговоритель; K_1 и K_2 — контакты, переключающиеся при переводе переключателя диапазонов на первый поддиапазон.

Распространение гидрометеорологической информации с помощью ИСЗ. Принцип использования космической радиосвязи для распространения гидрометеорологической информации можно пояснить на примере эксперимента, начатого в США в 1966 г.

В эксперименте используется космический корабль АТС-1 со стабилизированной осью вращения, запущенный на синхронную орбиту. Перемещаясь в восточном направлении с той же скоростью, что и Земля, спутник как бы висит над точкой экватора с долготой 151° З. Схема эксперимента показана на рис. 7.21. Спутник АТС-1 с помощью антенны 2 может принимать радиопередачи космического центра 1 в Майами (США), а с помощью антенны 3 — информацию от метеорологического спутника 4 («Нимбус», ЭССА). Принятые сигналы усиливаются на спутнике и с помощью антенны 5 излучаются в направлении Земли. Прием этих передач возможен в любой точке района Тихого океана (в том числе на кораблях, островах, побережье).

Наземные пункты приема информации с метеорологических спутников снабжаются сравнительно простым комплексом радиотехнического оборудования. Антенное устройство может представлять собой спиральную антенну или антенну типа «волно-

вой канал», ориентированную в направлении спутника. Прием сигналов со спутника осуществляется с помощью ультракоротковолнового радиоприемника супергетеродинного типа. В отдельных случаях антенна включается на вход радиоприемника через антенный усилитель с низким уровнем внутренних шумов.

Запись принятых со спутника сигналов производится с помощью фототелеграфного приемного аппарата.

Комплекс аппаратуры приема и передачи со спутника, располагаемый на морских судах, отличается от описанного тем, что антенное устройство в этом случае содержит поворотный

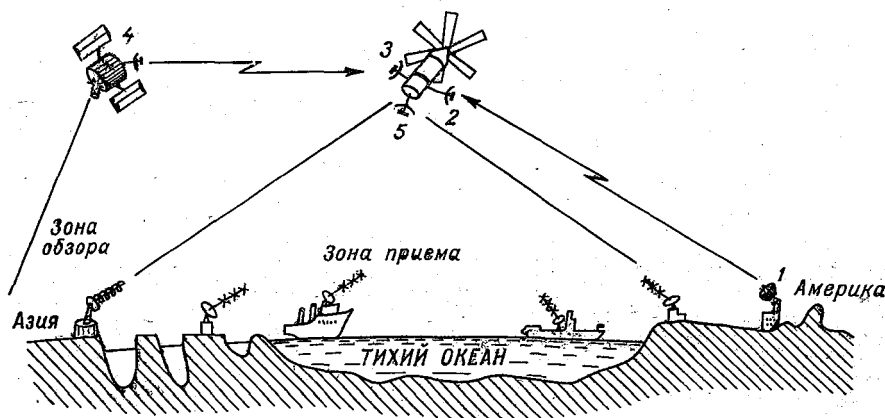


Рис. 7.21. Эксперимент по распространению гидрометеорологической информации с помощью ретранслятора на спутнике.

механизм. Слежение за неподвижным спутником при движении судна осуществляется поворотом антенны автоматически или вручную по азимуту и углу места.

Основные выводы

1. В гидрометеорологической службе используются три сети радиосвязи: сбора, обмена и распространения информации. Сеть сбора включает пункты гидрометеорологических наблюдений и центры сбора, сеть обмена — центры обмена, а сеть распространения предусматривает передачу информации из малого числа центров в большое число приемных пунктов. Основные виды радиосвязи: радиотелеграфная, радиотелефонная, факсимильная, передача данных. Широкое распространение получила радиосвязь на одной боковой полосе частот.

2. В сети сбора применяются прямо-передающие радиостанции мощностью от 5 до 100 вт и в отдельных случаях до 250 вт (на пунктах гидрометеорологических наблюдений), а для

опроса пунктов применяются радиопередатчики мощностью до 5 кВт. В северных районах радиосвязь, как правило, организуется на средних волнах, в средних и южных районах — на коротких.

3. В сети обмена используются радиорелейные каналы тональной частоты. При отсутствии радиорелейных каналов общегосударственной сети связи организуются телеграфные радиоканалы с использованием магистральных радиопередатчиков мощностью от 5 до 25 кВт и магистральных радиоприемников. Связь осуществляется на средних, коротких и ультракоротких волнах.

4. В сети распространения используются те же каналы, что и в сети обмена, а также большое количество коротковолновых циркулярных радиопередатчиков мощностью до 80 кВт. Прием этих передач осуществляется с помощью простейших антенн и радиоприемников «Волна». Перспективным в сети распространение гидрометеорологической информации является применение специальных спутников связи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные виды радиосвязи используются в гидрометеорологической службе?
2. Поясните принцип осуществления радиосвязи на одной боковой полосе частот.
3. Изобразите блок-схему и опишите принцип действия аппаратуры факсимильной радиосвязи.
4. В чем основное различие между факсимильной и фототелеграфной радиосвязью?
5. Опишите принципы радиотелеграфии при работе с АМ и ЧМ сигналами.
6. Дайте общую характеристику средствам радиосвязи сети сбора гидрометеорологической информации.
7. Поясните работу радиостанций «Недра-П» и РСО-30.
8. В чем особенность схемы радиопередатчиков мощностью 1 кВт?
9. Какие основные виды радиосредств используются в сети обмена?
10. Опишите работу радиорелейной аппаратуры Р-60/120.
11. Поясните работу наземной станции системы космической связи через спутник «Молния-1».
12. Опишите особенности радиосредств сети распространения.
13. Изобразите упрощенную блок-схему и поясните принцип действия длинноволнового радиопередатчика мощностью 70 кВт.
14. Опишите работу радиоприемника «Волна».
15. Дайте краткую характеристику радиосредств, применяющихся в сети распространения гидрометеорологической информации с помощью ИСЗ.

ГЛАВА 8

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Начало широкого применения радиолокационной техники относится к периоду второй мировой войны. При использовании радиолокаторов для военных целей (обнаружения самолетов противника и наведения на них зенитных батарей) было замечено, что на точность и надежность работы РЛС существенно влияют помехи, значительная часть которых вызвана метеорологическими явлениями: наличием облачных масс, зон осадков, гроз, слоев инверсии и т. п. Метеорологов же эти помехи навели на мысль использовать свойства распространения радиоволн для определения качественных и количественных метеорологических характеристик атмосферы.

Сначала для этой цели использовались военные радиолокаторы, а затем во многих странах начали конструироваться специальные метеорологические радиолокаторы. Сейчас радиолокационная аппаратура стала одним из основных технических средств метеорологии. Широки и разнообразны области применения РЛС в Гидрометеорологической службе.

Наиболее распространены РЛС в аэрологии, где они используются для целей температурно-ветрового радиозондирования атмосферы. В 40—50-х годах аэрологическая сеть благодаря усилиям Г. И. Голышева, Л. А. Александрова и др. начала оснащаться новыми радиолокационными средствами. Большой вклад в создание радиотехнических узлов аэрологических систем внесли В. В. Костарев, И. П. Эльман, Б. Г. Рождественский и др. (наземные установки) и В. С. Хахалин, М. В. Кречмер, С. Ф. Калачинский и др. (радиозондовые передатчики).

Вторая наиболее крупная область применения радиолокационных средств — метеорология, где РЛС нашли применение в качестве аппаратуры для определения зон облачности, осадков, гроз и различных атмосферных неоднородностей (атмосфериков). В настоящее время РЛС в этой области используются настолько широко, что это привело к выделению самостоятельной отрасли — радиолокационной метеорологии. Большой вклад

в развитие методов радиолокационной метеорологии внесли советские ученые Е. М. Сальман, В. В. Костарев, В. Д. Степаненко, К. С. Шифрин, А. Г. Горелик, А. М. Боровиков, А. А. Черников, В. М. Мучник, Г. К. Сулаквелидзе, А. И. Карцивадзе и др.

В СССР под руководством Г. Ф. Шевелы, С. И. Ваксенбурга и др. создан специальный метеорологический радиолокатор типа МРЛ, который выпускается серийно и широко используется в практике метеорологических наблюдений.

Много и успешно работают над применением радиолокационных методов в метеорологии за рубежом (в США Д. Атлас, Л. Дж. Баттан, Дж. С. Маршалл и др.). В ряде зарубежных стран довольно широко используются метеорологические радиолокаторы, выпускающиеся серийно: в Англии (фирма «Плесси Радар»), Италии (фирма «Селения»), Японии (фирма «Мицубиси») и др.

§ 8.1. РАДИОЛОКАЦИЯ И ЕЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Радиолокацией называется отрасль радиоэлектроники, которая использует отражение, переизлучение или собственное излучение объектами электромагнитных волн для обнаружения различных целей (объектов), измерения их координат и параметров движения.

На рис. 8.1 показаны координаты цели, которые определяются с помощью радиолокатора.

Наклонной дальностью цели D называется кратчайшее расстояние от радиолокатора до цели. Высота H — расстояние от цели до земли (по вертикали). Горизонтальная дальность D_r — это проекция наклонной дальности на горизонтальную плоскость. Азимут цели β называется угол между D_r и условным направлением отсчета азимута. Обычно азимут отсчитывается по часовой стрелке от линии направления на север, проходящей через место расположения станции.

Углом места цели ε называется угол между дальностью D и ее проекцией на горизонтальную плоскость D_r .

Заметим, что приведенные определения справедливы для точечных целей. Реальные же цели представляют собой материальные объекты, размеры которых обычно много меньше значений определяемых координат, так что величины D , H , β и ε с достаточной степенью точности характеризуют положение цели в пространстве.

При дальнейшем изложении под дальностью цели мы будем понимать наклонную дальность.

Радиолокационная цель — это любой материальный объект, местоположение и параметры движения которого можно определить методами радиолокации. Радиолокационными целями могут быть самолеты, ракеты, радиозонды, облака, зоны осадков, грозы и т. д.

Почти все радиолокационные системы относятся по информационным признакам к системам извлечения информации (см. § 1.3) и разделяются на пассивные и активные.

Пассивная радиолокация осуществляется путем приема электромагнитной энергии, излучаемой целью. *Активная радиолокация* осуществляется путем облучения цели электромагнитной энергией, излучаемой антенной радиолокационной станции, и приема энергии, отраженной от цели. Разновидностью активной радиолокации является *активная радиолокация с активным ответом*. Ее сущность заключается в том, что на цели устанавливается ответчик, представляющий собой радиоприбор, который, реагируя на зондирующий сигнал радиолокационной станции, вырабатывает ответный сигнал.

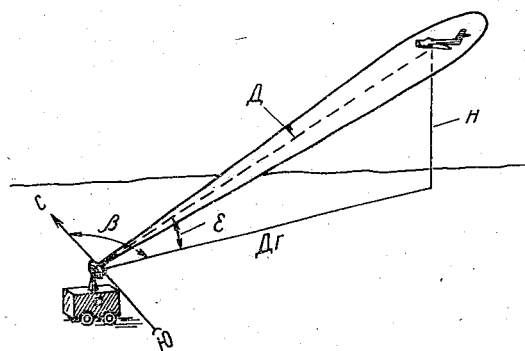


Рис. 8.1. Координаты движущейся воздушной цели, определяемые с помощью радиолокатора.

Радиолокацию подразделяют на радиодальномерию и радиопеленгацию. При использовании метода *радиодальномерии* определяется дальность цели путем измерения длины траектории распространения радиоволн до цели и обратно; при *радиопеленгации* находится направление на цель, т. е. измеряются угловые координаты цели. Почти все современные радиодальномеры могут осуществлять и радиопеленгацию цели, поэтому термин «радиодальномерия» употребляется редко; аппаратуру для определения и дальности, и угловых координат обычно называют *радиолокационной станцией* (РЛС) или *радиолокатором*.

Устройства, служащие для непосредственного определения только угловых координат, называются *радиопеленгаторами*.

Расстояние до цели определяется по времени запаздывания отраженного сигнала относительно импульса сверхвысокочастотной электромагнитной энергии, излученной в пространство антенной РЛС. Момент излучения импульса, называемого *зондирующим*, принимается за начало отсчета времени распространения радиоволн. Интервал времени между моментом излучения

зондирующего импульса и моментом приема отраженного импульса называется временем запаздывания t_3 отраженного сигнала. Время, необходимое для прохождения импульсом расстояния до цели и обратно со скоростью света, определяется по формуле

$$t_3 = \frac{2D}{c}, \quad (8.1)$$

где D — расстояние до цели; c — скорость света. Из формулы (8.1) можно определить дальность цели:

$$D = \frac{ct_3}{2}. \quad (8.2)$$

Если в формулу (8.2) подставить значение $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек, а время запаздывания выразить в микросекундах, то дальность в метрах будет $D = 150 t_3$, т. е. время запаздывания в 1 мксек соответствует дальности 150 м.

В зависимости от способа измерения t_3 в радиолокации применяется несколько методов радиодальнометрии, главные из которых основаны на использовании импульсного и непрерывного излучения.

Импульсный метод является наиболее распространенным. Большинство схем импульсных РЛС имеют особенности работы, отличающие их от обычных (неимпульсных) схем. Импульсные схемы изучаются в курсе «Основы радиолокации», поэтому здесь подробно будут рассмотрены только общие вопросы, связанные с работой радиолокационных систем.

В главах 5 и 6 об импульсах тока и напряжения уже говорилось. Приведем основные характеристики так называемых *прямоугольных импульсов*, наиболее широко используемых в радиолокационной технике.

На рис. 8.2 показаны периодическая последовательность таких импульсов и основные параметры, характеризующие эту последовательность: U_m — амплитуда импульсов, τ_n — длительность импульса, T_c — период следования (повторения). Величиной, обратной T_c , является частота следования (повторения)

$F_c = \frac{1}{T_c}$. Отношение периода следования к длительности импульса называется *скважностью*

$$q = \frac{T_c}{\tau_n}. \quad (8.3)$$

Длительность радиолокационных импульсов обычно составляет от долей до десятков микросекунд, а скважность — от сотен до нескольких тысяч.

Показанные на рис. 8.2 *a* импульсы называют *видеоимпульсами*, они являются импульсами постоянного тока. В высокочас-

тотных цепях РЛС и в пространстве возникают *радиоимпульсы* (рис. 8.2 б) — колебания частоты f_0 , огибающая которых повторяет форму видеоимпульса. Получение таких колебаний обеспечивается импульсной модуляцией, о которой рассказывалось в главе 5.

В реальных схемах форма видео- и радиоимпульсов отличается от идеального прямоугольника, однако для рассмотрения принципов работы радиолокационных систем это не имеет существенного значения.

Принцип действия импульсной РЛС поясним с помощью упрощенной блок-схемы (рис. 8.3 а) и временных диаграмм напряжений (рис. 8.3 б).

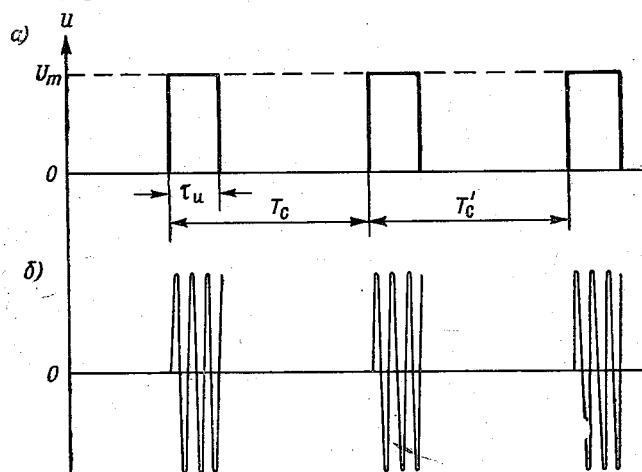


Рис. 8.2. Видеоимпульсы и радиоимпульсы.

Для задания определенного «ритма» работы всей станции (синхронизации) используются импульсы u_m , вырабатываемые модулятором. Это обеспечивает одновременность начала посылки зондирующего импульса передатчика и начала отсчета времени запаздывания (и соответствующей ему дальности).

Передатчик излучает колебания сверхвысокой частоты в виде периодически повторяющихся зондирующих импульсов (радиоимпульсов). В промежутках времени между зондирующими импульсами с помощью приемника осуществляется прием отраженных импульсов. С выхода приемника принятые импульсы поступают на индикатор, позволяющий измерить интервал времени между началом излучения зондирующего импульса и началом приема отраженного импульса и тем самым определить расстояние до цели, от которой отразились радиоволны.

В передатчик входит генератор СВЧ, обеспечивающий получение сверхвысокочастотных колебаний, и модулятор, служащий

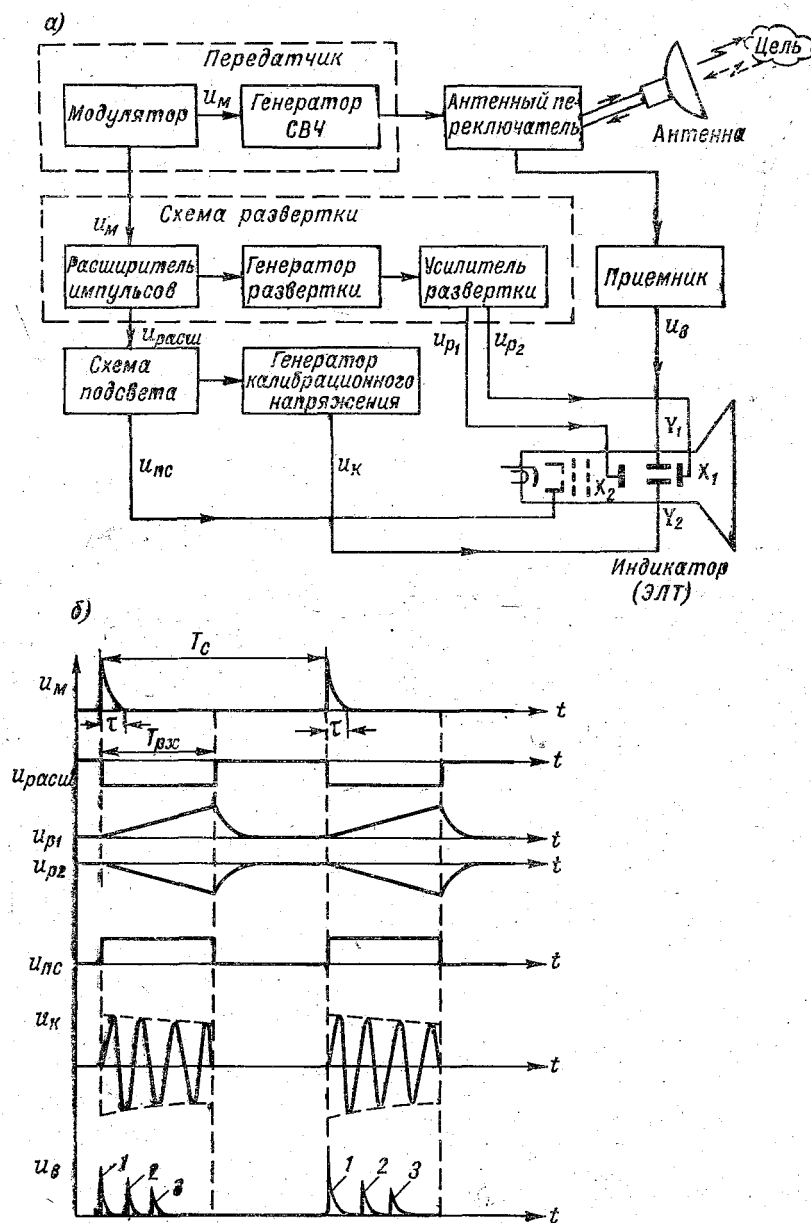


Рис. 8.3. К пояснению принципа действия импульсной РЛС.

а — упрощенная блок-схема радиолокатора; б — временные диаграммы напряжений.

для формирования из этих колебаний «пакетов» (радиоимпульсов). Выше указывалась и вторая задача модулятора — создавать импульсы, согласующие во времени работу передатчика и работу остальных блоков РЛС: приемника, индикаторов и т. д.

Антенной РЛС может быть одна из описанных в главе 3 антенн для метровых или более коротких волн (волновой канал, параболоид, рупор и т. п.).

Импульсный метод работы РЛС позволяет применять для приема отраженных сигналов ту же антенну, что и для излучения зондирующих импульсов. Однако постоянное подключение передатчика и приемника РЛС к одной антенне привело бы к выходу из строя высокочувствительных входных цепей приемника мощным зондирующим импульсом.

Для предотвращения этого приемник подключается к антенне станции не непосредственно, а через специальный антенный переключатель, автоматически отключающий приемник от антенны в момент послышки передатчиком зондирующего импульса и вновь подключающий его после окончания импульса. Большая частота повторения циклов работы переключателя (до нескольких тысяч в секунду) в сочетании с необходимостью отключать и подключать приемник за весьма короткое время (единицы и десятые доли микросекунды) требует применения в качестве переключателей специальных электрических устройств. Основной элемент такого устройства — газовый разрядник (двухэлектродный прибор дугового разряда). При напряжениях, меньших чем напряжение зажигания разрядника, его сопротивление велико и он не влияет на работу устройства. При подаче на него высокого напряжения от передатчика в разряднике возникает дуговой разряд, сопротивление его становится весьма малым и он замыкает накоротко вход приемника.

В качестве приемников используются специальные устройства, которые кратко описаны в § 6.8.

С выхода приемника сигналы от целей поступают в индикатор. В качестве прибора, на котором визуально наблюдаются отметки целей, «карта» местности и т. п., в РЛС используется электроннолучевая трубка (ЭЛТ). Электронный луч, перемещаясь по экрану трубки, создает развертку.

Схема развертки предназначена для получения импульсов пилообразного напряжения u_{p1} и u_{p2} , прикладываемого к пластинам X_1 и X_2 ЭЛТ. Форма импульсов при этом должна быть такой, чтобы во время рабочего (прямого) хода развертки T_{px} электронный луч перемещался по возможности равномерно вдоль линии развертки, а затем быстро возвращался в исходное положение. Так как длительность прямого хода развертки T_{px} больше длительности импульса модулятора, то перед генератором развертки включен расширитель импульсов. Его отрицательные импульсы $u_{расш}$ через каждый период следования T_c

запирают на время $T_{рж}$ лампу генератора развертки. пилообразное напряжение развертки, снимаемое с генератора, после усиления подается на горизонтально отклоняющие пластины (X_1 и X_2) ЭЛТ. Усилитель развертки преобразует напряжение развертки в два противофазных напряжения $u_{р1}$ и $u_{р2}$. Эти напряжения подаются на разные пластины, и вследствие того, что они находятся в противофазе, разность потенциалов между пластинами, а следовательно, и скорость развертки возрастает вдвое.

Схема подсвета изменяет импульсы расширителя по полярности и амплитуде так, чтобы импульсы подсвета $u_{пс}$, прикла-

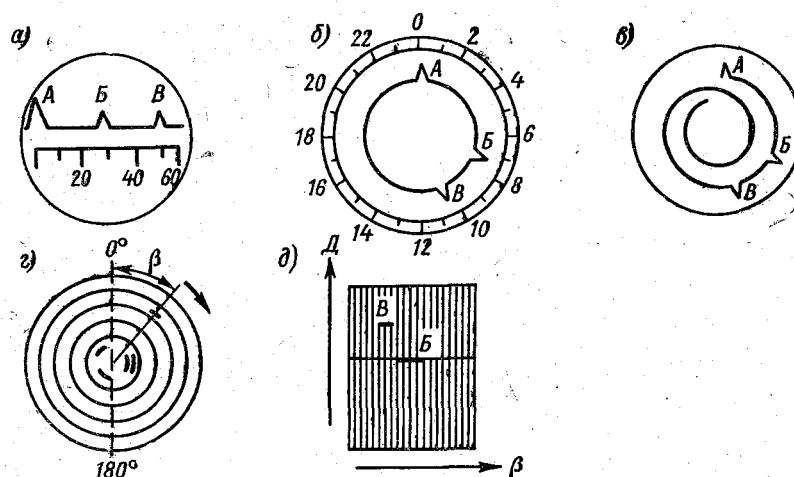


Рис. 8.4. Типы разверток (А — зондирующий импульс; Б, В — отраженные импульсы).

а — прямая; б — кольцевая; в — спиральная; г — радиально-круговая; д — растровая (телевизионная).

дыаемые к управляющему электроду (или катоду) ЭЛТ, вызывали свечение экрана только при прямом ходе развертки.

Видеоимпульсы u_v с выхода приемника поступают на вертикально отклоняющую пластину Y_1 . На пластину Y_2 подается постоянное напряжение смещения. В результате на экране ЭЛТ возникают как зондирующий импульс 1, так и отраженные от целей импульсы 2, 3 (рис. 8.3 б).

Кроме того, для периодического контроля шкалы индикатора на эту же пластину подается напряжение u_k от генератора калибрационного напряжения. Изображенное на рис. 8.3 б калибрационное напряжение имеет форму синусоидальных колебаний, стабильных по частоте. На экране в результате воздействия напряжения u_k возникают так называемые калибрационные (масштабные) метки.

Типы разверток, применяемых в РЛС, показаны на рис. 8.4, а упрощенные схемы наиболее широко используемых индикаторов дальности (ИД) и кругового обзора (ИКО) показаны на рис. 8.5.

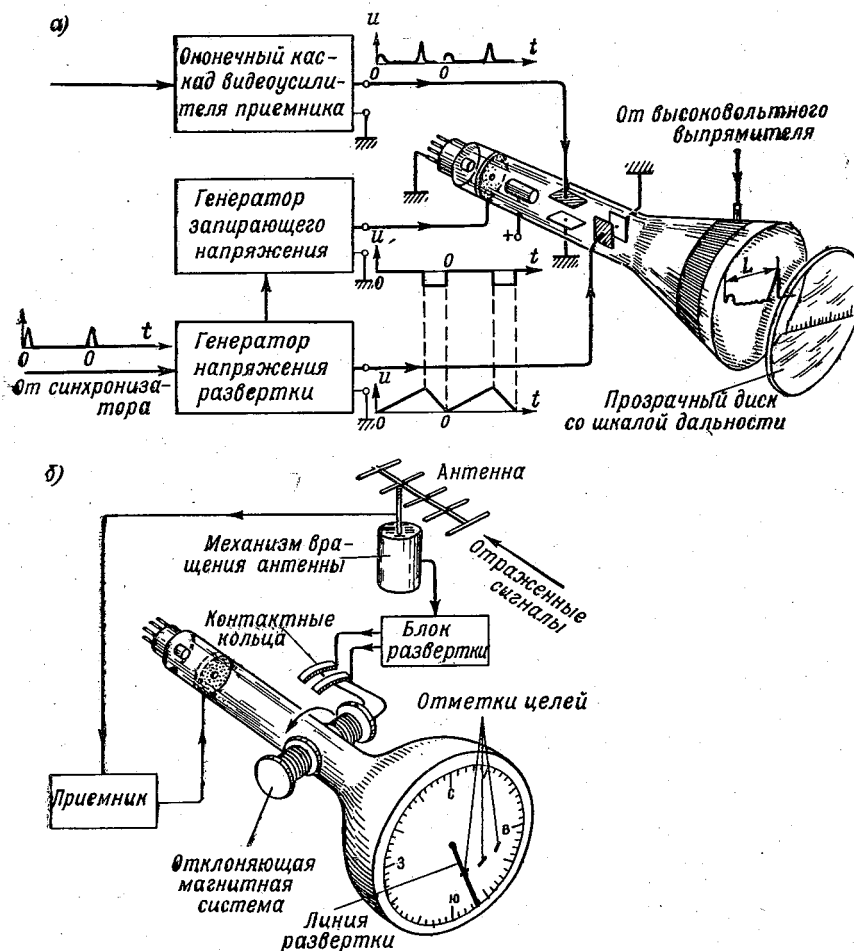


Рис. 8.5. Упрощенные схемы индикаторов.
а — дальности; б — кругового обзора.

Применение в качестве индикаторов электроннолучевых трубок, которые практически безынерционны, позволяет измерять расстояние до отражающих объектов с весьма высокой точностью.

При прямой развертке индикатора соотношение между длиной развертки от ее начала до отраженного импульса (вели-

чина L на рис. 8.5 а) и измеряемой дальностью цели D следующее

$$L = V_p t_3 = V_p \frac{2D}{c} = MD, \quad (8.4a)$$

где V_p — постоянная скорость развертки; $M = \frac{2V_p}{c}$ — масштаб развертки.

Отсюда можно легко определить дальность:

$$D = \frac{L}{M}. \quad (8.46)$$

При обзоре пространства или определении координат цели перемещение радиолуча РЛС осуществляется в большинстве случаев вращением антенны в одной или двух плоскостях с помощью электродвигателей, составляющих вместе с рядом механических устройств механизм вращения антенны. С ним связаны индикаторы угловых координат.

Основное уравнение радиолокации. Рассмотрим основные энергетические соотношения, характерные для импульсной РЛС, работающей в режиме исследования цели, находящейся на расстоянии R .

Если излучение антенны РЛС одинаково по всем направлениям и мощность его равна P , то мощность P_0 , приходящуюся на единицу площади шаровой поверхности радиусом R , в центре которой находится радиолокатор, можно выразить так:

$$P_0 = \frac{P}{4\pi R^2}. \quad (8.5)$$

При использовании антенны с коэффициентом направленного действия D мощность P'_0 излучения, достигающего цели, будет

$$P'_0 = \frac{PD}{4\pi R^2}.$$

Так как цель имеет конечное значение площади поперечного сечения S , то из мощности P'_0 «уловлена» этой целью будет только часть ее (P''_0):

$$P''_0 = \frac{PDS}{4\pi R^2}.$$

Отразившись от цели (при условии, что цель не поглощает мощности), электромагнитная волна также будет распространяться во все стороны, и у приемной антенны мощность P_A , приходящаяся на единицу площади, будет

$$P_A = \frac{PDS}{(4\pi R^2)^2}.$$

Полная мощность сигнала, уловленная антенной после того, как электромагнитные волны прошли путь до цели и обратно, равна

$$P_A = \frac{PDSA}{16\pi^2 R^4}, \quad (8.6)$$

где A — эффективная площадь приемной антенны.

Для широко применяемых в радиолокации параболических антенн пользуются следующим соотношением:

$$D = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \frac{2}{3} A_p = \frac{8\pi A_p}{3\lambda^2},$$

где λ — длина волны РЛС; A_p — площадь раскрыва антенны, связанная с эффективной площадью соотношением $A_p = \frac{2}{3} A$.

Подставив значение D в формулу (8.6), получим следующее выражение для мощности принятого сигнала:

$$P_A = \frac{PA_p^2 S}{9\pi R^4 \lambda^2}. \quad (8.7)$$

При выводе этой формулы предполагалось, что цель, имеющая площадь поперечного сечения S , отражает энергию одинаково по всем направлениям (изотропно). В действительности же все цели, включая метеорологические, отражают падающую на них энергию не изотропно. Поэтому в радиолокации пользуются понятием *эффективной площади рассеяния* σ , под которой понимается площадь поверхности, расположенной в месте нахождения цели перпендикулярно к радиолучу, которая, рассеивая равномерно во все стороны всю падающую на нее энергию, создает в точке приема такую же плотность потока, что и реальная цель.

Подставив в формулу (8.7) вместо S величину σ , получим *основное уравнение радиолокации* для любой одиночной рассеивающей цели, находящейся в непоглощающей среде:

$$P_A = \frac{PA_p^2 \sigma}{9\pi R^4 \lambda^2}. \quad (8.8)$$

Если считать, что чувствительность приемного устройства $P_{пр}$ в точности равна мощности отраженного сигнала, то, подставив в формулу (8.6) значения $P_{пр} = P_A$ и $D_{max} = R$, можно получить выражение для максимальной дальности действия РЛС

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{PA_p^2 \sigma}{9\pi P_{пр} \lambda^2}}. \quad (8.9)$$

Из формулы (8.9) следует, что влияние всех величин, входящих в правую часть уравнения, на дальность действия РЛС не

очень велико, так как они находятся под корнем четвертой степени. Поэтому повышение дальности действия РЛС — технически сложная задача. Например, чтобы увеличить дальность действия всего в 3 раза, нужно увеличить излучаемую мощность или повысить чувствительность приемника в $3^4=81$ раз.

Уравнения (8.8) и (8.9) справедливы для свободного пространства. В реальных условиях на дальность действия РЛС оказывают влияние атмосфера и Земля (вследствие чего наблюдается рефракция радиоволн, происходит поглощение их энергии парами воды, кислорода, дождевыми каплями, изменяются диаграммы направленности и др.). Поэтому для каждого конкретного случая применения радиолокационной аппаратуры в формулу (8.9) вводят коэффициенты, учитывающие влияние перечисленных факторов.

Основные характеристики радиолокационных станций. К основным техническим характеристикам импульсных РЛС относятся: несущая частота колебаний или длина волны; вид модуляции и ее параметры; длительность импульса τ ; частота повторения импульсов $F_{\text{п}}$ или период повторения $T_{\text{п}}$; импульсная мощность излучения $P_{\text{и}}$; средняя мощность излучения $P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{и}}\tau}{T_{\text{п}}}$; коэффициент направленного действия или коэффициент усиления антенны; чувствительность и полоса пропускания приемного устройства; максимальная дальность обнаружения и максимальная дальность сопровождения цели; пределы обзора по азимуту и углу места; определяемые координаты цели и точность их измерения; разрешающая способность (т. е. возможность раздельного наблюдения целей, находящихся недалеко друг от друга); время обзора (т. е. время, в течение которого луч РЛС производит однократный обзор заданного пространства).

Кроме того, каждая РЛС имеет еще ряд специфических характеристик в зависимости от ее конкретного назначения. О таких характеристиках метеорологических радиолокаторов будет рассказано в § 8.3.

Метод непрерывного излучения. Радиодальнометрия, основанная на использовании непрерывного излучения, может осуществляться двумя основными способами: частотным и фазовым.

Частотный способ заключается в том, что на вход детектора одновременно подаются два промодулированных по частоте сигнала: прямой и отраженный от цели. При их сложении возникают биения. Результирующий сигнал оказывается модулированным и по частоте (так как исходные сигналы имели частотную модуляцию), и по амплитуде (так как амплитуда отраженного сигнала не равна амплитуде зондирующего). Выделив огибающую результирующего сигнала, после усиления

можно подать ее на частотомер, показания которого проградуированы в единицах расстояния.

Фазовый способ заключается в том, что на фазометр подаются два напряжения: от генератора масштабной частоты и с выхода приемника. Запаздывание фазы в цепях дальномера и сдвиг фазы, возникающий при отражении, постоянны и могут быть вычислены. Тогда, измерив разность фаз указанных двух напряжений, можно определить расстояние до цели.

§ 8.2. РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕЛИ И ОБЗОР ПРОСТРАНСТВА

Определение координат цели и обзор пространства при импульсном методе. Дальность цели, как было сказано выше, можно определить непосредственно по экрану ЭЛТ, используя соотношение (8.4 б).

Более точно определение дальности можно производить *потенциометрическим способом*. Сущность его заключается в том, что на одну горизонтально отклоняющую пластину ЭЛТ подается напряжение развертки U_p , а на другую — постоянное напряжение U_0 , величину которого можно регулировать с помощью точного потенциометра R_n (рис. 8.6). Поворот движка

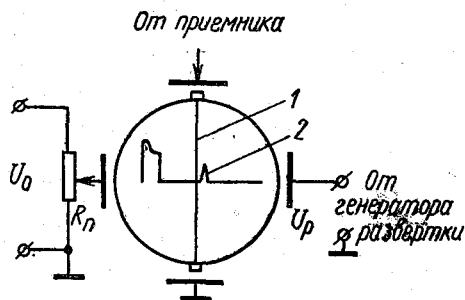


Рис. 8.6. К пояснению потенциометрического способа определения дальности.
1 — визирная нить; 2 — отраженный импульс.

потенциометра вызывает смещение всей линии развертки вместе с отметкой от цели. В момент совмещения отметки цели с визирной нитью достигается равенство $U_p = U_0$. Механизм движка потенциометра связан со шкалой, проградуированной в величинах дальности так, что каждому углу его поворота соответствует вполне определенное значение дальности.

Еще более повышается точность определения дальности при использовании подвижной электронной метки дальности в виде яркой или темной точки, линии, ступеньки и т. д. Метка дальности (которая часто называется стробирующим импульсом или стробом) создается специальным импульсом, который совмещается с импульсом от цели.

Этот метод применяется в индикаторе дальности с кольцевыми развертками (рис. 8.7). Индикатор имеет две трубки: грубого отсчета (скорость развертки соответствует максимальной дальности цели) и точного отсчета (повышенная скорость развертки).

Совмещая визир (а вместе с ним и строб) на трубке грубого отсчета дальности с отметкой от выбранной цели, на трубке точного отсчета дальности можно выделить соответствующий участок развертки. Стробирующий импульс перемещается вращением вручную штурвала дальности, с которым связаны потенциометр задержки строба и визир. Дальность отсчитывается сначала по трубке грубой дальности (в километрах), а затем по трубке точной дальности (в метрах).

Современные радиолокационные станции снабжены системами, с помощью которых непрерывное и точное определение координат цели производится не вручную, а автоматически, т. е. без непосредственного участия оператора. Эти системы называются системами автоматического сопровождения.

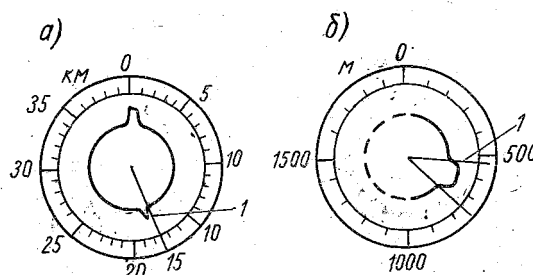


Рис. 8.7. Трубки грубого (а) и точного (б) отсчета в кольцевом индикаторе дальности.

1 — визирные нити.

Система автоматического сопровождения по дальности (АСД) обеспечивает автоматическое слежение строба за импульсом от цели. Вначале оператор вручную совмещает строб с импульсом от цели. Затем системой АСД вырабатывается так называемый сигнал ошибки, появление которого вызывается небольшим смещением цели по дальности, а следовательно, и импульса от цели. Этот сигнал ошибки воздействует на устройство, которое обеспечивает автоматическое совмещение строба с отраженным импульсом. Такое слежение продолжается до тех пор, пока цель находится в пределах дальности действия РЛС.

Угловые координаты цели чаще всего определяют, используя свойства направленных антенн. Существуют три основных метода: максимума, минимума и равносигнальный.

При использовании *метода максимума* антенну направленного действия поворачивают до совпадения максимума диаграммы направленности антенны с направлением на цель (рис. 8.8 а). Этот момент определяется по достижении отметки цели максимальной амплитуды или яркости (в зависимости от типа индикатора). Значения координат отсчитывают по шкале индикатора.

Из-за сравнительно невысокой точности данный метод применяется только в режиме обнаружения цели.

Метод минимума (рис. 8.8 б) основан на том, что о направлении на цель судят по направлению минимума диаграммы направленности в момент, когда амплитуда отраженного от цели сигнала становится минимальной (или равной нулю). Этот метод имеет малые погрешности и применяется в радионавигации для точной пеленгации. В радиолокации он применяется только

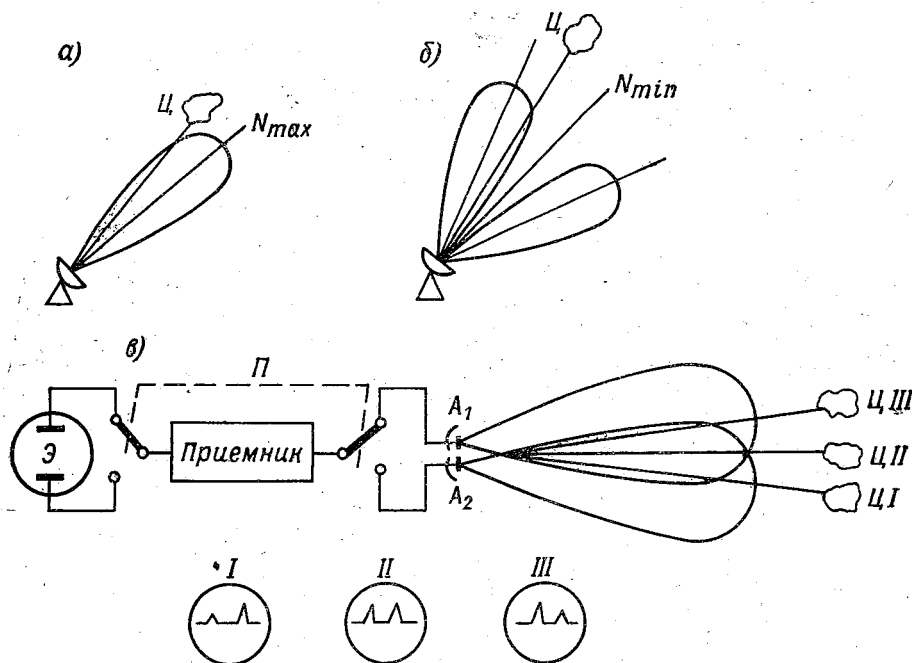


Рис. 8.8. Определение угловых координат (Ц — цель).

а — метод максимума (N_{max} — направление максимума); б — метод минимума (N_{min} — направление минимума); в — равносигнальный метод (I, II, III — направления на цель и соответствующие им изображения импульсов на экране Э индикатора).

при наличии отдельного канала дальности, так как в момент определения точного пеленга отраженный сигнал равен нулю и определение дальности по каналу угловых координат становится невозможным.

При **равносигнальном методе** направление на цель определяется по положению так называемого **равносигнального направления**, которое в простейшем случае может быть образовано при помощи двух одинаковых антенн, у которых оси диаграмм направленности расходятся под некоторым углом (рис. 8.8 в). Особенность равносигнального направления заключается в том,

что отраженные от цели сигналы имеют по равносигнальному направлению одинаковую мощность, независимо от того, энергией какой антенны облучена цель. Переключателем Π к приемнику поочередно подключается то одна, то другая антенна. Одновременно с переключением антенн выход приемника подключается то к одной, то к другой вертикально отклоняющей пластине индикатора, создавая на экране импульсы от цели. Если цель смещена относительно равносигнального направления, то амплитуды сигналов, принятых антеннами A_1 и A_2 , различны, что бывает отчетливо видно на индикаторе. Если же цель находится на равносигнальном направлении, то амплитуды сигналов одинаковы. После ручного совмещения равносигнального направления с направлением на цель, что достигается поворотом штурвала, связанного с механизмом вращения антенной системы, по шкале углов производят отсчет угловой координаты.

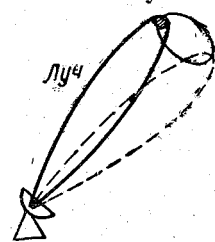


Рис. 8.9. Коническое развертывание луча.

При автоматическом сопровождении цели по угловым координатам необходимо, чтобы без помощи оператора электрическая ось антенной системы непрерывно совпадала с направлением на цель. Это обеспечивается системой автоматического сопровождения по направлению (АСН). Одна из наиболее распространенных систем АСН — это система с равносигнальной зоной, которая образуется вдоль оптической оси параболической антенны при так называемом коническом развертывании луча антенны (рис. 8.9). Такое развертывание можно получить, если, например, сместить облучатель из фокуса параболоида и вращать его вокруг оси. Если цель не находится в равносигнальной зоне, то амплитуда принятых отраженных сигналов непрерывно изменяется по закону синуса. Полученные амплитудно-модулированные сигналы после детектирования подаются на специальное устройство, с помощью которого вырабатываются напряжения, поступающие на приводные двигатели антенны. Огибающая амплитудно-модулированных сигналов называется *сигналом ошибки*. Когда цель находится на оси антенны, сигнал ошибки равен нулю. Во всех остальных случаях система АСН обеспечивает непрерывное совмещение равносигнального направления с направлением на цель. При этом по положению антенны можно судить об угловых координатах цели, передавая с помощью специальных механизмов значения углов поворота антенны на шкалы углов.

Обзор пространства¹ необходим для поиска цели. Так как антенны РЛС обладают направленностью, то обзор всего

¹ В литературе, главным образом иностранной, радиолокационный обзор пространства часто называется сканированием.

пространства должен производиться последовательно, путем перемещения луча во все точки пространства. РЛС поочередно принимает отраженные сигналы от всех целей заданного пространства, получая таким образом информацию о наличии целей и их координатах. На рис. 8.10 показаны наиболее распространенные методы радиолокационного обзора.

При *круговом обзоре* (рис. 8.10 а) луч вращается в горизонтальной плоскости на 360° . Диаграмма направленности в вертикальной плоскости должна быть достаточно широкой, чтобы за один оборот луча облучить все цели заданного пространства.

Разновидностью кругового обзора является *секторный обзор* (рис. 8.10 б), при котором луч антенны совершает движение в пределах заданного сектора по азимуту.

При *винтовом обзоре* (рис. 8.10 в), кроме вращения по азимуту, луч медленно перемещается и по углу места, в результате

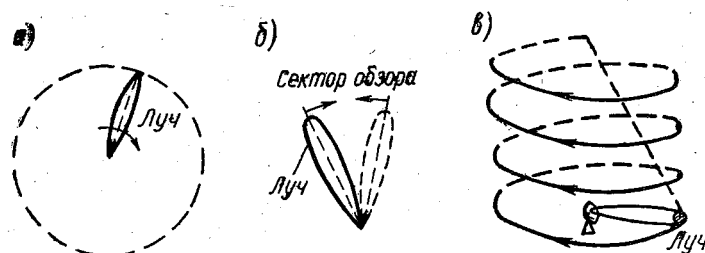


Рис. 8.10. Методы обзора пространства.

а — круговой; б — секторный; в — винтовой.

чего каждая точка луча описывает в пространстве винтовую линию. Когда луч достигает верхнего предела заданного сектора по углу места, антенна быстро возвращается в исходное положение и цикл обзора повторяется.

О *коническом обзоре* уже упоминалось (см. рис. 8.9). В этом случае луч описывает в пространстве коническую поверхность вокруг оптической оси сигнала. Конический обзор часто применяется не только для обеспечения работы системы автоматического сопровождения по направлению, но и для исследования углового сектора вокруг оси антенны. В современных радиолокаторах все виды обзора производятся автоматически.

Определение координат цели при использовании метода непрерывного излучения. Обнаружение цели при непрерывном излучении, так же как и при импульсном методе, происходит при приеме радиолокатором отраженных от цели сигналов. Однако при использовании этого метода к радиолокационной аппаратуре предъявляются дополнительные требования. При импульсном методе во время приема отраженных сигналов передатчик РЛС не работает и не создает помех приему. При непрерывном

режиме работы прием отраженных сигналов производится одновременно с излучением прямых сигналов значительной мощности, что требует применения отдельных антенн для приема и передачи, хорошей развязки между приемным и передающим трактами.

Дальность цели при непрерывном излучении определяется по времени запаздывания отраженного от цели сигнала относительно излучаемого. Трудность здесь заключается в выборе начала отсчета (при импульсном методе, как уже указывалось, за начало отсчета принимается момент времени, соответствующий началу зондирующего импульса).

Для получения точного времени запаздывания в системах с непрерывным излучением применяется частотная модуляция.

Вырабатываемые передатчиком ЧМ колебания излучаются в пространство и одновременно подаются на вход приемника. К моменту прихода отраженного сигнала частота передатчика уже другая, отличающаяся на величину, однозначно связанную с расстоянием до цели и обратно. В результате сложения колебаний этих двух частот образуются биения с частотой, пропорциональной дальности цели.

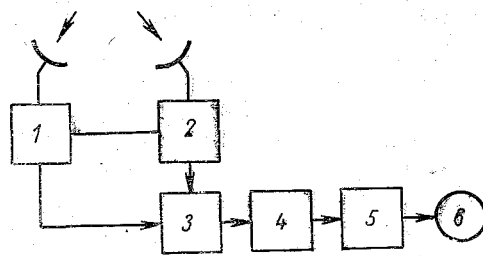


Рис. 8.11. Блок-схема доплеровского радиолокатора.

1 — передатчик; 2 — приемник; 3 — смеситель; 4 — усилитель доплеровских частот; 5 — частотомер; 6 — индикатор.

Если использовать немодулированные колебания, то за начало отсчета можно принять момент изменения частоты отраженного сигнала, вызванного тем, что цель движется и, следовательно, проявляется эффект Доплера¹. Радиолокаторы, основанные на использовании эффекта Доплера, позволяют, кроме координат цели, определять скорость ее движения.

Блок-схема простейшего доплеровского радиолокатора показана на рис. 8.11. Передатчик излучает колебания с частотой f_0 . Отраженные движущейся целью колебания имеют частоту $f_{отр}$:

$$f_{отр} = f_0 \pm F_d, \quad (8.10)$$

где F_d — так называемая доплеровская частота, ее знак зависит от направления движения цели.

¹ Эффект Доплера — известное из физики явление изменения частоты принимаемых колебаний вследствие перемещения источника или приемника колебаний относительно друг друга.

Принятые приемником колебания с частотой $f_{отр}$ одновременно с колебаниями с частотой f_0 подаются на смеситель, в результате чего получаются биения с частотой F_d , которые поступают в усилитель доплеровских частот и дальше на частотомер, индикатор которого проградуирован в значениях скорости.

Скорость движущейся цели при этом определяется по формуле

$$v_p = \frac{F_d \lambda}{2}, \quad (8.11)$$

где $v_p = v_d \cos \theta$ — радиальная составляющая скорости цели (θ — угол между направлением вектора скорости v_d и направлением на РЛС); λ — длина волны излучаемых колебаний.

Угловые координаты в системах с непрерывным излучением определяются с помощью антенн направленного действия теми же методами, что и в импульсных системах.

§ 8.3. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РЛС, РАБОТАЮЩИЕ ПО ПРИНЦИПУ АКТИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Системы для определения скорости и направления ветра

Измерение параметров ветра на разных высотах с помощью радиолокационных систем основано на определении координат наполненного водородом поднимающегося вверх шара, свободно переносимого потоками воздуха.

При этом в качестве радиолокационной цели используется подвешенное к шару хорошо отражающее радиоволны тело или радиопередатчик.

В первом случае наземный радиолокатор и отражающее тело образуют обычную активную радиолокационную систему, с помощью которой определяются угловые координаты и дальность цели.¹

Во втором случае применяются две разновидности передатчика: 1) непрерывно излучающий радиоволны, воспринимаемые наземной аппаратурой, которая работает только как приемная система, определяющая угловые координаты цели с помощью одного из описанных выше методов (пассивная радиолокация); 2) работающий в режиме ответчика, т. е. по зондирующему сигналу, излучаемому наземной РЛС, вырабатывающий ответный сигнал, по которому определяется дальность цели (активная радиолокация с активным ответом). Угловые координаты определяются путем пеленга передатчика, который, кроме выработки ответного сигнала, имеет еще и непрерывное излучение.

¹ В аэрологии этот метод называется методом радиопилота.

В качестве хорошо отражающего тела чаще всего используются *уголковые отражатели*, состоящие из жестко связанных между собой взаимно перпендикулярных плоских граней треугольной, секторной или прямоугольной формы (рис. 8.12). Особенностью этих отражателей является их способность отражать попадающую на них электромагнитную энергию в противоположном направлении, т. е. обратно к радиолокатору. Уголковые отражатели обычно изготавливаются из металлизированного картона, неотожженной алюминиевой фольги, металлической сетки или жести. Наиболее часто применяемый в метеорологии треугольный уголковый отражатель имеет размеры основания $a = 50 \div 100$ см. Эффективная площадь рассеяния σ такого отражателя вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}. \quad (8.12)$$

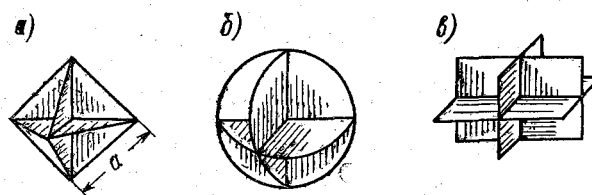


Рис. 8.12. Уголковые отражатели разной формы.
а — с треугольными гранями; б — с секторными гранями;
в — с прямоугольными гранями.

Система «Метеор» — РКЗ. Определение параметров ветра производится отечественной радиолокационной станцией РМС-1 («Метеор») ¹ и радиозондом РКЗ. Система радиолокатор — радиозонд представляет собой радиолокационно-телеметрическую систему, позволяющую измерять не только координаты цели (уголкового отражателя или радиозонда), но и определять по сигналам радиозонда температуру, давление и влажность воздуха на различных высотах.

Здесь рассмотрим только радиолокационную часть системы, а радиотелеметрическую опишем в главе 9. В то же время подчеркнем условность такого рассмотрения, так как ряд одних и тех же блоков РЛС и радиозонда выполняют функции обеих частей системы.

Станция РМС-1 имеет следующие основные технические характеристики: несущая частота 1780 Мгц ($\lambda \approx 17$ см); частота следования зондирующих импульсов 833 имп/сек; мощность зон-

¹ Станция РМС-1 выпускается в двух модификациях: «Метеор» (смонтированная в подвижном кузове) и «Метеорит» (монтируемая в помещении).

дирующего импульса 200 квт; длительность зондирующего импульса 0,8 мксек; чувствительность приемной системы $6,5 \times 10^{-13}$ вт; ширина диаграммы направленности по половинному спаду мощности $6,5 \pm 1^\circ$; диаметр зеркала параболической антенны 1,83 м.

Станция может работать в двух режимах: 1) сопровождения углового отражателя; 2) сопровождения радиозонда. В обоих режимах возможно автоматическое и ручное сопровождение.

Дальность автоматического сопровождения углового отражателя 25—30 км, дальность сопровождения радиозонда, снабженного передатчиком-ответчиком, до 150 км. Усовершенствованный вариант РЛС «Метеорит», разработанный в последние годы и уже внедряемый на сеть аэрологических станций, позволяет сопровождать угловой отражатель до 100—120 км, а радиозонд до 250—300 км.

При работе с угловым отражателем РМС-1 работает как обычная РЛС, измеряющая дальность с помощью стробирующего импульса, а угловые координаты — по методу равносигнальной зоны. Представляет интерес метод получения конического развертывания луча станции, в результате чего образуется сигнал ошибки. Мы уже упоминали (§ 8.2) о том, что смещения оси диаграммы направленности антенны можно достичь смещением центра облучателя относительно фокуса параболоида. В станции РМС-1 применен так называемый *несимметричный контррефлектор* (рис. 8.13). Контррефлектор выполнен в виде цилиндрической крышки, в боковой поверхности которой несимметрично оси прорезаны узкие щели. Когда контррефлектор неподвижен, электромагнитная энергия, излучаемая вибратором, распространяется как в сторону параболического отражателя, так и в сторону контррефлектора. Для частоты 1780 Мгц контррефлектор представляет собой колебательный контур, через щели которого энергия колебаний направляется к параболическому отражателю, где складывается с энергией вибратора, а так как щели расположены несимметрично, то это вызывает сдвиг максимума энергии излучения относительно геометрической оси параболоида. В результате вращения контррефлектора специальным двигателем ось диаграммы направленности описывает в пространстве коническую поверхность с частотой 24 гц, которая является, таким образом, и частотой сигнала ошибки.

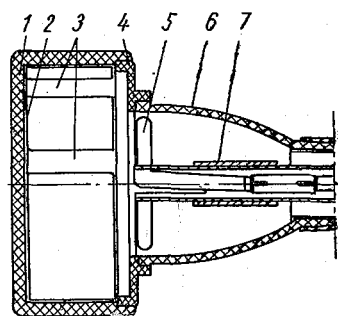


Рис. 8.13. Контррефлектор.

1 — пенопластовый колпак; 2 — цилиндрическая крышка; 3 — щели; 4 — полистироловая крышка; 5 — полуволновый вибратор; 6 — полистироловый колпак; 7 — четвертьволновый стакан.

При работе с радиозондом его сопровождение по угловым координатам осуществляется в результате приема и преобразования колебаний, излучаемых радиопередатчиком радиозонда. Измерение дальности радиозонда и его автоматическое сопровождение по дальности производится по сигналам, вырабатываемым в ответ на зондирующие запросные импульсы РЛС.

Ответный сигнал представляет собой кратковременную паузу (перерыв) в излучении несущей частоты. Эта пауза и играет роль отраженного сигнала, по которому определяется дальность цели. Более подробно работа передатчика радиозонда РКЗ рассматривается в главе 9.

«Малахит» — А-22. Второй отечественный системой для определения параметров ветра является система «Малахит» — А-22 — радиотеодолит «Малахит» с дальномерной приставкой и радиозонд А-22. Эта система также является радиолокационно-телеметрической. Ее основные характеристики такие: рабочая частота 216 МГц ($\lambda \approx 1,5$ м); частота повторения запросных импульсов 1070 имп/сек; мощность зондирующего импульса $P_{\text{и}} = 30$ кВт; длительность запросного импульса 2 мксек; чувствительность приемника 8 мкВ; ширина диаграммы направленности $18 \pm 2^\circ$.

Определение угловых координат производится по методу равносигнальной зоны, образуемой излучением двух пар антенн типа «волновой канал». На больших удалениях при угле места меньше 16° определение угловых координат затруднено, так как диаграмма направленности «ложится» на землю. При углах места от 16 до 75° можно определить дальность до значений 100 км. Вращение антенной системы ручное. Радиолокационной целью является передатчик-ответчик, входящий в комплект радиозонда А-22. При определении угловых координат производится пеленг по несущей частоте передатчика. При определении дальности используется ответный сигнал передатчика, проявляющийся на индикаторе дальности в виде сгустка импульсов повышенной яркости, передний фронт которого совмещается с электронной меткой дальности (темновой визир на экране трубки дальности).

Так как система «Малахит» — А-22 была разработана сравнительно давно и, как видно из характеристик, значительно уступает по важнейшим показателям системе «Метеор» — РКЗ, на сети она постепенно заменяется системой «Метеор» — РКЗ.

Другие системы. Одной из новых радиолокационных систем для измерения параметров ветра является так называемая радиоакустическая система. Сущность ее состоит в том, что вместо обычно выпускаемого радиозонда в атмосферу излучаются импульсы акустических волн, скорости и направления распространения которых измеряются с помощью радиолокатора, работающего на использовании эффекта Доплера. У такого радиолокатора, помимо обычных устройств для излучения и приема

электромагнитных колебаний, имеется устройство для излучения акустических (звуковых) колебаний. Акустические колебания создаются в среде, в которой они распространяются, периодические изменения (скачки) плотности. При попадании электромагнитной энергии на границы скачков плотности среды будет происходить ее рассеяние. Часть рассеянной энергии принимается приемником РЛС, и по разности частот посланного и принятого сигналов может быть определена скорость ветра, так как скорость распространения звука зависит от скорости перемещения воздушного потока, плотности и температуры воздуха.

Для определения скорости и направления ветра можно использовать метод радиолокационного слежения за легкими отражающими поверхностями (лентами), забрасываемыми на определенную высоту ракетами или снарядами.

Две последние системы пока не нашли массового применения, поэтому здесь они подробно не описываются.

Системы для определения характеристик облачности и осадков

Рассмотренные выше радиолокационные цели (угловые отражатели и радиопередатчики) являются обычными сплошными телами, имеющими конечные геометрические размеры, что позволяет точно рассчитывать их отражающие свойства.

Переходя к радиолокации чисто метеорологических целей, какими являются облака и осадки, следует учитывать, что они представляют собой цели множественные, т. е. состоящие из отдельных частиц.

Совокупность таких частиц (главным образом капель воды, градин, снежинок и ледяных кристаллов), сосредоточенных в определенном объеме, можно условно считать единой целью. Однако свойства этой цели довольно быстро изменяются, так как частицы непрерывно перемещаются относительно друг друга. Это приводит к тому, что мощность принимаемого РЛС отраженного сигнала может изменяться. При этом к приемной антенне РЛС приходит суммарный сигнал, отраженный от всех частиц, находящихся в объеме, ограниченном по ширине, высоте и дальности.

Выведем соотношение, позволяющее рассчитать этот объем. Воспользуемся для этого рис. 8.14, на котором условно изображена РЛС (в точке O), часть диаграммы направленности с телесным углом θ и отражающий объем, ограниченный по ширине и высоте диаграммой направленности, а по дальности — расстоянием h .

Пусть в некоторый момент времени задний фронт электромагнитной волны, образованной зондирующим импульсом, нахо-

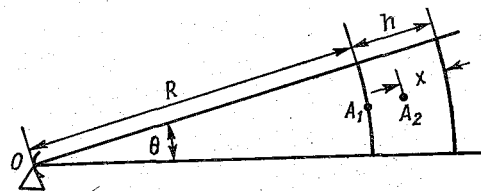
дится на расстоянии R от радиолокатора. Протяженность зондирующего импульса обозначим через $h = c\tau_n$, где τ_n — длительность импульса, а c — скорость распространения электромагнитной волны. Луч, отраженный от частицы облака в точке A_1 , находящейся на поверхности заднего фронта волны, достигнет радиолокатора через промежуток времени

$$t_1 = \frac{R}{c}, \quad (8.13a)$$

а от частицы в точке A_2 , находящейся на расстоянии x от переднего фронта волны, — через время

$$t_2 = \frac{R + c\tau_n - 2x}{c}. \quad (8.13b)$$

Импульсы, отраженные от частичек в точках A_1 и A_2 придут к радиолокатору одновременно, если будет выполняться условие $t_1 = t_2$, т. е.



$$\frac{R}{c} = \frac{R + c\tau_n - 2x}{c}. \quad (8.14a)$$

Из формулы (8.14a) можно получить выражение для x :

$$x = \frac{c\tau_n}{2} = \frac{h}{2}. \quad (8.14b)$$

Рис. 8.14. К выводу формулы отражающего объема.

Весь объем V , заполненный частицами, отраженные от которых импульсы одновременно достигают антенны радиолокатора, может быть подсчитан как объем цилиндра (ввиду малости угла θ), имеющего высоту $x = \frac{h}{2}$ и площадь основания, как показы-

вают расчеты, приближенно равную $\frac{\pi^2 R^2 \lambda^2}{16A}$,

$$V = \frac{h}{2} \frac{\pi^2 R^2 \lambda^2}{16A} = \frac{\pi^2 R^2 h \lambda^2}{32A}. \quad (8.15a)$$

Для параболической антенны $\left(A = \frac{3}{2} A_p\right)$

$$V = \frac{\pi^2 R^2 h \lambda^2}{32 \frac{3}{2} A_p} = \frac{\pi^2 R^2 h \lambda^2}{48 A_p}. \quad (8.15b)$$

Полагая, что средняя мощность волны, отраженной от частиц на данном расстоянии, равна сумме мощностей волн, отраженных от всех частиц, уравнение (8.8) можно записать в виде

$$P_A = \frac{PA_p^2 \sum_i \sigma_i}{9\pi\lambda^2 R^4}, \quad (8.16)$$

где σ_i — эффективная площадь рассеяния частицы.

Электромагнитная волна, проходя через облака и осадки, возбуждает в каждой частице колебания. При этом часть энергии этой волны идет на нагрев частицы, а часть излучается в пространство. Частота излучаемых волн равна частоте проходящих колебаний.

Для получения расчетных формул исходят из предположения, что частицы имеют сферическую форму. При этом принципиально важным является соотношение между геометрическими размерами капли и длиной электромагнитной волны.

В общем случае зависимость эффективной площади рассеяния сферической частицы от радиуса частицы и длины волны может быть подсчитана на основании закона дифракции электромагнитных волн по довольно сложной формуле, выведенной американским ученым Ми.

Формулами Ми, которые из-за громоздкости здесь не приводятся, приходится пользоваться, если размеры частиц соизмеримы или превышают длину радиоволны.

Если же радиус капли значительно меньше, чем длина волны ($r \leq 0,05\lambda$), происходит так называемое *рассеяние Релея*¹. Эффективная площадь рассеяния сферической частицы в этом случае может быть подсчитана по формуле

$$\sigma = \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2, \quad (8.17)$$

где r — радиус частицы; λ — длина волны; m — показатель преломления вещества частицы (воды или льда).

При $2r \approx 0,08\lambda$ значение σ , вычисленное по формуле (8.17), уменьшается на 20%, а при $2r \approx 0,2\lambda$ — на 50%.

Если имеется N рассеивающих частиц в единице объема луча, а отраженный сигнал выходит из объема V в одно и то же время, но с различными фазами, то эффективная площадь рассеяния будет

$$\sigma = V \sum_i N \sigma_i = \frac{128\pi^5 V}{3\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \sum_i N r_i^6, \quad (8.18)$$

[вместо σ_i подставлено ее значение из формулы (8.17)].

¹ Релей (1842—1919 гг.) — английский физик, один из крупнейших ученых в области волновой и молекулярной оптики.

Определим теперь с учетом всего вышеизложенного среднюю мощность отраженной от метеорологической цели радиоволны, пришедшей к радиолокатору. Для этого в отношение (8.16) подставим значение σ , вычисленное по формуле (8.18), где объем V взят по формуле (8.15б)

$$P_A = \frac{PA_p^2}{9\pi\lambda^2 R^4} \frac{128\pi^5}{3\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \frac{\pi^2 R^2 h \lambda^2}{48A_p} \sum N r^6 = \\ = \frac{0,1PA_p h \pi^6}{R^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \sum N r^6. \quad (8.19)$$

Формула (8.19) носит название *основного уравнения радиолокации для облаков и осадков*.

Уравнение (8.19) позволяет сделать несколько принципиальных выводов, основные из которых следующие:

1) для данной длины волны обратно рассеянная мощность прямо пропорциональна сумме радиусов капель в шестой степени;

2) для данного радиуса капли мощность отраженного сигнала пропорциональна рабочей длине волны РЛС в четвертой степени;

3) мощность сигнала, отраженного от облаков или зоны осадков, прямо пропорциональна пространственной протяженности зондирующего импульса и эффективной площади приемной антенны;

4) мощность отраженного сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния от РЛС до исследуемого объема.

Кроме того, при радиолокации облаков и осадков следует учитывать ряд факторов, которые исключались при выводе формул данного раздела, но которые имеют место. К таким факторам относятся: 1) наличие затухания, т. е. ослабления мощности сигналов вследствие их поглощения при прохождении в реальных атмосферных условиях (при этом ослабление возрастает при переходе к более коротким волнам); 2) отражающий объем может не вмещать всей зоны облаков или осадков; 3) форма частиц в большом числе случаев отличается от правильной сферической; 4) ледяные сфероиды малых размеров отражают лучше, чем водяные такого же размера, однако крупные льдинки (градины) дают значительно большее отражение, чем такие же по размерам частицы дождя; 5) отражательная способность ледяных кристаллов, начинающих таять (т. е. покрываться тонкой водяной пленкой), резко увеличивается.

При выборе характеристик РЛС для определения того или иного метеорологического явления учитывают влияние всех перечисленных факторов. Многие факторы оказывают противоположное влияние. Например, чтобы обеспечить распознавание мелких капель желательно применять короткие волны, хотя они сильнее ослабляются.

В результате многочисленных исследований был сделан вывод о том, что наиболее целесообразными для различных видов метеорологических наблюдений являются РЛС, работающие на длинах волн порядка 1, 3, 5, 10 и 20 см.

Детальный анализ всех закономерностей, влияющих на выбор конкретных величин длин волн, мощностей, длительностей импульсов, режимов работы и других характеристик РЛС весьма сложен и является предметом новой отрасли радиолокации — радиолокационной метеорологии (радиометеорологии). В настоящей же главе мы рассмотрим только особенности радиоаппаратуры, применяемой для радиолокационного исследования облаков и осадков.

Метеорологическая радиолокационная станция МРЛ-1. Отечественная РЛС типа МРЛ-1 предназначена для получения информации о типах облачных систем и связанных с ними опасных явлениях (грозах, ливнях), их горизонтальной и вертикальной протяженностях, тенденции развития, о скорости и направлении перемещения в радиусе до 300 км. Кроме того, в радиусе до 30 км можно получить более подробную информацию о формах облаков, их границах и облачных прослойках, а также о характере явлений, связанных с облаками.

Методические основы использования МРЛ разработаны в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова под руководством Е. М. Сальмана.

Согласно этой методике, метеорологические наблюдения осуществляются при следующих предположениях: 1) рассеяние электромагнитной энергии частицами происходит по закону Релея; 2) ослабления сигналов нет; 3) луч антенны полностью заполнен рассеивающими частицами.

При указанных предположениях, допустимость которых подтверждена большим количеством опытов, пользуются формулой (8.19), левая и правая часть которой разделена на величину $P_{\text{ш}}$ (мощность собственных шумов приемника РЛС):

$$\frac{P_A}{P_{\text{ш}}} = \Pi_m \frac{Z}{R^2}, \quad (8.20)$$

где $\Pi_m = \frac{0,1 P A_p h \pi^6 K}{P_{\text{ш}} \lambda^4}$ — метеорологический потенциал, зависящий только от параметров РЛС (K — коэффициент полезного действия волнового тракта); $Z = \sum_i N r^6 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2$ — отража-

емость удельного объема облака, зависящая только от его микроструктуры (величину Z называют интенсивностью радиоэхо).

Сущность работы МРЛ-1 заключается в определении вели-

чины Z различных облаков путем измерения значений $\frac{P_A}{P_{\text{ш}}}$ и R при известной величине $P_{\text{м}}$.

Отражаемость обычно выражается в логарифмах величины Z [$\text{мм}^6/\text{м}^3$], отношение $\frac{P_A}{P_{\text{ш}}}$ — в децибелах $\left(10 \lg \frac{P_A}{P_{\text{ш}}}\right)$, метеорологический потенциал вычисляется заранее как $10 \lg P_{\text{м}} \left[\frac{\partial \delta / \text{км}^2}{\text{мм}^6/\text{м}^3} \right]$.

Для правильного определения величины Z в процессе работы РЛС необходим контроль за постоянством величины $P_{\text{м}}$, зависящей от параметров P_A и $P_{\text{ш}}$.

МРЛ-1 имеет ряд особенностей, свойственных метеорологическому назначению станции, основные из которых следующие.

1. В радиолокаторе использованы два различных канала с длинами волн $\lambda_{\text{I}}=0,86$ см (канал I) и $\lambda_{\text{II}}=3,2$ см (канал II). Для получения информации о недождящих облаках, находящихся на малых расстояниях, применение канала I с меньшей длиной волны предпочтительнее. Для получения информации об облаках с осадками и зон выпадения осадков эффективнее использовать канал II.

Импульсная мощность $P_{\text{иI}}=65$ кВт, $P_{\text{иII}}=210$ кВт.

2. Антенной МРЛ-1 (диаметр раскрыва 3 м) формируются узкие и симметричные в обеих плоскостях диаграммы направленности, обеспечивающие высокую разрешающую способность по угловым координатам. Ширина диаграммы направленности 13 мин (канал I) и 44 мин (канал II).

3. В станции применена универсальная система индикации, обеспечивающая наглядное представление окружающей обстановки; она включает индикатор кругового обзора (ИКО) для наблюдения в горизонтальной плоскости, индикатор дальность—высота (ИДВ) для наблюдения в вертикальной плоскости и индикатор дальности (ИД) для количественных измерений интенсивности радиоэхо.

4. В схему станции включены специальные устройства: измеритель мощности отраженного сигнала; накопитель, позволяющий регистрировать слабые сигналы, уровень которых ниже чувствительности приемника; так называемая система изо—эхо, позволяющая на одном экране представлять отраженные сигналы, соответствующие разной интенсивности.

5. Для документирования картин отраженных сигналов имеется специальная фоторегистрирующая аппаратура, позволяющая осуществить покадровую съемку экранов индикаторов (фотограммы) и экспонирование изображения на движущуюся пленку (нефограммы).

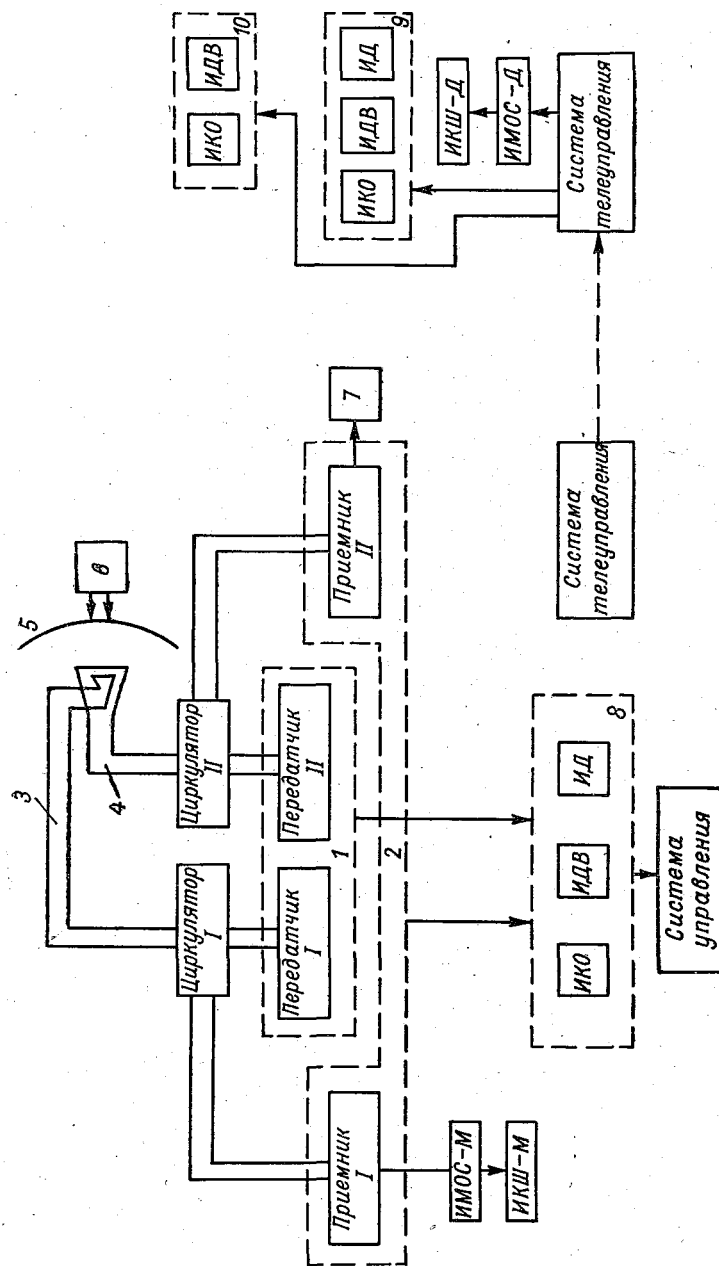


Рис. 8.15. Блок-схема МРД-1.

Аппаратная кабина (слева), выносная аппаратура (справа): 1 — радиопередающее устройство, 2 — радиоприемное устройство, 3 — волновод и рупорный облучатель канала I, 4 — волновод и рупорный облучатель канала II, 5 — параболитический отражатель, 6 — блок управления антенной, 7 — накопитель, 8 — блок индикаторов, 9, 10 — выносные пульты с индикаторами.

Рассмотрим назначение и работу основных блоков и узлов станции (рис. 8.15).

Антенна представляет собой параболический отражатель и сдвоенный двухдиапазонный облучатель (рис. 8.16). Малый рупор встроен в большой рупор так, что их раскрывы находятся в одной плоскости, а центры излучения совпадают. Сдвоенный двухдиапазонный облучатель установлен относительно отража-

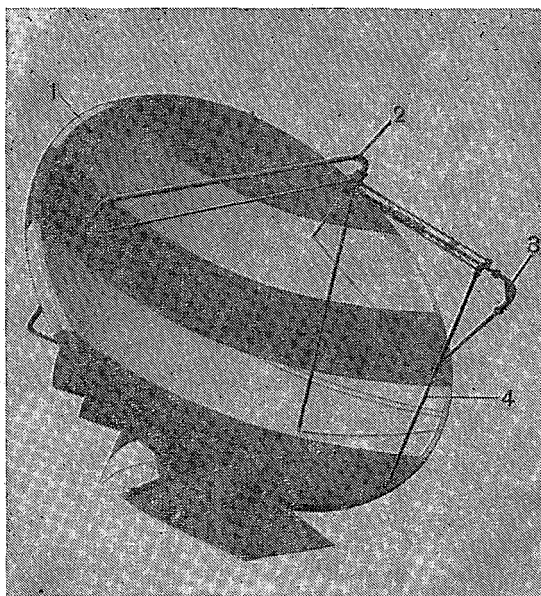


Рис. 8.16. Антенна радиолокатора МРЛ-1.

1 — отражатель; 2, 3 — волноводные тракты и рупорный облучатель каналов I и II; 4 — держатели волноводов. По правилам, установленным для аппаратуры, размещаемой в аэропортах, отражатель (как и вся РЛС) окрашен чередующимися полосами красного и белого цвета.

теля таким образом, что центры излучения обоих рупоров находятся в фокусе параболоида (фокусное расстояние 132 см). С целью повышения электрической прочности, а также предотвращения попадания в волноводный тракт пыли и влаги передающая часть тракта герметизирована и в ней системой наддува поддерживается избыточное давление.

Управление движением антенны по азимуту (вращение) и углу места (качение) производится с пульта управления. Механизмы вращения и качания антенны связаны с датчиками азимута и угла места, сигналы от которых поступают на ИКО и ИДВ.

С помощью блока электропривода антенной системы могут быть осуществлены следующие режимы работы: а) автоматическое вращение антенны по азимуту; б) автоматическое качание (сканирование) антенны по углу места; в) программный режим управления антенной; г) позиционный режим («двороты»).

Передающее устройство включает два передатчика. Режимы их работы приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Номер канала	Режим	Длительность импульса, мксек	Частота повторения, имп/сек
I	Основной	0,45	600
II	Первый	1	600
	Второй	2	300
	Третий	0,8	1125

Каждое из передающих устройств состоит из подмодулятора, модулятора, магнетронного генератора и источника питания.

Аппаратура встроенного допускового контроля предназначена для непрерывного контроля заданного режима работы передающих устройств каналов I и II и позволяет измерять:

1. Импульсную мощность (излучаемую). Измерение производится волноводной измерительной секцией со стрелочными индикаторами.

2. Напряжение высоковольтного выпрямителя (магнитоэлектрические индикаторы с добавочными сопротивлениями).

3. Средний ток генератора (магнитоэлектрические индикаторы).

Приемное устройство состоит из двух приемников, предназначенных для преобразования и усиления принятых антенной сигналов до величины, необходимой для нормальной работы индикаторных устройств.

Чувствительность приемника канала I равна $3,2 \cdot 10^{-12}$ вт, канала II — $1,6 \cdot 10^{-13}$ вт; полосы пропускания по промежуточной частоте соответственно 3 и 1,5 Мгц, амплитуда выходного сигнала по обоим каналам 10 в.

Приемники собраны по обычным схемам радиолокационных приемников, в приемнике канала II в усилителе высокой частоты применена лампа бегущей волны (ЛБВ).

Накопительное устройство (накопитель) предназначено для обнаружения метеорологических целей, отраженный от которых сигнал существенно ниже собственных шумов при-

емника канала II. Принцип работы накопителя основан на том, что улучшение отношения сигнал/шум производится путем увеличения времени наблюдения метеорологических целей, относительно низкая скорость перемещения которых позволяет делать это без слежения. В результате сигналы от цели с помощью специальных устройств «накапливаются» и регистрируются на ленте самописца.

Индикаторные устройства, как было указано выше, включают ИКО, ИДВ и ИД. Индикаторы ИКО и ИД в принципе не отличаются от рассмотренных обычных индикаторов. ИКО имеет три фиксированных масштаба дальности: 25 км (с масштабными метками 5 км), 100 км (с основными масштабными метками 10 км и опорными 50 км), 300 км (с основными масштабными метками 50 км и опорными 100 км), а также азимутальные метки через каждые 10° (основные) и 30° (опорные) угла поворота антенны по азимуту.

Индикатор дальности имеет несколько масштабов дальности: от 0,5 до 300 км и масштабные метки от 0,1 до 20 км. ИД имеет две развертки, на которых могут рассматриваться отраженные сигналы в одном из двух режимов: 1) в режиме наблюдения на обеих развертках отраженных сигналов каналов I или II, причем на первой развертке отраженные сигналы любого участка второй развертки могут рассматриваться в более крупном масштабе; 2) в режиме одновременного наблюдения на первой развертке отраженных сигналов канала I, на второй — отраженных сигналов канала II. ИД позволяет выполнять и ряд других функций: он, например, используется в качестве осциллографа при ремонте и настройке РЛС.

ИДВ является специфическим индикатором, предназначенным для получения на экране ЭЛТ радиолокационного изображения в вертикальной плоскости в координатах дальность—высота при любом азимуте. Индикатор имеет яркостную отметку от цели. Электронный луч в таких индикаторах развертывается синхронно с вращением антенны по углу места, и его положение на экране соответствует вертикальному углу антенны. Радиоэхо изображается в координатной системе. Ось абсцисс — удаление по горизонтали, ось ординат — высота. Индикатор ИДВ особенно удобен для исследования вертикального строения и эволюции облаков и осадков. ИДВ имеет четыре фиксированных масштаба дальности: 5, 10, 20 и 40 км с масштабными метками соответственно 1, 2, 4 и 8 км. Имеются и метки высоты: 0,5; 1; 2 и 4 км. Местоположение метеорологических целей в вертикальной плоскости (от -1 до 105° по углу места) определяется по их расположению на экране ЭЛТ относительно масштабных меток дальности и высоты, нанесенных на шкалу ИДВ.

Примеры изображения метеорологических целей на экранах перечисленных трех типов индикаторов показаны на рис. 8.17.

Система управления предназначена для управления и контроля работы основных блоков и устройств станций.

Измеритель мощности отраженных сигналов (ИМОС) предназначен для измерения мощности отраженных сигналов при частоте следования зондирующих импульсов 300 и 600 *имп/сек.*

Измеритель коэффициента шума (ИКШ) измеряет коэффициент шума приемных устройств каналов I и II, что необходимо для контроля чувствительности приемников.

Кроме перечисленных устройств, в состав МРЛ-1 входит также выносная аппаратура, которую можно установить на расстоянии до 1 км от места расположения радиолокатора; управление этой аппаратуры дистанционное. Выносная аппаратура включает все три индикатора и систему управления.

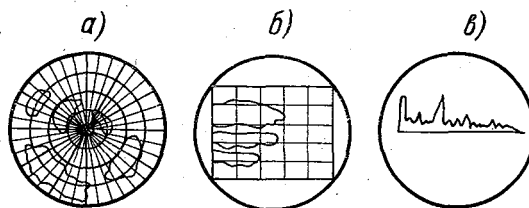


Рис. 8.17. Изображение радиоэхо от метеорологических целей на экранах.

а) ИКО; б) ИДВ; в) ИД.

На рис. 8.18 показано размещение аппаратуры метеорологического радиолокатора МРЛ-1.

Метеорологические наблюдения с помощью радиолокатора МРЛ-1 состоят из двух этапов: 1) оперативного получения первичной радиолокационной информации; 2) анализа первичной информации и представления ее в виде, удобном для метеорологического использования. Кратко рассмотрим особенности этих этапов.

Получение первичной радиолокационной информации. Из уравнения (8.19) следует, что мощность отраженного сигнала прямо пропорциональна радиусу капли в шестой степени и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Поэтому, например, мелкокапельные облачные образования обнаруживаются лишь на малых расстояниях. Кроме того, по мере удаления от РЛС, все большие участки пространства, расположенные ниже линии радиогоризонта, оказываются затененными землей. Обнаруженными могут быть только те атмосферные образования, которые находятся выше этой линии.

В связи с этим процесс получения первичной информации разбивается на два цикла: а) обзор «ближней» зоны (дальность до 30 км), в пределах которой обнаруживаются практически все

облака; б) обзор «дальней» зоны (до 300 км), где обнаруживаются преимущественно осадки и грозы. В первом случае обзор осуществляется по методу вертикальных разрезов по любому азимуту, во втором — по методу последовательных круговых разрезов пространства по разным углам возвышения антенны. В результате двух циклов наблюдений получают комплекс радиолокационных данных. Первый цикл обычно называют получением радиолокационных характеристик облаков, а второй — получением радиолокационных характеристик облачных систем.

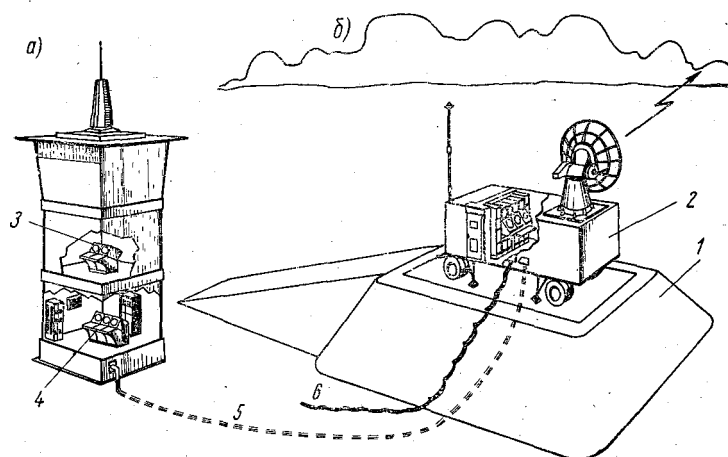


Рис. 8.18. Упрощенная схема размещения основных узлов МРЛ-1 в аэропорту.

а — командно-диспетчерский пункт; б — место установки аппаратурной кабины РЛС. 1 — эстакада с бетонированной площадкой, 2 — аппаратурная кабина, 3 — пульт руководителя полетов с индикаторами ИКО и ИДВ, 4 — пульт метеоролога с индикаторами ИКО, ИДВ и ИД, 5 — кабель дистанционной связи, 6 — кабель, идущий от системы электропитания.

В первом цикле получают следующую информацию:

1) качественные картины вертикального распределения радиоэхо на ИДВ в заданном азимуте; 2) абсолютные высоты верхней и нижней границ отдельных областей радиоэхо; 3) абсолютные величины отражаемости (в логарифмах Z) в вертикальной плоскости.

Рассмотрим методику получения перечисленных видов первичной радиолокационной информации.

Вертикальное распределение радиоэхо получают путем проведения вертикальных радиолокационных разрезов при одновременном использовании каналов I и II станции. Выбор азимутов, по которым производятся вертикальные разрезы, определяется особенностями горизонтального распределения радиоэхо по четырем основным направлениям (румбам). Для выбора ука-

занных азимутов в режиме кругового вращения антенны на экране ИКО (включенного на масштаб 100 км) при угле места, при котором наблюдаются наибольшие площади радиоэхо, в каждом румбе выбирается один из азимутов, в направлении которого радиоэхо имеет наибольшую радиальную протяженность на расстояниях до 40 км.

Разрезы выполняются в режиме автоматического качания антенны по углу места (в пределах от -1 до $+105^\circ$) на выбранном азимуте. При этом на ИДВ наблюдаются видеосигналы обоих каналов (в масштабе 20/40 км, т. е. по высоте 20 км, по дальности 40 км). Картина с ИДВ вручную переносится на прозрачное табло, а затем на специальный бланк.

Границы облаков измеряются непосредственно по картине радиоэхо, наблюдаемой на ИДВ при вертикальном сканировании антенны. Для измерения выбираются наиболее высоко расположенные области радиоэхо; их высоты определяются с точностью до $1/4$ метки шкалы экрана при совместной работе на каналах I и II (в крайнем случае только на канале II). Высоту нижней границы облаков более точно можно измерить при использовании только канала I способом *наклонного зондирования облака*. Сущность этого способа заключается в том, что сначала на экране ИКО выбирается азимут, затем вручную устанавливается соответствующий угол места ϵ и по индикатору дальности с помощью меток дальности определяется с возможно большей точностью наклонная дальность переднего фронта радиоэхо. Высота нижней границы облаков рассчитывается по формуле

$$H = R \sin \epsilon. \quad (8.21)$$

Документирование данных о границах облаков производится на специальном прозрачном табло, где указываются местоположения областей, в которых измерялись абсолютные высоты верхней и нижней границ в декаметрах.

Данные о *распределении отражаемости в вертикальной плоскости* получаются в результате количественных измерений величин $\frac{P_A}{P_{\text{ш}}}$ на канале II с последующим пересчетом этих величин в значения $\lg Z$ по формуле

$$\lg Z = 0,1 \left(\frac{P_A}{P_{\text{ш}}} - P_{\text{м}} + 20 \lg R \right), \quad (8.22)$$

где $\frac{P_A}{P_{\text{ш}}}$ и $P_{\text{м}}$ выражены в децибелах, R — в километрах.

На практике обычно удобнее пользоваться номограммой, рассчитанной по формуле (8.22). При определении величины $\lg Z$ следует учитывать значение метеорологического потенциала $P_{\text{м}}$

в данный момент времени, пользуясь заранее вычисленной зависимостью P_m от непрерывно измеряемых в процессе работы на МРЛ-1 значений коэффициента шума, чувствительности приемника и излучаемой мощности. Абсолютная величина P_m в зависимости от значений перечисленных выше факторов колеблется в пределах от $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^5$ (в децибелах от 43 до 56). Измерение $\lg Z$ можно производить в одном из двух режимов: а) работа с системой изо—эхо; б) работа с системой ИМОС (измеритель мощности отраженного сигнала).

Работа с системой изо—эхо состоит в последовательном уменьшении уровня изо—эхо через 5 дБ, начиная с полного исчезновения радиоэхо до уровня изо—эхо, равного 0 дБ на ИДВ при непрерывном сканировании антенны. Система изо—эхо построена так, что позволяет «затенить» на экране индикатора обла-

сти радиоэхо со значением $\frac{P_A}{P_{ш}}$ выше определенного, заранее устанавливаемого уровня. После изменения каждой ступени изо—эхо на прозрачном табло наносятся контуры наблюдаемой картины радиоэхо, эти контуры являются изолиниями величины $\frac{P_A}{P_{ш}}$.

При работе с системой ИМОС значения $\lg Z$ получают на расстояниях, где радиоэхо имеет наибольшую высоту.

Для получения вертикального профиля $\lg Z$ измеряют величины $\frac{P_A}{P_{ш}}$ на высотах 1, 2, 3, 4 км и т. д., а затем их пересчитывают в значения $\lg Z$.

Измерение величин $\frac{P_A}{P_{ш}}$ производится с помощью предварительно откалиброванного прибора при неподвижной антенне, устанавливаемой под фиксированными углами возвышения, которые при данном расстоянии до метеорологической цели соответствуют определенным высотам.

Документирование данных осуществляется нанесением величин $\frac{P_A}{P_{ш}}$ на стандартных высотах на прозрачное табло. Примеры различных видов первичной информации, получаемой при исследовании радиолокационных характеристик облаков, показаны на рис. 8.19¹.

¹ Этот и последующие примеры представления радиолокационной информации взяты из разработанных в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова методических указаний.

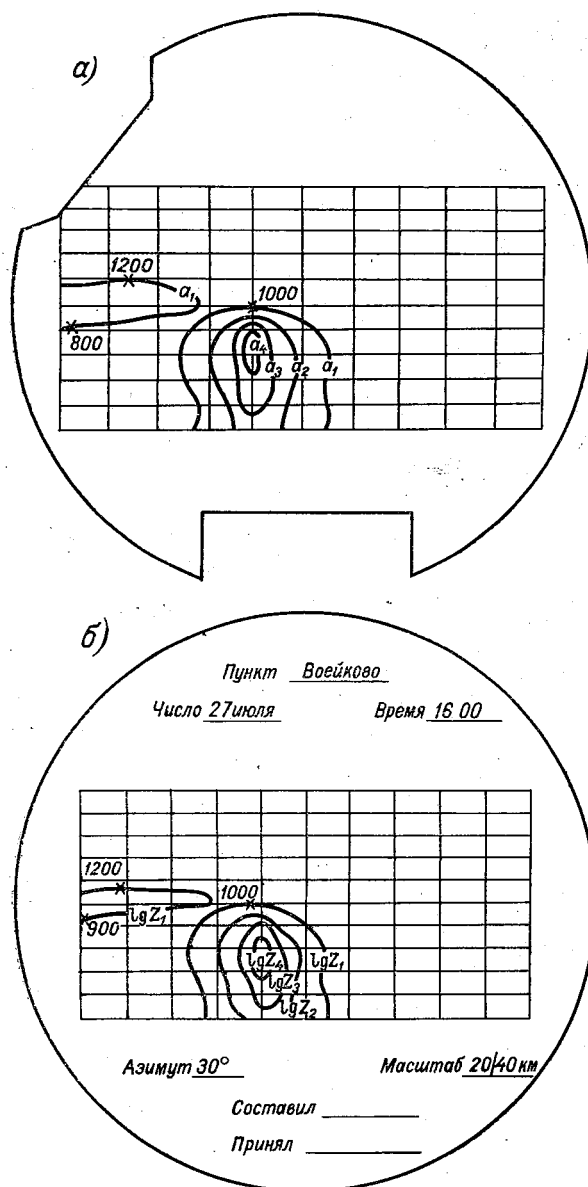


Рис. 8.19. Виды первичной радиолокационной информации при исследовании облаков (изолинии отражаемости при разных положениях аттенюатора).

а — на прозрачном табло; б — на бланке. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ — значения отношения $\frac{P_A}{P_{ш}}$; $\lg Z_1, \lg Z_2, \lg Z_3, \lg Z_4$ — значения отражаемости (в логарифмах) на высотах 1, 2, 3, 4 км и т. д. Крестиком обозначены верхние и нижние границы облаков, а число около него — высота этих границ в декаметрах.

Рассмотрим методику извлечения первичной информации при втором цикле — получении радиолокационных характеристик облачных систем.

При проведении радиолокационных наблюдений за облачными системами в дальней зоне первичной информацией является: 1) качественная картина горизонтального распределения радиоэхо на ИКО под углом возвышения антенны, соответствующим наибольшим площадям наблюдаемого радиоэхо; 2) абсолютные величины максимальных высот радиоэхо в различных ячейках пространства, занятого радиоэхо; 3) абсолютные величины отражаемости $\lg Z$ в различных ячейках пространства, занятого радиоэхо, на одном или двух характерных уровнях.

Рассмотрим методику получения указанных видов первичной информации в дальней зоне.

Картина горизонтального распределения радиоэхо получается на ИКО (масштаб 300 км) при круговом вращении антенны со скоростью 6 об/мин. При этом устанавливается оптимальный угол возвышения антенны (обычно в пределах от 0 до 3°), при котором на ИКО наблюдаются наибольшие площади радиоэхо. Полученная картина переносится на прозрачное табло.

Максимальные высоты радиоэхо в ячейках пространства определяются путем последовательных измерений величин H [км] в каждой из ячеек пространства размером 30×30 км, занятого радиоэхо. Разбивка поля на квадраты осуществляется с помощью прозрачного табло с координатной сеткой, которое накладывается на экран ИКО. Для определения значений H измеряют в каждой ячейке максимальный угол возвышения антенны $\epsilon_{i \max}$, при котором отмечается первоначальное появление радиоэхо при движении антенны сверху вниз. Определение абсолютных величин максимальных высот радиоэхо в каждой ячейке производится по таблице, составленной на основании соотношения

$$H = R_i \sin \epsilon_{i \max} + K R_i^2, \quad (8.23)$$

где R_i — удаление ячейки в километрах; K — коэффициент, учитывающий подъем луча антенны над землей из-за ее кривизны. Представляется первичная радиолокационная информация в этом случае в виде так называемой *цифровой карты высот*, т. е. специального бланка с координатной сеткой, на которой изображена картина радиоэхо и в каждой ячейке проставлены значения величины H в километрах.

Отражаемость в ячейках пространства определяется на одной-двух заранее выбранных высотах. Абсолютные величины отражаемости определяются путем последовательных определений значений $\frac{P_A}{P_{\text{ш}}}$ в ячейках и последующего пересчета их в $\lg Z$

с учетом метеорологического потенциала Π_m и расстояния R_i до соответствующей ячейки. Пересчет делается по формуле (8.22) или по таблицам, составленным на основании этой формулы. Измерения производятся при непрерывно вращающейся по азимуту со скоростью 6 об/мин антенне и последовательно устанавливаемых углах ε_i (начиная с малых углов) в двух масштабах:

300 и 100 км. Измерения абсолютных величин $\frac{P_A}{P_{ш}}$ в ячейках

осуществляются с помощью системы изо — эхо на ИКО. Вначале устанавливают такой уровень изо — эхо, при котором исчезает радиоэхо в соответствующей ячейке, а затем снижают уровень изо — эхо через 5 дБ, каждый раз отмечая в ячейке появление радиоэхо.

Форма представления первичной радиолокационной информации об облачных системах показана на рис. 8.20.

Анализ первичной радиолокационной информации и представление ее в виде, удобном для метеорологического использования. Этот этап разбивается на три подэтапа: а) анализ первичной информации об облачных системах; б) анализ первичной информации об облаках; в) представление результатов анализа в виде, удобном для метеорологического использования.

Анализ первичной информации об облачных системах включает определение типа облачной системы, оценку тенденции развития, скорости и направления перемещения облачных систем, а также локализацию опасных явлений.

Тип облачной системы определяется на основании анализа картин горизонтального распределения радиоэхо, максимальных высот радиоэхо и отражаемостей в ячейках пространства.

Тенденция развития облачных систем оценивается по временным изменениям радиолокационных признаков (изменения отражаемости и высоты радиоэхо).

За скоростью и направлением перемещения облачных систем можно следить по ИКО при выбранном угле возвышения антенны. Точки, нанесенные в два последовательных промежутка времени, соединяются, и по полученному вектору определяется направление движения (азимут).

Локализацию (т. е. определение местоположения) опасных явлений, связанных с облачными системами, можно определить, пользуясь критерием грозоопасности Y :

$$Y = \frac{H_{\max} \lg Z_1}{|\lg Z_1 - \lg Z_2|}, \quad (8.24)$$

где $H_{\max}$ — высота верхней границы радиоэхо; $\lg Z_1$ и $\lg Z_2$ — величины отражаемости облаков на уровнях H_1 и H_2 соответственно.

Высота уровня H_1 обычно совпадает с высотой нулевой изотермы, а высота уровня H_2 выбирается на 2 км больше H_1 . Критерий Y можно не рассчитывать, если величина отражаемости на одном уровне является однозначным признаком грозы. Для боль-

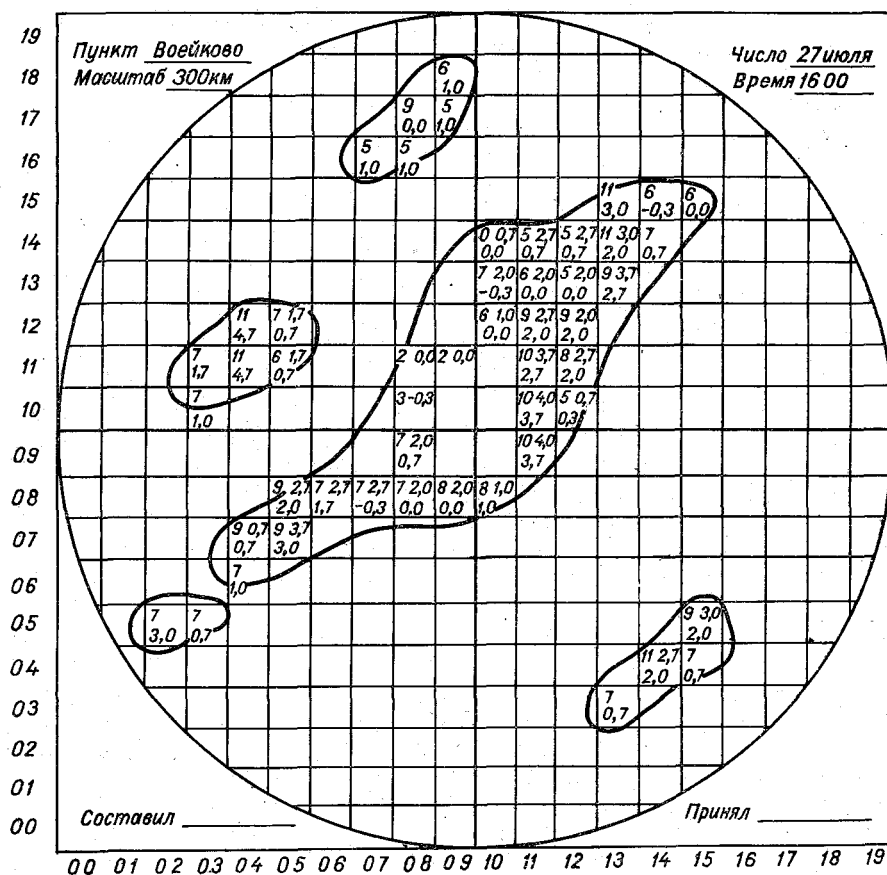


Рис. 8.20. Форма представления первичной радиолокационной информации при исследовании облачных систем (внешние контуры радиоэхо, наблюдаемого на ИКО под оптимальным углом места).

Цифры в правом верхнем углу каждого квадрата — абсолютная максимальная высота радиоэхо в километрах; в левом верхнем и нижнем углах — величины радиоэхо на двух заранее выбранных уровнях.

шей части Европейской территории СССР, например, такими критериями могут служить соотношения $\lg Z_2 \geq 3$ или $\lg Z_1 \geq 4$.

Перечисленные выше критерии были получены в результате анализа и обработки большого статистического материала. Эти критерии сведены в особые таблицы, которыми обычно пользуются при работе на МРЛ-1. Одна из таблиц, например, связы-

Таблица 8.2

Признаки первичной радиолокационной информации			Тип облачной системы	Критерии тенденции развития системы	Способ определения скорости и направления перемещения системы
характер горизонтального распределения радиоэхо	характер распределения высот верхней границы радиоэхо	характер распределения радиоэхо на стандартных уровнях (в летний период выше высоты нулевой изотермы на 2 км, в зимний на высоте 1,5–2 км)			
Радиоэхо на ИКО в масштабах 100 и 300 км под оптимальным углом возвышения антенны имеет вид большой области без резко очерченных границ (летом и зимой)	Однородное поле высот на равных дальностях с монотонным понижением $H_{\max}$ по мере увеличения дальности. Диапазон $H_{\max}$ от 3 до 8 км (летом) и от 1 до 6 км (зимой)	Однородное поле отражаемости в диапазоне величин $\lg Z$ от -1 до 1 (летом) и от -2 до 1 (зимой)	As—Ns	Временная изменчивость отражаемости	По изменению положения передней или задней линий радиоэхо
Радиоэхо на ИКО в масштабах 100 и 300 км под оптимальным углом возвышения антенны в летний период имеет вид хаотически разбросанных ячеек или небольших полос	Неоднородное поле высот радиоэхо с разбросом величин $H_{\max}$ в диапазоне от 5 до 13 км	Неоднородное поле отражаемости с разбросом величин $\lg Z$ от 1 до 6	Cu cong.—Cb	Временная изменчивость: а) высот верхней границы радиоэхо; б) отражаемости; в) критерия безопасности грозоопасности	По изменению положения центра тяжести фигуры, соответствующей площади радиоэхо

вает значение критерия Y с вероятностью появления гроз и ливней. Из этой таблицы следует, что величины критерия Y от 1 до 15 связаны с вероятностями появления гроз от 3 до 100% и ливней от 100 до 1%.

Другая таблица дает взаимосвязь между типом облачной системы и характером первичной радиолокационной информации. Приводимая в качестве примера табл. 8.2 является частью общей таблицы, которой пользуются в оперативной работе.

Анализ первичной информации об облаках включает определение форм и границ облаков и характера явлений, связанных с облаками.

Формы и границы облаков определяются на основании анализа качественной картины радиоэхо облаков на ИДВ, абсолютных значений отражаемости и особенностей вертикального распределения отражаемости в облаках (вертикальный профиль $\lg Z$). На основании обработки большого количества наблюдений были выработаны критерии, связывающие указанные признаки и типы облаков.

Получены типичные картины радиоэхо, однозначно связанные с определенным типом облаков (рис. 8.21). Если реальные картины отличаются от этих типичных картин, то, кроме картины на ИДВ, приходится пользоваться и значениями $\lg Z$ и H .

При определении явлений, связанных с облаками, пользуются следующими признаками: а) если радиоэхо дождевых облаков простирается до земли, это свидетельствует о выпадении из облаков осадков; б) для разделения грозовых и негрозовых ливней пользуются критерием грозоопасности, рассчитанным по формуле (8.24).

Представление результатов анализа осуществляется на специальном бланке, из которого видны все особенности и характеристики облаков ближней зоны и облачных систем. Пример такого бланка, полностью подготовленного для передачи потребителю информации, показан на рис. 8.22.

Метеорологическая радиолокационная станция МРЛ-2. Опыт использования радиолокаторов МРЛ-1 позволил сделать ряд практических выводов, результатом которых явилось создание радиолокатора МРЛ-2. Технические характеристики этого радиолокатора в основном аналогичны характеристикам МРЛ-1, однако некоторые из них несколько отличаются.

Радиолокатор МРЛ-2 выполнен в стационарном варианте, размещается он в специальном помещении, на крыше которого устанавливается антенная колонка, защищенная радиопрозрачным укрытием. Так как МРЛ-2 является массовым радиолокатором, предназначенным для оперативной работы, из состава его аппаратуры для упрощения исключен ряд устройств. К таким устройствам относятся ИМОС и накопитель. Кроме того, из состава станции исключена аппаратура канала I. Однако



Рис. 8.21. Примеры картин радиозо на ИДВ и соответствующие им типы облаков.
 а) высоко-кучевые облака As: 1 — летом, 2 — зимой; б) — конвективные облака Cu cong.: 3 — летом, 4 — зимой.

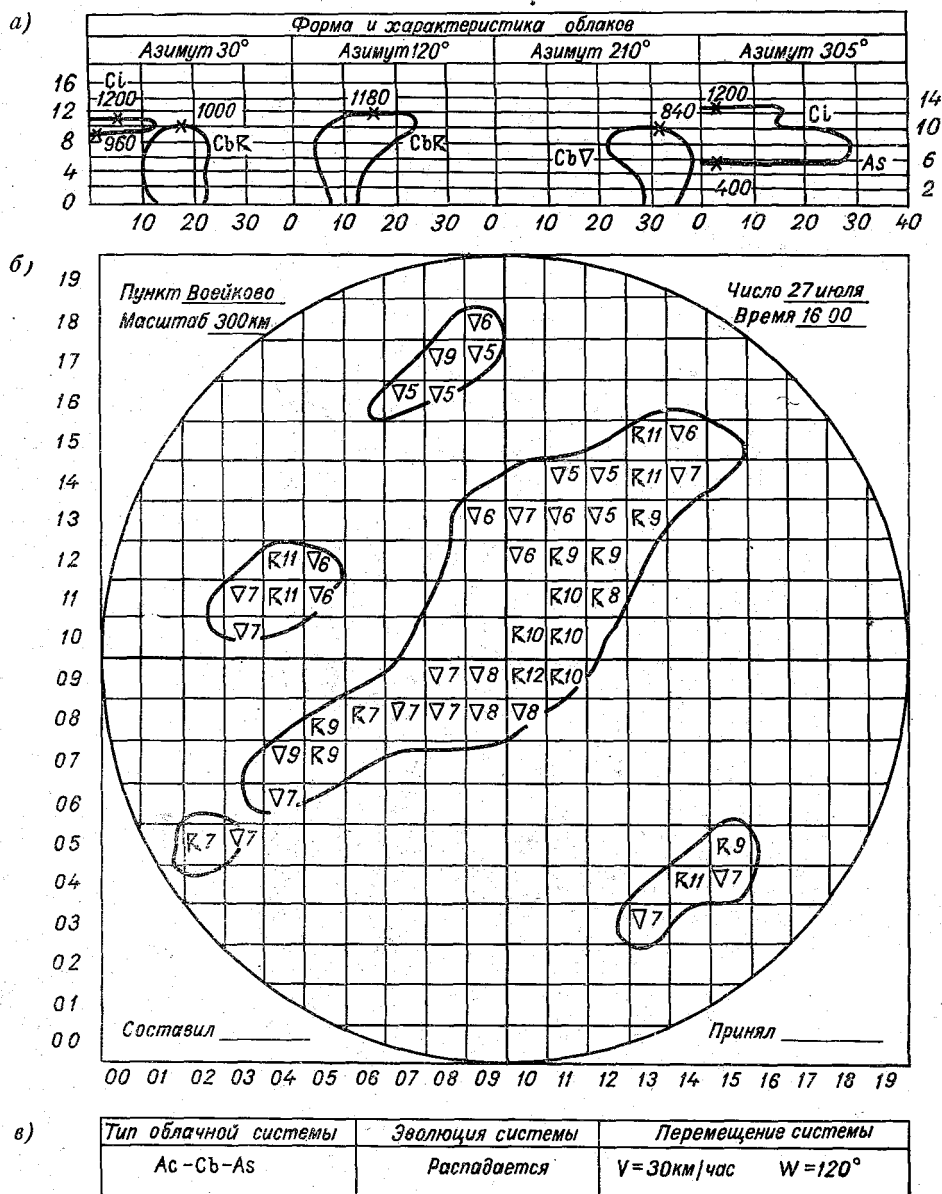


Рис. 8.22. Форма представления метеорологической информации.

а — бланк-карта ближней зоны (контуры радиоэхо; высоты верхней и нижней границ облаков; типы облаков; явления, связанные с облаками: K — гроза, V — ливень; азимут околнуренного радиоэхо); б — бланк-карта дальней зоны (контуры радиоэхо при оптимальном угле возвышения антенны; явления погоды в ячейках пространства: K — гроза, V — ливень, без знака — обложные осадки и облака без осадков; высота облаков в километрах в ячейках пространства, занятых грозами и ливнями); в — таблица для обозначения типа облачной системы, ее эволюции и перемещения.

МРЛ-2 по сравнению с радиолокатором МРЛ-1 имеет ряд существенных усовершенствований, главные из которых следующие: введены блок программного управления антенной и блок коррекции отраженного сигнала на квадрат расстояния до цели.

Блок программного управления антенной обеспечивает автоматический режим в одной из следующих двух программ: 1) антенна обеспечивает винтовое развертывание луча со скоростью 6 об/мин и одновременный подъем по углу места примерно на 23° с шагом $0,72^\circ$ (32 скачка); $2,88^\circ$

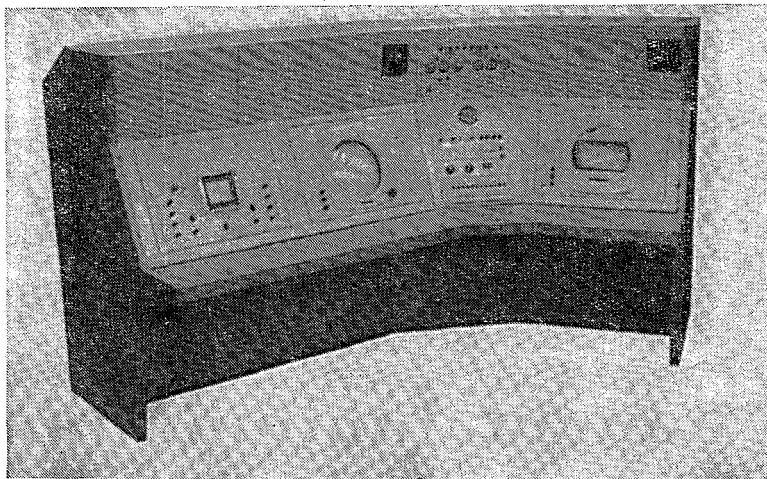


Рис. 8.23. Пульт управления радиолокатора МРЛ-2.

(8 скачков); $5,76^\circ$ (4 скачка) или $11,52^\circ$ (2 скачка); 2) антенна обеспечивает непрерывное сканирование луча по углу места от -1° до 105° и одновременное перемещение его в плоскости азимута с одним из выбранных шагов (значения шагов и количества скачков такие же, как и в первой программе).

Блок коррекции отраженного сигнала на квадрат расстояния обеспечивает более оперативное определение значений отражаемости, так как при расчетах по формуле (8.22) отпадает необходимость вычислять значение $20 \lg R$. Это достигается тем, что применен усилитель промежуточной частоты с логарифмической характеристикой.

Кроме того, в аппаратуру МРЛ-2 введен ряд конструктивных усовершенствований, направленных на повышение надежности радиолокатора и удобства его эксплуатации. Внешний

вид пульта управления с индикаторами МРЛ-2 показан на рис. 8.23.

Перспективы применения метеорологических радиолокаторов. По плану комплексной автоматизации Гидрометеорологической службы СССР предусмотрено создание сети радиолокационного штормового оповещения. При этом будет достигнуто освещение облачной обстановки на больших территориях, соизмеримых с масштабами синоптических процессов. Плотность размещения сети МРЛ определяется эффективным радиусом действия одной станции (порядка 150 км), в пределах которого обеспечивается надежное обнаружение основных форм облаков и сопровождающих их явлений погоды.

При этом будут широко использоваться автоматические средства для обработки и передачи радиолокационной инфор-

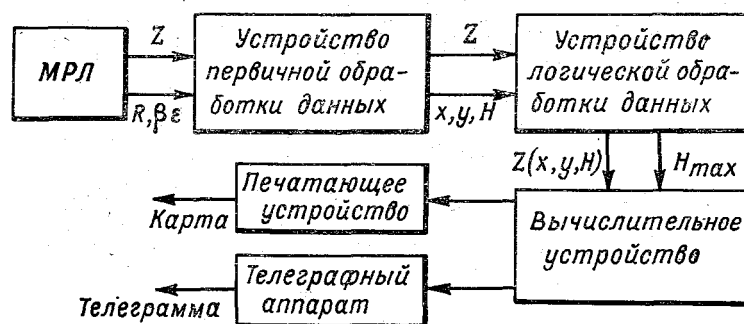


Рис. 8.24. Блок-схема аппаратуры для автоматической обработки радиолокационных данных.

мации. Уже сейчас создается аппаратура для автоматического получения радиолокационных метеорологических данных.

На рис. 8.24 показана упрощенная блок-схема аппаратуры автоматической обработки радиолокационных данных в радиусе действия одной РЛС.

В схему МРЛ вводятся специальные датчики, которые вырабатывают напряжения, пропорциональные значениям отражаемости Z и сферическим координатам: дальности R и угловым положениям антенны ϵ , β . В устройстве первичной обработки вырабатываются напряжения, пропорциональные прямоугольным координатам x , y и H . В устройстве логической обработки и вычислительном устройстве автоматически производится разделение всего обозреваемого пространства на 1000 ячеек, определение максимальных высот H в каждой ячейке и выделение максимальных значений отражаемости Z (в логарифмах) для каждой ячейки на нескольких уровнях, т. е. выполняются операции, аналогичные тем, которые в аппаратуре МРЛ-1 выполнялись вручную.

В состав цифрового вычислительного устройства входит специальный блок управления выводом данных, обеспечивающий вывод информации на телеграфный аппарат или на печатающее устройство, обеспечивающее печать на специальных бланках (так называемых цифровых картах) значений Z и H .

Результаты передаются в центр обработки по проводам или радиоканалам.

Автоматическая обработка данных значительно быстрее, чем ручная.

Сведения о радиолокационном измерении осадков. Мы уже упоминали о том, что с помощью радиолокаторов можно обнаруживать зоны осадков. Для большого числа задач необходимо знать также их интенсивность и количество. Однако определение концентрации и размеров капель по известной средней мощности радиоэхо или поглощению на пути распространения радиоволн оказывается очень трудным. Поэтому задачу радиолокационного измерения интенсивности и количества осадков пока нельзя считать окончательно решенной, хотя проводится очень много исследований и предложено несколько методов. Суть всех методов сводится к нахождению критериев, связывающих параметры радиоэхо с параметрами осадков.

В результате исследований, проведенных советскими и зарубежными учеными, удалось установить, что для вычисления интенсивности осадков можно пользоваться соотношением

$$Z = A I^b \quad (8.25)$$

где Z — отражаемость; I — интенсивность осадков; A и b — коэффициенты, зависящие от условий измерения и микроструктуры осадков.

К сожалению, оказывается, что для одного дождя формула (8.25) дает вполне удовлетворительную точность, а для другого приводит к заметным погрешностям. Исследования, проведенные Центральной аэрологической обсерваторией с участием Государственного гидрологического института и Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова под руководством В. В. Костарева, А. А. Черникова, В. А. Урываева и др., показали, что результаты получаются удовлетворительными, если использовать РЛС, работающую одновременно на двух длинах волн: одной в миллиметровом диапазоне, другой в сантиметровом.

Опыты, проведенные с помощью радиолокатора МРЛ-1 (с некоторыми конструктивными изменениями), показали, что если для волны одной длины связь параметров отраженного сигнала с характеристиками дождя не является устойчивой, то

для двух волн, особенности распространения которых в условиях дождя существенно различны, эта связь довольно устойчива и позволяет с удовлетворительной точностью судить об интенсивности и количестве осадков.

Применение РЛС для определения градоопасных зон. В этой области достигнуты существенные успехи. Было доказано, что сухие градины отражают в направлении радиолокатора во много раз большую энергию, чем такие же по размерам капли дождя. Когда же частицы града покрыты слоем воды, то они отражают энергию так же, как если бы они состояли полностью из воды. Эти явления объясняются тем, что сухой лед слабо поглощает электромагнитные волны и градина имеет свойства линзы, т. е. падающая на нее энергия фокусируется на противоположной стороне сферы и отражается обратно к радиолокатору. Когда лед начинает таять, условия отражения резко изменяются, так как вода поглощает электромагнитную энергию гораздо сильнее, чем лед. В результате, если градина покрыта даже очень тонкой пленкой воды, значительная часть падающей энергии будет поглощена еще до того, как произойдет фокусирование и рассеяние энергии от выпуклого переднего края градины.

Эти явления и легли в основу при радиолокационных наблюдениях за градоопасными облаками. По изменению отражаемости судят о фазах развития града, о наличии опасности его выпадения, и эта информация служит единственным критерием, определяющим координаты градоопасных облаков и момент начала активных воздействий на град.

Так же как и при радиолокационном измерении жидких осадков, наиболее точным здесь оказывается метод использования двух- и даже трехволновых РЛС.

В качестве примера приведем разработанный в Высогогорном геофизическом институте экспериментальный радиолокатор «Град-2». С его помощью определяются с достаточной точностью размеры градин, их концентрация в облаке и некоторые другие характеристики. Технические данные радиолокационной станции «Град-2» такие: рабочие длины волн $\lambda_1 = 3$ см и $\lambda_2 = 10$ см, длительности импульсов $\tau_1 = 1,0$ мксек и $\tau_2 = 0,8$ мксек, частоты повторения импульсов $F_1 = F_2 = 1250$ гц, мощность в импульсе $P_{и1} = 50$ квт и $P_{и2} = 250$ квт, чувствительность приемных устройств $P_{пр1} = P_{пр2} = 10^{-12}$ вт.

В станции имеется блок фоторегистратора с выносным индикатором кругового обзора, который дает возможность одновременно фиксировать общую картину на ИКО, время и координаты радиоэхо, а также мощность отраженного сигнала в децибелах.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом проводятся исследовательские и конструкторские работы, имеющие

целью создать РЛС, с помощью которой с высокой надежностью и достоверностью можно было бы определять характеристики градоопасных и градоносных облаков.

Некоторые специальные метеорологические радиолокаторы

Применение радиолокационных средств для исследования неоднородностей атмосферы. Выше рассказано о применении радиолокаторов для определения таких неоднородностей атмосферы, как облачные системы и зоны осадков. Известно применение радиолокаторов и для исследования других неоднородностей атмосферы, к которым относятся турбулентные движения частиц облака или воздуха, резкие изменения температуры и влажности, т. е. тех атмосферных образований, на границах которых имеет место заметное изменение диэлектрической проницаемости.

Следует отметить, что отражения от диэлектрических неоднородностей чаще всего наблюдаются днем как при безоблачной погоде, так и при наличии облаков. Такие неоднородности называют невидимыми объектами или «ангелами». В результате проведенных исследований пока еще не удалось точно связать характер отраженного от ангелов сигнала с их природой, однако полученные результаты позволяют надеяться, что отражение электромагнитных волн от «ясного» неба позволит определять важные для метеорологов характеристики атмосферы.

Применение радиолокационных средств для исследования ледников. В 1958 г. советскими и американскими полярными исследователями наблюдалось интересное явление: в момент посадки самолетов на ледниковые аэродромы Антарктиды их радиовысотометры показывали высоту 100—120 м. Этот факт был объяснен тем, что индикатор высотометра регистрировал сигнал, отраженный от основания ледника. После этого в нашей стране и за рубежом были проведены исследования с целью создать радиолокатор для измерения толщины ледника.

При исследованиях применялась импульсная РЛС, антенна которой располагалась непосредственно на льду или была поднята над его поверхностью. Излученные импульсы отражались от границы воздух—ледник, от плотностных и структурных неоднородностей, находящихся в толще ледника, а также от границы ледник—ложе.

При этом о толщине льда судят по интервалу времени от момента излучения до приема, а о физических свойствах и характере рельефа можно судить по изменению амплитуды и формы принятого сигнала.

Тот факт, что воздух и снег имеют близкие значения диэлектрических и магнитных проницаемостей, сделал возможным производить исследования ледников через слой воздуха, т. е. дистанционно, например, с самолетов.

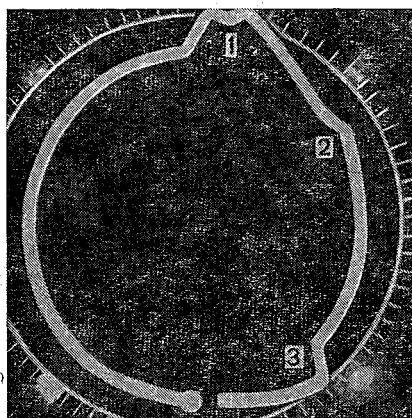
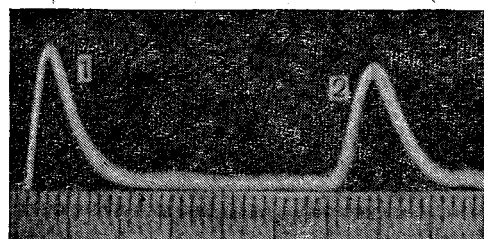


Рис. 8.25. Фотографии индикаторов РЛС, работающих в режиме исследования ледников.

Вверху — излученный (1) и отраженный (2) импульсы на ИД РЛС «Гюйс 1М4», толщина льда 310,8 м (цена большого деления шкалы 51,8 м); внизу — отраженные сигналы на ИД радиовысотомера РВ-10 (1 — от неоднородностей поверхностного слоя, 2 — от глубинной неоднородности, 3 — от ложа ледника).

Советскими антарктическими экспедициями в последние годы широко применяются радиолокаторы для измерения толщины и других характеристик ледников. Приведем технические данные двух из этих радиолокаторов.

Радиолокатор «Гюйс 1М4» имеет рабочую частоту $f = 213 \text{ Мгц}$, мощность в импульсе $P_{\text{и}} = 5 \times 10^4 \text{ вт}$, длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 2,5 \text{ мксек}$, частоту следования импульсов $F = 100 \text{ гц}$,

чувствительность приемника $P_{\text{пр}} = 5 \times 10^{-14}$ вт и полосу пропускания приемного тракта $\Delta f = 600$ кГц.

Излучение и прием радиолокационных сигналов осуществлялись одной антенной, состоящей из четырех вибраторов с рефлекторами.

Импульсный авиационный высотомер РВ-10 имеет рабочую частоту $f = 400$ МГц, мощность в импульсе $P_{\text{и}} = 5 \div 7$ вт, длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 0,3$ мксек, чувствительность приемного устройства $P_{\text{пр}} = 7 \cdot 10^{-13}$ вт. В качестве антенны применялись полуволновые вибраторы.

С помощью этих двух радиолокаторов были проведены параллельные измерения как непосредственно над поверхностью ледника (для этого антенны устанавливались на движущихся по льду санях на высоте 4—5 м над поверхностью ледника), так и с самолетов (для этого аппарата устанавливалась на самолете ИЛ-14).

Толщина льда определялась по формуле

$$h = \frac{c_{\text{л}} t}{2}, \quad (8.26)$$

где h — толщина в метрах; $c_{\text{л}} = 167,0$ м/сек — скорость распространения электромагнитных волн в толще льда; t — интервал времени в микросекундах между началом излучения и моментом прихода импульса, отраженного от ложа ледника. Формы отраженных сигналов показаны на рис. 8.25. Погрешность измерений не превышала $\pm (25 \div 30)$ м, что для толщин льда порядка нескольких сотен метров вполне приемлемо.

Светолокационная аппаратура для измерения высоты нижней границы облаков. В некоторых случаях оказывается удобным в качестве распространяющихся до цели и обратно сигналов использовать импульсы света. Аппаратура, основанная на этом принципе, называется светолокационной и является самостоятельной разновидностью радиолокационной техники. В метеорологической практике применяется основанный на методе светолокации измеритель высоты нижней границы облаков (ИВО). Он используется до максимальных высот порядка 2 км, когда применение радиолокаторов становится невыгодным вследствие их громоздкости и сравнительно невысокой точности на данных высотах.

ИВО может работать при отсутствии тумана, сильных осадков и дымки, погрешность измерения высоты облаков возрастает от величины $\pm (0,1H + 5)$ м в диапазоне 50—150 м до $\pm (0,05H + 50)$ м в диапазоне свыше 1500 м (H — истинное значение высоты нижней границы облаков).

Световые импульсы создаются специальной импульсной лампой типа ИСШ 100-3 с частотой повторения 20 имп/сек.

Ввиду того что зондирующий и отраженный импульсы являются световыми, функции приемной и передающей антенн выполняют параболические зеркальные отражатели, в фокусе которых помещены импульсная лампа (в блоке передатчика) и фотоумножитель (в блоке приемника).

Оптические элементы передатчика (зеркало и импульсная лампа) и приемника (зеркало и фотоумножитель) укреплены на карданных подвесах, обеспечивающих их самоустойчивку таким образом, что зондирующие световые импульсы посылаются вертикально вверх, а приемник принимает отраженные

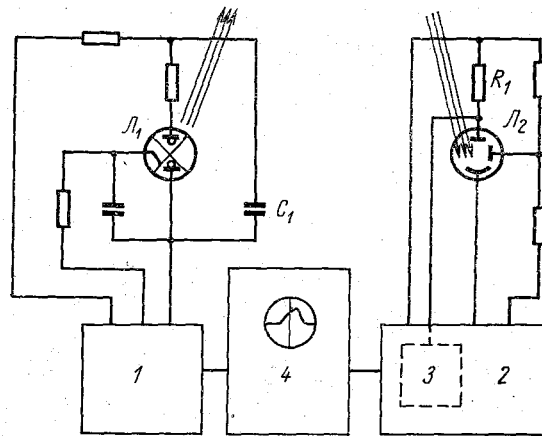


Рис. 8.26. Блок-схема ИВО.

1 — передатчик; 2 — приемник; 3 — двухкаскадный усилитель, 4 — отметчик.

от облака сигналы и фокусирует их с помощью зеркала на фотоумножитель.

На рис. 8.26 показана схема, поясняющая принцип работы прибора. Излучение светового импульса происходит при разряде конденсатора C_1 через импульсную лампу L_1 . Конденсатор заряжается от находящегося в пульте управления высоковольтного выпрямителя. Электрический импульс, соответствующий по времени излученному световому, передается в отметчик для запуска развертки.

Отраженные от облаков световые импульсы попадают на фотоумножитель L_2 , на сопротивлении нагрузки которого R_1 выделяются импульсы напряжения, подаваемые на двухкаскадный усилитель с высокочастотной коррекцией. Этот усилитель находится в блоке приемника.

Усиленные импульсы попадают в блок отметчика и могут наблюдаться на экране электроннолучевой трубки. Индикатор

собиран по потенциометрической схеме с электронной темновой меткой, причем ось потенциометра связана с указателем шкалы высот, проградуированной в метрах.

§ 8.4. ПРИМЕНЕНИЕ РЛС, РАБОТАЮЩИХ ПО ПРИНЦИПУ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Мы уже упоминали о пассивной радиолокации как о системе извлечения информации, использующей прием электромагнитной энергии, излучаемой целью, и о разделении этих систем на две основные разновидности: 1) системы, использующие искусственное излучение, осуществляемое специальным радиопередатчиком, установленным на цели; 2) системы, использующие естественное излучение, которое обусловлено тепловыми процессами, происходящими в самой цели.

В отличие от систем радиодальнометрии, пассивные радиолокационные системы обычно используются в качестве радиопеленгационных систем (системы первой разновидности) и систем для определения физических характеристик цели (системы второй разновидности). Рассмотрим эти системы подробнее.

Системы, использующие искусственное излучение. В гидрометеорологической практике использован ряд систем, основанных на пеленгации радиопередатчиков, установленных на движущихся целях. При этом, как указывалось выше, определяется только пеленг (направление) на цель, а расстояние до цели (дальность) можно найти, используя специальные способы, которые поясняются ниже, при рассмотрении конкретных систем.

Система для определения скорости и направления ветра. Упомянутая выше система «Малахит»—А-22 в ряде случаев используется в качестве пассивной радиопеленгационной системы. В тех образцах аппаратуры «Малахит», где не установлена дальномерная приставка, установка используется только как радиопеленгатор. Пеленгация цели осуществляется путем приема колебаний, излучаемых специальным радиоблоком, подвешенным к радиозонду. Угловые координаты радиоблока определяются методом равноточной зоны. Определение дальности цели возможно благодаря тому, что система «Малахит»—А-22 является телеметрической, т. е. передающей сведения о температуре, давлении и влажности в месте нахождения цели (радиозонда). Зная давление, можно определить высоту (по гипсометрической формуле), а затем и дальность.

Система для определения координат движения льдин. Для систематического изучения дрейфа льда и морских течений в Арктическом бассейне применяются специальные передающие автоматические радиостанции. Такие станции

устанавливаются на дрейфующем льду и периодически, в заранее назначенное время, посылают сигналы, принимаемые береговыми пеленгаторными станциями. Автоматические радиостанции, работающие в описываемой системе, называются радиовехами.

Наиболее распространены радиовехи, разработанные Ю. К. Алексеевым. Радиовеха Алексеева — это специальная радиостанция, автоматически работающая по заранее заданной программе. Радиостанции работают на волнах в диапазоне 530—625 м. Они снабжены вызывным устройством, содержащим радиоприемник, что дает возможность включить радиовеху путем посылки специального сигнала с самолета, корабля или береговой станции. Направление на радиовеху определяется радиопеленгаторами с направленными антеннами по методу равносигнальной зоны. Для фиксирования координат льдины направление на радиовеху определяется двумя пеленгаторами, расстояние между которыми известно.¹

Системы, использующие естественное излучение. Примерами таких систем являются системы пеленгации грозовых очагов и радиотеплолокационные системы.

Системы пеленгации грозовых очагов. Работа этой системы основана на приеме электромагнитных импульсов, возникающих в основном в результате молниевых разрядов.

Прием этих импульсов осуществляется с помощью нескольких радиопеленгаторов, называемых *радиогониометрами*. Основные части радиогониометра — это две взаимно перпендикулярные рамочные антенны, присоединенные через одинаковые по своим характеристикам приемники к отклоняющим пластинам электроннолучевой трубки (рис. 8.27 а), на экране которой под воздействием импульса образуется светящаяся прямая линия (след). Положение следа изменяется в зависимости от направления (азимута) приходящего импульса, вызванного молниевым разрядом.

Определение места грозового разряда (его координат) при помощи радиогониометров возможно только в том случае, если отсчитываемые пеленги относятся к одному и тому же разряду. Поэтому отсчеты пеленгов должны быть одновременными на всех пунктах. Это осуществляется следующим образом. Один из пунктов является ведущим, он имеет аппаратуру для осуществления передачи по радио или по проводам командных сигналов, по которым наблюдатели других пунктов отсчиты-

¹ Мы уже упоминали о том, что некоторые из рассматриваемых в данной главе систем являются радиолокационно-телеметрическими (системы «Метер» — РКЗ, «Малахит» — А-22). Такой же системой является и радиовеха, на которой устанавливается специальный метеорометр. Телеметрические особенности этих систем описываются в главе 9.

вают те пеленги, которые совпадают по времени с пеленгами, определенными ведущим.

С помощью рис. 8.27 б поясняется принцип работы сети из трех гониометров). Антенны (рис. 8.27 в) представляют из себя рамки, обмотки которых помещены в кольцевом незамкнутом экране.

Приемники радиогониометра — это резонансные четырехкаскадные усилители с полосовыми фильтрами. Один усили-

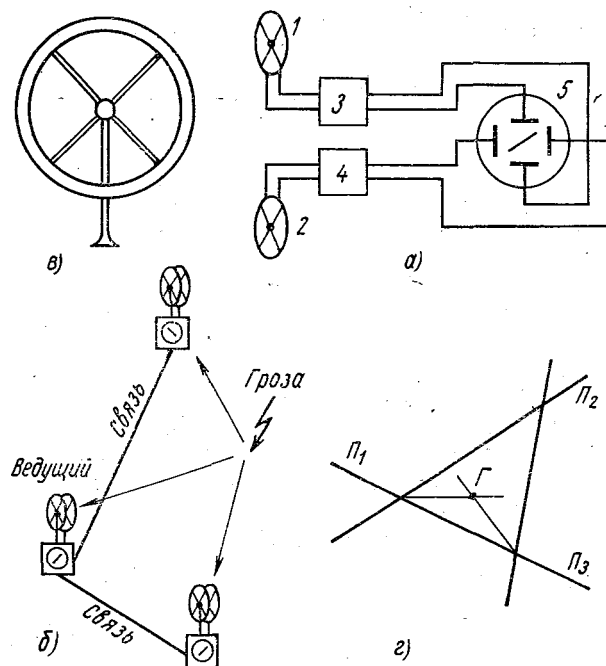


Рис. 8.27. К пояснению работы гониометров.

а) упрощенная блок-схема гониометра: 1, 2 — антенны север—юг и запад—восток; 3, 4 — усилители (приемники); 5 — электроннолучевая трубка; б) схема размещения трех гониометров; в) рамочная антенна; г) определение координат точки грозы Г по трем пеленгам P_1 , P_2 , P_3 .

тель соединен с рамочной антенной север—юг, другой — с рамочной антенной восток—запад. В схеме предусмотрена возможность деления напряжения ступенями на 5, 10, 15 и т. д. до 60 дБ, что необходимо при работе с сигналами разной интенсивности. С выходного каскада усилителя напряжение подается на отклоняющие пластины ЭЛТ. Характеристики усилителей такие: рабочая частота 7 кГц, полоса пропускания ± 250 Гц, коэффициент усиления 10^6 , выходное напряжение,

обеспечивающее появление на экране ЭЛТ хорошо различного следа, равно 360 в.

Так как погрешность определения направления на грозу оказывается существенной, обычно не ограничиваются одновременной работой двух гониометров, а создают сеть из трех или даже четырех пунктов. При этом точные координаты грозы определяют по точке пересечения биссектрис углов треугольника, образованного пересечением линий трех пеленгов (рис. 8.27 г).

Укажем, что в некоторых образцах метеорологических радиолокаторов МРЛ имеются радиопеленгационные блоки, которые позволяют получить на экране ЭЛТ точный пеленг на грозу. Введение такого пеленгатора позволяет более точно и уверенно определять местоположение грозовых разрядов (дальность до них определяется по индикатору МРЛ).

Радиотеплолокационные системы. Работа радиотеплолокационных систем основана на приеме собственного теплового электромагнитного излучения различных объектов. Одним из таких объектов является атмосфера. Излучатели колебаний — это атомы и молекулы вещества. При этом происходит преобразование внутренней тепловой энергии излучающего тела в энергию электромагнитного поля, распространяющегося вне излучающего тела. Величина тепловой энергии определяется главным образом температурой излучающего тела, поэтому от температуры зависит и средняя мощность излучения. В связи с тем что при приеме этого излучения время выхода волны из объекта неизвестно, метод радиотеплолокации дает возможность обнаружить объект и определить направление на него, но не позволяет измерить расстояние до цели. Поэтому дальность объекта определяется путем пеленгации цели с двух точек, т. е. обычным радиопеленгационным способом. Таким способом пользуются при определении координат летящих целей: самолетов, ракет и т. д.

Развитие радиотеплолокации стало возможным лишь в последние годы, когда появились высокочувствительные приемные устройства. Дело в том, что мощность радиотеплового излучения весьма мала и для выделения сигналов на фоне собственных шумов приемника потребовались принципиально новые схемы входных каскадов приемников.

Учеными предложены способы использования радиотеплолокационных систем и для метеорологических целей: для определения температуры поверхности земли и океана, содержания водяного пара в атмосфере, характеристик облаков, осадков, снежного и ледяного покровов и др. При этом из всего спектра теплового излучения, упоминавшегося в главе 4, наиболее выгодным оказывается использование радиоокна ($2,5 \text{ мм} \leq \lambda \leq 20 \text{ м}$), так как излучение с длиной волны $\lambda \geq 3 \text{ см}$ свободно

проходит через облачный покров. Поскольку облака в среднем закрывают 55% земной поверхности, то это радиоокно представляет единственную возможность «смотреть» сквозь облака при изучении слоя между облаками и земной поверхностью при исследованиях, производимых со спутников или ракет, и при исследовании атмосферы и находящихся в ней образований с земли.

Радиотепловое излучение представляет собой случайный процесс, так как тепловое движение заряженных и поляризованных частиц, вызывающее так называемый тепловой шумовой ток, носит случайный характер. Факторы, влияющие на интенсивность радиотеплового излучения реальных излучающих тел, учесть очень трудно, поэтому в теории радиотеплолокации пользуются понятием абсолютно черного тела (АЧТ), имеющего максимальное излучение.

Плотность потока мощности, проходящего через единицу поверхности АЧТ, перпендикулярную к направлению распространения энергии, заключенной в единичном телесном угле, определяется по формуле

$$P_{\text{АЧТ}} = \frac{2KT}{\lambda^2}, \quad (8.27)$$

где $P_{\text{АЧТ}}$ — плотность потока мощности излучения ($\text{вт}/\text{м}^2 \text{ гц}$), λ — длина волны в метрах, $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана ($\text{вт} \cdot \text{сек}/\text{град}$), T — температура в градусах Кельвина.

Реальное тело, в отличие от АЧТ, имеет так называемое избирательное (селективное) излучение, когда наблюдаются максимумы и минимумы в ходе кривой, выражающей зависимость мощности излучения от частоты. Если в правую часть формулы (8.27) ввести в качестве множителя коэффициент, определяющий излучательную способность любого рассматриваемого тела на данной частоте при температуре, равной температуре АЧТ, то излучательную способность реального тела можно характеризовать излучением абсолютно черного тела, имеющего такую температуру (она называется *эффективной* или *яркостной*), при которой оно на данной частоте излучает такую же мощность, как и реальное тело.

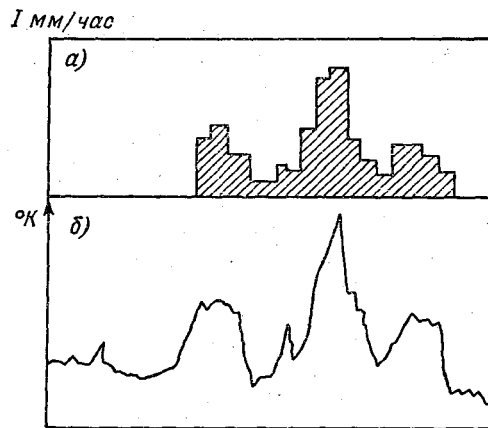


Рис. 8.28. Характеристики интенсивности дождя, измеренной обычными осадкомерами (а) и радиотеплолокатором на длине волны 3,7 см (б).

Пассивные РЛС имеют обычные радиолокационные приемники, с помощью которых осуществляется прием сигналов теплового радиоизлучения объекта. Проведенные исследования позволили накопить некоторые данные о зависимости между величиной и характером радиоизлучений, с одной стороны, и видом и характером атмосферных образований — с другой.

Наиболее ценными для использования в метеорологии являются радиотепловые излучения с длинами волн 0,1—0,5; 0,86; 1,8; 2—4; 8,5; 25—30 см и др.

В качестве примера на рис. 8.28 показаны данные интенсивности дождя, полученные с помощью радиотеплолокатора обычным осадкомером.

Проведенные исследования и полученные результаты показывают, что радиотеплолокация имеет большие перспективы использования в метеорологии.

Основные выводы

1. Радиолокация — это отрасль радиоэлектроники, которая использует явления отражения, переизлучения или собственные излучения электромагнитных волн для обнаружения различных целей, а также измерения их координат и параметров движения. Основные виды радиолокации — пассивная и активная. В гидрометеорологической службе применяются оба вида радиолокации. Метеорологическими целями являются как специальные объекты (радиозонды, уголкового отражатели), так и атмосферные образования (облака, осадки, грозы).

2. Наиболее распространен импульсный метод радиолокации, при котором расстояние до цели определяется путем измерения времени, затраченного импульсом электромагнитной энергии на прохождение от радиолокатора до цели и обратно.

3. Из основного уравнения радиолокации следует, что величина отраженной одиночной целью энергии обратно пропорциональна расстоянию до цели в четвертой степени. Для увеличения дальности действия РЛС необходимо существенно повышать основные технические показатели радиолокатора.

4. Современные РЛС имеют системы автоматического сопровождения цели по дальности (АСД) и угловым координатам (АСН). Действие систем АСД и АСН основано на выработке сигналов ошибки, которые обеспечивают работу специальных следящих систем.

5. В гидрометеорологической службе активные радиолокационные системы применяются для определения скорости и направления ветра, характеристик облаков, осадков и других атмосферных неоднородностей. Применяются эти системы и для измерения толщины ледников, характеристик турбулентности в атмосфере и т. д. Наиболее применимы для этих целей РЛС,

работающие в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн.

6. Метеорологический радиолокатор типа МРЛ — основной вид аппаратуры для всестороннего изучения облачных систем и связанных с ними опасных явлений. Работа системы МРЛ разбивается на два этапа: 1) получение первичной радиолокационной информации об облаках и облачных системах, 2) анализ полученной информации и представление ее в виде, удобном для метеорологического использования. Система МРЛ основана на измерении электромагнитной энергии, отраженной метеорологическими целями, частицы которых имеют размеры, значительно меньшие, чем длина волны. В этом случае пользуются формулой Релея, согласно которой отражаемость частицы пропорциональна шестой степени ее радиуса.

7. Метод радиотеплолокации, основанной на приеме собственного теплового электромагнитного излучения объектов, оказывается пригодным для получения температуры поверхности земли и океана, содержания водяного пара в атмосфере, характеристик облаков, осадков, снежного и ледяного покрова. Основное достоинство этого метода — способность излучения с длиной волны, превышающей 3 см, проникать сквозь облака.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Назовите основные методы радиодальнометрии и кратко поясните сущность каждого метода.

2. Изобразите блок-схему импульсного радиолокатора и поясните принцип его работы.

3. Выведите основное уравнение радиолокации и проанализируйте его.

4. Как изменится дальность действия РЛС, если: а) чувствительность приемника повысится в 16 раз; б) мощность зондирующих импульсов возрастет в 100 раз?

5. Определите среднюю мощность излучения радиолокатора МРЛ-2.

6. Опишите методы определения дальности и угловых координат.

7. Каковы основные методы радиолокационного обзора пространства?

8. Опишите принцип работы доплеровской РЛС.

9. Перечислите основные виды метеорологических РЛС, работающих по принципу активной радиолокации.

10. Проанализируйте основное радиолокационное уравнение для облаков и осадков. Как зависит обратно рассеянная мощность от радиуса капли?

11. Каковы особенности отражения электромагнитных волн от градин?

12. Каковы основные характеристики радиолокаторов системы МРЛ?

13. Изложите порядок получения первичной радиолокационной информации с помощью радиолокатора МРЛ-1.

14. Изобразите примерный вид бланка с информацией, полученной с помощью МРЛ-1 и предназначенной для передачи потребителю.

15. В чем сущность радиолокационного исследования ледников?

16. Приведите пример светолокационной аппаратуры.

17. Опишите работу одной из метеорологических систем пассивной радиолокации с искусственным излучением.

18. В чем сущность радиотеплолокации? Каковы перспективы ее использования в гидрометеорологии?

ГЛАВА 9

РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

§ 9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕЛЕМЕТРИИ И РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Радиотелеметрией называется раздел радиотехники, предметом изучения которого являются методы и технические средства передачи по радио результатов измерений физических величин.

Радиотелеметрическая система (РТС) — это совокупность технических средств, с помощью которых обеспечивается передача информации об измеряемых величинах по радио из одного пункта и прием и регистрация этой информации на другом пункте.

Следует отметить, что метеорология — одна из отраслей, где радиотелеметрия нашла наиболее широкое применение. Действительно, одним из главных объектов изучения в метеорологии является атмосфера, исследование которой в настоящее время невозможно без наличия в ее точках различных измерительных приборов и передачи результатов измерения на расстояние. Таким образом, типичными примерами радиотелеметрических систем можно считать комплексы, в которых имеются передающие (радиозонды, ракеты, спутники, автоматические метеостанции) и приемные (пункты, оборудованные аппаратурой для приема информации) части.

Первой в мире радиотелеметрической системой является сконструированный П. А. Молчановым и опробованный им в 1930 г. комплекс радиозонд — радиоприемник.

Кроме упоминавшихся в главе 8 советских ученых, внесших значительный вклад в развитие метеорологических радиолокационно-телеметрических систем, отметим Г. И. Голышева, В. А. Путохина, А. М. Касаткина, Н. С. Лившиц, Г. А. Кокина, Н. Д. Рязанцева и др. (радиотелеметрические системы для исследования высоких слоев атмосферы), Д. Я. Суражского, А. В. Горелейченко, Я. Г. Виленского, Ю. К. Алексеева и др.

(радиометеорологические станции, размещаемые на поверхности земли и воды).

Несмотря на большое разнообразие РТС по сложности, назначению, виду преобразований информации и т. д., все они могут быть пояснены с помощью структурной схемы (рис. 9.1), являющейся, как и всякая радиосистема, разновидностью общей блок-схемы радиосвязи (см. рис. 1.2). Как видно из рис. 9.1, РТС включает два комплекса аппаратуры — передающий и приемный.

Рассмотрим назначение всех элементов, входящих в каждый из комплексов.

Датчиками ($D_1, D_2, \dots, D_n$) называются приборы, воспринимающие измеряемые величины и преобразующие их в ве-

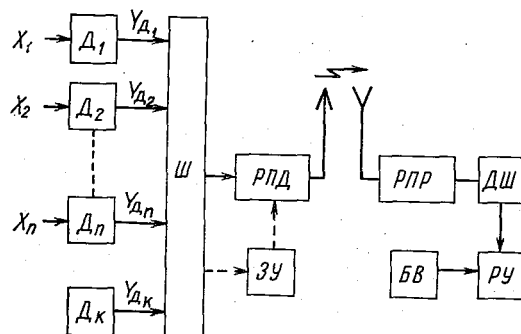


Рис. 9.1. Структурная схема радиотелеметрической системы.

личины другого вида, более удобного для воздействия на последующие элементы системы.

Кроме измеряемых величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, передаче подлежит информация о так называемом *контрольном параметре*, вырабатываемая датчиком контрольного параметра D_k . Этот параметр может принимать одно или больше заранее известных значений, с помощью которых осуществляется расшифровка результатов радиотелеизмерений. Количество датчиков в одной РТС определяет число каналов n , составляющих радиотелеметрическую линию связи.

Сигналы $Y_{d1}, Y_{d2}, \dots, Y_{dn}$ и Y_{dk} , соответствующие измеренным величинам $X_1, X_2, \dots, X_n$ и контрольному параметру, с датчиков $D_1, D_2, \dots, D_n$ и D_k поступают в *шифратор Ш*, где происходит кодирование этих сигналов. Сущность кодирования состоит в преобразовании сигнала Y_{d1} , вырабатываемого каждым датчиком, в форму, пригодную для воздействия на *радиопередатчик РПД*.

В передающий комплекс некоторых РТС, например, искусственных спутников, входит *запоминающее устройство ЗУ*, пред-

назначенное для запоминания телеметрической информации в закодированном виде и передачи ее в определенные моменты времени в направлении приемного комплекса (например, когда спутник пролетает над наземной приемной станцией).

Приемный комплекс РТС включает *радиоприемник РПР*, на выходе которого возникает напряжение, подобное тому, которое поступает на вход передатчика. Это напряжение поступает в *дешифратор ДШ*, где происходит выделение сигналов, отображающих измеренные величины, и преобразование этих сигналов в форму, пригодную для воздействия на *регистрирующее устройство РУ*. В регистрирующем устройстве осуществляется запись результатов телеизмерений на технический носитель (фотопленку, фотобумагу или магнитную ленту).

Для привязки измеряемых величин к определенным моментам времени на тот же технический носитель, на который были записаны результаты радиотелеизмерений, необходимо нанести так называемые метки времени, расстояния между которыми соответствуют определенному интервалу времени. Для этой цели служит *блок времени БВ*.

По назначению РТС подразделяются на самолетные, ракетные, спутниковые, радиозондовые и др. В соответствии с этим разделением к РТС предъявляются конкретные технические требования в отношении числа каналов, скорости передачи информации, точности радиотелеизмерений, метода записи результатов, габаритов и веса передающего и приемного комплексов.

Наиболее общей классификацией РТС является их подразделение по способам образования каналов. По этому признаку различают четыре группы РТС: 1) с частотным разделением каналов; 2) с временным разделением каналов; 3) с кодовым разделением каналов; 4) с комбинированным разделением каналов.

В основе всех способов разделения информационных каналов лежит модуляция сигналами $Y_{d_1}, Y_{d_2}, \dots, Y_{d_n}$ специальных напряжений, вырабатываемых в шифраторе. Эти напряжения (импульсные или синусоидальные) называются *поднесущими*, а модуляция в шифраторе называется *первичной*. В радиопередатчике происходит еще одна, так называемая *вторичная* модуляция, так что колебания несущей частоты, излучаемые антенной радиопередатчика, оказываются промодулированными два или более раз.

Для обозначения типа РТС обычно пользуются сокращенными записями вида модуляции: АМ (амплитудная), ЧМ (частотная), ФМ (фазовая), АИМ (амплитудно-импульсная), КИМ (кодо-импульсная), ШИМ (широотно-импульсная) и т. д. Используя эти сокращения для первичной и вторичной модуляции, названия типов РТС составляют из сокращенных обозна-

чений (сначала идет обозначение первичной, затем вторичной модуляции). Так системы с частотным разделением каналов имеют обозначения АМ—АМ, АМ—ЧМ, ЧМ—АМ, ЧМ—ЧМ и др.

В связи с тем что в системах с временным разделением каналов наиболее часто первичной является импульсная модуляция, в обозначении вида модуляции появляется буква И: АИМ—АМ, АИМ—ЧМ, ФИМ—ЧМ, КИМ—ЧМ и др. Подобным образом обозначаются и другие типы РТС.

По методам записи РТС подразделяются на системы с непрерывной, прерывистой и смешанной регистрацией. При *непрерывной* регистрации телеметрируемая величина¹ записывается в виде непрерывной функции времени (в виде непрерывных кривых). При *прерывистой* регистрации запись ведется в отдельные моменты времени (в виде точек, черточек, пятен и т. п.). В случае *смешанной* регистрации часть или все телеметрируемые величины записываются одновременно приборами непрерывной и прерывистой регистрации.

Рассмотрим подробнее каждый вид РТС. При этом в настоящем параграфе описываются только основные элементы систем — шифраторы и дешифраторы, так как другие элементы — датчики телеметрируемых и контрольных параметров, блоки времени, регистрирующие устройства и др. — ввиду их многообразия более удобно рассматривать при описании конкретных РТС (см. § 9.2, 9.3, 9.4).

РТС с частотным разделением каналов. Сущность частотного разделения каналов состоит в том, что каждому каналу отводится своя полоса частот (поднесущие частоты), которая обычно лежит в диапазоне от нескольких сотен герц до нескольких десятков килогерц, причем ширина этой полосы определяется диапазоном изменения и характером телеметрируемой величины.

В приемном комплексе РТС поднесущие частоты распределяются по отдельным цепям (каналам) с помощью полосовых фильтров. Указанная аппаратура, таким образом, может быть уподоблена обычному радиоприемному устройству с рядом полосовых фильтров, каждый из которых «открывает путь» в определенный канал заранее заданной полосе частот.

На рис. 9.2 показана блок-схема многоканальной радиотелеметрической системы с частотным разделением каналов. Выходные сигналы датчиков $Y_{d_1}, Y_{d_2}, \dots, Y_{d_n}$ и Y_{d_k} подаются на первичные модуляторы $M_1, M_2, \dots, M_n$ и M_k . Первичные модуляторы воздействуют на генераторы поднесущих колебаний $ГП_1, ГП_2, \dots, ГП_n$ и $ГП_k$.

¹ Под телеметрируемой величиной здесь и далее понимается физический параметр, подлежащий измерению и передаче на расстояние. (Прим. ред.)

Напряжения генераторов поднесущих колебаний модулируются по амплитуде, частоте, фазе или с помощью импульсов.

Наиболее часто применяются частотная и импульсная модуляция. Поднесущие частоты выбираются обычно в диапазоне от 400 до 70 000 гц , а индекс модуляции принимается равным 5.

Сигналы, поступающие с выхода генераторов, подаются на суммирующее устройство СУ , где они смешиваются, а затем поступают в радиопередатчик. Модуляторы, генераторы поднесущих колебаний и суммирующее устройство образуют шифратор. В радиопередатчике РПД осуществляется вторичная модуляция, которая чаще всего является частотной.

Радиоприемник приемного комплекса обеспечивает равномерное усиление всего спектра частот принимаемых колебаний.

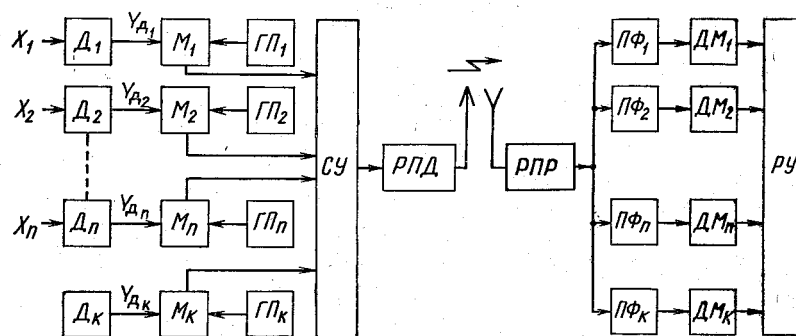


Рис. 9.2. Упрощенная блок-схема многоканальной РТС с частотным разделением каналов.

На входе детектора этого приемника появляется напряжение, подобное тому, которое имеет место на входе радиопередатчика. Полосовые фильтры $\text{ПФ}_1, \text{ПФ}_2, \dots, \text{ПФ}_n$ и ПФ_k выделяют поднесущие колебания. В результате вторичного детектирования (демодуляции) каждого из поднесущих колебаний демодуляторами $\text{ДМ}_1, \text{ДМ}_2, \dots, \text{ДМ}_n$ и ДМ_k получаются напряжения, отображающие в некотором, заранее известном масштабе сигналы датчиков. Полосовые фильтры и демодуляторы образуют дешифратор.

Регистрирующим устройством РУ производится фиксация на техническом носителе получаемых сигналов.

В качестве элементов РТС с частотным разделением каналов используются в большинстве случаев обычные радиотехнические схемы, имеющие, однако, ряд особенностей. Кратко рассмотрим эти схемы.

Генераторы поднесущих колебаний — это обычные генераторы низкой частоты, в которых приняты меры для достижения

достаточно высокой стабильности генерируемой частоты. Наиболее распространены в РТС LC - и RC -генераторы. При этом LC -генераторы наиболее применимы в высокочастотной части диапазона поднесущих частот, и собираются они, например, по описанным в главе 5 трехточечным схемам.

В низкочастотной части диапазона поднесущих частот (400—100 Гц) элементы колебательных контуров (главным образом индуктивные) становятся громоздкими, поэтому преимущественно применяются RC -генераторы.

Первичные модуляторы представляют собой схемы, с помощью которых обеспечивается один из видов модуляции. Если сигнал с датчика РТС поступает в виде напряжения, то можно осуществить амплитудную модуляцию, подав это напряжение на сетку модулятора, обеспечив рассмотренную в главе 5 сеточную модуляцию.

Наиболее часто первичной является частотная модуляция. Так как в качестве датчиков в РТС широко используются индуктивные, емкостные или омические элементы, то обычно они включаются как элементы колебательных контуров, частота которых изменяется при изменении величины L , C или R .

Модуляцию частоты в RC -генераторах можно обеспечить, изменяя величину C или R в одной или одновременно в нескольких фазосдвигающих ячейках.

Таким образом, в РТС, где датчиками служат элементы L , C или R , модуляторы как отдельные устройства отсутствуют, и схемы представляют собой как бы объединенные узлы датчик—модулятор.

Суммирующие устройства предназначены для объединения всех промодулированных поднесущих колебаний в общую цепь без искажения формы суммируемых напряжений.

Суммирующие устройства подразделяются на пассивные и активные. Пример пассивного устройства показан на рис. 9.3. На сопротивлении R_0 падает напряжение $U_{\text{общ}}$, равное сумме четырех напряжений: U_1 , U_2 , U_3 , U_4 .

Активные суммирующие устройства имеют в схеме активные элементы — лампы или транзисторы, что (несмотря на некоторую сложность схем) обеспечивает одновременное с суммированием усиление входных сигналов, а также ослабление связи и взаимного влияния между источниками напряжений.

Полосовые фильтры, применяющиеся в приемных комплексах РТС, служат для разделения модулированных поднесущих

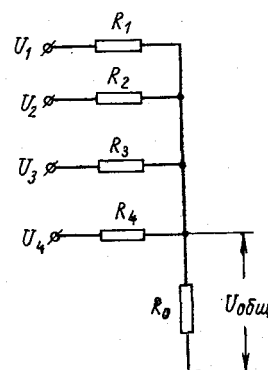


Рис. 9.3. Пассивное суммирующее устройство на резисторах.

частот по отдельным цепям (каналам). Каждый из фильтров настраивается на поднесущую частоту своего канала и имеет заданную полосу пропускания, величина которой зависит от вида первичной модуляции. В РТС с первичной амплитудной модуляцией ширина полосы выбирается равной $2F_m$, где F_m — максимальная частота сигнала, возникающего на выходе датчика. Системы с первичной частотной модуляцией имеют фильтры с полосой, равной удвоенному значению девиации частоты поднесущего колебания. Чтобы не было взаимного влияния каналов вследствие перекрытия полос пропускания фильтров, их частотные характеристики должны быть возможно ближе к П-образной форме, т. е. иметь крутые спады.

На практике в качестве полосовых фильтров часто используются связанные или одиночные колебательные контуры, включенные в качестве нагрузки усилительных каскадов. Применяются и другие схемы, в том числе электромеханические фильтры, подобные применяемым в схемах аппаратуры однополосной связи (см. гл. 7).

Демодуляторы предназначены для выделения из модулированной частоты поднесущей, образующейся на выходе каждого полосового фильтра, напряжения или тока, отображающего сигнал датчика соответствующего канала. Для демодуляции поднесущих частот в зависимости от вида первичной модуляции применяются обычные схемы амплитудных или частотных детекторов.

Конкретные схемы элементов выбираются в зависимости от требований, предъявляемых к данной РТС. Среди радиотелеметрических систем с частотным разделением каналов наиболее распространены системы типа ЧМ—ЧМ. Широкое применение систем этого типа обусловлено малыми габаритами входящих в нее элементов, небольшим потреблением энергии, возможностью использовать датчики в виде составной части колебательного контура генератора поднесущей частоты.

РТС с временным разделением каналов. Сущность работы РТС с временным разделением каналов заключается в том, что сигналы каждого датчика передаются не одновременно. Это возможно благодаря тому, что между импульсами, характеризующими сигналы каждого датчика, имеются определенные промежутки времени, в которых «размещаются» импульсы других каналов.

Блок-схема РТС с временным разделением каналов показана на рис. 9.4. Телеметрируемые величины $X_1, X_2, \dots, X_n$ преобразовываются датчиками $D_1, D_2, \dots, D_n$, выходные сигналы которых поступают на первичные модуляторы $M_1, M_2, \dots, M_n$, где осуществляется один из видов импульсной модуляции: АИМ, ШИМ, КИМ или ФИМ. Датчик D_k предназначен для передачи контрольного параметра, необходимого, как и в системах с ча-

стотным разделением каналов, при дешифрировании результатов записи.

Генератор тактовых импульсов ГТИ вырабатывает периодические тактовые импульсные сигналы, темп выдачи которых определяется скоростью подключения (опроса) датчиков. Сигналы ГТИ управляют работой коммутатора K_1 , который в заданные для каждого канала моменты времени вырабатывает импульсы, воздействующие на модуляторы.

Тактовые импульсы подаются также на синхронизатор C_1 , формирующий синхронизирующие импульсы, которые по ка-

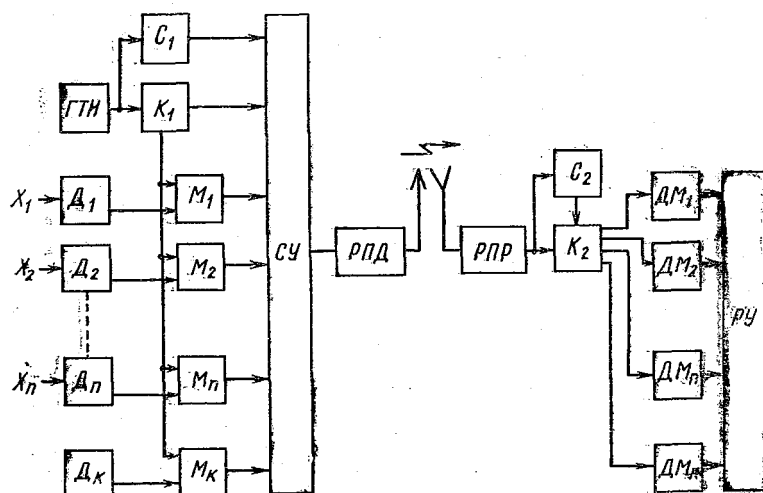


Рис. 9.4. Упрощенная блок-схема многоканальной РТС с временным разделением каналов.

кому-нибудь признаку (амплитуде, длительности и т. д.) отличаются от так называемых информационных импульсов, соответствующих сигналам от датчиков. Назначение синхронизирующих импульсов — обеспечить согласованную (синхронную) работу передающего и приемного комплексов РТС. Сущность синхронизации состоит в том, что при включении, например, модулятора M_1 выход радиоприемника подключается к цепям первого канала. Когда передаются сигналы второго, третьего и так далее до n -го каналов, выходные сигналы радиоприемника поступают в цепи соответствующих каналов приемного комплекса. Выходные сигналы синхронизатора и модуляторов смешиваются в суммирующем устройстве $СУ$ и поступают на вход радиопередатчика $РПД$, который излучает сложные колебания, несущие информацию о телеметрируемой величине, контрольном параметре, а также синхронизирующие сигналы.

В качестве примера на рис. 9.5. показаны сигналы на входе радиопередатчика для РТС с первичной амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ).

В приемном комплексе РТС сигналы с выхода радиоприемника поступают на коммутатор K_2 и синхронизатор C_2 (рис. 9.4). В синхронизаторе C_2 происходит отделение синхронизирующих импульсов от информационных и формируется напряжение, используемое для управления коммутатором K_2 . Этот коммутатор служит для обеспечения подачи измерительных импульсов на соответствующие демодуляторы $ДМ_1, ДМ_2, \dots, ДМ_n$, где модулированные импульсы преобразовываются в вид, удобный для воздействия на регистрирующее устройство $РУ$.

В РТС с временным разделением каналов наиболее применимы следующие виды первичной и вторичной модуляции: АИМ—АМ, АИМ—ЧМ, ШИМ—АМ, ШИМ—ЧМ, КИМ—АМ и КИМ—ЧМ.

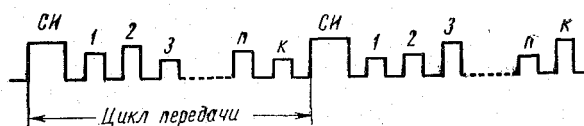


Рис. 9.5. Сигналы на входе радиопередатчика РТС с первичной АИМ (над каждым импульсом проставлен номер канала).

Синхронизирующие импульсы СИ отличаются от измерительных большей длительностью.

Достоинства РТС с временным разделением каналов заключаются в том, что эти системы проще систем с частотным разделением каналов, так как в них отсутствуют полосовые фильтры.

Большинство элементов РТС с временным разделением каналов, так же как и в системах с частотным разделением каналов, представляют собой обычные радиотехнические схемы.

Генераторы тактовых импульсов, определяющие темп работы всей радиотелеметрической системы, представляют собой импульсные устройства, собранные на лампах или транзисторах. Как мы уже упоминали, импульсные схемы, изучаемые в курсах радиолокации, автоматики, телемеханики и вычислительной техники, в данной книге специально не рассматриваются. Отметим только, что импульсы, вырабатываемые ГТИ, должны иметь высокую стабильность частоты следования, формы, длительности и амплитуды. Укажем также, что в качестве ГТИ иногда используются устройства, состоящие из обычного автогенератора синусоидальных колебаний и последующих усилителей-ограничителей, которые в результате

ряда последовательных усилений и ограничений придают колебаниям форму, близкую к прямоугольной.

Коммутаторы и модуляторы РТС с временным разделением каналов на практике часто объединены в одно устройство, называемое коммутаторно-модуляторным. В приемном комплексе для разделения сигналов по соответствующим каналам применяются коммутаторы, схемы которых подобны коммутаторным схемам передающего комплекса. Наиболее распространены механические и электронные коммутаторно-модуляторные устройства.

Действие механических коммутаторно-модуляторных устройств (МКМУ) ясно из рис. 9.6. При контакте одной из пластин $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ с вращающейся с постоянной скоростью щеткой $\mathcal{W}$ напряжение от отдельных датчиков поступает на формирующие каскады и в радиопередатчик. Выходное напряжение для каждого канала имеет вид импульсов, частота следования которых зависит от скорости вращения щетки. Амплитуда выходных импульсов зависит от величины измеряемого параметра, а длительность — от ширины неподвижных пластин и скорости вращения щетки.

Достоинства механического коммутаторно-модуляторного устройства: простота конструкции, прочность и довольно высокая надежность при частоте переключений до 50—60 в секунду.

Недостаток МКМУ: невозможность работать при телеметрировании быстро изменяющихся величин.

Электронные коммутаторно-модуляторные устройства (ЭКМУ) формируют в определенной последовательности информационные импульсы каждого канала под действием сигналов, вырабатываемых генератором тактовых импульсов. ЭКМУ представляют собой собранные на лампах или транзисторах импульсные схемы, действие которых в принципе подобно работе МКМУ.

В качестве *суммирующих устройств* применяются те же схемы, что и в РТС с частотным разделением каналов.

Дешифраторы РТС с временным разделением каналов состоят из коммутатора, синхронизатора и демодулятора. Для любого вида записи наиболее удобны импульсы, модулированные по амплитуде, поэтому в приемных комплексах РТС с временным разделением каналов применяются преобразователи неамплитудной модуляции в амплитудную (АИМ). Сигналы

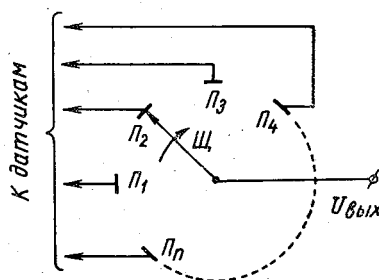


Рис. 9.6. К пояснению принципа работы механического коммутаторно-модуляторного устройства.

в системах с КИМ часто не имеют преобразователей в АИМ, так как запись в виде кодов пригодна для непосредственного ввода в электронные вычислительные машины. Демодуляторами в РТС с временным разделением каналов называются все преобразователи, использующиеся в дешифраторах. Элементы дешифратора—коммутатор, синхронизатор и демодулятор — представляют собой импульсные схемы, собранные на лампах или транзисторах.

Понятие об РТС с кодовым и комбинированным разделением каналов. Сущность *кодowego метода* разделения каналов состоит в том, что в каждом канале в качестве поднесущих колебаний используется периодическая последовательность групп импульсов, называемых кодами или кодовыми группами.

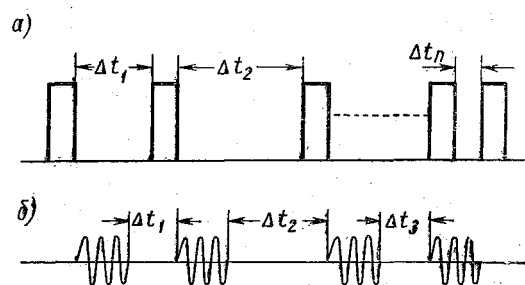


Рис. 9.7. Кодовые группы видеоимпульсов (а) и радиоимпульсов (б).

Каждый такой код состоит из n импульсов, отстоящих друг от друга на заданных временных интервалах $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$. Характеристикой каждого кода является комбинация временных интервалов между импульсами.

Вместо видеоимпульсов могут использоваться импульсы синусоидального напряжения. Обе разновидности кодовых групп показаны на рис. 9.7.

Когда необходимо дистанционно измерить значительное количество параметров, скорость изменения которых существенно различна, применяют *комбинированный метод* разделения каналов, заключающийся в построении систем, в которых используется совокупность рассмотренных выше методов разделения каналов.

Например, РТС с частотно-временным разделением каналов имеет две группы каналов: одна используется для передачи быстро изменяющихся параметров, вторая — для всех остальных телеметрируемых величин. В первой группе используется метод временного разделения каналов, во второй — метод частотного разделения.

§ 9.2. РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, РАЗМЕЩАЕМЫЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ВОДЫ

К радиотелеметрическим системам можно отнести автоматические станции, предназначенные для передачи по радио результатов измерения гидрометеорологических параметров. Размещаются такие станции обычно в недоступных или труднодоступных районах и работают в течение определенного срока (6—12 месяцев) безнадзорно. В курсах «Метеорологические приборы» и «Автоматика и телемеханика» приводятся сведения о конструкциях и схемах некоторых из этих станций, подробно описываются такие элементы, как датчики, преобразователи, усилители и т. д. В данной книге рассматриваются только особенности конкретных автоматических гидрометеорологических станций как радиотелеметрических систем.

Автоматическая станция М-36 (АРМС-Н). В главе 5 был описан радиопередатчик этой станции, состоящий из задающего генератора (см. рис. 5.18) и выходного каскада (см. рис. 5.10). Отметим, что в комплект станций входят два одинаковых радиопередатчика: один для работы днем (диапазон длин волн 60—90 м), другой — ночью (диапазон длин волн 90—120 м).

Станция предназначена для измерения атмосферного давления, температуры воздуха, скорости и направления ветра, количества выпавших жидких осадков и наличия солнечного сияния в момент работы станции. Соответствующие датчики вырабатывают определенные сигналы в виде перемещения механического элемента (стрелки, положения челнока и т. д.). Эти перемещения с помощью специальных устройств преобразуются в сигналы, соответствующие коду Морзе. В пункте приема эти сигналы могут быть приняты оператором на слух и затем расшифрованы.

В станции применено коммутаторно-модуляторное устройство механического типа. Его упрощенная схема показана на рис. 9.8.

Собственно коммутатором является электромеханическое переключающее устройство, состоящее из неподвижного статора

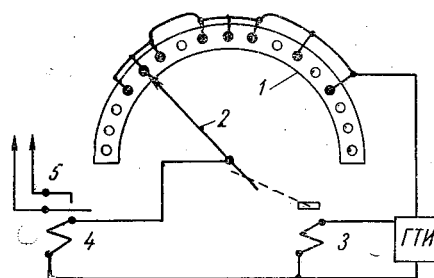


Рис. 9.8. Схема, поясняющая работу коммутаторно-модуляторного устройства станции М-36.

1 — статор с ламелями; 2 — щетка ротора; 3 — электромагнит, управляющий передвижением ротора; 4 — реле манипуляции; 5 — контакты реле манипуляции, управляющие работой радиопередатчика.

с контактными ламелями и подвижного ротора, представляющего собой перемещающуюся контактную щетку. Такие устройства, называемые шаговыми искателями, широко используются в телефонии и имеют несколько типов унифицированных конструкций, отличающихся числом ламелей статора и числом статорных пластин.

Сигналы с датчиков образуют разные комбинации соединения отдельных ламелей статоров шаговых искателей. Станция имеет программный механизм для автоматического включения датчиков и осуществления необходимой коммутации ламелей статора, соответствующей данному значению метеорологического параметра. Сигналами, поступающими от генератора тактовых импульсов, периодически возбуждается электромагнит шагового искателя, обеспечивающий последовательное (шаговое) перемещение контакта щеток с ламели на ламель. В момент контакта щеток с ламелями, закоммутированными сигнальными цепями, включается реле манипуляции, контакты которого при замыкании включают радиопередатчик. При переходе щеток с ламели на ламель реле манипуляции возбуждается с перерывами, равными 0,01—0,03 сек. Так как время отпущения реле превышает 0,3 сек, то за время перехода щетки с одной ламели на соседнюю реле манипуляции обеспечивает поддержание контактов замкнутыми. Когда щетка ротора проходит одну ламель, соединенную с реле манипуляции, вырабатывается сигнал, соответствующий телеграфному сигналу «точка», а когда щетка проходит три ламели, вырабатывается «тире». Ламели, не включенные в цепь реле манипуляции, обеспечивают возникновение перерывов (пауз) между сигналами.

Результаты измерений представляются в виде радиограммы, передача которой длится примерно 105 сек. Эта радиограмма, принятая оператором и переведенная из точек и тире кода Морзе в буквы, может иметь, например, такой вид:

<u>Р</u> БАВ	<u>Р</u> БАВ	<u>Р</u> БАВ	<u>Р</u> БАВ	<u>Р</u> БАВ	<u>Р</u> БАВ
<u>Ю</u> МНТ	<u>Я</u> ИУ	<u>П</u> АА	<u>О</u> УН	<u>И</u> Д	<u>Б</u> СР
<u>Ю</u> МНТ	<u>Я</u> ИУ	<u>П</u> АА	<u>О</u> УН	<u>И</u> Д	<u>Б</u> СР
<u>Ю</u> МНТ	<u>Я</u> ИУ	<u>П</u> АА	<u>О</u> УН	<u>И</u> Д	<u>Б</u> СР

Здесь сочетания РБАВ, являющиеся позывными, присвоенными данной станции, играют роль синхронизирующих сигналов, по которым оператор узнает, что сейчас последует передача телеметрируемых величин.

Роль контрольных сигналов играют буквы (в приведенном выше тексте радиограммы они подчеркнуты), которые являются «окрашивающими» для каждого элемента. Так давлению

присвоена буква Ю, температуре воздуха — буква Я, скорости ветра — П, направлению ветра — О, солнечному сиянию — Ц, осадкам — Б. Остальные буквы являются информационными сигналами, причем каждой группе соответствуют вполне определенные значения той или иной метеорологической величины, заранее установленные и сведенные в специальные таблицы.

Таким образом, систему М-36 можно классифицировать как РТС с временным разделением каналов и кодо-импульсной модуляцией (КИМ). Приемный комплект РТС не автоматизирован, так как в работе участвует оператор, который осуществляет прием, дешифрирование и регистрацию сигналов.

На описанном принципе работают и две другие радиометеорологические установки: автоматический радиовеетромер М-42 (АРИВ) и автоматический радиоосадкомер М-4 (АРО).

Дрейфующая автоматическая станция ДАРМС. В главе 8 было указано, что сигналы станции ДАРМС используются для ее пеленга при определении местоположения льдин. Опишем, как происходит передача сведений о значениях метеозлементов в месте нахождения станции. Как и система М-36, комплекс ДАРМС является РТС с временным разделением каналов и модуляцией типа КИМ. Конструктивное же исполнение ее другое: применены иные датчики и коммутаторно-модуляторное устройство.

Принципиальная схема передающей части ДАРМС показана на рис. 9.9. Коммутаторно-модуляторное устройство представляет собой металлическую пластину, изрезанную канавками, по дну которых проложены изолирующие вставки. Борты канавок также покрыты изолирующим материалом. Эта пластина согнута и соединена с двумя колесами, насаженными на ось.

Указанная конструкция называется *кодовым барабаном*. Сущность работы коммутаторно-модуляторного устройства заключается в том, что при его вращении по канавкам скользят связанные с датчиками иглы стрелок, положение которых зависит от значения того или иного метеозлемента (на рис. 9.9 для простоты изложения показана только одна стрелка с иглой). Длина изолирующих вставок и расстояний между ними определяет длительность контакта между металлической основой пластины и стрелкой. Барабан со стрелкой является ключом радиопередатчика, который посылает радиосигналы при замкнутом ключе и «молчит» — при разомкнутом. Переход иглы с одной канавки на другую происходит, когда игла выходит из соприкосновения с барабаном.

В качестве радиопередатчика используется схема с задающим (на лампе L_1) и выходным (на лампе L_2) каскадами. С помощью переменного конденсатора C_4 осуществляется настройка задающего генератора на нужную частоту, а для

настройки антенного контура на частоту задающего генератора служит регулируемая индуктивность L_3 . Настройка выполняется по максимуму тока в антенне, который измеряется амперметром A , включаемым в цепь антенны при регулировочных работах.

Если стрелка датчика находится на оголенной части канавки, то катодное сопротивление R_6 оказывается замкнутым накоротко, а лампа Λ_2 — открытой, обеспечивая излучение радиосигналов. Если же стрелка находится на изоляторе или вовсе выходит из соприкосновения с пластиной, то большое по величине сопротивление R_6 практически запирает лампу.

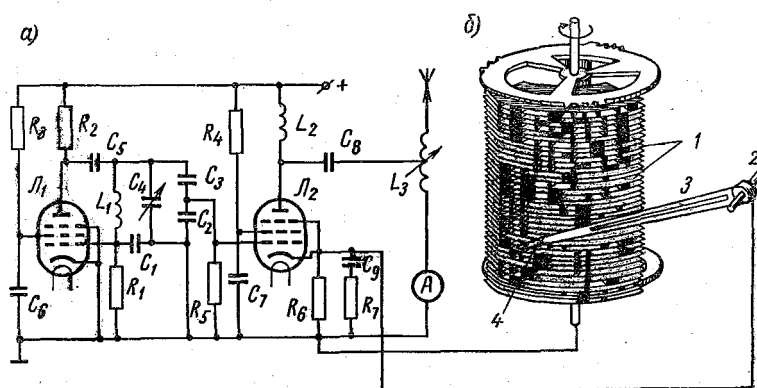


Рис. 9.9. Радиопередатчик (а) и коммутаторно-модуляторное устройство (б) ДАРМС.

1 — канавки; 2 — игла; 3 — стрелка; 4 — ось, соединяющая стрелку с датчиком.

Поэтому при вращении (которое обеспечивается специальным мотором) кодового барабана образуются модулирующие сигналы, соответствующие точкам, тире и паузам кода Морзе.

Прием и расшифровка сигналов ДАРМС, так же как и в системе М-36, производится оператором с помощью любого АМ-приемника, настроенного на частоту передатчика станции.

Радиоизмерители волн (ГМ-32) и течений (ГМ-33). Для измерения и передачи параметров волн, скорости и направления течений в морях и океанах применяются установки ГМ-32 и ГМ-33. Измерительные и передающие части этих установок, размещаемые на якорных буях, и приемные, которые могут быть смонтированы на судне или берегу, образуют радиотелеметрические системы.

Радиоизмеритель волн ГМ-32. На рис. 9.10 показана упрощенная блок-схема РТС радиоизмерителя волн ГМ-32. Эта система предназначена для передачи информации

только об одной величине — амплитуде (высоте) волн, следовательно, РТС является одноканальной.

Рассмотрим работу передающей и приемной частей системы.

В модуляторе осуществляется преобразование напряжения, поступающего от датчика давления,¹ в последовательность отрицательных импульсов, частота повторения которых зависит от величины этого напряжения.

Отрицательные импульсы с модулятора поступают на радиопередатчик, представляющий собой автогенератор УКВ колебаний, собранный на двойном триоде 6Н15П, колебательный контур которого составляют: включенный между анодом и сеткой и замкнутый на конце отрезок длинной линии (индуктивность), конденсатор C_3 и емкость лампы $C_{ак}$. Антенна передатчика представляет собой полуволновый петлевой вибратор. Рабочая частота передатчика 216,5 МГц ($\lambda \approx 1,5$ м). Режим передатчика выбран таким образом, что поступающие от модулятора импульсы срывают на время, равное их длительности ($\tau_{н}$), генерацию передатчика, в результате чего в излучаемых колебаниях появляются паузы, частота повторения которых равна частоте повторения импульсов модулятора, а следовательно, пропорциональна изменению измеряемой величины.

В передающей части РТС имеется программный механизм, который обеспечивает (с помощью специальных часов) периодическое подключение на 20 мин датчика, а затем на 1 мин калиброванного сопротивления.

Таким образом, в РТС осуществляется частотно-импульсная модуляция, а роль синхронизирующих и контрольных сигналов играют сигналы, возникающие при подключении к модулятору калиброванного сопротивления.

Приемная часть РТС содержит антенно-фидерную систему (АФС) с устройством для поворота антенны, радиоприемник и записывающее устройство. АФС состоит из антенны типа «волновой канал» с сетчатым рефлектором, четырьмя директо-

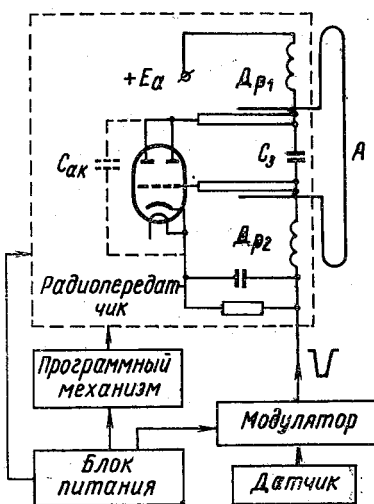


Рис. 9.10. Упрощенная блок-схема передающей части РТС ГМ-32.

¹ В установке ГМ-32 измерение высоты волн производится путем измерения давления воды на помещенную на определенной глубине барометрическую коробку.

рами и петлевым активным вибратором. Поворотным устройством осуществляется вращение антенны по азимуту в пределах 340° , что бывает необходимо в режиме поиска буя. Радиоприемник собран по супергетеродинной схеме. Поступающий от АФС высокочастотный сигнал поступает на УВЧ, а затем на смеситель, куда от гетеродина подаются сигналы с частотой 186 Мгц (при несущей частоте 216 Мгц промежуточная частота, таким образом, будет равна $216 - 186 = 30 \text{ Мгц}$). Напряжение промежуточной частоты усиливается в восьмикаскадном УПЧ и подается на детектор, где выделяется огибающая сигналов, которая поступает на трехкаскадный усилитель импульсов. Часть выходного напряжения с выхода усилителя подается на усилитель звуковой частоты и далее на телефоны.

Преобразователь частоты, включенный на выходе приемника, выделяет из полученных видеоимпульсов паузы, формирует из них импульсы, одинаковые по амплитуде и длительности, а частота их зависит только от величины напряжения на входе модулятора, т. е. от значения измеряемой величины.

Далее в схеме преобразователя выделяется среднее значение напряжения, которое пропорционально частоте импульсов. Наконец, после усиления этого напряжения усилителем постоянного тока (УПТ) сигнал с выхода УПТ поступает на регистратор, обеспечивающий на диаграммной ленте запись сигналов в виде непрерывной линии, изображающей профиль волны. По разности отсчетов ординат гребня и впадины волны с учетом контрольного параметра определяется высота (амплитуда) волны, а период волны вычисляется по расстоянию между двумя последовательными впадинами или гребнями с учетом скорости перемещения ленты регистратора.

Радиоканал РТС обеспечивает достаточно высокую помехоустойчивость, так как роль информационных сигналов играют паузы, продолжительность которых меньше длительности радиоимпульсов.

Радиоизмеритель течений ГМ-33 обеспечивает измерение и передачу по радио значений скорости и направления течения на двух горизонтах с помощью контактных гидрологических вертушек, выходными сигналами которых являются однополярные электрические импульсы.

Блок-схема ГМ-33 показана на рис. 9.11 а. Для передачи информации с буя на судно используется несущая частота $216,5 \text{ Мгц}$, излучаемая передатчиком, конструкция которого такая же, как и в приборе ГМ-32.

Коммутаторно-модуляторный (программный) механизм обеспечивает такой режим работы, при котором измерение элементов течения может производиться либо на одном горизонте (непрерывно или в течение 10 мин каждые полчаса), либо на двух горизонтах (последовательно с каждого гори-

зонта в течение 5 мин каждые полчаса). Таким образом, в первом случае реализуется схема одноканальной РТС, во втором — двухканальной РТС с временным разделением каналов.

Конструктивно коммутаторно-модуляторное устройство представляет собой часовой механизм, у которого вместо циферблата установлен программный контактный диск, а минутная стрелка несет подвижный контакт, который управляет очередностью подключения датчиков ко входу модулятора и обеспечивает длительность работы системы.

При каждом замыкании контактов датчиков течения происходит включение радиопередатчика путем замыкания цепи

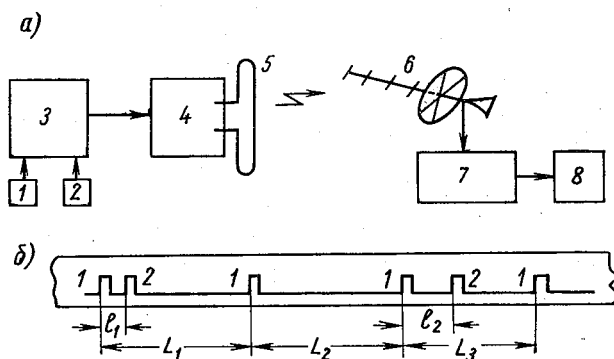


Рис. 9.11. К пояснению работы РТС ГМ-33.

а — упрощенная блок-схема РТС: 1, 2 — датчики, 3 — коммутаторно-модуляторный (программный) механизм, 4 — радиопередатчик, 5 — передающая антенна, 6 — приемная антенна, 7 — радиоприемник, 8 — регистратор; б — образец записи результатов радиотелеизмерений на телеграфной ленте: 1 — импульсы скорости, 2 — импульсы направления (импульсы направления следуют не в каждом цикле, а через один, чтобы отличить их от импульсов скорости).

анодного напряжения. После размыкания контактов в излучении наступает пауза. Перед началом передачи информации от каждого датчика, а затем в конце сеанса передается контрольный сигнал, служащий для разделения информации от первого и второго датчика и для предупреждения об окончании работы передатчика (этот сигнал играет роль синхронизирующего и контрольного сигналов).

В качестве приемника радиоизмерителя течений используется приемник РТС ГМ-32. К выходу приемника подключается регистратор течения, который обеспечивает запись на телеграфную ленту сигналов, соответствующих замыканиям и размыканиям контактов датчиков. Зная скорость перемещения телеграфной ленты и расстояние между импульсами, можно определить скорость течения. Кроме импульсов скорости тече-

ния, в датчике вырабатываются импульсы направления, возникающие при замыканиях контактов верхушки и магнитной рамки, ориентированной по магнитному меридиану. Направление течения относительно магнитного меридиана определяется как $\frac{l}{L} 360^\circ$, где l — расстояние между импульсами скорости и направления, L — расстояние между двумя последовательными импульсами скорости (рис. 9.11 б).

Таким образом, данная система относится к РТС с временным разделением каналов и число-импульсной модуляцией.

Радиооповеститель селя РОС. Для сигнализации о повышении уровня воды в руслах горных рек до заранее заданных отметок и о появлении в створе передающего пункта селевого потока применяется радиотелеметрическая система РОС. Программа работы системы построена так, что при повышении уровня воды передаются сначала два его опасных значения, а затем сигнал «сель». В соответствии с этим имеются два датчика уровня и датчик наличия селя (первые два датчика — поплавковые приборы, а датчиком селя служит натянутый через селеопасное русло трос, который натягивается или разрывается при прохождении селя). Сигналы датчиков уровня воды и датчика селя включают генераторы поднесущих (фиксированных) частот. При повышении уровня воды до малоопасного значения первый датчик включает генератор поднесущей частоты F_1 , который модулирует по частоте колебания радиопередатчика. Когда уровень воды поднимается до критического (селеопасного) значения, второй датчик включает генератор поднесущей F_2 . Третий сигнал («сель») на частоте F_3 возникает при обрыве троса.

В приемном пункте имеются полосовые фильтры, настроенные на частоты F_1 , F_2 , F_3 и связанные с механизмами, включающими звуковую или световую сигнализацию (если срабатывает хотя бы один из датчиков).

Данную систему, таким образом, можно отнести к РТС с частотным разделением каналов и модуляцией АМ—ЧМ (считается, что включение и выключение поднесущих частот равносильно амплитудной манипуляции).

§ 9.3. РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЕТРОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Для измерения распределения метеорологических элементов до высот порядка 25—35 км применяется метод радиозондирования. Радиотелеметрическую систему образуют передатчик радиозонда и наземная приемная установка. Мы уже отмечали, что применяющиеся в настоящее время системы вертикального зондирования атмосферы являются радиолокационно-телемет-

рическими. В то же время можно считать, что и координаты, определение которых является основной задачей радиолокации, также представляют собой телеметрируемые величины, информация о которых передается по отдельным радиоканалам.

В настоящем параграфе мы рассматриваем системы вертикального зондирования атмосферы именно с точки зрения их радиотелеметрических особенностей.

Радиотелеметрия системы «Малахит»—А-22. Радиозонд А-22 является передающей частью системы. В РТС применен метод временного разделения каналов с кодо-импульсной модуляцией. Радиопередатчик собран по схеме передатчика-ответчика, сигналы которого служат как для определения координат радиозонда, так и для определения значений метеозлементов, измеряемых датчиками зонда.

В настоящее время наиболее часто в системе «Малахит» — А-22 используется передатчик-ответчик типа А-35-1П. На рис. 9.12а показана схема передатчика-ответчика и коммутаторно-модуляторного устройства в виде вращаемого специальным двигателем кодового барабана, аналогичного описанному на стр. 331. Детали радиопередатчика смонтированы в основном на одной стороне платы из высокочастотного гетинакса. На другой стороне печатным способом нанесены соединительные перемычки схемы и высокочастотные дроссели $Др_1$ и $Др_2$.

Передатчик-ответчик работает в двух отличающихся друг от друга режимах: режиме ответа и режиме метеоинформации.

Режим ответа возникает, когда цепь манипуляции разомкнута (между иглой стрелки датчика и проводящей поверхностью канавки барабана контакта нет). В этом режиме передатчик работает как сверхрегенеративный приемник, обладающий способностью не только принимать, но и излучать ответные сигналы. Сущность этого процесса заключается в том, что режим работы лампы и параметры цепей подобраны так, что воздействие внешних колебаний с частотой, равной или близкой частоте собственных колебаний контура, вызывает генерирование ответных колебаний. Роль внешних колебаний в системе играют запросные импульсы, излучаемые передатчиком дальномерной приставки радиотеодолита «Малахит». Когда цепь манипуляции разомкнута, в момент отпирания лампы на ее сетку подается напряжение контура ударного возбуждения L_1C_1 . При положительном полупериоде напряжения высокочастотный генератор возбуждается и обеспечивает излучение «пакета» колебаний на несущей частоте 216,5 Мгц (длительность пакета 0,7—0,9 мксек).

Частота посылок запросных импульсов 1070 гц, и в промежутках между запросами, пока разомкнута цепь манипуляции, передатчик-ответчик будет генерировать так называемые шумовые колебания с частотой примерно 40—60 кгц.

Из рис. 9.12 б видно, что ответные импульсы на экране индикатора дальности имеют вид сгустков, отличающихся от шумовых импульсов повышенной яркостью и несколько большей амплитудой; за этими импульсами следует пауза.

Ответные импульсы используются для измерения дальности, о чем рассказывалось в главе 8.

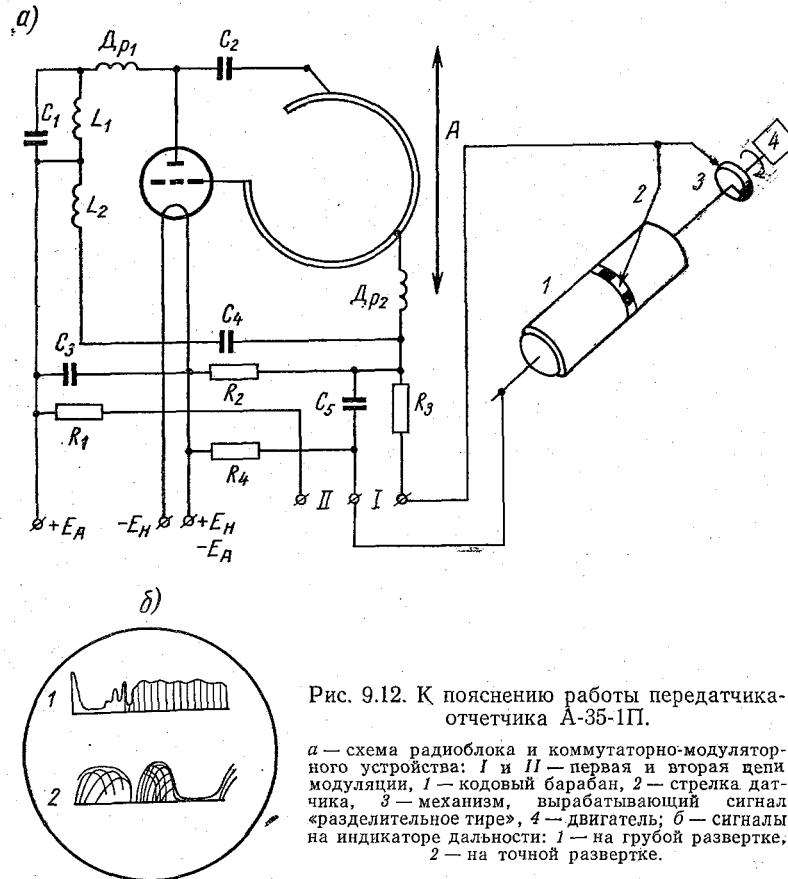


Рис. 9.12. К пояснению работы передатчика-ответчика А-35-1П.

а — схема радиоблока и коммутаторно-модуляторного устройства: I и II — первая и вторая цепи модуляции, 1 — кодовый барабан, 2 — стрелка датчика, 3 — механизм, вырабатывающий сигнал «разделительное тире», 4 — двигатель; б — сигналы на индикаторе дальности: 1 — на грубой развертке, 2 — на точной развертке.

Режим метеоинформации обеспечивается, когда цепь манипуляции замкнута, т. е. стрелка датчика войдет в соприкосновение с пластиной кодового барабана, а это приводит к режиму прерывистой генерации (автомодуляции).

Режим автомодуляции заключается в том, что цепочка, образованная резисторами R_1 , R_2 и R_3 и конденсаторами C_4 и C_5 , обеспечивает подачу на управляющую сетку лампы дополнительного положительного смещения, которое вызывает периодические прерывания генерации.

Частота этих прерываний зависит от того, какая цепь манипуляции используется: первая или вторая (см. рис. 9.12 а). В обоих случаях при замкнутой цепи манипуляции передатчик посылает импульсы высокой частоты, а при разомкнутой — импульсы низкой частоты.

При включении первой цепи манипуляции частота следования импульсов становится стабильной и равной примерно 20 кГц. При этом в качестве наземной записывающей аппаратуры используется автоматический регистратор, который обеспечивает автоматическое дешифрирование сигналов кода Морзе.

При включении второй цепи манипуляции передатчик излучает сигналы с частотой следования 300—600 имп/сек. В этом случае сигналы радиозонда принимаются на слух.

Когда цепь манипуляции размыкается, частота, посылок увеличивается до 2500—6000 имп/сек и в телефоне слышен звук высокого тона, соответствующий паузам кода Морзе.

Режим передачи метеоинформации (когда цепь замкнута) нарушает способность передатчика отвечать, однако это не мешает вести его пеленгование по угловым координатам и дальности (дальность определяется в те моменты, когда стрелка скользит по изолированной части канавки).

Роль синхронизирующего и контрольного сигнала в системе играет так называемый сигнал «разделительное тире», который при приеме на слух дает возможность оператору следить за циклами передачи, а при автоматическом приеме обеспечивает синхронизацию работы цепей автоматического регистратора.

Регистрация производится на движущейся бумажной ленте в виде точек. Кроме того, на ленту наносятся отметки времени, вырабатываемые специальным блоком времени (реле времени).

Радиотелеметрия системы «Метеор»—РКЗ. В этой системе применяется комбинированный метод разделения каналов и частотно-импульсная модуляция. Телеметрируемой является информация о метеозлементах: температуре, давлении, влажности воздуха; ветровые характеристики, как указывалось в главе 8, определяются методом радиолокации.

На рис. 9.13 показана упрощенная блок-схема РТС «Метеор»—РКЗ. Передающей частью этой системы является радиоблок, выполненный как составная часть радиозонда.

Измерительный генератор собран по импульсной схеме, вырабатывающей отрицательные импульсы напряжения, частота повторения которых зависит от величины сопротивления датчика температуры (терморезистора R_t) и влажности (реостата $R_{вл}$, связанного с мембраной из органической пленки).

С целью повышения точности в системе применен метод отношений. Сущность этого метода заключается в том, что о значении телеметрируемой величины судят не просто по определяемой частоте импульсов, а по ее отношению к так называемой

мой опорной частоте, с которой излучаются колебания при подключении к измерительному генератору высокостабильного (опорного) сопротивления $R_{оп}$. В качестве коммутаторного устройства используется механическая конструкция, называемая *баропереключателем*, которая состоит из мембранной барометрической коробки и связанной с ней стрелки, скользящей по контактной шкале.

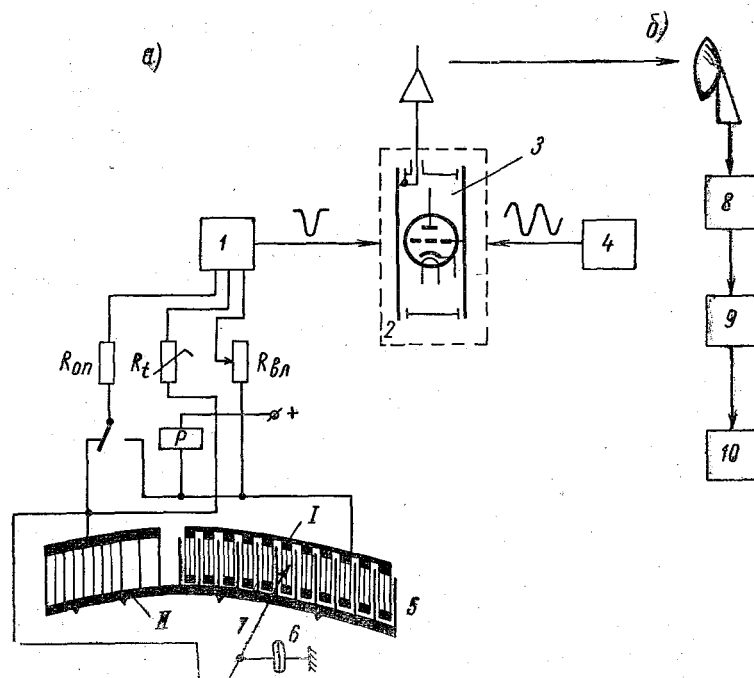


Рис. 9.13. Упрощенная блок-схема РТС «Метеор»—РКЗ.

a — радиозонд, b — наземные блоки РТС; 1 — измерительный генератор, 2 — генератор СВЧ, 3 — объемный резонатор, 4 — модулятор, 5 — шкала баропереклюателя, 6 — барокоробка, 7 — стрелка, 8 — радиоприемник, 9 — система счета, 10 — печатающий узел.

При подъеме радиозонда, а следовательно, и изменении (уменьшении) атмосферного давления стрелка перемещается вдоль шкалы, изготовленной из органического стекла, на котором нанесены металлические полоски (контакты), определяющие программу передачи радиозондом измеряемых величин.

Если стрелка находится на контакте шкалы, терморезистор R_t оказывается замкнутым и к измерительному генератору подключается только опорное сопротивление $R_{оп}$. При переходе стрелки на изоляционный промежуток между контактами шкалы к измерительному генератору оказывается подключен-

ным сопротивлением $R_{оп} + R_t$. Сказанное относится к случаям, когда стрелка находится на так называемой температурной группе контактов шкалы (группа I на рис. 9.13).

При перемещении стрелки на один из контактов группы II (группы влажности) срабатывает реле P и к измерительному генератору вместо терморезистора подключается реостат $R_{вл}$ датчика влажности.

В рассматриваемых РТС применен комбинированный метод разделения каналов, так как во время подъема радиозонда происходит временное (благодаря наличию баропереклюкателя) и частотное (благодаря тому, что частоты следования импульсов различны: частота сигналов температуры $F_t = 100 \div 1950$ имп/сек, частота сигналов влажности $F_{вл} = 1500 \div 1950$ имп/сек, опорная частота $F_{оп} = 1965 + 2215$ имп/сек) разделение каналов.

Отрицательные импульсы, поступающие с измерительного генератора, воздействуют на генератор сверхвысокой частоты ($f \approx 1800$ Мгц), вызывая паузы в излучении; частота следования этих пауз для разных метеоэлементов различна ($F_t, F_{вл}$ и $F_{оп}$). Генератор СВЧ собран на триоде 6С11Д карандашного типа. Анодный и сеточный контуры образованы двумя объемными резонаторами. Антенная система передатчика состоит из штырька и конического противовеса, образующих в свободном полете излучатель, ориентированный вертикально вниз. Высоко-частотная энергия от генератора в антенну поступает через виток связи, введенный в полость анодного объемного резонатора и коаксиального фидера.

Мы уже упоминали (§ 8.3), что радиозонд РКЗ обеспечивает работу в режиме активной радиолокации с активным ответом, для чего в схеме радиоблока предусмотрен модулятор, вырабатывающий синусоидальное напряжение с частотой 800 кГц. Одновременное воздействие на генератор СВЧ двух напряжений — отрицательных импульсов от измерительного генератора (длительность этих импульсов может изменяться от 50 до 200 мксек) и синусоидального напряжения — приводит к тому, что передатчик работает в режиме, при котором он становится чувствительным как к импульсам измерительного генератора, так и к запросным импульсам, поступающим в виде пакетов СВЧ колебаний, излученных магнетронным передатчиком радиолокатора РМС-1.

Когда на передатчик поступает запросный импульс, генератор СВЧ вырабатывает ответный сигнал.

На рис. 9.14 показана форма сигналов радиозонда РКЗ, где виден результат воздействия на колебания несущей частоты всех напряжений.

В результате модуляции синусоидальным напряжением возникают радиоимпульсы с частотой 800 кГц, которые образуют основное поле излучения передатчика, так называемое поле

сверхрегенеративных шумов. В этом поле появляются две серии пауз: одна возникает в результате воздействия импульсов измерительного генератора (эти паузы образуют частоты телеметрического канала и называются паузами метеоданных), другая — вследствие воздействия запросных импульсов (эти паузы образуют частоту канала измерения дальности и называются ответными).

В отличие от пауз метеоданных, длительность ответных пауз во много раз меньше, поэтому они не оказывают влияния на результаты измерения F_t , $F_{вл}$ и $F_{оп}$.

Прохождение сигналов дальности и угловых координат в наземной аппаратуре РТС рассмотрено в главе 8 (напомним, что

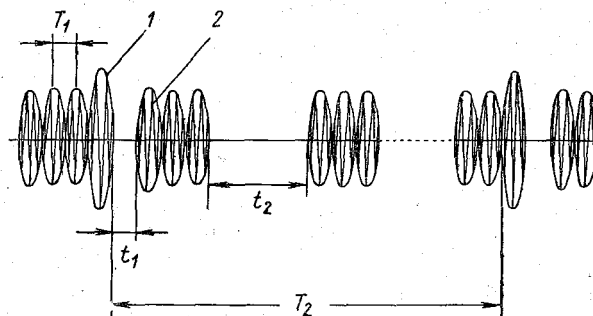


Рис. 9.14. Форма колебаний, излучаемых радиозондом РКЗ.

T_1 — период колебаний с частотой 800 кГц, t_1 — ответная пауза, t_2 — пауза в результате воздействия импульсов измерительного генератора, T_2 — период повторения запросных импульсов; 1 — всплеск перед ответной паузой, 2 — несущая частота.

колебания, изображенные на рис. 9.14, модулируются еще частотой сигнала ошибки, возникающей при определении угловых координат, что из-за масштаба рисунка показать нельзя). Поясним прохождение сигналов метеоданных.

В качестве дешифратора использована система счета, с помощью которой определяется частота следования импульсов (соответствующая F_t , $F_{вл}$, $F_{оп}$). Эта частота определяется путем подсчета количества импульсов в заданном интервале времени. Подсчет производится с помощью специальной импульсной схемы (электронного счетчика). В соответствии с итогом счета, зафиксированным счетчиком, срабатывает схема, управляющая регистрирующим устройством, которое представляет собой электромеханический печатающий узел.

Сведения об РТС метеорологических ракет. РТС комплекса ракетного зондирования атмосферы состоит из бортовой передающей и наземной приемной аппаратуры.

Передача сигналов об измеренных величинах чаще всего производится по методу комбинированного разделения каналов и частотной модуляции. В советских метеорологических ракетах передача сигналов, несущих метеорологическую информацию, осуществляется путем поочередного циклического подключения выходных напряжений датчиков на вход реактивной лампы. Очередность подключения определяется механическим коммутатором, имеющим 60 ламелей.

Контрольными в данной РТС являются сигналы, вырабатываемые датчиком контрольного параметра, в качестве которого используются высокостабильные резисторы.

Для приема сигналов, посылаемых радиопередатчиком с ракеты, применяется коротковолновый приемник, снабженный панорамной приставкой. Панорамная приставка позволяет просматривать и фотографировать появляющиеся на экране электроннолучевой трубки все сигналы с частотами, входящими в полосу пропускания передатчика.

В качестве регистрирующих устройств часто используются блоки записи на магнитную ленту, обработка которой производится на электронных вычислительных машинах.

§ 9.4. РАДИОТЕЛЕМЕТРИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ

Особенностью радиотелеметрии метеорологических спутников является то, что телеметрируемые величины представляют собой атмосферные процессы большого (планетарного) масштаба, какими являются картины облачного покрова, уходящее и приходящее тепловое излучение и т. п.

Диапазон длин волн, на которых возможна регулярная радиосвязь со спутниками, ограничен как со стороны длинных волн, так и со стороны очень коротких. Длинные и средние волны неприменимы вследствие того, что ионосфера для них является преградой, а очень короткие волны поглощаются облаками, осадками и воздухом.

В связи с этим на практике для связи со спутником используются в основном метровыми и дециметровыми волнами, которые беспрепятственно проникают сквозь атмосферу, облака, осадки. Однако такие волны, как известно, не огибают препятствий и могут быть использованы только в зоне прямой видимости. В соответствии с международными соглашениями для связи с метеорологическими спутниками выделены волны в дециметровом ($f=1790 \text{ МГц}$, $\lambda=16,75 \text{ см}$) и метровом ($f=137 \text{ МГц}$, $\lambda=2,19 \text{ м}$) диапазонах.

Советский метеорологический спутник «Космос-122» был введен на круговую орбиту высотой около 650 км. На спутнике была установлена аппаратура для получения данных о распределении облачности, снежного покрова и ледяных полей, температуры поверхности Земли или верхних границ облаков,

а также различных составляющих радиационного баланса Земли и атмосферы.

«Космос-122» обеспечивал передачу телевизионных изображений облаков, покрывающих большую часть земной поверхности. Из мозаики отдельных снимков, полученных и переданных телекамерой спутника во время облета земного шара и принятых наземными приемными пунктами, составляются карты облачного покрова.

Однако телевизионные камеры могут вести наблюдения за облаками только на освещенной (дневной) стороне планеты.

Чтобы определить расположение облачного покрова на теневой (ночной) стороне Земли, фотографирование производится не в видимом свете, а в инфракрасных лучах, точнее в тех участках спектра («окнах»), где ИК излучение практически не поглощается водяным паром.

28 февраля и 27 апреля 1967 г. в СССР были запущены метеорологические спутники «Космос-144» и «Космос-156» на круговые орбиты, проходящие на высоте 625—630 км, причем запуск спутника «Космос-156» осуществлен с таким расчетом, чтобы начальная плоскость орбиты спутника была смещена относительно плоскости орбиты спутника «Космос-144» на 95° (рис. 9.15). Взаимное расположение орбит выбрано так, что спутники производят наблюдения за погодой над любым районом земного шара с интервалом в шесть часов. Эти спутники в комплексе с наземной аппаратурой составили экспериментальную космическую метеорологическую систему «Метеор».

Метеорологические спутники представляют собой непрерывно движущиеся автоматические обсерватории. Они связаны с командно-измерительными наземными станциями, расположенными на больших расстояниях друг от друга, но объединенными общностью управления, регистрации, обработки и передачи информации. Эти станции осуществляют непрерывный радиоконтроль орбиты, посылают соответствующие команды на борт спутника, принимают, регистрируют, запоминают всю информацию со спутника. Обработанная информация поступает в метеорологические центры, составляющие прогноз погоды.

В настоящее время система «Метеор» успешно функционирует; она пополняется новыми спутниками, которые запускаются на смену спутникам, отработавшим свои ресурсы.

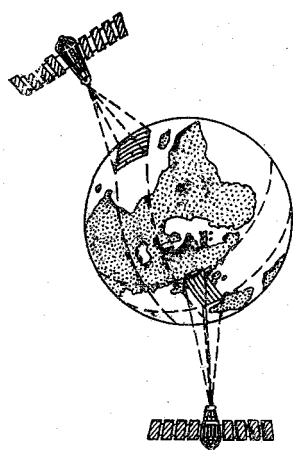


Рис. 9.15. Схема взаимного расположения орбит метеорологических спутников «Космос-144» и «Космос-156».

В США также создана и эксплуатируется метеорологическая космическая система на базе спутников «Тайрос» и «Нимбус».

По информационному признаку рассматриваемые системы относятся к комбинированным, так как в них применены методы пассивного извлечения информации (используется прием видимого и инфракрасного излучения от Земли и атмосферных образований) и методы передачи телевизионной информации на Землю.

Ниже описываются некоторые узлы радиотелеметрической аппаратуры метеорологических спутников.

Телевизионная аппаратура. При телевизионных наблюдениях за облачностью на Землю нацеливается передающая телевизионная трубка с объективом, имеющим тот или иной угол зрения. Обычно ставится не менее двух трубок: одна с большим углом зрения, другая — с малым, причем изображение в узкоугольной камере находится внутри изображения в широкоугольной камере.

В качестве передающих трубок обычно используются *видиконы* (рис. 9.16). Фотомишень видикона представляет собой тонкое плоское фотосопротивление. На стеклянную основу, являющуюся передней стенкой передающей трубки, с внутренней стороны напылена тонкая металлическая, так называемая сигнальная пластинка, поверх которой и нанесено фотосопротивление. Сопротивление и пластинка крепятся металлическим кольцом к корпусу трубки. Основное требование к сигнальной пластине — высокая прозрачность для световых лучей, идущих от телеметрируемого объекта, и достаточно низкое электрическое сопротивление (обычно сигнальная пластинка делается из золота). Основное требование к материалу фотомишени — не слишком большая инерция при максимальной чувствительности к световому потоку (таким требованиям удовлетворяет, например, трехсернистая сурьма). Электронный луч трубки посылает сфокусированный пучок электронов, который тормозится вблизи сетки, имеющей потенциал, близкий к потенциалу катода.

Когда объектив закрыт (фотомишень в темноте), пучок электронов последовательно пробегает всю фотомишень по строчкам и по кадрам и заряжает обращенную к прожектору (на рисунке левую) сторону фотосопротивления до некоторого потенциала, близкого к потенциалу катода. Сигнальная пластинка имеет потенциал на 20—30 в выше потенциала катода.

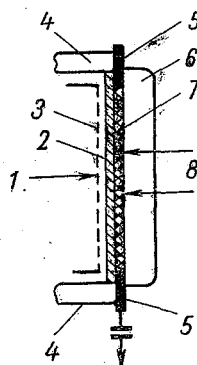


Рис. 9.16. Упрощенная схема видикона.

1 — электронный пучок, 2 — фотосопротивление (фотомишень), 3 — сетка, 4 — корпус трубки, 5 — металлическое кольцо, 6 — стеклянная основа, 7 — сигнальная пластинка, 8 — свет от объектива; стрелка, направленная вниз, показывает выход видеосигнала на усилитель.

Таким образом, после пробега пучка электронов по фотомишени между левой и правой сторонами фотосопротивления появится разность потенциалов. При этом можно считать, что фотомишень состоит из большого числа элементарных конденсаторов, у которых правые пластины соединены вместе сигнальной пластиной, а левые не соединены.

Если же объектив на короткое время (несколько миллисекунд) открыть, то сопротивление участков фотомишени в направлении, перпендикулярном к ее поверхности, окажется обратно пропорциональным освещенности. Распределение сопротивлений различных участков поверхности (рельеф сопротивлений) будет повторять распределение освещенности объекта, на который нацелена трубка, т. е. объект будет изображен в черно-белом тоне. Пока объектив открыт и рельеф сопротивлений существует, элементарные конденсаторы будут разряжаться, причем на более освещенных участках разряд будет происходить быстрее. После закрытия объектива на левой стороне фотомишени окажется рельеф потенциалов, повторяющий рельеф сопротивлений, т. е. само изображение. Изображение будет храниться до тех пор, пока электронный луч снова не obeжит фотомишень и не уравнивает потенциалы всех участков на левой стороне фотомишени. Ток, который при уравнивании потенциала течет от сигнальной пластины на усилитель, представляет собой видеосигнал — полезную информацию, являющуюся электрическим аналогом изображения. Таким образом, можно процессы занесения изображения объекта на фотомишень и его считывание сделать существенно различными по длительности: быстрое занесение изображения и его сравнительно медленное считывание.

На рис. 9.17 показана блок-схема телевизионной системы, установленной на метеорологическом спутнике «Космос-122». Для увеличения в два раза угла поля зрения телевизионной системы в ней использованы два видикона, благодаря чему обеспечивается отражение с высокой детальностью состояния облачного покрова на каждом витке спутника в полосе, охватываемой углом зрения 76° . Телевизионная съемка облачного покрова велась по маршруту так, что отснятые кадры частично накладывались друг на друга (это облегчало затем их соединение при фотомонтаже). Циклы работы двух видиконов сдвинуты относительно друг друга на 10 сек, т. е. экспонирование второго видикона начинается после окончания считывания первого.

Диафрагма объектива и длительность экспозиции изменяются блоком программного управления по командам с Земли и от бортового датчика.

Видеосигнал, снимаемый с видикона, усиливается и корректируется в предварительном видеоусилителе. Видеосигналы

с двух предварительных видеоусилителей коммутируются на входе линейного усилителя, благодаря чему непрерывно поступают на вход устройства магнитной записи.

Назначение линейного усилителя — обеспечить наличие в видеосигнале различных вспомогательных импульсов (синхронизирующих, гасящих и корректирующих) и контрольных сигналов (кодовых посылок, содержащих информацию о номере каждой пары кадров). В устройстве магнитной записи видеосигнал от каждой пары кадров записывается в течение 20 сек. Магнитная запись обеспечивает запоминание видеоинформации, накапливаемой спутником за время полета вне зоны приема назем-

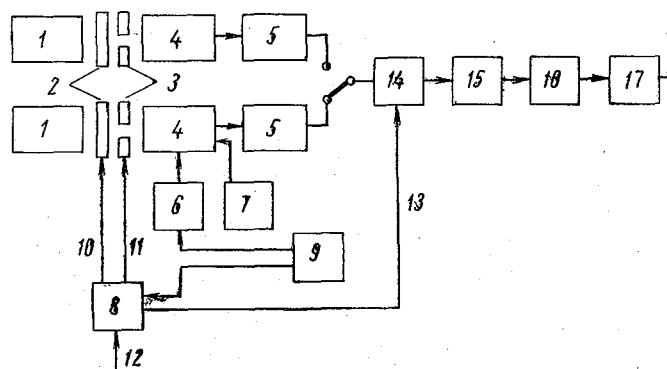


Рис. 9.17. Упрощенная блок-схема телевизионной системы метеорологического спутника «Космос-122».

1 — объективы; 2 — затворы; 3 — диафрагмы; 4 — видеоконверторы; 5 — предварительные видеоусилители; 6 — блок развертки; 7 — усилитель гасящих импульсов; 8 — блок программного управления; 9 — синхрогенератор; 10 — управление затвором; 11 — управление диафрагмой; 12 — команда; 13 — сигнал номера кадра; 14 — линейный усилитель; 15 — блок магнитной записи; 16 — устройство формирования; 17 — бортовой радиопередатчик (блоки второго видеоконвертора не показаны).

ной станции. Когда же спутник входит в зону приема, происходит ускоренное (в четыре раза быстрее записи) считывание и передача. С устройства магнитной записи при этом видеосигнал подается на усилитель и далее в бортовой радиопередатчик.

Принятый наземной станцией телевизионный сигнал с антенны подается на схему демодуляции, а затем воспроизводится на экранах видеоконтрольных устройств и регистрируется на магнитной ленте или кинофотопленке, обрабатывается, привязывается к местности и поступает в метеорологический центр.

Инфракрасная аппаратура. Рассмотрим устройство для измерения интенсивности ИК излучения (такие устройства часто называются *радиометрами*), установленное на борту американского метеорологического спутника «Тайрос-II». На спутнике

установлены три прибора для измерения ИК излучения: пятиканальный радиометр с малым полем зрения, двухканальный радиометр с широким полем зрения и датчик горизонта (рис. 9.18).

Пятиканальный радиометр состоит из пяти независимых радиометров, каждый из которых выделяет отраженное от Земли солнечное излучение, собственное излучение Земли, излучение водяных паров атмосферы, отраженное излучение от облаков и излучение в окне прозрачности атмосферы (7,15—12 мкм).

На рис. 9.19 показана конструкция одного из каналов радиометра. Радиационный поток проходит фильтр 1 и линзы 2, 3, 4. Между линзой 4 и чувствительным элементом 5 (терморезистором, фотосопротивлением, болометром) находится так

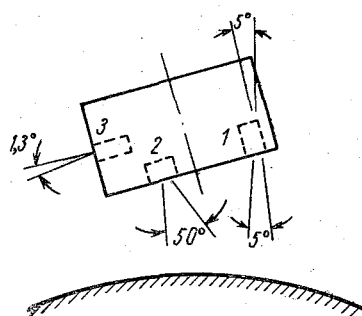


Рис. 9.18. Расположение ИК аппаратуры на спутнике «Тайрос-П».

1 — пятиканальный радиометр; 2 — двухканальный радиометр; 3 — датчик горизонта.

называемое иммерсионное вещество 6, которое способствует увеличению разрешающей способности оптической системы.

Если угол зрения составляет несколько градусов, то при высоте спутника в несколько сотен километров в поле зрения радиометра оказывается участок Земли с линейными размерами в несколько десятков километров.

Выходные контакты 7, 8 чувствительного элемента подсоединяются к схеме, предназначенной для усиления сигналов. Сущность процессов, происходящих в схеме, показанной на рис. 9.19а, заключается в следующем. С помощью мотора 10

вращается диск 9, одна половина которого зеркальная, а другая зачерненная (рис. 9.19 б). Попеременное отражение радиации отражающей половиной диска на чувствительный элемент приводит к появлению модулированного сигнала (с частотой модуляции 44 гц), который соответствует соотношению между потоками ИК излучения от эталона и объектива. Усиленный до достаточного уровня сигнал на выходе схемы подается на двухполупериодный выпрямитель и далее на выходной RC-фильтр, подавляющий частоту модуляции и выделяющий полезный сигнал, который является электрическим аналогом температуры излучающего объекта или интенсивности радиации, отраженной от объекта. Так как каждый из каналов предназначен для приема определенного спектра ИК излучения, оптика каждого радиометра имеет разные кривые спектральной чувствительности.

Различают РТС с орбитальным запоминанием и немедленной передачей.

Рассмотренная выше телевизионная и инфракрасная аппаратура входит в состав РТС с *орбитальным запоминанием*. Эти РТС характерны тем, что получаемая от датчиков информация с помощью специального бортового запоминающего устройства записывается на технический носитель (чаще всего магнитную ленту) и в моменты прохождения спутника над определенным приемным пунктом с помощью радиопередатчика «сбрасывается» на Землю.

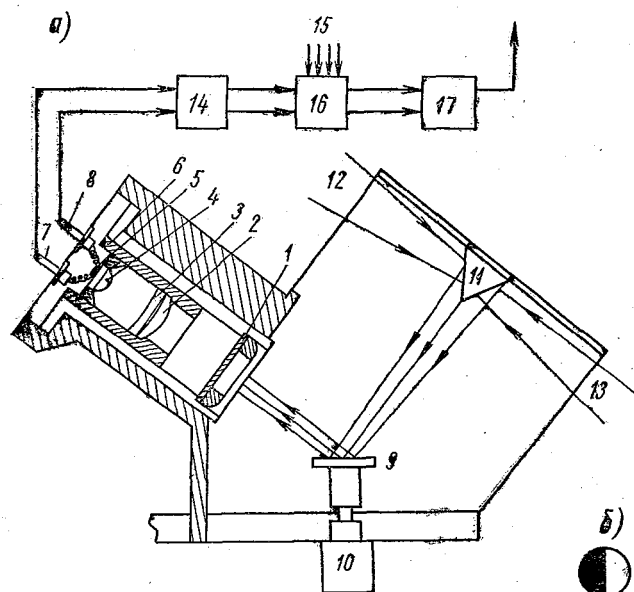


Рис. 9.19. Упрощенная схема одного канала пятиканального радиометра.

а — один из каналов: 1 — фильтр, 2, 3, 4 — линзы, 5 — чувствительный элемент, 6 — иммерсионное вещество, 7, 8 — выходные контакты, 9 — диск-прерыватель, 10 — мотор, 11 — призма, 12 — лучи от эталона, 13 — лучи от объектива, 14 — предварительный усилитель, 15 — входы от других четырех каналов, 16 — блок магнитной записи, 17 — бортовой радиопередатчик; б — диск-прерыватель (вид сверху).

Второй разновидностью спутниковых РТС являются РТС с *передачей*, которые передают информацию сразу после ее получения; эта информация может быть принята в любом пункте Земли при наличии в нем приемного устройства.

Сведения о приемной аппаратуре космических метеорологических систем. Рассмотрим для примера наземную установку, используемую для приема информации со спутников, аппаратура которых работает в режиме непосредственной передачи. Такие приемные установки выпускаются сейчас некоторыми

странами, осуществляющими прием информации от американских метеорологических спутников.

Система, выпускаемая в Финляндии (индекс SR-11), рассчитана на прием сигналов с несущей частотой 137,3 МГц. Антенна применена спиральная. В основании антенны смонтирован антенный усилитель, обеспечивающий подачу на вход приемника сигнала достаточной амплитуды. Приемник выполнен по су-

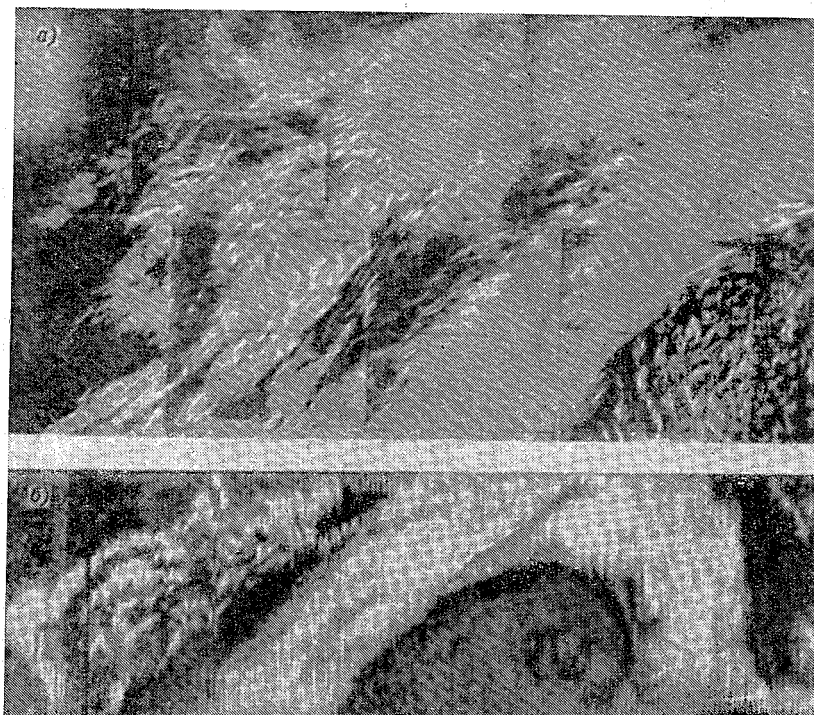


Рис. 9.20. Сопоставление фотографий одного и того же циклона, принятых по телевизионному (а) и инфракрасному (б) каналам.

пергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты (первая промежуточная частота 30 МГц, вторая — 10,7 МГц).

Вращать антенну можно с помощью специальных устройств, органы управления которыми выведены на переднюю панель приемника. Антенна может перемещаться по углу места на 180° и по азимуту на 720° (два полных оборота). Можно использовать ее и в режиме автоматического слежения за спутником.

Прибор снабжен специальными устройствами для наблюдения телевизионных и инфракрасных изображений. Для регист-

рации этих изображений может быть использована магнитная лента (в комплект SR-11 входит специальный магнитофон), фото пленка (для чего имеется автоматическая фотокамера с комплектом приборов для обработки фото пленки) либо светочувствительная бумага (в комплекте есть факсимильное записывающее устройство).

Имеется также устройство для автоматического нанесения на каждую фотографию даты и времени получения снимка.

Указанная аппаратура способна на средней широте принимать 2—3 телевизионных кадра за один проход спутника. Дальность действия радиолинии примерно 3400 км.

На рис. 9.20 показаны фотографии одного и того же циклона, снятые с индикаторов телевизионного и инфракрасного изображений.

Основные выводы

1. Основное назначение радиотелеметрических систем (РТС) — обеспечить передачу по радио информации об измеряемых величинах. Главными признаками, по которым классифицируются РТС, являются способы разделения каналов, из которых наиболее употребительны частотный и временной.

2. Передающий комплекс РТС содержит датчики телеметрируемых величин и контрольного параметра, шифратор и радиопередатчик, а приемный комплекс состоит из радиоприемника, дешифратора и регистрирующего устройства.

3. Сущность работы РТС с частотным разделением каналов состоит в выделении каждому каналу отдельной полосы частот (поднесущих частот), а РТС с временным разделением каналов — в последовательной (поочередной) передаче на одной несущей частоте сигналов от различных датчиков.

4. В практике гидрометеорологической службы РТС нашли самое широкое применение. Наиболее часто используются РТС с временным разделением каналов (автоматические метеорологические станции, радиозонды А-22), с частотным разделением каналов (радиоволнограф, радиовертушка), с комбинированным разделением каналов (радиозонд РКЗ).

5. Особую группу РТС составляют космические метеорологические системы. Существуют две основные разновидности бортовой аппаратуры РТС: с орбитальным запоминанием и немедленной передачей. Главные виды информации метеорологических спутников — телевизионная и инфракрасная.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Каково основное назначение радиотелеметрических систем? Изобразите типовую блок-схему РТС и поясните назначение каждого элемента, входящего в нее.

2. Что обозначают сочетания ЧМ—АМ, АИМ—ЧМ, КИМ—ЧМ?
3. Поясните назначение элементов, входящих в РТС с частотным разделением каналов.
4. Каково назначение коммутаторно-модуляторных устройств?
5. Опишите принцип разделения каналов в автоматических метеорологических станциях М-36 и ДАРМС.
6. Изобразите блок-схемы и поясните работу РТС радиоизмерителей волн и течений.
7. Опишите работу радиотелеметрических систем вертикального зондирования атмосферы.
8. В чем различие (с точки зрения характеристик РТС) систем «Малаяхит» — А-22 и «Метеор» — РКЗ?
9. Перечислите контрольные сигналы, используемые в метеорологических РТС. Каково назначение этих сигналов?
10. Как работает система передачи телевизионных изображений с метеорологических спутников?
11. Опишите принцип действия РТС, обеспечивающих передачу изображений, полученных в спектре ИК излучения.
12. Поясните работу приемного устройства, работающего в наземном комплексе космической метеорологической системы.
13. Изобразите блок-схему спутниковой РТС с орбитальным запоминанием.
14. Приведите примеры РТС с комбинированным разделением каналов.

ГЛАВА 10

РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

§ 10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОИЗМЕРЕНИЯХ

Мы уже упоминали (глава 1) о том, что под радиоизмерениями понимаются измерения с помощью радиосредств радиотехнических параметров, к которым относят как параметры радиосигналов (напряженность поля, мощность, ток, напряжение, частота, фаза), так и характеристики радиоэлектронных цепей и систем (чувствительность, частотные, фазовые, амплитудные характеристики, индуктивность, емкость).

Радиотехнические методы измерений благодаря высокой точности и чувствительности все больше внедряются в различные области науки и техники для точного измерения самых разнообразных физических величин, включая гидрометеорологические. Однако эти методы не являются, строго говоря, радиоизмерениями, а составляют вполне определенные области применения радиоэлектроники: радиотелеметрию, радиоуправление, радиолокацию, которые в настоящей главе не рассматриваются.

Радиоизмерение, как и всякое другое измерение, имеет своей целью сравнение измеряемой величины с помощью мер и измерительных приборов с определенным значением этой величины, принятым за единицу.

При измерениях пользуются разными приемами сравнения измеряемой величины с единицей измерения. Применение того или иного приема обусловлено рядом причин: природой измеряемой величины, условиями ее измерения, схемой и конструкцией измерительного прибора, требуемой точностью. В связи с этим методы можно классифицировать с разных точек зрения.

По способу получения числового значения измеряемой величины измерения делятся на три вида: прямые, косвенные и совокупные.

Прямыми называются такие измерения, при которых измеряемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно или при помощи измерительного прибора, предвари-

тельно проградуированного в данных единицах. При этом значения измеряемой величины получают непосредственно в процессе измерения.

Косвенными называются такие измерения, при которых измеряется не сама величина непосредственно, а другие величины, связанные с измеряемой величиной определенной математической зависимостью.

Например, измерив силу постоянного тока и напряжение на каком-либо участке цепи, значение мощности постоянного тока можно получить, перемножив значения величин тока и напряжения.

Совокупными называются такие измерения, которые состоят из нескольких прямых измерений одной или нескольких однородных величин, причем одно измерение отличается от другого тем, что оно выполняется при других условиях или при других сочетаниях измеряемых величин. Числовые значения измеряемых величин можно найти, решив несколько уравнений, полученных в результате измерений.

Наибольшее распространение в радиоизмерительной практике получили прямые измерения. Перечислим методы прямых измерений:

1. Метод непосредственной оценки, при котором с помощью мер или измерительных приборов оценивается вся измеряемая величина. Примером является процесс измерения с помощью стрелочных приборов.

2. Дифференциальный (разностный) метод, при котором с помощью измерительных приборов измеряется разность между измеряемой и известной величинами. Примером такого метода является определение частоты колебаний с помощью заданной частоты путем смешивания колебаний обеих частот и выделения разностной частоты.

3. Нулевой метод, при котором эффект действия измеряемой величины компенсируется эффектом известной величины, так что их взаимное действие становится равным нулю. Примерами могут служить измерения, основанные на применении мостовых схем, в диагональ которых включаются приборы, довольно точно определяющие момент равенства измеряемой и известной величин.

4. Метод замещения, при котором измеряемая величина замещается в измерительной установке равновеликой ей известной величиной, но так, чтобы факт замещения не вызвал изменения в состоянии измерительного прибора. Примером является измерение электрического сопротивления путем включения в схему вместо измеряемого сопротивления образцового магазина сопротивлений.

Приведем понятия, часто встречающиеся в практике радиоизмерений.

Мера — это конкретный образец (катушка индуктивности, конденсатор, резистор и др.), с известной точностью воспроизводящий единицу измерения (генри, фараду, ом и др.) либо ее кратное или дробное значение. Для получения разных значений одной и той же электрической величины применяются так называемые *магазины мер* или *меры с переменным значением*, снабженные соответствующими шкалами.

Измерительный прибор — это устройство, предназначенное для сравнения измеряемой величины с мерой.

Меры и измерительные приборы разделяются на *рабочие*, служащие для практических целей измерений, и *образцовые*, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц измерения.

Радиоизмерительная техника характеризуется большим разнообразием типов, групп и подгрупп из-за многочисленности электрических и радиотехнических величин, подлежащих измерению, и очень широкими пределами их возможных значений.

Все меры и измерительные приборы, находящиеся в эксплуатации, должны обязательно периодически проверяться в специальных учреждениях Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. Если же приходится делать проверку или градуировку измерительных приборов в условиях, когда нельзя обратиться в учреждения Комитета стандартов, то необходимо использовать рабочие приборы более высокого класса точности, чем проверяемые.

§ 10.2. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Любое измерение, как бы тщательно оно проведено ни было, сопровождается погрешностями, возникновение которых неизбежно в реальных условиях. Полный учет и устранение источников погрешностей невозможны. Однако необходимо всегда стремиться в наибольшей степени избежать погрешностей, знать законы их возникновения, учитывать их при анализе результатов измерения.

Все погрешности разделяются на три основные категории: систематические, грубые (промахи) и случайные.

Систематические погрешности — это погрешности, величина и знак которых в процессе измерений остаются постоянными или изменяются по известному закону. Возникновение систематических погрешностей обуславливается разными причинами: несовершенством прибора, влиянием окружающих условий, неточностью градуировки шкалы, неудачной схемой измерения и т. п.

В зависимости от причины, вызывающей погрешность, систематические погрешности подразделяются на инструментальные, личные, погрешности установки и погрешности метода.

Инструментальные погрешности возникают из-за конструктивных недостатков прибора (например, мертвого хода регулировочного механизма). Эти погрешности обычно можно учесть, введя в показания приборов соответствующие поправки, выявляемые в процессе проверок приборов.

Личные погрешности связаны с индивидуальными особенностями лиц, производящих измерения, несовершенством их зрения или слуха.

Погрешности установок возникают в результате влияния внешних условий (давления, температуры, влажности, наличия электромагнитного поля) или неудачного взаимного расположения измерительных приборов и проводов, их соединяющих.

Погрешности метода (называемые иногда теоретическими погрешностями) возникают тогда, когда произведен неправильный выбор метода измерения или используются приближенные формулы. Примерами погрешностей метода являются ошибки в измерениях, возникающие за счет паразитных связей и утечек в элементах схем высокочастотных приборов.

Помимо введения в показания приборов поправок, часто пользуются и такими способами исключения систематических погрешностей, как использование уже упоминавшегося метода замещения. Так как и измеряемая, и образцовая величины при этом методе находятся в одинаковых условиях, систематическая погрешность исключается.

Иногда пользуются так называемым *способом компенсации по знаку*. Сущность этого способа состоит в том, что величина погрешности входит в два измерения с разным знаком, а результирующее значение измеряемой величины определяется как среднее арифметическое двух измерений. Понятно, что систематическая погрешность при этом способе получается равной нулю.

Выявление систематических погрешностей производят путем проведения измерений одной и той же величины приборами, различными по принципам действия и способам измерений. В то же время следует помнить, что на величину систематической ошибки никакое увеличение числа измерений не влияет.

Грубые погрешности (промахи) — это погрешности из-за грубых просчетов измеряющего. Обнаружить промах можно всегда, рассматривая ряд измерений и находя в нем резко выделяющиеся результаты. Выявленные в процессе измерений промахи при обработке результатов должны быть исключены.

Случайные погрешности. К случайным погрешностям относят все те погрешности, которые не имеют явно выраженной регулярности. Большинство случайных погрешностей обусловлено суммарным влиянием на результаты измерений таких факторов, как непредвиденные изменения температуры, давления, влажности,

воздействие толчков, вибраций, люфтов, изменений напряжения источников питания и т. д.

Величина случайных погрешностей заранее не может быть вычислена и может иметь различные абсолютные величины и знаки. Если число измерений невелико, то появление случайных погрешностей не имеет никакой закономерности. Если же провести серию измерений, то можно выявить некоторые закономерности в появлении случайных погрешностей. Эти закономерности, полученные в теории вероятностей, позволили сделать два важных вывода.

1. При большом числе измерений случайные погрешности, одинаковые по абсолютной величине, но различные по знаку, встречаются одинаково часто. При этом количество положительных и отрицательных погрешностей одинаково.

2. Малые погрешности встречаются чаще, чем большие, причем очень больших погрешностей не встречается.

Поясним на примере эти выводы. Пусть истинное значение какой-либо измеряемой величины равно X . В результате измерений этой величины получен ряд значений: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Случайные погрешности будут определяться разностями между истинным значением величины и соответствующими значениями результатов измерения, т. е. $X - x_1, X - x_2, X - x_3, \dots, X - x_n$. Предположим, что самое большое значение случайной погрешности не превосходит величину $X - x_7$. Разобьем весь интервал значений от x_1 до x_7 на возрастающие по величине группы отдельно для отрицательных и положительных значений $X - x_i$, которые будем обозначать через δ . Затем подсчитаем количество погрешностей, попавших в каждую группу, и изобразим на графике зависимость между соответствующими группами и количеством погрешностей, содержащихся в них.

Получим ступенчатую диаграмму (рис. 10.1 а), где высота каждой ступеньки $N_1, N_2, N_3, \dots, N_7$ пропорциональна количеству погрешностей, а основание $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ пропорционально соответствующему значению погрешностей.

Если проделать большое количество измерений, увеличив тем самым число ступенек и уменьшив их основания, то огибающая, проходящая через вершины ступенек, примет вид плавной кривой, которая носит название *кривой нормального распределения случайных величин* или *кривой Гаусса* (кривая 1 на рис. 10.1 б). Кривая 2 на рис. 10.1 б имеет меньшую высоту, т. е. соответствует большему числу больших погрешностей. Следовательно, высота кривой определяет меру точности произведенных измерений: чем выше кривая, тем точнее измерения.

Основные методы оценки точности измерений. Если измерений проведено очень много, то распределение погрешностей весьма близко к симметричной кривой Гаусса и значение вели-

чины погрешности определяется как среднее арифметическое значение из ряда замеров

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}, \quad (10.1)$$

где $\bar{X}$ — среднее арифметическое; n — число измерений, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ — величины, полученные при измерениях.

Из симметричности кривой Гаусса следует, что в этом случае погрешность должна быть близкой к нулю, так как число одинаковых по величине погрешностей с разными знаками примерно одинаково. Если же число измерений сравнительно невелико, то среднее арифметическое может довольно существенно отличаться

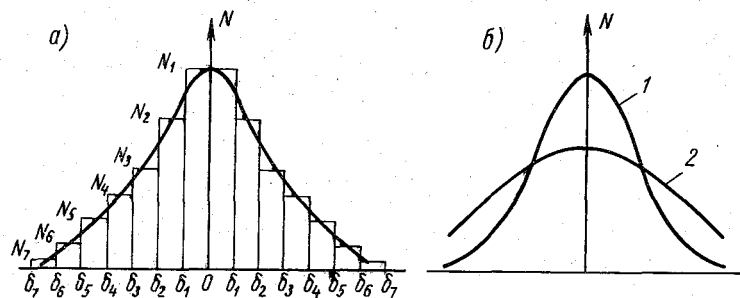


Рис. 10.1. Нормальное распределение случайных величин.

а — ступенчатая и плавная диаграммы; б — кривые Гаусса.

от истинного значения измеряемой величины, поэтому пользуются таким показателем, который не зависит от знаков отдельных случайных ошибок и более наглядно отражает наличие сравнительно крупных ошибок, которые в наибольшей степени влияют на достоверность результатов измерений. Таким показателем является *средняя квадратическая погрешность*

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \dots + \delta_n^2}{n}}, \quad (10.2)$$

где σ — средняя квадратическая погрешность; n — число измерений; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ — разности между истинным значением величины и результатами измерений.

Средняя квадратическая погрешность, как видно из выражения (10.2), имеет двойной знак (плюс и минус), что указывает на одинаковую вероятность появления положительной и отрицательной погрешности.

Средняя квадратическая погрешность позволяет оценить точность измерений даже при сравнительно небольшом числе измерений. Так, например, при числе измерений $n=12$ погрешность не превышает $\pm 20\%$.

Максимальную погрешность измерений можно определить, исходя из полученного в теории вероятностей уравнения кривой Гаусса

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}, \quad (10.3)$$

где y — ордината кривой на рис. 10.1; e — основание натуральных логарифмов ($e=2,7183$); σ — средняя квадратическая погрешность; δ — разность между истинным значением величины и результатом измерений.

Если придавать величине δ разные значения, выраженные через средние квадратические погрешности σ , то формула (10.3) дает следующие значения вероятности появления достоверного результата измерения:

Величина погрешности измерения δ . . .	$\frac{1}{2} \sigma$	$\frac{2}{3} \sigma$	σ	2σ	3σ
Вероятность появления достоверного результата измерения (в процентах)	38	50	68	95	99,7

Как видно, вероятность появления погрешности, превышающей значение 3σ , составляет всего $100\% - 99,7\% = 0,3\%$. Принято погрешность, равную 3σ , называть *максимальной погрешностью измерений*. Это соответствует тому, что погрешность, превышающая 3σ , может встретиться только в одном из 370 измерений.

Приведенные выше рассуждения и формулы предполагают, что истинное значение величины X нам известно. В большинстве же практических случаев оно неизвестно, так что измеряемая величина определяется всегда с той или иной погрешностью. Чем больше число измерений, тем ближе к истинному значению измеряемой величины среднее арифметическое из ряда измерений.

Для оценки достоверности каждого измерения x_i составляют разности $x_i - \bar{X}$ и сравнивают их с величиной σ . Если $x_i - \bar{X} > 3\sigma$, то измерение считается сомнительным и исключается из анализируемого ряда.

Наиболее вероятные значения измеряемой величины $X_{н. в.}$, как показывает теория, определяются из соотношения

$$X_{н. в.} = \bar{X} \pm \frac{2}{3} \sigma. \quad (10.4)$$

Смысл наиболее вероятной величины таков, что вероятность появления погрешностей, больших или меньших, чем $X_{н. в.}$, одинакова.

Абсолютные и относительные погрешности. Рассмотренные выше погрешности — это абсолютные значения, выраженные

в единицах измерения данной величины. Это так называемые *абсолютные погрешности*, к которым относятся, например, рассмотренные выше значения δ .

Более полно точность измерений характеризуется *относительной погрешностью измерений* γ , равной отношению (чаще всего в процентах) абсолютной погрешности δ к значению измеряемой величины x_i

$$\gamma = \frac{\delta}{x_i} 100\%. \quad (10.5)$$

Сравнительная оценка точности измерительных приборов обычно производится по величине так называемой *приведенной относительной погрешности* $\gamma_{\text{пр}}$, равной отношению абсолютной погрешности к верхнему пределу шкалы $x_{\text{пр}}$.

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\delta}{x_{\text{пр}}} 100\%. \quad (10.6)$$

В зависимости от условий эксплуатации все погрешности разделяются на основные и дополнительные.

Основные погрешности включают в себя погрешности, возникающие при работе измерительного прибора в так называемых *нормальных условиях*, которые соответствуют техническим требованиям к данному прибору. Нормальными обычно считаются следующие условия: температура $20 \pm 5^\circ \text{C}$, относительная влажность воздуха не более 70%, отсутствие помех, допустимые отклонения питающего напряжения и т. д.

Однако выдержать нормальные условия удается далеко не всегда, поэтому возникают и *дополнительные погрешности*. К этим погрешностям, как правило, относятся систематические погрешности, а также погрешности, вызываемые влиянием внешнего электромагнитного поля, изменением температуры и влажности, напряжения или частоты источников питания и т. д. Обычно дополнительные погрешности в виде поправок указываются в эксплуатационной документации.

При учете влияния условий работы прибора необходимо руководствоваться следующими правилами сложения погрешностей.

Сначала суммируются алгебраически систематические погрешности. Суммарная систематическая погрешность арифметически складывается с максимальной или средней квадратической случайной погрешностью. Полученная общая погрешность имеет знак систематической погрешности.

Пусть, например, известны систематические погрешности установки для измерения емкости конденсатора: $\delta_1 = -0,8 \text{ нф}$; $\delta_2 = +0,2 \text{ нф}$. Вычисленная из ряда измерений средняя квадра-

тическая погрешность $\sigma = \pm 0,4 \text{ нф}$. Тогда общая погрешность вычисляется так:

$$\delta_{\text{систем}} = -0,8 + 0,2 = -0,6 \text{ нф}; |\delta_{\text{общ}}| = 0,6 + 0,4 = 1 \text{ нф}; \\ \delta_{\text{общ}} = -1 \text{ нф}.$$

§ 10.3. РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

При радиоизмерениях пользуются приборами, которые можно разделить на три группы: 1) приборы общего применения; 2) приборы встроенного контроля; 3) приборы специального применения.

Приборы общего применения используются в радиоизмерениях, производимых в различных областях применения радиозлектроники, и служат для определения общих радиотехнических параметров. В качестве примеров можно привести обычные амперметры, вольтметры, омметры и т. д.

Приборы встроенного контроля — это радиоизмерительные приборы, построенные, как правило, по тем же схемам, что и приборы общего применения, но конструктивно выполненные в виде узла той или иной радиоаппаратуры. Примерами являются приборы контроля напряжения в различных точках схемы радиолокаторов.

Приборы специального применения — это приборы (или чаще комплекты приборов), которые хотя конструктивно и не объединены с радиоаппаратурой, но выпускаются специально для нее. Примером может служить комплект приборов, выпускаемый для радиоизмерений и прилагаемый к радиолокационным станциям.

В настоящей главе рассматриваются только приборы общего применения, так как с приборами встроенного контроля и специального применения знакомятся при изучении конкретных радиоустройств.

Следует отметить, что в радиоизмерениях очень часто применяются обычные электротехнические измерительные приборы, известные учащимся из курса электротехники и в настоящей книге не описываемые.

Магнитоэлектрические индикаторы. Большое количество радиоизмерительных приборов сконструировано так, что измеренная величина определяется по отклонению стрелки магнитоэлектрического прибора, подключенного к измерительной схеме и называемого индикатором. Последовательное включение индикатора дает возможность измерять ток, параллельное включение — напряжение. Применение приборов именно магнитоэлектрической системы обусловлено тем, что они потребляют очень малый ток, не оказывая существенного влияния на токи в схеме.

Принцип действия магнитоэлектрического индикатора поясним с помощью рис. 10.2. Между полюсными наконечниками постоянного магнита NS расположен стальной цилиндр 1. Между магнитопроводом и цилиндром образуется кольцеобразный воздушный зазор 2, в котором создается магнитное поле. В этом зазоре может поворачиваться легкая алюминиевая рамка 3, укрепленная на полуосях 5 в подпятниках 4. На рамку намотан тонкий провод. Ток к рамке подводится через две спиральные пружины 6, которые служат также для создания момента сил, противодействующего повороту рамки.

Магнитное поле измеряемого тока взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита, в результате чего создается вращающий момент. Рамка с приклеенной к ней стрелкой 7 поворачивается на некоторый угол, пропорциональный силе проходящего тока. При изменении направления тока рамка со стрелкой поворачивается в другую сторону, т. е. прибор измеряет только постоянный ток. При прохождении переменного тока стрелка либо колеблется около нуля (при частотах, не превышающих 20 гц), либо стоит на нуле, не успевая следовать за быстро изменяющимся направлением тока, поэтому в приборах, в которых нужно измерять переменный ток, последний выпрямляется и уже после выпрямления пропускается через индикатор.

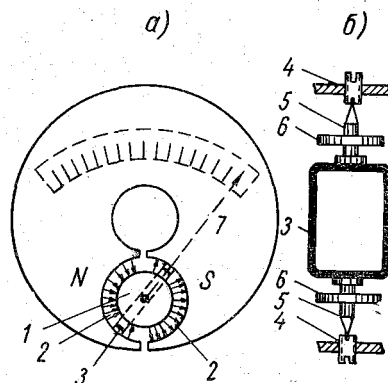


Рис. 10.2. Магнитоэлектрический индикатор.

a — магнитопровод; b — подвижная система.

прямления пропускается через индикатор.

Наиболее широко применяются магнитоэлектрические индикаторы М-24, М-94, М-265, М-1792 и др. Пределы измерения обычно выбирают 50, 100, 150, 200, 300, 500 мка, сопротивление рамки 700—3000 ом.

Система обозначений радиоизмерительных приборов. С 1960 г. введена новая система обозначений радиоизмерительных приборов. Все виды приборов разделены на 16 групп, обозначаемых русскими буквами А, В, М, Е, Р, Ч, Ф, С, Х, И, У, П, Д, Э, Г, Л.

Группа А — приборы для измерения тока, В — приборы для измерения напряжения, М — приборы для измерения мощности, Е — приборы для измерения параметров (сопротивлений, индуктивностей, емкостей, магнитных свойств и др.) в устройствах с сосредоточенными параметрами, Р — приборы для измерения параметров в устройствах с распределенными параметрами, Ч — приборы для измерения частоты, Ф — приборы для измере-

ния сдвига фаз, С — приборы для наблюдения и исследования формы сигналов, Х — приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоаппаратуры, И — приборы для импульсных измерений, У — измерительные усилители, П — приборы для измерения напряженности поля и радиопомех, Д — аттенюаторы и делители напряжения, Э — элементы коаксиальных и волноводных трактов, Г — измерительные генераторы, Л — приборы для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов.

Например, прибор ВЗ-7 является прибором группы В, подгруппы 3 и имеет порядковый номер 7. Для обозначения комбинированных приборов после обозначения группы добавляется буква К, например, ВК7-3. Если прибор выпускается в улучшенной модификации, то в конце обозначения ставится буква А, а при дальнейшей модернизации эта буква заменяется последующими буквами русского алфавита Б, В, Г и т. д. Ниже описываются некоторые методы и приборы, часто применяемые для измерения радиотехнических параметров аппаратуры, используемой в гидрометеорологической службе. Следует отметить, что в эксплуатации находится довольно большое количество радиоизмерительных приборов, выпущенных до 1960 г., т. е. имеющих старые обозначения, поэтому некоторые из описываемых ниже приборов имеют двойной индекс: новый и в скобках старый.

§ 10.4. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И СОПРОТИВЛЕНИЙ

В радиоэлектронике измерение ряда величин производят на частотах до нескольких тысяч мегагерц, где начинает сказываться собственная емкость между деталями и проводами, так что применять можно только те приборы, которые рассчитаны на работу в данном диапазоне.

В отдельных блоках радиоэлектронной аппаратуры протекают очень малые токи, поэтому измерительный прибор должен потреблять ток еще меньший, чтобы не влиять на работу схемы.

И, наконец, в радиосхемах часто применяются колебательные контуры, настроенные на определенную частоту. При подключении прибора его собственные параметры L , C и R вызывают расстройку контура, так что следует применять приборы с минимальными значениями собственных параметров.

Исходя из перечисленных особенностей и сконструированы приборы для измерения напряжения, которые называются **ламповыми (или электронными) вольтметрами**.

Схема лампового вольтметра обычно включает детектор, усилитель и индикатор. В вольтметрах одного типа измеряемое напряжение сначала детектируется, а затем усиливается усилителем постоянного тока (о таких вольтметрах говорят, что они собраны по схеме детектор—усилитель); в вольтметрах другого

типа исследуемое напряжение сначала усиливается, затем детектируется и подается на индикатор (схема усилитель—детектор).

В вольтметрах первого типа измеряемое напряжение выпрямляется диодным детектором и измеряется индикатором, подключенным к детектору через усилитель постоянного тока. Нагрузкой такого детектора (рис. 10.3) является высокоомное сопротивление R . Под воздействием подаваемого на вход схемы измеряемого переменного напряжения конденсатор C заряжается в положительные полупериоды и разряжается в отрицательные. Заряд конденсатора происходит через малое внутреннее сопротивление диода, а разряд — через большое сопротивление R . Поэтому, зарядившись до максимального напряжения в положительный полупериод, конденсатор незначительно разряжается в отрицательный полупериод, в результате чего напряжение на нагрузке R примерно равно амплитудному значению измеряемого напряжения. Это напряжение иногда называют пиковым напряжением, а детектор — пиковым детектором или пик-детектором.

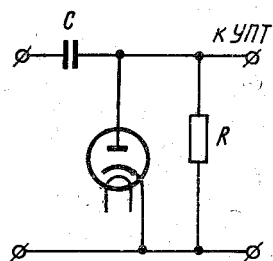


Рис. 10.3. Диодный детектор.

Поскольку собственная резонансная частота входной цепи диода зависит от индуктивности вводов и выводов внутри баллона лампы и вне его, диодный детектор вольтметра выполняется в специальном пробнике, что позволяет производить измерения без дополнительных подводящих проводов. Вольтметры, работающие по схеме детектор—усилитель, применяются для измерения на частотах до нескольких сот мегагерц.

В вольтметрах типа усилитель—детектор измеряемое напряжение предварительно усиливается апериодическим широкополосным усилителем, затем детектируется и подается на индикатор. Усилитель собирается по схеме с отрицательной обратной связью, вследствие чего расширяется полоса пропускания усилителя и уменьшается зависимость показаний вольтметра от питающего напряжения, стабильности параметров ламп и других элементов схемы. Чувствительность такого прибора достигает 1 мВ на всю шкалу (против $1\text{—}1,5\text{ В}$ у вольтметров типа детектор—усилитель).

Иногда в качестве детектора вольтметра используется триод, работающий в режиме анодного детектирования.

Ламповые вольтметры используются не только для измерения малых напряжений, но и больших. В последнем случае применяются делители напряжения, собранные на резисторах или конденсаторах.

Резисторные делители (рис. 10.4 а) применяют только на постоянном токе или на переменном токе с частотой до не-

скольких мегагерц, так как на больших частотах начинают сказываться входные емкости прибора и емкости монтажа.

Емкостные делители (рис. 10.4 б) используют в широком диапазоне частот: от единиц килогерц до десятков мегагерц. Делитель обычно имеет один предел деления и придается к вольтметру в виде приставки. Коэффициент деления определяется по формуле

$$\frac{U_{изм}}{U_{вх}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}. \quad (10.7)$$

При работе с делителем, например, типа Д6-3 (ДНЕ-6) (коэффициент деления равен 100) вольтметр В7-2, имеющий собственные пределы 0—1,5; 0—5; 0—15; 0—50 и 0—150 в, может

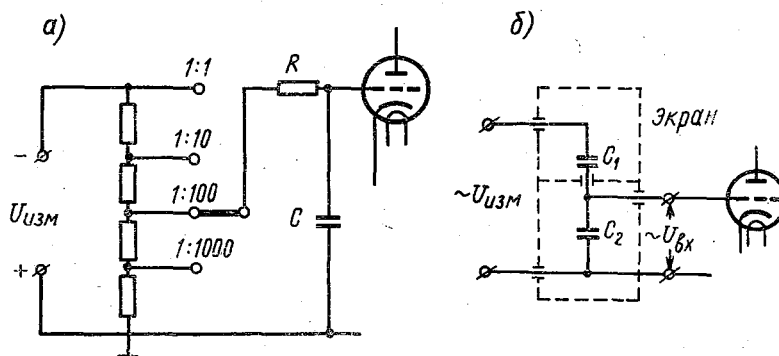


Рис. 10.4. Делители напряжения.

а — резисторный; б — емкостный.

быть использован для измерения напряжения в пределах 0—150; 0—500; 0—1500 и 0—5000 в.

Измерение сопротивлений, как будет показано ниже, может производиться с помощью тех же схем, что и измерение напряжений.

Рассмотрим несколько конкретных типов вольтметров и омметров.

Универсальный вольтметр В7-2 (ВЛУ-2). Вольтметр В7-2 предназначен для измерения напряжений постоянного и переменного токов. Вольтметр собран по схеме детектор—усилитель. Если измеряется постоянное напряжение, то оно подключается непосредственно ко входу усилителя постоянного тока, собранного на двойных триодах 6Н9С. В диагональ моста, образуемого двумя лампами и сопротивлениями, включен индикатор (микроамперметр М-24 на 100 мка). При отсутствии сигнала мост сбалансирован напряжением смещения на сетке одного из триодов. Когда измеряемое напряжение поступает на вход

усилителя, мост разбалансируется и стрелка индикатора отклоняется на угол, пропорциональный измеряемому напряжению.

При измерении переменных напряжений применяется выносной пробник (рис. 10.5). Во время положительного полупериода измеряемого напряжения конденсатор C_1 заряжается до амплитудного значения и напряжение на сопротивлении R_1 оказывается равным этому значению. Это напряжение через сглаживающий фильтр $R_2R_3C_2$ подается на усилитель постоянного тока. Для обеспечения быстрого возвращения стрелки индикатора в нулевое положение при снятии измеряемого напряжения конденсатор C_2 может быть разряжен через сопротивление R_3 , если нажать кнопку K .

Технические характеристики вольтметра В7-2. Пределы измерения напряжений постоянного и переменного токов от 0,1 до 150 в на пяти шкалах 1; 5; 15; 50 и 150 в. Пределы

измерения могут быть расширены при использовании делителей до 5000 в (для переменного тока) и до 15000 в (для постоянного тока). Диапазон рабочих частот 20 гц — 400 Мгц. Основная погрешность измерения прибора в нормальных условиях не превышает $\pm 2,5\%$ от номинала каждой шкалы.

Входное сопротивление вольтметра при измерении постоянного напряжения не ниже 25 Мом, при измерении переменных напряжений на частоте 50 гц не ниже 10 Мом, на частоте 100 Мгц не ниже 50 ком.

Входная емкость пробника не превышает 3 пф (при использовании высокочастотной головки пробника) и 7 пф (при использовании низкочастотной головки).

Электронный милливольтметр В3-13. Милливольтметр В3-13 имеет более высокую по сравнению с прибором В7-2 чувствительность, так как собран по схеме усилитель—детектор. Рассмотрим его принципиальную схему (рис. 10.6).

Входная часть прибора состоит из катодного повторителя на триоде 6СЗП (L_1) и делителей напряжения, включенных до и после него. В зависимости от установленного предела измерения измеряемое напряжение поступает на сетку катодного повторителя полностью (при измерении напряжений ниже 1 в) или через резисторный делитель R_1R_2 . Применение катодного повторителя обеспечивает высокое входное сопротивление и малую входную емкость. Низкое выходное сопротивление катодного повторителя позволяет применять для второго делителя напряжения точные низкоомные проволочные резисторы $R_8—R_{13}$.

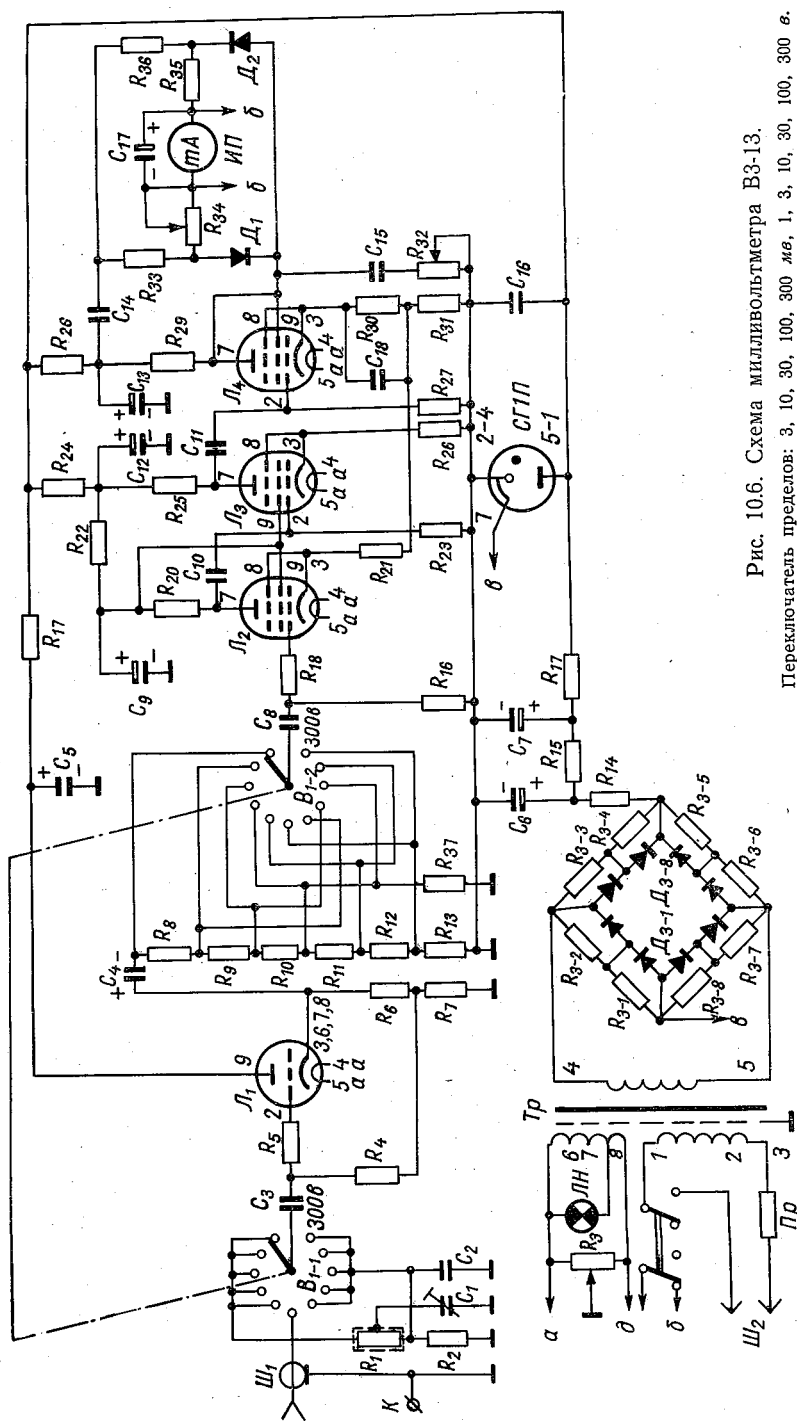


Рис. 10.6. Схема милливольтметра ВЗ-13.

Переключатель пределов: 3, 10, 30, 100, 300 мв , 1, 3, 10, 30, 100, 300 в .

После делителя напряжение поступает на вход трехкаскадного широкополосного усилителя с глубокой отрицательной обратной связью по току.

Детектор в схеме двухполупериодный, собранный по схеме моста, в плечи которого включены диоды Д2В (D_1 и D_2) и резисторы R_{33} и R_{36} . Разделительный конденсатор C_{14} предназначен для обеспечения работы детектора только от переменной составляющей (постоянная через него не проходит). В измерительную диагональ моста включен магнитоэлектрический индикатор (микроамперметр М-94 на 100 мка) с добавочными сопротивлениями R_{34} и R_{35} .

Технические характеристики милливольтметра ВЗ-13. Пределы измерения напряжения от 0,3 мВ до 300 В на 11 шкалах: 3, 10, 30, 100, 300 мВ и 1, 3, 10, 30, 100, 300 В. Диапазон рабочих частот 20 Гц — 1 МГц. Основная погрешность измерения прибора в нормальных условиях $\pm 4\%$ (на пределах 3—300 В в диапазоне частот от 20 кГц до 1 МГц погрешность возрастает до $\pm 6\%$). Входное сопротивление прибора для напряжений выше 1 В находится в пределах от 1 до 1,6 Мом, а для напряжений менее 1 В находится в пределах от 0,5 до 0,8 Мом. Входная емкость прибора на пределах 3 мВ — 1 В не более 25 пф, на пределах 3—300 В не более 15 пф.

Вольтметр ВК7-7. Вольтметр ВК7-7 предназначен для измерения напряжений и сопротивлений и собран по схеме детектор—усилитель. Прибор имеет выносной пробник, в котором смонтированы малогабаритные резисторы, конденсаторы и диод 6Д8Д, что позволяет получить очень малую входную емкость и использовать прибор на высоких частотах.

В качестве омметра прибор работает как ламповый вольтметр постоянного тока с набором калиброванных сопротивлений, которые обеспечивают установку того или иного диапазона измеряемых сопротивлений. Измеряемое сопротивление включается последовательно с одним из калиброванных сопротивлений. На измеряемом сопротивлении ламповый вольтметр постоянного тока измеряет падение напряжения, которое является частью стабилизированного измерительного напряжения. На шкале индикатора имеется градуировка в значениях сопротивлений. Для создания стабилизированного измерительного напряжения используется однополупериодный выпрямитель на полупроводниковых диодах, выходное напряжение которого стабилизировано стабилитроном типа СГ2П.

Технические характеристики вольтметра ВК7-7. Прибор измеряет напряжение переменного тока в пределах от 0,3 до 150 В на пяти шкалах: 1,5; 5; 15; 50 и 150 В. Диапазон рабочих частот — от 20 Гц до 700 МГц. Основная погрешность в нормальных условиях $\pm 2,5\%$. Входное сопротивление прибора 10 Мом понижается на частоте 100 МГц до 50 ком.

Входная емкость пробника 3 *пф*. Прибор измеряет и напряжение постоянного тока от 0,3 до 500 *в*.

Как омметр прибор измеряет сопротивления от 100 *ом* до 50 *Мом* в пяти пределах с множителями X1, X10, X100, X1000 и X10000. Основная погрешность $\pm 10\%$.

Приведем более краткие описания других часто применяющихся приборов для измерения напряжения.

Вольтметр ВК7-3 (А4-М2) предназначен для измерения постоянных и переменных напряжений, сопротивлений, индуктивностей и емкостей. Диапазон измерения напряжений постоянного тока от 0,1 до 1000 *в*, а при использовании выносного делителя диапазон измеряемых напряжений расширяется до 3000 и до 10 000 *в*.

Диапазон измерения напряжений переменного синусоидального тока от 0,1 до 1000 *в* на семи поддиапазонах 1; 3; 10; 30; 150; 300; 1000 *в* (эффективные значения). Диапазон рабочих частот от 50 *гц* до 60 *Мгц*.

Диапазон измерения сопротивлений постоянному току, разбитый на семь поддиапазонов, от 1 *ом* до 100 *Мом*. Диапазон измерения емкостей от 100 *пф* до 100 *мкф*, диапазон измерения индуктивностей от 100 *мгн* до 10^5 *гн*.

Основным элементом прибора ВК7-3 является мост постоянного тока с индикатором, обеспечивающим измерение постоянных напряжений, а совместно с диодным детектором и переменных напряжений. Измерение величин *L* и *C* основано на измерении падения напряжения на испытуемой индуктивности или емкости. Отклонение стрелки индикатора прямо пропорционально величине индуктивности и обратно пропорционально величине емкости. При измерении *L* и *C* используется напряжение с частотой 50 *гц*, которое подается на измеряемую индуктивность или емкость от обмотки силового трансформатора.

Вольтметр ВК7-9 — универсальный ламповый вольтметр. Предел измерения постоянного напряжения от 30 *мв* до 500 *в* (с делителем до 20 000 *в*), переменного напряжения от 100 *мв* до 1000 *в*, сопротивления от 2 *ом* до 1000 *Мом*. Диапазон рабочих частот от 20 *гц* до 700 *Мгц*. Входное сопротивление на постоянном токе 15 *Мом*, на переменном 3 *Мом*. Входная емкость при измерениях высокочастотным пробником не превышает 1,3 *пф*.

Ампервольтметр АВО-5М — многопредельный прибор, предназначенный для измерения постоянного и переменного напряжения и тока и сопротивлений постоянному току. Прибор имеет дополнительную градуировку в децибелах. Диапазон частот от 50 до 1000 *гц*. Пределы измерений: постоянного и переменного напряжения 3; 12; 30; 300; 600; 1200 и 6000 *в*; силы постоянного тока 3 и 300 *мка*; 3; 30 и 120 *ма*; 1,2 и 12 *а*; силы переменного тока 3; 30 и 120 *ма*; 1,2 и 12 *а*; сопротивления постоянному току 3 и 300 *ком* и 30 *Мом*. Прибор собран по мосто-

вой схеме на сопротивлениях, что дает возможность измерять в его рабочем диапазоне частот с погрешностями порядка $\pm (2-5\%)$. Этот прибор очень распространен и является универсальным измерительным прибором при ремонтных и регламентных работах в схемах для частот до 1000 *гц*.

В последнее время выпущено довольно много новых вольтметров, среди которых особое место занимают приборы с так называемым *цифровым отсчетом*. Они снабжены специальными устройствами, преобразующими величину напряжения в число импульсов, которые подаются на пересчетные устройства с индикационными приборами; на них высвечиваются цифры, соответствующие значению измеряемой величины в вольтах, милливольтах и т. д., что является преимуществом перед стрелочными индикаторами. Погрешность измерения таких приборов часто выражается в так называемых единицах счета (ед. сч.).

§ 10.5. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Для измерения мощностей в диапазоне частот до 1 *Мгц* можно определить сопротивление цепи и протекающий по ней ток. Если сопротивление цепи активное, то мощность можно найти по формуле $P=I^2R$, если реактивное, то по формуле $P=I^2R\cos\varphi$.

Для частот, превышающих 1 *Мгц*, пользуются обычно другими, описываемыми ниже методами.

В зависимости от диапазона частот, величины измеряемой мощности и требуемой точности измерений различают несколько основных методов измерения мощности на сверхвысоких частотах.

1. Электрический метод (метод измерения тока или напряжения при известной величине сопротивления). Этот метод используется в диапазоне частот от 50 до 2000 *Мгц* и позволяет измерять среднюю мощность от 60 *мвт* до 500 *вт* с точностью $\pm 20\%$ и импульсную мощность до нескольких тысяч киловатт с точностью до $\pm 30\%$.

2. Фотометрический метод, основанный на превращении электромагнитной энергии в световую. Он используется для измерения мощности от 1 до 120 *вт* в диапазоне частот до 5000 *Мгц*; точность метода $\pm 10-12\%$.

3. Калориметрический метод, основанный на превращении электромагнитной энергии в тепловую. Применяют этот метод, когда необходимо измерить мощность от единиц ватт до сотен киловатт в диапазоне частот до 30 000 *Мгц*. Точность измерения мощности может быть доведена до $\pm 3\%$.

4. Метод, основанный на использовании термосопротивлений (терморезисторов или болометров). Метод применим для измерения небольших мощностей, его погрешность $\pm 15\%$.

5. Метод механического (пондеромоторного) действия электромагнитного поля, основанный на превращении электромагнитной энергии в энергию механическую. Метод применим главным образом в волноводных линиях передачи, дает возможность измерять мощность от десятков милливатт до сотен киловатт с точностью до $\pm 1,5\%$.

Рассмотрим подробнее некоторые из перечисленных методов.

Электрический метод. На известном активном сопротивлении R_n , включенном в качестве эквивалента нагрузки передающей коаксиальной линии (рис. 10.7), ламповым вольтметром измеряют напряжение. Чтобы ламповый вольтметр меньше влиял на работу линии и не вносил заметного рассогласования, его подключают только к известной части нагрузки R_1 . В качестве нагрузочного сопротивления используют поверхностное углеродистое сопротивление, заключенное в специальный согласующий экран.

Мощность, потребляемая эквивалентом нагрузки, подсчитывается по формуле

$$P = \frac{U_m^2 R_n}{2R_1^2}, \quad (10.8)$$

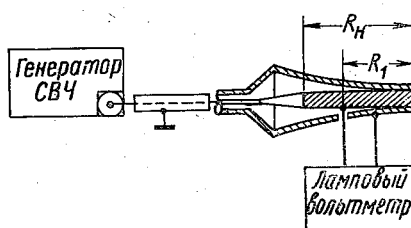


Рис. 10.7. Блок-схема измерения мощности электрическим методом.

где U_m — амплитудное значение напряжения генератора СВЧ.

На рассмотренном методе работают, например, приборы МЗ-3А, МЗ-5А, МЗ-9, которые называются электронными измерителями мощности. Их основные характеристики приводятся в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Тип прибора	Диапазон частот, МГц	Пределы измерения мощности		Погрешность измерения, %	R_n , ом
		средней, вт	в импульсе, кВт		
МЗ-5А	400—850	—	0,5—500	30	75
МЗ-3А	30—1200	0,25—15	0,005—5	20—30	75
МЗ-9	150—3000	5	0,001—5	20	50

Фотометрический метод. Фотометрический измеритель мощности — это отрезок коаксиальной линии, ко внутренней жиле которой подключена лампочка накаливания, являющаяся нагрузкой линии. Эта линия подключается к линии передачи энергии (рис. 10.8). В наружном проводе коаксиальной линии имеется отверстие, через которое свет от лампочки попадает на

фотоэлемент; в цепь фотоэлемента включен микроамперметр, показания которого пропорциональны измеряемой мощности.

Достоинство метода — простота конструкции и отсутствие связи индикатора с цепью высокой частоты. Недостатком является изменение характеристик фотоэлемента с течением времени.

Калориметрический метод. В качестве нагрузочного сопротивления при этом методе используется вода, которая отделяется от волновода тонкой диэлектрической оболочкой. Разность температур на входе и выходе нагрузки (калориметра) измеряют прибором, состоящим из термопары и магнитоэлектрического индикатора. Водомером измеряют количество воды, протекающее через калориметр. Поглощенная водой мощность колебаний зависит от скорости протекания воды и потери тепла в калориметре. При постоянной скорости протекания воды в калориметре разность температур на входе и выходе калориметра пропорциональна мощности.

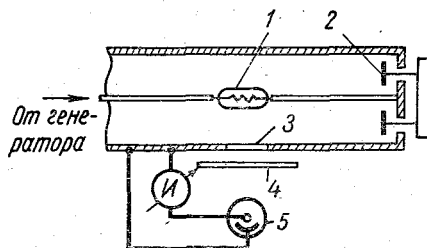


Рис. 10.8. Фотометрический измеритель мощности.

1 — лампа накаливания; 2 — согласующее устройство; 3 — отверстие; 4 — светофильтр; 5 — фотоэлемент.

Этот метод применим главным образом в сантиметровом и дециметровом диапазонах.

Примерами приборов, работающих на калориметрическом методе, являются измерители МЗ-4 и МЗ-11, предназначенные для измерения выходной мощности генераторов, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн.

Достоинствами калориметрических ваттметров являются высокая точность измерения, возможность градуировки по току любой частоты (в том числе 50 гц), возможность использовать их на самых высоких частотах при любых мощностях.

Недостатки: конструктивная громоздкость и невозможность получения быстрого отсчета.

Метод, основанный на использовании термосопротивлений. При измерении малых величин мощности в качестве элементов, «чувствующих» изменение уровня мощности, используются термосопротивления — терморезисторы и болометры. Наибольшее распространение при измерениях получили терморезисторы. Терморезистор представляет собой небольшой шарик (бусинку) из полупроводникового материала, поддерживаемый двумя тонкими проволочками и заключенный в стеклянный баллон.

Болометр — это очень тонкая платиновая или вольфрамовая нить, запаянная в стеклянный баллон.

Болометр — это очень тонкая платиновая или вольфрамовая нить, запаянная в стеклянный баллон.

Болометр — это очень тонкая платиновая или вольфрамовая нить, запаянная в стеклянный баллон.

Разница между терморезистором и болометром заключается в том, что они имеют противоположные температурные коэффициенты, т. е. их сопротивления по-разному изменяются при изменении температуры окружающей среды, а следовательно, и в высокочастотной мощности, прошедшей через пространство, где они помещены.

На рис. 10 а, б, в показаны конструкции терморезистора, болометра, их характеристики, схема включения терморезистора для измерения мощности.

Для того чтобы включить терморезистор в высокочастотный тракт, согласовать его сопротивление с волновым сопротивлением линии передачи и разделить цепи высокочастотного и низкочастотного или постоянного тока, существуют различного рода терморезисторные камеры, одна из которых (коаксиальная) показана на рис. 10.9 г.

Измерения производятся следующим образом. Перед подачей энергии высокочастотных колебаний мост уравнивается, допустим, при токе питания моста I_1 . Затем на вход мостовой схемы подают энергию СВЧ колебаний и регулируют сопротивление R так, чтобы мост был снова уравновешен, например при токе I_2 . Учитывая, что сопротивление плеч моста R_1 выбираются одинаковыми, мощность можно подсчитать по формуле

$$P = \frac{R_t I_1^2}{4} - \frac{R_t I_2^2}{4} = \frac{R_t}{4} (I_1 + I_2)(I_1 - I_2), \quad (10.9)$$

где R_t — сопротивление терморезистора. Недостатком метода является то, что на сопротивление терморезисторов влияет не только поглощаемая ими высокочастотная энергия, но и изменение температуры окружающей среды.

Болометры меньше подвержены влиянию температуры окружающей среды и имеют почти квадратичную характеристику, что позволяет сделать шкалу индикатора очень близкой к линейной. К недостаткам болометров следует отнести их малую чувствительность, небольшие пределы изменения сопротивления и размеры, превышающие размеры терморезисторов, что затрудняет их использование в сантиметровом диапазоне длин волн.

Следует отметить, что в последнее время разработаны болометры, выполненные в виде проводящих пленок на диэлектрических основаниях. Это позволило применить болометры и в сантиметровом диапазоне длин волн.

Краткие характеристики некоторых приборов, действие которых основано на рассмотренном методе приведены в табл. 10.2 и 10.3.

Промышленностью выпускаются терморезисторные и болометрические головки специально для применения в указанных

измерителях мощности, которые сконструированы так, что они могут быть подключены непосредственно к волноводной или коаксиальной линии.

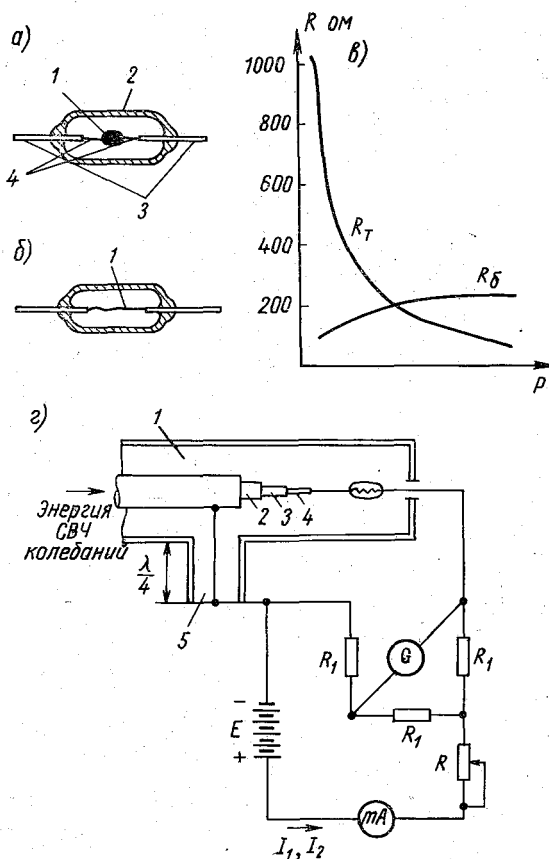


Рис. 10.9. К пояснению метода измерения мощности с использованием термосопротивлений.

а) терморезистор: 1 — бусинка, 2 — стеклянный баллон, 3 — выводные концы, 4 — платино-иридиевые проволоочки;
 б) болометр: 1 — вольфрамовая или платиновая нить;
 в) графики зависимости сопротивлений терморезистора (R_T) и болометра (R_B) от величины рассеиваемой мощности;
 г) схема измерения мощности: 1 — коаксиальная камера, 2, 3, 4 — согласующие трансформирующие участки, 5 — короткозамкнутый металлический изолятор. Разделение цепей постоянного и переменного токов происходит благодаря наличию емкости, образованной в отверстии коаксиальной камеры.

Метод механического действия. Если удалить часть стенки волновода и заменить ее упругой пластинкой, связанной с датчиком давления, то по измеряемому давлению можно будет

Таблица 10.2

Измерители мощности терморезисторные

Тип прибора	Диапазон частот, ГГц	Пределы измерения мощности, мвт	Погрешность измерения, %	Сопротивление терморезистора постоянному току, ом	Тип ВЧ тракта
МЗ-1А	0,02—3	0,1—1000	10	75	коаксиальный то же волноводный то же
МЗ-2Б	0,3—3,75	0,002—6 (7 шкал)	9—37	150	
МЗ-2А	7—16,7	0,002—6 (7 шкал)	9—37	330	
МЗ-10	0,15—16,7	0,05—7,5 (5 шкал)	10—15	75; 100; 150; 200; 300 (в зависимости от типа терморезисторной головки)	

Таблица 10.3

Измерители мощности болометрические

Тип прибора	Диапазон частот	Пределы измерения мощности	Погрешность измерения, %	Сопротивление болометра постоянному току, ом	Тип ВЧ тракта
МЗ-8А	0,02—30 ГГц	100 мквт — 1000 мвт	1,5—4	180—642 (в зависимости от типа болометрической головки)	Коаксиальный
МЗ-12	100—10 000 МГц (для тракта 50 ом) 100—3100 МГц (для тракта 75 ом)	100 мвт (средняя) 1000 мвт (в импульсе)	15	200 и 300 (используются болометрические головки пленочного типа)	то же

судить о величине мощности электромагнитных колебаний. Существуют и другие разновидности приборов, основанных на этом методе, все они довольно точные (погрешность не превышает 1—1,5%) и применяются главным образом в качестве образцовых измерителей мощности в лабораторных условиях.

§ 10.6. ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ И ДЛИНЫ ВОЛНЫ

При измерениях весь спектр частот разделяют на два основных диапазона: звуковые частоты (от 30 гц до 20 кГц) и высокие частоты (свыше 20 кГц). Звуковые частоты измерить с высокой

точностью более трудно, чем измерить высокие частоты. Если, например, частоту 10 Мгц нужно измерить с точностью $\pm 10^{-6}$, то погрешность измерения не должна превышать $\pm 10\text{ гц}$. Требование к той же точности при измерениях частот 100 гц приводит к тому, что погрешность измерения должна быть весьма малой ($\pm 0,0001\text{ гц}$).

Методы измерения звуковых частот. Эти методы можно разделить на три основные группы: метод непосредственного измерения, метод сравнения и мостовой метод.

Метод непосредственного измерения частоты основан на применении схемы заряда — разряда конденсатора, включенного в схему, показанную на рис. 10.10. Конденсатор C

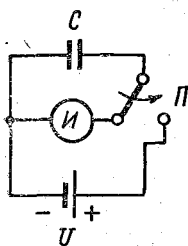


Рис. 10.10.
К пояснению
измерения ча-
стоты методом
заряда — раз-
ряда конденса-
тора.

переключателем P можно включать на заряд от источника постоянного напряжения U или на разряд через стрелочный индикатор I . Если конденсатор заряжается и разряжается полностью, то за одно переключение на заряд и разряд количество электричества, получаемое конденсатором при заряде и отдаваемое им при разряде через индикатор, равно $Q = CU$. Если переключатель P переключать f_x раз в секунду, то количество электричества, проходящее через индикатор за время $T = 1\text{ сек}$, можно выразить через ток, протекающий через индикатор

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{CU}{T} = CUf_x. \quad (10.10)$$

Принимая C и U постоянными, можно так проградуировать шкалу индикатора, что его показания будут пропорциональны частоте f_x . В схемах приборов, основанных на этом методе, в качестве переключателя используются бесконтактные электронные или полупроводниковые переключатели. Примером такого прибора является измеритель частоты ЧЗ-7 (ИЧ-7). Он предназначен для измерения частоты синусоидальных напряжений в диапазоне от 10 до 500 000 гц , разбитом на 12 поддиапазонов. Основная погрешность не превышает $\pm 2\%$. Входное сопротивление прибора 500 ком, входная емкость 15 нф . Внутри прибора имеется кварцевый генератор, работающий на частоте 10 000 гц , с помощью которой осуществляется калибровка шкал прибора.

В ряде современных приборов имеются не стрелочные, а цифровые индикаторы.

Метод сравнения заключается в том, что измеряемую частоту f_x сравнивают с известной (образцовой) частотой f_0 . Добиваясь равенства f_x и f_0 , значение f_x отсчитывают по шкале частоты f_0 .

Наиболее распространены методы сравнения с применением детектора-смесителя и осциллографа.¹

Метод сравнения с применением детектора-смесителя основан на рассмотренном в главе 6 принципе образования разностной частоты при подаче на нелинейный элемент двух частот: f_x и f_0 . Когда значение частоты f_x стремится к f_0 , разностная частота стремится к нулю, т. е. образуются нулевые биения.

Наиболее распространенными устройствами, с помощью которых можно обнаружить токи нулевых биений, являются головные телефоны и магнитоэлектрический индикатор. В телефонах при приближении разностной частоты к нулю будет слышен звук понижающегося тона, а стрелка индикатора будет колебаться вокруг нуля с понижающейся частотой.

Как видно из рис. 10.11, существуют две области нулевых биений, так как образцовая частота f_0 может быть и больше, и меньше, чем измеряемая частота f_x .

Измерения с помощью метода нулевых биений производятся следующим образом. Изменяя частоту f_0 , добиваются того, чтобы в телефонах был слышен звук высокого тона. Дальнейшее изменение f_0 должно происходить так, чтобы тон звука понижался. При разностной частоте, равной 15—20 гц, звук в телефоне исчезает, так как человеческое ухо не воспринимает колебания с частотой ниже 15—16 гц. Эта величина и является точностью метода сравнения при использовании телефонов. Отметим, что такая точность для частот порядка десятков мегагерц вполне приемлема. Если нужна более высокая точность, то последовательно с телефонами можно включить стрелочный магнитоэлектрический индикатор, который позволяет сравнивать частоты с точностью до долей герца.

Приведем краткие характеристики некоторых приборов, основанных на методе сравнения частот.

1. Кварцевый калибратор Ч5-1 (КК-6). В схему прибора входит кварцевый генератор на две фиксированные частоты: 125 и 1250 кГц. Форма колебаний несинусоидальная, они содержат ряд гармоник, что позволяет получать сигналы в диапазоне частот от 125 кГц до 20 МГц. Детектор-смеситель собран на ламповом триоде 6С5С. Биения прослушиваются в телефонах.

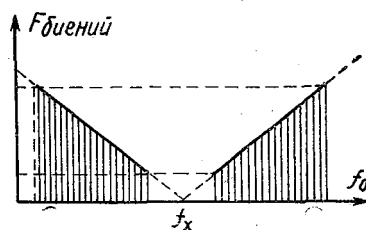


Рис. 10.11. Области нулевых биений.

¹ Метод с применением осциллографа рассматривается в § 10.8.

2. Гетеродинный частотомер Ч4-1 (ГВ-526У). Прибор предназначен для измерения частоты в диапазоне от 125 кГц до 20 МГц. Как и в приборе Ч5-1, перекрытие диапазона осуществляется на гармониках колебаний, создаваемых кварцевым генератором, собранным на одной половине триода 6Н9С. Другая половина триода является детектором-смесителем колебаний, на который подаются частоты от гетеродина, кварцевого генератора и неизвестная частота.

Сначала производят смешение частот кварцевого генератора и гетеродина, добиваясь их равенства. Затем производят измерения, смешивая неизвестную частоту и частоту гетеродина, которая считается образцовой. Погрешность измерения частоты не превышает 50 гц (для частот до 250 кГц) и 400 гц (для более высоких частот).

Промышленностью выпускаются гетеродинные частотомеры и более высокой точности, например Ч4-9 (диапазон измерения от 20 МГц до 1 ГГц, погрешность $5 \cdot 10^{-6}$) и несколько типов приборов с погреш-

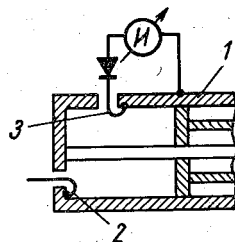


Рис. 10.12. Коаксиальный резонансный волномер.

1 — поршень; 2 — петля связи с источником колебаний измеряемой частоты; 3 — петля связи волномера с индикатором.

ностью $5 \cdot 10^{-5}$, в том числе Ч4-5 (диапазон частот от 2,5 до 18 ГГц), Ч4-8А (частоты от 12,46 до 39 ГГц), Ч4-25 (частоты от 37,5 до 78,3 ГГц).

Мостовой метод измерения частот основан на применении мостовых схем, состоящих из активных сопротивлений и емкостей. Используя в качестве питания моста напряжение неизвестной частоты и изменяя сопротивления, добиваются его равновесия. Значение измеряемой частоты рассчитывается по формулам, связывающим f_x с известными параметрами моста R и C . Точность метода 0,5—1%.

Методы измерения высоких частот. Высокие частоты измеряются двумя основными методами: методом сравнения частот и методом резонансных волномеров.

Методы сравнения высоких частот основаны на тех же принципах, которые использованы и в диапазоне звуковых частот. Так, диапазон частот, измеряемых гетеродинными частотомерами, как указано выше, расширен до 78,3 ГГц, и приборы имеют весьма высокую точность.

Методы резонансных волномеров. Для большинства практических случаев частоту достаточно измерять и с меньшей точностью. В этих случаях применяют так называемый резо-

нансный волномер (или резонансный частотомер), — настраиваемый резонансный контур, по шкале настройки которого можно произвести отсчет резонансной частоты.

В практике применяются волномеры с сосредоточенными (на частотах примерно до 1500 МГц) и с распределенными (на частотах выше 1500 МГц, $\lambda < 20$ см) параметрами резонансного контура.

Волномер, измеряющий частоты ниже 1500 МГц, представляет собой прибор, в котором имеется контур с конденсатором переменной емкости, с помощью которого и производят настройку контура в резонанс. Момент резонанса определяется по стрелочному индикатору, который подключается к контуру, так, чтобы не вызвать в нем заметного затухания (используется, например, слабая индуктивная связь). Ток, подаваемый на индикатор, детектируется полупроводниковым диодом. Измерения производят так. В контурной катушке индикатора за счет индуктивной связи возбуждаются колебания измеряемой частоты. Затем, изменяя емкость конденсатора, настраивают контур в резонанс (максимальное показание индикатора), и по шкале переменного конденсатора отсчитывают значение измеряемой частоты.

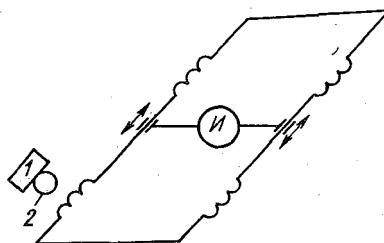


Рис. 10.13. Схема двухпроводной измерительной линии.

1 — источник колебаний измеряемой частоты f_x ; 2 — петля связи.

Волномеры, предназначенные для измерения частот выше 1500 МГц, имеют контур в виде объемного резонатора, т. е. отрезка коаксиальной линии или волновода.

Процесс настройки коаксиального или волноводного волномера состоит в том, что, передвигая вручную поршень, наблюдают за показаниями индикатора, включенного через петлю связи и диодный детектор (рис. 10.12). В момент, когда волномер настроен в резонанс, показание индикатора будет максимальным.

Конструктивно волномеры выполняются в виде цилиндров и прямоугольных параллелепипедов. Рукоятка подстройки, связанная с поршнем, имеет шкалу, проградуированную в длинах волн. Точность измерения у таких волномеров довольно высокая.

Приведем краткие технические данные некоторых резонансных волномеров (табл. 10.4 и 10.5).

К резонансным волномерам относятся также широко применяемые измерительные линии, выполненные в виде замкнутых накоротко отрезков двухпроводной, коаксиальной или волноводной линий.

Таблица 10.4

Коаксиальные резонансные волномеры

Тип прибора	Диапазон частот, Мгц	Погрешность измерения, %	Сопротивление ВЧ тракта, ом
Ч2-1А	0,8—12	0,25	75
Ч2-2	40—180	0,075	75
Ч2-6	350—675	0,05	75
Ч2-8	600—2 000	0,075	75
Ч2-19А	1 500—2 500	0,05	75
Ч2-35	4 100—5 600	0,05	50
Ч2-36	5 500—7 700	0,05	50
Ч2-37	7 700—10 700	0,05	50

Таблица 10.5

Волноводные резонансные волномеры

Тип прибора	Диапазон частот, Ггц	Погрешность измерения, %	Размер волновода, см
Ч2-33	7—9	0,05	28,5 × 12,6
Ч2-45	8,4—12	0,5	23 × 10
Ч2-31	12—16,66	0,05	17 × 8
Ч2-25	36,14—52,63	0,1	5,2 × 2,6
Ч2-26	52,63—78,95	0,1	3,6 × 1,8

В метровом и дециметровом диапазонах длин волн используют измерительные линии из двух параллельных проводов, вдоль которых может перемещаться закорачивающая их металлическая перемычка (рис. 10.13). К началу линии через индуктивность связи подводятся колебания неизвестной частоты. В металлическую перемычку включен индикатор (лампочка или стрелочный прибор), так что в точках линии, совпадающих с пучностями напряжения, свечение лампочки или показания прибора максимальны. Передвигая вдоль проводов перемычку, определяют пучности напряжений, а длину волны находят как удвоенное расстояние между пучностями. Очевидно, что с помощью таких линий можно измерять не только длину волны, но и некоторые параметры антенн и фидерных линий: полное сопротивление, волновое сопротивление, добротность, затухание, коэффициенты стоячих и бегущих волн и т. д.

Выпускаются также измерительные линии, сконструированные в виде отрезков коаксиальной или волноводной линий.

§ 10.7. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Выше был описан ряд методов измерения радиотехнических параметров, в которых применялись генераторы стабильной частоты. Кроме таких генераторов, встроенных в некоторые приборы, выпускаются в большом количестве измерительные генераторы, выполненные в виде самостоятельных приборов.

Ко всем измерительным генераторам предъявляются требования высокой стабильности, широкого предела регулировки выходного напряжения, малой зависимости выходного напряжения от сопротивления нагрузки.

В зависимости от частоты генерируемых колебаний измерительные генераторы подразделяются на звуковые, высокочастотные и сверхвысокочастотные, а также импульсные.¹ Высокочастотные и сверхвысокочастотные генераторы подразделяются на генераторы сигналов и генераторы стандартных сигналов (имеющие плавную регулировку и позволяющие отсчитывать параметры колебаний: частоту, коэффициент модуляции, выходное напряжение).

Схемы измерительных генераторов обычно включают:

1. Возбудитель, создающий переменное напряжение. Возбудители собираются на LC -контурах, RC -цепочках или по схеме биений двух высокочастотных колебаний. LC -генераторы и RC -генераторы рассмотрены в главе 5, схема биений в принципе не отличается от схемы, рассмотренной в § 10.6. Обычно возбудители перестраиваются в широких пределах и позволяют производить отсчет установленной частоты.

2. Выходной усилитель, служащий для усиления напряжения и мощности возбуждаемых колебаний.

3. Вольтметр для контроля величины напряжения на выходе усилителя.

4. Делитель напряжений (аттенюатор), позволяющий уменьшить в необходимое число раз напряжение на выходе усилителя (зная напряжение на выходе усилителя и коэффициент деления, можно определить напряжение на выходе делителя; применяя делители с большими коэффициентами деления, можно получать очень малые напряжения, нужные для работы с высокочувствительной радиоаппаратурой).

5. Дополнительные устройства для согласования генератора с различными нагрузками, определения различных параметров сигналов и т. д.

6. Блоки питания, которые обязательно включают схемы стабилизации.

Звуковые генераторы предназначены для создания переменных напряжений низких (звуковых) частот. Они применяются

¹ Импульсные генераторы применяются в устройствах импульсной техники (радиолокации, вычислительной технике) и здесь не рассматриваются.

при проверке и регулировке низкочастотной аппаратуры (усилителей, телефонов и др.).

В качестве примеров приведем характеристики нескольких наиболее распространенных звуковых генераторов: ГЗ-33, ГЗ-34А, ГЗ-35. У этих генераторов примерно одинаковая конструкция и принципиальная схема. Некоторые различия в их технических данных видны из табл. 10.6.

Таблица 10.6

Тип прибора	Диапазон частот, $гц$	Погрешность установки частоты F , $гц$	Нестабильность частоты	Значение выходной величины и сопротивления нагрузки
ГЗ-33	20—200 000 (4 поддиапазона)	$\pm (0,02F + 1)$	$2,5 \cdot 10^{-3}$ за 1 час	0,5—5 $вт$, 600 $ом$
ГЗ-34А	20—20 000 (3 поддиапазона)	$\pm (0,01F + 2)$	$2,5 \cdot 10^{-3}$ за 1 час	4 $вт$, 600 $ом$
ГЗ-35	20—200 000 (4 поддиапазона)	$\pm (0,01F + 1)$	$2 \cdot 10^{-5}$ за 1 час	8 $в$, 600 $ом$

Возбудитель генератора ГЗ-34А двухкаскадный, собранный по схеме RC -генератора на двух лампах 6Ж1П и 6П14П (рис. 10.14). Плавное изменение частоты в пределах $\pm 1,5\%$ от F производится путем изменения емкости сдвоенного конденсатора. Звуковое напряжение с потенциометра R_n , с помощью которого можно регулировать его амплитуду, подается на двухкаскадный усилитель, собранный на лампах 6Н1П (предварительный усилитель) и 6П14П (усилитель мощности).

С выходного трансформатора напряжение подается на аттенюатор. Это напряжение контролируется вольтметром, который имеет два предела измерения: 30 и 60 $в$.

Аттенюатор позволяет уменьшить выходное напряжение в 3, 10, 30, 100, 300, 1000, 3000, 10 000, 30 000 и 100 000 раз.

Напряжение звуковой частоты снимается с трансформатора $Tr_{вых}$, у которого вторичная обмотка имеет выведенную среднюю точку. С помощью переключателя «Вых. сопр. Ω » можно установить одно из положений, рассчитанных на подключение согласованной нагрузки 60, 600 и 6000 $ом$.

В одном из положений этого переключателя (АТТ) выходной трансформатор отключается, а выход аттенюатора подключается непосредственно к клеммам «Вых.». В этом случае можно работать с аттенюатором, производя перечисленные выше уменьшения выходного напряжения.

Высокочастотные генераторы. К группе высокочастотных генераторов относят приборы, предназначенные для воспроизведения частот примерно до 400 $Мгц$. Примером наиболее распространен-

ного генератора этой группы является генератор стандартных сигналов Г4-1А (ГСС-6А). Диапазон генерируемых им частот от 100 до 25 000 кГц перекрывается 8 поддиапазонами. Погрешность установки частоты 1%. Величина выходного напряжения может быть установлена в пределах от 0,1 мкВ до 1 В. Генератор может работать в режимах непрерывной генерации сигналов высокой частоты, амплитудной модуляции сигнала высокой частоты от внутреннего звукового генератора 400 или 1000 Гц, амплитудной модуляции сигнала высокой частоты от внешнего звукового генератора. В режимах амплитудной моду-

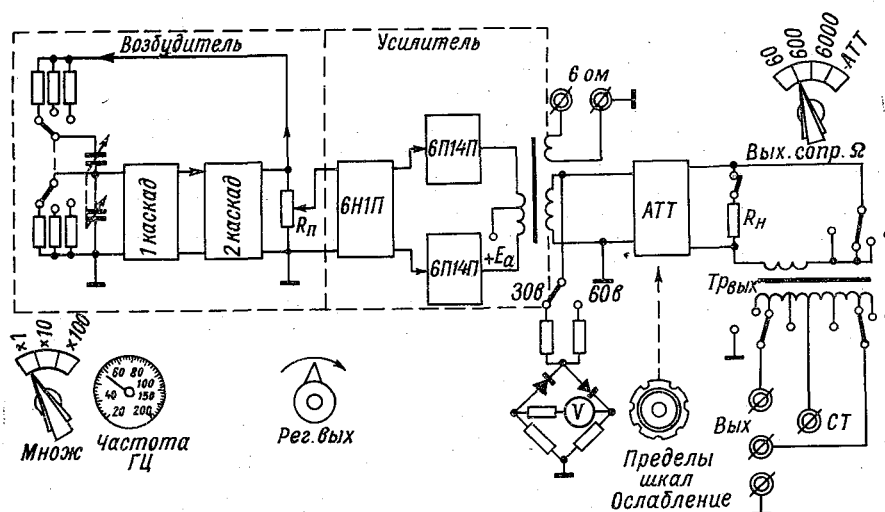


Рис. 10.14. Блок-схема генератора ГЗ-34А.

На рисунке показаны органы регулировки и переключения, выведенные на переднюю панель прибора.

ляции глубина модуляции может изменяться от 0 до 100%, а коэффициент модуляции может быть отсчитан по индикатору.

Возбудитель генератора выполнен по схеме индуктивной трехточки на лампе 6Ж4. Напряжение высокой частоты с анодной нагрузки лампы подается на усилитель мощности высокой частоты, собранный на лампе 6К3. Плавное изменение частоты происходит в результате изменения емкости переменных конденсаторов, включенных в контур возбуждителя и анодный контур усилителя мощности. Переключение диапазонов производится с помощью переключателя, одновременно переключающего контурные катушки обоих контуров. Модуляция осуществляется с помощью внутреннего звукового генератора, собранного на лампе 6Н8С. Модулирующее напряжение подводится к усилителю мощности (к экранной сетке лампы 6К3).

Приведем краткие технические данные некоторых других генераторов высокой частоты (табл. 10.7).

Таблица 10.7

Тип прибора	Диапазон частот f , Мгц	Погрешность установки частоты, %	Нестабильность частоты за 10 мин	Выходное напряжение и нагрузка
Г5-17	20—260 (10 поддиапазонов)	1	$3 \cdot 10^{-4} f$	10 мкв — 0,1 в, 75 ом
Г4-18	0,1—35 (6 поддиапазонов)	1	$2 \cdot 10^{-4} f +$ $+ 50 \text{ гц}$	1 мкв — 1 в, 75 ом
Г4-44	10—400 (5 поддиапазонов)	1	$1 \cdot 10^{-4} f$	0,1 мкв — 0,1 в, 75 ом

Генераторы сверхвысоких частот. Генераторы этой группы обычно имеют возбудитель, собранный на клистроне. В качестве измерительных приборов в генераторах метровых и дециметровых волн применяются вольтметры, а в генераторах сантиметровых волн — измерители малой мощности или волномеры. Выходные устройства таких генераторов — это отрезки волноводов или коаксиальных линий, имеющие аттенюаторы и выходные разъемы. Аттенюаторы в этих диапазонах бывают либо *поглощающие* (в них ослабление энергии производится за счет поглощения части энергии диэлектриком или металлом, помещаемым внутрь линий и волноводов), либо *предельные* (представляющие собой отрезок волновода, размеры которого для данной длины волны меньше критических).

Рассмотрим для примера два генератора стандартных сигналов сверхвысоких частот.

Генератор Г4-9 имеет диапазон генерируемых частот 2000—3800 Мгц. В приборе два выхода на согласованную нагрузку 50 ом: большой мощности (30 мвт) и малой мощности (от 100 до 10^{-8} мвт). Генератор может работать в режимах непрерывной генерации, внутренней частотной модуляции, внутренней или внешней импульсной модуляции.

Генератор собран на клистроне, колебательным контуром является коаксиальный резонатор. Перестройка частоты достигается путем изменения рабочей длины резонатора с одновременным изменением напряжения на отражательном электроде клистрона. Для внутренней модуляции предусмотрен специальный импульсно-модуляционный блок.

Генератор Г4-2 предназначен специально для использования в 3-см диапазоне волн (8600—9600 Мгц). Выходная мощность от 10^{-24} до 10^{-3} вт.

Задающий генератор работает на клистроне, помещенном в специальную генераторную камеру, которая с помощью зонда

связывается с волноводом. Величину отдаваемой мощности регулируют, изменяя глубину погружения зонда в волновод. Изменение частоты генератора производится так же, как и у генератора Г4-9. Между генераторной камерой и измерителем мощности (терморезисторным мостом) помещен резонансный коаксиальный волномер, по которому определяется частота генератора. В генераторе имеются переменные поглощающие аттенюаторы, обеспечивающие ослабление мощности в пределах от 1 мвт до 10^{-13} вт.

Подключение генератора к испытываемой аппаратуре осуществляется через отрезок волновода, рупорную антенну или волноводно-коаксиальный переход.

Приведем краткие технические данные некоторых других генераторов сверхвысоких частот (табл. 10.8).

Таблица 10.8

Тип прибора	Диапазон частот, Ггц	Погрешность установки частоты, %	Нестабильность частоты за 10 мин	Выходная мощность и нагрузка
Г4-8	1—2	0,25	$3 \cdot 10^{-4} f$	10^{-8} —100 мквт и 0,5 вт, 75 ом
Г4-10А	3,75—7,5	0,25	$2 \cdot 10^{-4} f$	$2 \cdot 10^{-8}$ —10 мквт и 3 мвт, 50 ом
Г4-32А	8,82—12,1	0,2	$1 \cdot 10^{-4} f$	$2 \cdot 10^{-8}$ —200 мквт и 4 мвт, волновод 23×10 мм
Г4-11А	12—16,67	0,2	$1 \cdot 10^{-4} f$	$2 \cdot 10^{-8}$ —200 мквт и 4 мвт, волновод 17×8 мм

§ 10.8. НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Измерители активного сопротивления и параметров катушек индуктивности и конденсаторов. Измерение активного сопротивления было рассмотрено в § 10.4, где было отмечено, что измерения производятся с помощью комплексных измерительных приборов ампервольтметров. Некоторую особенность имеют приборы для измерения больших величин сопротивлений, предназначенные для проверки сопротивлений изоляции. Примером такого прибора является ламповый мегомметр Е6-2, имеющий пределы измерения от 100 ом до 100 000 Мом.

Прибор Е6-2 состоит из входного делителя, образованного измеряемым и одним или двумя образцовыми сопротивлениями, лампового вольтметра постоянного тока и выпрямителя. Ламповый вольтметр выполнен в виде усилителя постоянного тока с индикатором на выходе. Неизвестное сопротивление определяется путем измерения ламповым вольтметром падения напряжения на параллельно соединенных образцовом и неизвестном

сопротивлениях. К этим параллельно соединенным сопротивлениям подводится стабилизированное напряжение.

Измерение индуктивности катушек и емкости конденсаторов производится на переменном токе и сводится к измерению реактивного сопротивления, которое эти элементы имеют на определенной частоте.

Метод моста. В плечи моста включаются сопротивления, содержащие активные и реактивные составляющие. В два плеча моста включаются активные сопротивления, в другие два плеча — реактивные (емкости или индуктивности), из которых одно образцовое, а другое неизвестное. Питание моста осуществляется

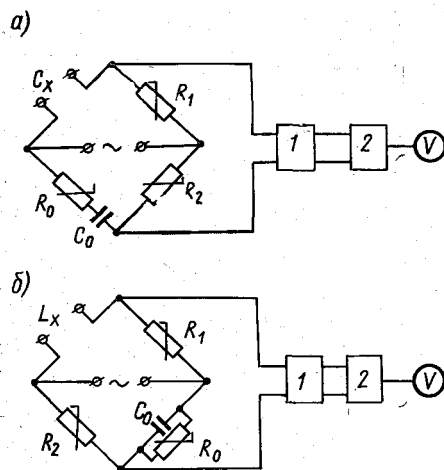


Рис. 10.15. Мостовые схемы для измерения неизвестных C_x и L_x .

а — емкости; б — индуктивности; 1 — усилитель, 2 — детектор.

переменным током фиксированной частоты. В измерительную диагональ включают электронный вольтметр переменного тока по схеме «усилитель — детектор».

Отметим, что и индуктивность, и емкость можно измерять с помощью одного и того же моста, изменяя только плечи, в которые включаются реактивные элементы (рис. 10.15).

Уравновесив ту или другую мостовую схему, можно определить неизвестные C_x и L_x по формулам

$$C_x = \frac{R_1}{R_2} C_0; \quad L_x = R_1 R_2 C_0. \quad (10.11)$$

По указанной схеме собран универсальный мост Е12-2 (УМ-3), который служит для измерения сопротивления, емкости, индуктивности и некоторых других параметров. Пределы измерения сопротивления от 0,1 ом до 5 Мом, емкости от 10 пф до 100 мкф, индуктивности от 10 мкгн до 100 гн. Основная погрешность измерения $\pm 3\%$. Питание моста производится от внутреннего генератора, который может вырабатывать напряжение с частотой 100, 1000 или 10 000 гц.

Резонансный метод применяют на высокой частоте. Он заключается в том, что на контур LC подают напряжение известной частоты. Для измерения неизвестной емкости в контур включают образцовую катушку, а для измерения неизвестной индуктивности — образцовый конденсатор. Добиваясь путем изменения величины образцового элемента (L или C) резонанса в контуре, значение параметра определяют по одной из формул (10.11).

Осциллографы. Из курса общей электроники учащимся известны электроннолучевые трубки (ЭЛТ) и общие сведения об осциллографах. Приведем типовую блок-схему осциллографа (рис. 10.16). Отклонение светящегося пятна на экране ЭЛТ достигается за счет напряжения порядка десятков и сотен вольт, подводимого к отклоняющим пластинам трубки. Усилители горизонтального и вертикального отклонения дают возможность получить перемещение пятна на экране при подаче на входы осциллографа малых напряжений. Если исследуются сигналы большой амплитуды, то они могут быть уменьшены с помощью делителей R_1 и R_2 . Обычно в осциллографах бывает предусмотрена

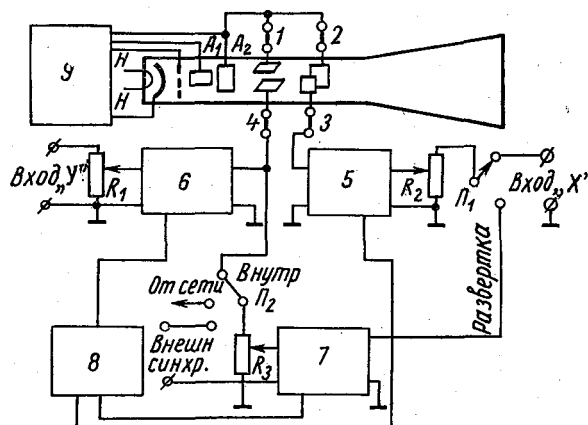


Рис. 10.16. Типовая блок-схема осциллографа.

1, 2, 3, 4 — входы отклоняющих пластин электроннолучевой трубки; 5 — усилитель горизонтального отклонения; 6 — усилитель вертикального отклонения; 7 — генератор развертки; 8 — источник низкого напряжения; 9 — источник высокого напряжения.

возможность подачи исследуемого напряжения непосредственно на входы отклоняющих пластин 1—4 и 2—3.

Наиболее широко используются осциллографы С1-1 (ЭО-7), С1-3 (ИО-4), С1-5 (СИ-1), С1-6 (ЭМО-2), С1-8А, С1-18 (двух-лучевой), С1-4 (ЭНО-1 для исследования низкочастотных процессов).

Приведем технические данные прибора С1-1 — одного из самых распространенных осциллографов.

Он собран по типовой блок-схеме (см. рис. 10.16). В осциллографе применена электроннолучевая трубка типа 13ЛО37 с диаметром экрана 12,5 см. Чувствительность прибора по вертикальному отклонению 0,25 см/мв (коэффициент усиления 1800), чувствительность по горизонтальному отклонению 4,5 см/мв (коэффициент усиления 35). Входное сопротивление усилителя вертикального отклонения 2 Мом, входная емкость 30 пф.

Более подробно осциллографы, являющиеся основными приборами для исследования импульсных процессов, изучаются в курсе радиолокации, поэтому мы здесь останавливаться на их принципиальных схемах не будем.

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные измерения, которые удобно выполнять при наличии осциллографа, являющегося универсальным измерительным прибором.

Измерение напряжений основано на том, что при подаче на пару отклоняющих пластин измеряемого напряжения происходит пропорциональное исследуемому напряжению смещение светового пятна на экране.

Постоянное напряжение (в вольтах) определяется по формуле

$$U_x = \frac{l}{h}, \quad (10.12)$$

где l — величина отклонения светового пятна в мм, h — чувствительность электроннолучевой трубки в мм/в.

При определении переменного напряжения следует иметь в виду, что рассчитанное по формуле (10.12) значение U_x представляет собой удвоенную амплитуду измеряемого напряжения.

Если измеряемое переменное напряжение не подводится непосредственно к входу отклоняющих пластин, а подается на вход усилителя вертикального отклонения, то для правильного определения амплитуды напряжения нужно знать чувствительность осциллографа, зависящую от положения рукоятки регулятора усиления усилителя вертикального отклонения.

В современных импульсных осциллографах измерение напряжения производится методом сравнения с переменным напряжением известной величины, получаемым от специального калибратора напряжения, встроенного в схему осциллографа.

Измерение частоты с помощью осциллографов производится по так называемому методу фигур Лиссажу. При использовании этого метода измеряемую частоту подают на один из входов осциллографа, например, на вертикальный, а на другой вход подают напряжение известной образцовой частоты. Воздействие на электронный луч двух переменных напряжений приводит к тому, что пятно описывает на экране фигуры, вид и характер которых зависит от формы переменных напряжений, их частот и фаз. Эти фигуры носят название фигур Лиссажу. Если частоты подведенных напряжений относятся друг к другу как целые числа, то на экране фигуры Лиссажу неподвижны и имеют вид, показанный на рис. 10.17 а. Чтобы определить соотношение частот по фигуре Лиссажу, нужно произвести пересечение неподвижной фигуры горизонтальной и вертикальной прямыми и сосчитать число точек пересечения по горизонтали и вертикали. Проводить горизонтальные и вертикальные прямые нужно так,

чтобы они не проходили через узловые точки фигуры или не касались отдельных ее фигур. Отношение числа точек пересечения равно отношению частот исследуемых колебаний. Для показан-

а)

	$\varphi=0$	$45^\circ \text{ или } 315^\circ$	$90^\circ \text{ или } 270^\circ$	$135^\circ \text{ или } 225^\circ$	180°
$\frac{f_x}{f_y} = \frac{1}{1}$					
$\frac{f_x}{f_y} = \frac{1}{2}$					
$\frac{f_x}{f_y} = \frac{1}{3}$					

б)

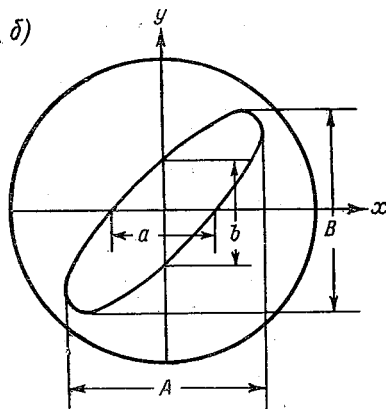


Рис. 10.17. Фигуры Лиссажу.

a — при разных соотношениях сравниваемых частот и фаз двух синусоидальных колебаний; b — при измерении сдвига фазы.

ного на рис. 10.17 а случая справедливо соотношение $\frac{f_x}{f_y} = \frac{1}{3}$ ($\varphi=90^\circ$ или $\varphi=270^\circ$).

Измерение сдвига фазы между двумя синусоидальными колебаниями одинаковой частоты можно произвести по одной из

фигур Лиссажу (рис. 10.17 б). Измерив расстояния a , b и A , B , угол сдвига фаз φ можно рассчитать по формуле

$$\varphi = \arcsin \frac{a}{A} = \arcsin \frac{b}{B}. \quad (10.13)$$

Удобно применять осциллограф и для измерения глубины модуляции. Рассматривая на экране осциллографа процесс, аналогичный показанному на рис. 5.27, и снимая непосредственно с изображения на экране величины $U_{m \max}$ и $U_{m \min}$, можно вычислить глубину модуляции по формуле (5.12).

В главе 11 будет рассмотрено применение осциллографа для снятия частотных характеристик радиоаппаратуры.

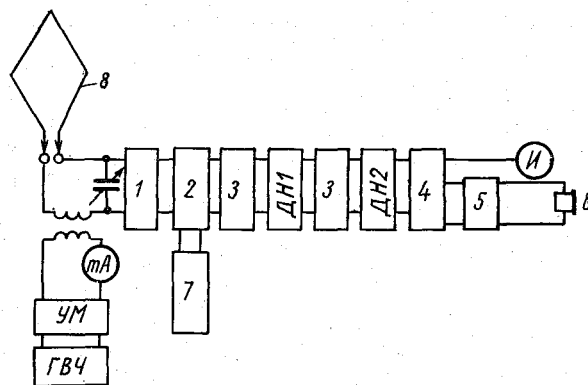


Рис. 10.18. Блок-схема компаратора.

1 — УВЧ; 2 — смеситель; 3 — УПЧ; 4 — детектор; 5 — УНЧ;
6 — оконечный прибор приемника; 7 — гетеродин; 8 — рамочная антенна.

Измерители напряженности поля и помех. Измерение напряженности поля необходимо при определении направленных свойств антенн и характеристик, связанных с распространением радиоволн. Разновидностью этих измерений является измерение помех, необходимое при определении наилучших условий радиоприема.

Наиболее широко применяется метод сравнения (компарирования), сущность которого состоит в том, что э. д. с. высокой частоты, наведенную измеряемым полем, сравнивают с э. д. с. той же частоты, но поданной от генератора. Контролируют величину э. д. с. чувствительным приемником. Схема прибора, основанного на этом методе и называемого *компаратором*, показана на рис. 10.18. Сначала при отключенном генераторе высокой частоты (ГВЧ) настраивают приемник и ориентируют рамочную антенну так, чтобы полученный сигнал оказался максимальным (контроль осуществляется индикатором I). Делители напряже-

ний ДН1 и ДН2 устанавливают при приеме сигналов на коэффициент деления α_1 , равный единице, а при приеме сильных сигналов вводят ослабление. При достижении максимального значения выходного сигнала замечают показания индикатора, а затем поворачивают рамку на 90° (так, чтобы показания индикатора стали равны нулю). Далее включают генератор ГВЧ и изменяют его частоту до совпадения с частотой настройки приемника. Так как э. д. с. от генератора намного больше, чем наведенная в рамке исследуемым полем, вводят значительный коэффициент деления α_2 до получения тех же показаний индикатора.

Напряженность электрического поля E определяется по формуле

$$E = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{\varepsilon_r}{h_d}, \quad (10.14)$$

где ε_r — внесенная э. д. с. генератора; α_1 и α_2 — коэффициенты деления; h_d — действующая высота рамочной антенны (обычно указывается в паспорте компаратора).

Испытатели радиоламп и полупроводниковых приборов. Практика показывает, что причиной большинства случаев отказов радиоаппаратуры является выход из строя радиоламп. Для проверки их исправности сконструированы специальные приборы, называемые испытателями ламп. Эти приборы представляют собой стенды, собранные по схеме, позволяющей определять все основные характеристики ламп и причины, вызвавшие их неисправность. Примером такого прибора является *универсальный испытатель ламп Л1-3 (МИЛУ-1)*. С помощью этого испытателя можно снимать характеристики всех приемо-усилительных и маломощных генераторных ламп, в том числе диодов (ток эмиссии, ток анодов и выпрямленный ток), триодов, тетродов, пентодов, комбинированных ламп (ток анода и экранной сетки, крутизну характеристики, ток утечки) и газоразрядных стабилизаторов напряжения (потенциал зажигания, напряжение стабилизации).

Всесторонние испытания транзисторов также производят на специально сконструированных измерителях, например, типа Л2-1, Л2-2, Л2-12. Особенностью испытания транзисторов является то, что основные их характеристики можно снять с помощью несложных схем, которые легко собрать в условиях лаборатории или мастерской.

В заключение отметим, что в настоящей главе описаны только основные методы и приборы для радиоизмерений. Выбор того или иного метода или прибора зависит от многих причин, о чем более подробно рассказывается в главах 11 и 12.

Основные выводы

1. Радиотехнические измерения, как бы тщательно они ни проводились, сопровождаются погрешностями. При проведении радиоизмерений следует стремиться к получению наиболее вероятного значения измеряемой величины, что достигается правильным учетом всех погрешностей.

2. При выборе радиоизмерительного прибора следует руководствоваться следующим: а) применять только те приборы, которые рассчитаны на работу в нужном диапазоне частот; б) прибор должен потреблять ток, значительно меньший, чем ток, протекающий в схеме; в) подключение прибора не должно вызывать заметной расстройки колебательных систем схемы.

3. Наиболее часто для измерений напряжений и сопротивлений применяются ламповые (электронные) вольтметры, омметры или вольтметры, собираемые по одной из двух схем: детектор—усилитель и усилитель—детектор. В качестве указывающего прибора чаще всего применяются магнитоэлектрические индикаторы.

4. Для измерения мощности, частоты (длины волны) и других радиотехнических величин применяется большое число приборов общего применения, выбор которых зависит от требуемой точности, диапазона измеряемой величины и рабочей частоты. Ряд особенностей имеют приборы, предназначенные для измерений в диапазоне сверхвысоких частот.

5. Весьма полезными при любых радиоизмерениях оказываются осциллографы, с помощью которых, кроме измерений, можно производить визуальное наблюдение исследуемого процесса.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Какие основные разновидности имеют прямые измерения?
2. Дайте определения мере и измерительному прибору.
3. В чем основное отличие систематических погрешностей от случайных? Каковы закономерности появления случайных погрешностей?
4. В каких случаях пользуются понятием средней квадратической погрешности?
5. В результате измерения частоты получены следующие значения (в мегагерцах): 1,81; 1,79; 1,82; 1,77; 1,83; 1,80; 1,78; 1,83; 1,92; 1,91; 1,90; 1,78; 1,94; 1,93; 1,95; 1,80; 1,78. Определить наиболее вероятное значение частоты.
6. Систематические погрешности установки для измерения индуктивности равны $+0,3$ и $-0,7$ гн. Вычислить общую погрешность.
7. Опишите принципы действия магнитоэлектрического индикатора.
8. В чем основное различие между электронными вольтметрами, собранными по схемам усилитель—детектор и детектор—усилитель?
9. Поясните назначение элементов и узлов, входящих в схему одного из электронных вольтметров.

10. Какими основными методами пользуются для измерения мощности колебаний разных частот?
11. Опишите метод измерения мощности, основанный на применении термосопротивлений. Приведите схему измерения.
12. Каковы основные методы измерения частоты?
13. Изобразите схему и поясните принцип действия одного из резонансных волномеров.
14. Какие основные узлы входят в схему измерительного генератора? Опишите работу схемы одного из этих генераторов.
15. Какие особенности имеют схемы генераторов сверхвысоких частот?
16. Каково основное назначение аттенюаторов?
17. Приведите схемы и опишите мостовые методы измерения емкостей и индуктивностей.
18. Поясните назначение основных узлов, входящих в схему осциллографа.
19. Как можно измерить частоту с помощью осциллографа?
20. Изобразите блок-схему и опишите работу компаратора.

ГЛАВА 11

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

§ 11.1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ К ПРАКТИКЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Сложность задач, стоящих перед современной радиоэлектронной аппаратурой, привела к тому, что появились устройства, насчитывающие десятки и сотни тысяч различных элементов. Наличие такого большого числа элементов усложнило выполнение требований к бесперебойности функционирования аппаратуры, обеспечению легкости ремонта и эксплуатации, возможности использования устройств в разных условиях. Все эти требования приобретают особенно большое значение для радиоэлектронных устройств, обеспечивающих полеты самолетов, космических кораблей, функционирования предприятий-автоматов и др. Отказы в работе этой аппаратуры могут привести к тяжелым последствиям.

Перечисленные выше факторы привели к возникновению специальной отрасли науки — *теории надежности*. В одном из ее разделов изучается работа радиоэлектронных систем в зависимости от различных внешних и внутренних физико-химических воздействий на элементы этих систем и даются рекомендации для создания надежно функционирующих систем. Указанные рекомендации вырабатываются в основном на базе статистической обработки большого числа результатов.

Надежностью системы (блока, прибора) называется ее способность выполнять заданные функции в определенных условиях в течение требуемого интервала времени. Надежность — сложный параметр, определяющийся несколькими количественными характеристиками.

Прежде чем перейти к рассмотрению главных количественных характеристик, приведем некоторые понятия и термины, употребляющиеся в теории надежности.

Отказ — событие, которое приводит к невозможности использования хотя бы одного из рабочих свойств элемента или системы (отказами считаются и случаи потери устройствами заданной точности). От отказов следует отличать *второстепенные неисправности*, возникновение которых не приводит к потере рабочих свойств аппаратуры (например, порча покрытия, перегорание осветительной лампочки и т. п.).

Различают *внезапные* и *постепенные* отказы. Внезапные отказы предусмотреть весьма сложно, так как они возникают в результате многих, подчас не поддающихся учету (случайных) причин (в том числе резких изменений температуры, окружающей среды, возникновения сотрясений и перегрузок и т. д.).

Постепенные отказы, в отличие от внезапных, возникают в результате развития процессов износа и старения, т. е. более или менее плавного изменения соответствующих параметров элементов. Так как свойства каждого элемента изучены, можно с определенной точностью предвидеть появление постепенных отказов и предотвратить их, своевременно проведя профилактические работы.

Анализ работы большого количества элементов и систем показал, что работа любой аппаратуры (в том числе и радиоэлектронной) может быть разбита на три основных этапа.

На первом, *начальном этапе* из строя выходит относительно большое число элементов, которые имеют скрытые производственные дефекты, что вызывает много отказов. Обычно стремятся к тому, чтобы этот этап закончился на предприятии, изготовившем аппаратуру. Это достигается путем строгого отбора деталей и тщательного изготовления и испытания аппаратуры.

Второй этап, *этап нормальной работы*, характеризует время нормального функционирования аппаратуры в условиях эксплуатации. На этом этапе внезапные отказы бывают сравнительно редко. Нормальное функционирование аппаратуры является результатом правильной конструкции и строгого соблюдения условий и правил эксплуатации. При тщательном выполнении этих условий и правил можно максимально увеличить время нормальной работы.

На третьем этапе, *этапе износа и старения*, отказы начинают происходить все чаще даже при самом тщательном уходе за аппаратурой. Эти отказы являются постепенными, они происходят вследствие неизбежных процессов износа и старения элементов. На этом этапе необходим различного рода ремонт аппаратуры.

Теперь перейдем к количественным характеристикам надежности.

Опасность отказов. Опасностью отказов называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени

к среднему числу элементов, продолжающих исправно работать, т. е.

$$\lambda = \frac{\Delta n}{N_{\text{ср}} \Delta t}, \quad (11.1)$$

где Δn — число элементов, отказавших за время Δt ; $N_{\text{ср}} = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}$ (N_{i-1} — число исправно работающих элементов в начале интервала времени Δt ; N_i — число исправно работающих элементов в конце интервала времени Δt).

Пример. Пусть в начале интервала времени $\Delta t = 50$ час имелось 5000 исправных элементов, а в конце осталось 4880, т. е.

$$N_{\text{ср}} = \frac{5000 + 4880}{2} = 4940; \quad \Delta n = 5000 - 4940 = 60 \text{ элементов.}$$

Опасность отказов λ определяем по формуле (11.1)

$$\lambda = \frac{60}{4940 \times 50} \approx 0,245 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}.$$

Получившаяся величина показывает, что по отношению к 4940 исправно работающим элементам за 1 час из строя выходит их часть, составляющая $0,245 \cdot 10^{-3}$ или $4940 \times 0,245 \cdot 10^{-3} = 120$ элементов. Отсюда следует, что из 10 000 элементов из строя выйдет 245, из 100 000 — 2450 и т. д.

Опасность отказов, часто называемая также λ -характеристикой или интенсивностью отказов, является одной из наиболее применяющихся характеристик надежности элементов. Ее сравнительно нетрудно определить экспериментально, поставив на испытание большое число элементов и фиксируя за определенное время Δt (в нашем примере 50 час) число отказов. Существуют методы сокращения интервала Δt , сводящиеся к более жестким испытаниям, но в течение менее продолжительного времени.

Приведем пределы, в которых находятся определенные экспериментальным путем значения λ для некоторых элементов радиоэлектронной аппаратуры (табл. 11.1).

Таблица 11.1

Наименование элементов	Опасность отказов, $\frac{1}{\text{час}}$
Электровacuумные приборы	$(0,002-0,345) \cdot 10^{-3}$
Резисторы	$(0,00001-0,015) \cdot 10^{-3}$
Конденсаторы	$(0,00001-0,164) \cdot 10^{-3}$
Трансформаторы	$(0,00002-0,064) \cdot 10^{-3}$
Дроссели	$(0,00002-0,044) \cdot 10^{-3}$
Полупроводниковые диоды	$(0,00012-0,5) \cdot 10^{-3}$
Полупроводниковые триоды	$(0,0001-0,9) \cdot 10^{-3}$

Зависимость $\lambda=f(t)$ можно изобразить в виде кривой (рис. 11.1), на которой явно выражены участки, соответствующие рассмотренным выше трем этапам работы аппаратуры.

Среднее время между двумя соседними отказами. Средним временем между соседними отказами (или временем наработки на отказ) называется среднее арифметическое время исправной работы между следующими друг за другом отказами, т. е.:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n}, \quad (11.2)$$

где t_1 — время работы до первого отказа; t_2 — время работы между первым и вторым отказами; t_n — время работы между $(n-1)$ -м и n -м отказами; n — число отказов за время испытаний.

Значение $t_{\text{ср}}$ может быть определено по результатам одного испытания образца, и в этом случае можно пользоваться формулой (11.2). Для многократных испытаний образца и для испытаний серии однотипных элементов, приборов и т. д. следует пользоваться формулой

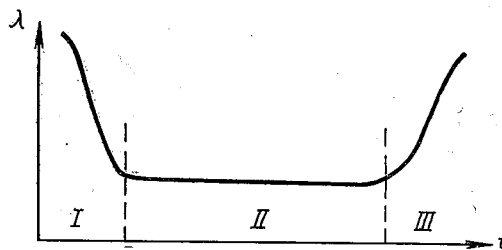


Рис. 11.1. Зависимость опасности отказов от времени.

I — начальный этап; II — этап нормальной работы; III — этап износа и старения.

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=M} t_{\text{ср}_i}}{M}, \quad (11.3)$$

где M — число испытываемых образцов или количество проведенных испытаний одного образца; $t_{\text{ср}_i}$ — среднее время между соседними отказами i -того образца или время безотказной работы одного образца при i -том испытании.

Пример. В результате испытания трех образцов получены следующие результаты (табл. 11.2):

Таблица 11.2

№ образца	Время работы до первого отказа, час	Время работы между первым и вторым отказами, час	Время работы между вторым и третьим отказами, час	Время работы между третьим и четвертым отказами, час
1	21	19	21	19
2	20	22	23	22
3	23	22	24	22

По формуле (11.2) определим время наработки на отказ каждого изделия:

$$t_{cp1} = \frac{21 + 19 + 21 + 19}{4} = 20 \text{ час}; t_{cp2} = \frac{20 + 22 + 23 + 22}{4} = 21,75 \text{ час};$$

$$t_{cp3} = \frac{23 + 22 + 24 + 22}{4} = 22,75 \text{ час}.$$

Рассчитанное по формуле (11.3) среднее время между соседними отказами всех трех образцов будет

$$t_{cp} = \frac{20 + 21,75 + 22,75}{3} = 21,5 \text{ час}.$$

Вероятность исправной работы. Вероятностью исправной (или безотказной) работы P называется вероятность того, что в течение заданного интервала времени непрерывной работы не будет отказов. Значение вероятности P заключено в пределах от 0 до 1 и уменьшается при увеличении интервала времени.

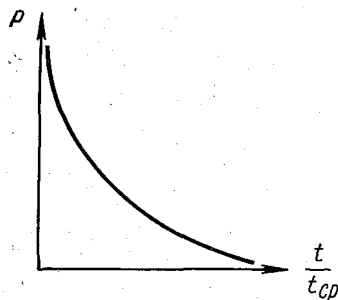


Рис. 11.2. Зависимость вероятности исправной работы от обобщенного времени.

Все численные характеристики надежности являются величинами вероятностными и определяются методами математической статистики и теории вероятностей. Это означает, что та или иная характеристика справедлива по отношению к большому числу образцов или к одному образцу, если наблюдение за ним производилось достаточно долго.

Определенное по формулам теории вероятностей значение P можно выразить через опасность отказов λ и время t :

$$P = e^{-\lambda t}. \quad (11.4)$$

Для этапа нормальной работы справедливо условие $\lambda = \frac{1}{t_{cp}} = \text{const}$, поэтому формулу (11.4) можно представить в виде

$$P = e^{-\frac{t}{t_{cp}}}, \quad (11.5)$$

где t_{cp} — время наработки на отказ.

На этапе нормальной работы, таким образом, справедлив экспоненциальный закон изменения надежности; график изменения надежности представляет собой экспоненту, показанную на

рис. 11.2. По оси абсцисс на этом графике отложены значения отношения $\frac{t}{t_{\text{ср}}}$, которые называются *обобщенным временем*.

Пример. Рассчитать вероятность исправной работы в течение 30 час и время наработки на отказ устройства, содержащего 20 электронных ламп, 40 резисторов, 35 конденсаторов, 4 трансформатора и 5 разъемов.

Пусть данные типы элементов имеют следующие значения λ -характеристик (табл. 11.3):

Таблица 11.3

Элементы	Значение λ -характеристики, $\frac{1}{\text{час}}$
Электронные лампы	$(0,08-0,11) \cdot 10^{-3}$
Резисторы	$(0,003-0,013) \cdot 10^{-3}$
Конденсаторы	$(0,0014-0,018) \cdot 10^{-3}$
Трансформаторы	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Разъемы	$0,02 \cdot 10^{-3}$

Найдем максимальное значение вероятности исправной работы в течение 30 час, подставив в формулу (11.4) наибольшие значения λ -характеристик из табл. 11.3, умноженные на числа элементов:

$$P_{\text{max}} = e^{-(0,08 \times 20 + 0,003 \times 40 + 0,0014 \times 35 + 0,01 \times 4 + 0,02 \times 5) \cdot 10^{-3} \times 30} = e^{-0,0019 \times 30} \approx 0,94.$$

Величина 0,0019 1/час является минимальной λ -характеристикой всей системы. Среднее время исправной работы для этого случая равно:

$$t_{\text{ср. max}} = \frac{1}{\lambda_{\text{min}}} \approx 500 \text{ час.}$$

Определим минимальное значение вероятности исправной работы, подставив в формулу (11.4) наибольшие значения λ :

$$P_{\text{min}} = e^{-(0,11 \times 20 + 0,013 \times 40 + 0,018 \times 35 + 0,01 \times 4 + 0,02 \times 5) \cdot 10^{-3} \times 30} \approx 0,89.$$

$$\lambda_{\text{max}} = 0,0035 \frac{1}{\text{час}}; t_{\text{ср. min}} = \frac{1}{\lambda_{\text{max}}} \approx 285 \text{ час.}$$

Таким образом, значение вероятности исправной работы в течение 30 час составляет 0,89—0,94, а среднее время исправной работы системы (наработка на отказ) заключено в пределах от 285 до 500 час.

Для обеспечения высокой надежности аппаратуры на всех этапах ее разработки, изготовления и эксплуатации используют специальные приемы и правила. Рассмотрим основные из них.

На этапах разработки и изготовления аппаратуры обычно руководствуются следующими правилами: 1) простота аппаратуры, 2) элементы, составляющие систему, должны использоваться только в рекомендованных режимах работы; 3) широкое использование высоконадежных унифицированных узлов, проверенных в условиях массового выпуска; 4) удобство технического обслуживания и ремонта; 5) резервирование; 6) точное соблюдение технологии, технических условий и другой документации на всех участках производства; 7) тщательный технический контроль всех процессов производства.

Указанные правила особого пояснения не требуют, за исключением резервирования, которое рассмотрим более подробно.

Резервирование (или наличие в конструкции аппаратуры резервных элементов) — одно из наиболее эффективных средств повышения надежности. Оно может быть общим (резервируется аппаратура в целом) или поэлементным (резервируется каждый элемент в отдельности). В обычной аппаратуре наиболее выгодно поэлементное резервирование, так как есть много элементов и узлов, работающих практически безотказно. В особо ответственных устройствах применяют двойное и даже тройное резервирование.

Всякое резервирование сводится к параллельному соединению одинаковых элементов (устройств, систем). При последовательном же соединении элементов отказ любого из них приводит к отказу всей системы. Так, если четыре элемента соединены последовательно, а вероятность исправной работы каждого из них равна 0,9, то вероятность исправной работы системы $P = 0,9^4 \approx 0,66$, т. е. общая надежность такой системы ниже надежности каждого из составляющих ее элементов. Если система состоит из тех же четырех элементов, но соединенных параллельно, то вероятность исправной работы равна 0,938.

Различают два вида резервирования: *горячее* (резервные элементы находятся под напряжением и при отказах основных элементов немедленно начинают работать вместо них) и *холодное* (питание на резервные элементы подается только после отказа основных элементов, так что для включения их в работу требуется определенное время). Тот или иной вид резервирования применяют в зависимости от конкретных требований к аппаратуре, однако горячее резервирование более оперативно.

Мы рассмотрели основные правила обеспечения надежности на различных стадиях разработки и изготовления аппаратуры. Наибольший же интерес для специалистов гидрометеорологической службы представляют этапы нормальной работы и износа и старения, во время которых основным условием сохранения высокой надежности является соблюдение правил эксплуатации аппаратуры.

§ 11.2. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Эксплуатационная документация. Каждый вид радиоэлектронной аппаратуры, предназначенной для эксплуатации, обязательно снабжается комплектом эксплуатационной документации, который в общем случае состоит из следующих документов: 1) технического описания; 2) инструкции по эксплуатации; 3) формуляра; 4) паспорта.

В перечисленных документах, как правило, содержатся все необходимые для обеспечения правильной эксплуатации сведения.

Техническое описание. Техническое описание предназначено для изучения аппаратуры специалистами, осуществляющими ее эксплуатацию, и содержит все необходимые данные по конструкции, техническим характеристикам, принципу работы и другие сведения и указания для обеспечения полного использования технических возможностей аппаратуры. Техническое описание обычно содержит следующие разделы:

1. *Назначение.* В этом разделе приводится назначение, область применения и условия эксплуатации (пределы температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления, виброустойчивость и т. п.).

2. *Технические данные.* Здесь приводятся основные данные изделия, по которым можно составить полное представление о его технических возможностях (дальность действия, погрешности, разрешающая способность, пределы измерения и т. п.).

3. *Состав.* В этом разделе приводится комплектация изделия. Сюда включается также перечень запасных частей, инструмента, принадлежностей (ЗИП).

4. *Принцип работы.* Здесь разъясняется принцип работы изделия согласно его схемам, дается описание взаимодействия отдельных узлов и блоков. В этом же разделе даются сведения о пределах регулирования характеристик органами регулировки, режимы работы ламп, осциллограммы импульсов и т. п.

5. *Конструкция.* В этом разделе приводится описание конструкции изделия и его основных частей, указываются их специфические особенности, дается описание основных элементов и приводятся их конструктивные и электрические характеристики. Часто в этом разделе помещаются схемы намотки трансформаторов и дросселей, а также описание систем обогрева, вентиляции и др.

6. *Размещение и монтаж.* Этот раздел имеется в техническом описании, когда данное изделие предназначено для размещения на каком-либо объекте или в специальном помещении. При этом указываются требования к объекту или помещению, даются рекомендации по защите изделия от ударов и вибраций

при передвижении или работе объекта, по защите от электрических помех и т. п.

Инструкция по эксплуатации. В инструкции по эксплуатации содержатся все правила и указания, которые необходимо выполнять при пользовании изделием. Содержание инструкции по эксплуатации обычно разбивается на следующие разделы:

1. *Состав обслуживающего персонала.* Здесь указывается общий численный состав обслуживающего персонала и приводится перечень всех специалистов с указанием участков изделия, обслуживаемых каждым специалистом.

2. *Указания по технике безопасности.* В этом разделе приводятся правила предосторожности, которые необходимо безусловно соблюдать как во время разворачивания и свертывания изделия, так и при его постоянной эксплуатации.

3. *Подготовка к работе.* В этом разделе дается описание и последовательность операций по подготовке изделия к работе. Приводится порядок и описание операций включения, настройки, проверки и выключения изделия. Указываются исходные положения органов управления и настройки. Излагается последовательность операций по проверке работы включенной аппаратуры и отдельных ее частей с помощью контрольно-измерительных приборов, а также указываются значения показаний этих приборов, соответствующих установленным режимам работы и допустимым отклонениям от этих показателей.

4. *Особенности эксплуатации.* Здесь указываются особенности эксплуатации аппаратуры в условиях высоких и низких температур, повышенной влажности, пониженного давления, сильного ветра, после длительного хранения и т. п.

5. *Порядок работы.* В этом разделе излагается порядок работы обслуживающего персонала, обеспечивающий четкое и быстрое решение поставленных задач.

6. *Контрольно-измерительная аппаратура.* В этом разделе приводятся перечень и краткие сведения по специальным, прилагаемым к изделию, контрольно-измерительным приборам, которые применяются для контроля его работы и настройки. Здесь же указываются меры предосторожности при пользовании этими приборами и дается методика работы с ними.

7. *Контроль работы и настройка.* Здесь указывается порядок проведения контроля работы изделия и его составных частей.

8. *Объем и периодичность контрольно-профилактических работ.* В разделе приводятся обязательные сроки и объем контрольно-профилактических работ с указанием последовательности и методики их проведения.

9. *Характерные неисправности и методы их устранения.* В этом разделе (оформляемом обычно в виде таблицы) приводится перечень характерных, наиболее часто встречающихся

неисправностей, указываются вероятные причины этих неисправностей и методы их устранения.

В инструкцию по эксплуатации включаются также и другие разделы, не требующие особых пояснений: *Смазка, Порядок хранения, Транспортирование в процессе эксплуатации* и некоторые другие.

Ф о р м у л я р. Формуляром называется документ, отражающий техническое состояние данного изделия и содержащий сведения по его эксплуатации (учет часов работы, профилактические осмотры, ремонты, учет неисправностей и др.).

Формуляр является документом, сопровождающим аппаратуру в течение всего периода эксплуатации с момента выпуска ее предприятием-изготовителем. В формуляре имеется ряд таблиц, которые должны тщательно заполняться персоналом, использующим данную аппаратуру.

П а с п о р т. Паспорт является документом, удостоверяющим гарантированные заводом-изготовителем основные параметры и характеристики изделия. В паспорте обычно приводятся как номинальные (указанные в техническом описании), так и фактически измеренные значения основных технических характеристик конкретного экземпляра изделия. Так, если в техническом описании указывается, например, точность измерения напряжения $\pm 0,5$ в, то фактическое значение этого параметра может быть для данного образца, допустим, $+0,39$ в.

В паспорте также приводятся гарантийные сроки хранения и эксплуатации аппаратуры, обязательства завода-изготовителя о безвозмездном ремонте или замене изделия и его частей при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации и хранения изделия: здесь же содержится раздел «Рекламации», где регистрируются все предъявленные рекламации¹ и их краткое содержание.

В паспортах электровакуумных или полупроводниковых приборов, кроме всего перечисленного, указываются предельно допустимые условия эксплуатации прибора, дается схема соединения электродов со штырьками или выводами и др.

Отметим, что в зависимости от назначения и сложности аппаратуры перечисленные документы часто объединяются.

Одним из основных условий поддержания высокой надежности аппаратуры является точное выполнение всех указаний, изложенных в рассмотренных документах.

Следует подчеркнуть, что правильное и своевременное заполнение формуляра и паспорта приносит пользу для тех, кто не только использует аппаратуру, но и дает важную информацию заводу-изготовителю для обобщения различных эксплуата-

¹ Рекламация (от лат. *reclamatio* — неодобрение) — требование возмещения убытков вследствие плохого качества полученного изделия.

ционных данных выпускаемого им изделия. Поэтому следует всегда внимательно относиться к запросам завода-изготовителя относительно качества прибора или его узлов.

Особое значение имеет точное соблюдение условий эксплуатации и регулярное выполнение контрольно-профилактических работ.

Условия эксплуатации. Под условиями эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры обычно понимают внешнюю среду, в которой она работает, и физические воздействия, которым она подвергается (вибрация, удары и т. д.).

В зависимости от диапазона изменения основных климатических факторов условия эксплуатации можно разделить на три группы:

1) *нормальные условия*, характерные для аппаратуры, работающей обычно в закрытых помещениях при температуре $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$, относительной влажности воздуха до 80% и атмосферном давлении 720—780 мм рт. ст;

2) *сложные условия* — условия эксплуатации аппаратуры при температуре от -50 до $+50^\circ \text{C}$, относительной влажности воздуха до 90% и атмосферном давлении от 90 до 780 мм рт. ст;

3) *тяжелые условия*, когда температура изменяется от -60 до $+70^\circ \text{C}$, относительная влажность воздуха — от 15 до 100% и атмосферное давление — от 40 до 1000 мм рт. ст.

Говорят еще об *особо тяжелых условиях* (очень высокие температуры, значительные давления и т. д.), но они обычно возникают при эксплуатации специальных видов аппаратуры.

Наличие механических воздействий (вибрация, тряска, удары и т. п.) определяется характером объекта, на котором устанавливается радиоэлектронная аппаратура.

Поэтому прежде чем начать использовать аппаратуру, следует изучить всю эксплуатационную документацию, сравнить изложенные в этой документации условия эксплуатации с условиями на данном объекте и в данной климатической зоне.

Контрольно-профилактические работы. Периодичность и методика проведения контрольно-профилактических работ указываются обычно в инструкции по эксплуатации конкретных приборов, однако для всех приборов общим является: внешний осмотр состояния аппаратуры, осмотр внутреннего состояния монтажа, проверка основных электрических параметров и их соответствия техническим характеристикам и паспортным данным.

При *внешнем осмотре* проверяют наличие механических повреждений, состояние лакокрасочных и гальванических покрытий и крепления, плавность хода или четкость фиксации ручек управления и регулировки прибора, исправность соединительных кабелей и шнура питания, комплектность и т. п.

При *осмотре внутреннего состояния монтажа* проверяют: крепление узлов и деталей к шасси корпуса, работу переключателя.

телей диапазонов, наличие трещин и сколов на деталях монтажа, состояние антикоррозийных покрытий в соответствующих местах монтажа, наличие смазки на фиксаторах переключателей.

Основные электрические параметры прибора проверяются в соответствии с требованиями, изложенными в инструкции по эксплуатации. Радиоизмерительные приборы, как указывалось в § 10.1, должны подвергаться периодической проверке в соответствии с правилами, выработанными Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР; один раз в год проверяются измерительные генераторы, резонансные волномеры, электронные вольтметры и комбинированные приборы и два раза в год — кварцевые калибраторы и гетеродинные частотомеры.

Выявленные в процессе контрольно-профилактических работ незначительные дефекты устраняются на месте в результате *мелкого ремонта*, при котором устраняются мелкие неисправности (закрашиваются трещины и царапины на покрытиях, заменяются электронные лампы, подрегулируются несложные узлы).

Крупные дефекты можно устранить только при *среднем* или *капитальном ремонте*, которые являются более сложными техническими мероприятиями и рассматриваются ниже.

§ 11.3. РЕМОНТНЫЕ РАБОТЫ

Мы уже рассказали о мелком ремонте. При среднем ремонте заменяются вышедшие из строя отдельные детали монтажа, производится настройка и регулировка аппаратуры. При капитальном ремонте заменяются отдельные узлы и блоки, восстанавливается пришедший в негодность монтаж и производится регулировка аппаратуры.

Прежде чем приступить к любому виду ремонта, необходимо ознакомиться с принципиальной и монтажной схемами аппаратуры, особенностями ее работы, техническими характеристиками и правилами эксплуатации. К ремонту особо сложной аппаратуры можно приступать только после глубокого изучения аппаратуры и приобретения навыков по ее ремонту на специальных курсах или во время стажировки на заводе-изготовителе.

При проведении ремонтных работ обычно используют следующую методику, которую в каждом отдельном случае уточняют в зависимости от сложности изделия:

- 1) производят внешний осмотр неисправной аппаратуры, проверяют ее комплектность, определяют примерный объем ремонтно-наладочных и проверочных работ, составляют список измерительной и другой аппаратуры, необходимой для ремонта;

- 2) извлекают прибор из кожуха (футляра), а для сложных систем открывают дверцы блоков, производят внешний осмотр

монтажа схемы внутренних узлов и блоков, выявляют видимые наружные дефекты отдельных элементов и явные повреждения монтажа;

3) проверяют исправность и качество работы выпрямительного устройства, питающего накальные, анодные и сеточные цепи электровакуумных приборов, а также отдельные узлы и блоки;

4) определяют качество работы блоков схемы (проверяют прохождение сигнала по всему тракту, что чаще всего рекомендуется начинать с выхода системы), выявляют дефектный блок или узел;

5) находят в дефектном узле неисправный каскад, цепь и отказавший элемент в этой цепи;

6) восстанавливают дефектный элемент или заменяют его на заведомо исправный того же типа и номинального значения;

7) регулируют прибор, проводят его послеремонтную проверку.

В последнее время распространение получил так называемый *сменно-блочный ремонт*, заключающийся в том, что дефектный блок может быть выявлен методом замены блоков, исправность которых вызывает сомнение, на заведомо исправные блоки. Этот вид ремонта приобретает особое значение при работе с радиоаппаратурой, собранной на так называемых *модульных* элементах, представляющих собой неделимые конструктивные единицы.

Следует отметить специфичность радиоэлектронной аппаратуры, которая заключается в том, что на устранение неисправности (замена неисправного резистора или конденсатора, восстановление монтажа путем пайки и т. п.) затрачивается сравнительно немного времени, тогда как отыскание этой неисправности может длиться долго. Поэтому при выявлении причины неисправности нужно придерживаться приведенной выше методики, уточненной для каждого конкретного изделия.

Кроме того, следует знать некоторые типовые неисправности элементов радиоаппаратуры. Многолетний опыт эксплуатации и ремонта радиоаппаратуры позволил выявить определенную закономерность в появлении неисправностей. Приведем данные о типовых неисправностях некоторых приборов (в скобках приводится количество неисправностей в процентах от общего числа отказов).

Электровакуумные приборы: изменения параметров и потери эмиссии (43—51%); обрывы и перегорания нити накала (20—28%); трещины в баллонах, поломка цоколя и пр. (9—12%).

Резисторы: обрыв или нарушения контактов (50%); перегорание проводящего слоя (35—40%); резкие изменения величины сопротивления по сравнению с номинальным значением (5—8%).

Конденсаторы: пробой диэлектрика (около 80%); уменьшение емкости (15%); уменьшение сопротивления изоляции (5%).

Реле: замыкание и обгорание контактов, разрегулировка контактных пружин, пробой изоляции обмоток на корпус; обрывы обмоток.

Трансформаторы и дроссели: перегорание обмоток, междувитковые замыкания обмоток, пробой изоляции обмоток на корпус, пробой между витками.

Полупроводниковые диоды и триоды: пробой участков между электродами, обрыв электродов, изменение параметров.

Восстанавливаемость радиоаппаратуры. В теории надежности оперируют понятием *восстанавливаемости*, охватывающим как свойства самой аппаратуры, так и процесс эксплуатации. Свойства самой аппаратуры оцениваются так называемой *ремонтнопригодностью*, под которой понимаются конструктивно-технические свойства аппаратуры, характеризующие ее приспособленность к обнаружению и устранению отказов. Основные показатели ремонтнопригодности — это время, необходимое для устранения неисправности, и коэффициент готовности аппаратуры, определяемый по формуле

$$K_r = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_{рем}}, \quad (11.6)$$

где t_{cp} — среднее время наработки на отказ; $t_{рем}$ — средняя продолжительность устранения отказа.

Для того чтобы повысить величину K_r , при конструировании аппаратуры стремятся к обеспечению легкости и доступности проведения ремонтных работ, а при эксплуатации — к точному соблюдению правил эксплуатации и ремонта. При этом большое значение имеет наличие квалифицированного обслуживающего персонала, хорошо налаженной системы снабжения инструментами, приборами, запасными частями.

Мы уже отмечали, что в радиоэлектронной аппаратуре очень часто основное время затрачивается на отыскание неисправности. Современная радиоэлектронная аппаратура, как правило, имеет специальные устройства, позволяющие сравнительно быстро отыскать неисправность (сигнальные лампочки, стрелочные индикаторы, системы автоматического контроля и т. п.). Однако наряду с этим имеется большое количество устройств и систем, где приходится довольно часто отыскивать неисправность, даже не имея достоверных данных о месте (блоке), где произошел отказ.

Рассмотрим подробнее способ обнаружения неисправного блока, заключающийся в постепенном сужении границ поиска области неисправной части аппаратуры. Для обнаружения неисправного тракта (приемного, передающего, индикаторного и т. п.), в тракте — неисправного блока, в блоке — неисправного каскада, в каскаде — отказавшего элемента пользуются так называемым *методом средней точки*. Изложим сущность этого метода.

Пусть некоторая система состоит из $N=8$ последовательно соединенных элементов и вероятности отказов каждого элемента одинаковы. Если бы мы попытались обнаружить неисправный элемент, поочередно испытывая каждый, то в случае неисправного элемента 8 нужно было бы провести $N-1=7$ испытаний (если 7 блоков исправны, то последний можно не испытывать). Пользуясь методом средней точки, мы начнем испытания в середине системы, т. е. между элементами 4 и 5. В результате границы неисправного участка системы сокращаются до элементов 5, 6, 7 и 8, а участок с элементами 1, 2, 3 и 4 сразу же исключается из рассмотрения.

При втором испытании (между элементами 6 и 7) пополам делится оставшийся неисправным участок системы. При третьем испытании обнаруживается неисправный элемент. Очевидно, что метод средней точки позволяет более быстро отыскать неисправный элемент, чем поочередные испытания.

Способы испытаний. Опишем некоторые наиболее распространенные способы испытаний, которые позволяют найти неисправность.

Способ контрольных переключений и регулировок, заключающийся в том, что из рассмотрения исправные участки исключаются в результате анализа работы схем с помощью рабочих органов переключения, регулировки и элементов текущего контроля (сигнальных лампочек, встроенных индикаторных приборов и т. п.). Поясним способ на примере вещательного приемника. При отсутствии сигнала на выходе приемника необходимо включить его в режим проигрывателя. Если звук в этом режиме есть, то можно сделать заключение, что участок схемы от входа усилителя низкой частоты до динамика исправен. Достоинство способа заключается в его простоте, а недостаток — в его ограниченности (находится только участок, а не конкретное место повреждения).

Способ промежуточных измерений, сущность которого состоит в том, что для сужения области неисправности или нахождения отказавшего элемента производят измерение сопротивлений цепей, режимов питания, параметров высокочастотных цепей, осциллографирование напряжений и токов в контрольных гнездах и других точках схемы. Результаты измерений сопоставляют с картами сопротивлений, напряжений и осциллограммами, которые обычно приводятся в техническом описании аппаратуры.

Значительное расхождение значений, указанных в картах с полученными при проверке дает возможность обнаружить дефектный элемент схемы.

Карта сопротивлений снимается с помощью омметра и служит для оценки электрической исправности схемы и сопротивления ее отдельных точек относительно шасси аппаратуры. Перед из-

мерениями полностью отключается питание прибора, все высоковольтные и электролитические конденсаторы разряжаются, отсоединяются провода внешних соединений, вынимаются из панелей все электровакуумные приборы и устанавливаются в определенные положения все органы включения, переключения и регулировки (обычно эти положения указываются в примечаниях к карте сопротивлений). В карте сопротивлений, как правило, приводятся данные, снятые между контактными лепестками панелей ламп относительно шасси. В этом случае один зажим омметра подсоединяется к шасси испытуемого прибора, а другой — к соответствующему лепестку ламповой панели. Расхождение значений сопротивлений свыше допускаемой нормы (она обычно указывается в карте) свидетельствует о неисправности в данной цепи, причину которой следует выяснить, устранить и только после этого продолжать проверку.

Убедившись в том, что все без исключения сопротивления в норме, можно перейти к снятию карты напряжений, т. е. к проверке прибора под напряжением. Для проверки прибора под напряжением необходимо, строго соблюдая правила техники безопасности, включить его в питающую сеть, предварительно сняв кожух и перемкнув контакты блокировочного устройства (если они имеются). Измерять напряжение нужно электронным вольтметром, внутреннее сопротивление которого во избежание шунтирования должно быть не менее чем в 10 раз больше сопротивления того участка схемы, на котором измеряется напряжение.

Примеры частей карт сопротивлений и напряжений, выполненных в виде чертежей, показаны на рис. 11.3¹. Часто аналогичные карты составляются и в виде таблиц (табл. 11.4).

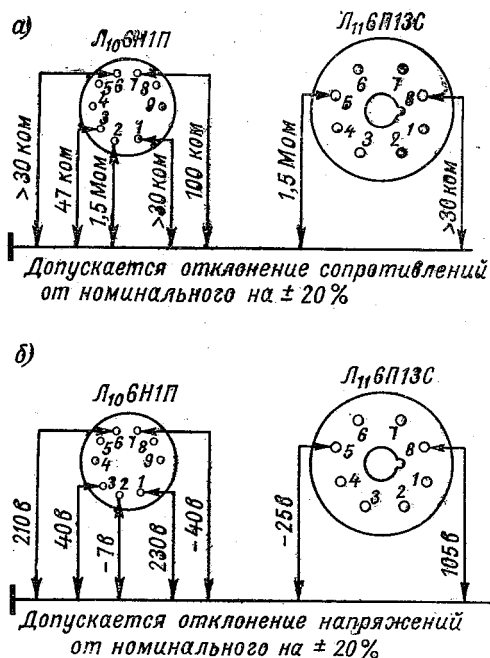


Рис. 11.3. Карты сопротивлений (а) и напряжений (б).

¹ Примеры заимствованы из книги [2].

Таблица 11.4

Карта напряжений

№ п/п	Точки замера		Величина напряжения, в (с до- пускаемым отклонением $\pm 20\%$)	Примечание
	первая	вторая		
1	$L_{10}(1)$	Корпус	230	Анодное напряжение
2	$L_{10}(2)$	"	-7	Напряжение на управляющей сетке
3	$L_{10}(3)$	"	40	Напряжение на катоде
4	$L_{10}(6)$	"	210	Напряжение на аноде
5	$L_{10}(7)$	"	-40	Напряжение на управляющей сетке
6	$L_{11}(8)$	"	105	Напряжение на экранной сетке
7	$L_{11}(5)$	"	-25	Напряжение на управляющей сетке

Примечание. В скобках указан номер контакта ламповой панели.

Способ промежуточных измерений наиболее целесообразен на конечном этапе поиска неисправности, когда граница неисправной части аппаратуры сужена до блока, каскада или цепи, и нужно найти отказавший элемент.

Способ замены, заключающийся в том, что для обнаружения неисправности отдельные элементы системы заменяются соответствующими заведомо исправными элементами. Если после замены нормальная работа системы восстановилась, то делается однозначный вывод с неисправности замененного элемента.

Наиболее часто этот способ применяется при поиске неисправных электровакуумных приборов.

Способ сравнения, сущность которого состоит в том, что режим работы неисправного участка аппаратуры сравнивается с режимом однотипного участка заведомо исправной аппаратуры. Способ дополняет и упрощает способ промежуточных измерений и может быть применен в тех случаях, когда в месте эксплуатации имеются однотипные приборы.

Способ характерных неисправностей основан на отыскании дефекта по известным признакам, однозначно характеризующим данную неисправность. Как указывалось выше, перечень таких неисправностей и методов их устранения обычно приводится в инструкциях по эксплуатации. Следует отметить, что в результате эксплуатации удается выявить некоторые характерные неисправности и способы их устранения, не вошедшие в инструкцию по эксплуатации. В этом случае рекомендуется поставить об этом в известность завод-изготовитель, который отразит это в эксплуатационной документации, прилагаемой к изделиям последующих выпусков.

Обнаружив с помощью одного или нескольких перечисленных выше способов неисправность, приступают к ее устранению.

Устранение неисправностей радиоаппаратуры. Устранение неисправности можно разделить на три этапа: 1) отсоединение дефектных элементов; 2) монтаж (установка исправных элементов); 3) регулировка.

Отсоединение дефектных элементов заключается в изъятии неисправного блока или элемента, отпайке резистора, конденсатора, реле и т. д.

Монтаж. При замене неисправного элемента, например лампы, монтаж заключается в простой установке в соответствующую ламповую панель исправной лампы. При сменно-блочном ремонте исправный блок также заменяется заведомо исправным блоком, который устанавливается на соответствующее место. Другие виды монтажа более сложны и требуют наличия соответствующих условий и инструмента. Прежде всего следует продуманно организовать рабочее место, так называемый *монтажный стол*. Один из вариантов монтажного стола показан на рис. 11.4. На таком столе размещается весь необходимый для выполнения монтажных работ инструмент и детали.

В кассах 3 хранятся детали крепежа (винты, гайки, шайбы, заклепки и т. д.), в ящиках 12 хранится инструмент по группам его применения (отдельно монтажный, сборочный, слесарный). В рамку 4 вставляется чертеж, карта, схема или другой документ, в соответствии с которым предполагается вести монтаж. Назначение остальных частей стола ясно из подписи к рис. 11.4. Полезно с правой стороны стола укрепить тиски, на которых можно выполнять мелкие слесарные работы (изготовление скобок для крепления конденсаторов или резисторов, мелких штырьков и др.). Стол должен быть хорошо освещен дневным светом, поэтому его рекомендуется размещать у окна. Для освещения искусственным светом применяют лампочку мощностью не более 60 *вт*. При этом в глаза производящего монтаж, свет от лампочки попадать не должен.

Размеры монтажного стола выбираются в зависимости от того, каких габаритов радиоэлектронную аппаратуру предполагается ремонтировать.

Качество монтажа во многом зависит от качества инструмента и полноты его набора. Рассмотрим наиболее важные элементы монтажного инструмента.

Для пайки соединений при монтаже радиоаппаратуры, как правило, пользуются *электрическими паяльниками*, представляющими собой спираль из нихромовой проволоки, охватывающей медный стержень. Полезно иметь два паяльника; один мощностью 60—100 *вт* со стержнем диаметром 10—12 *мм* для обычных монтажных работ (например, пайки проводов диаметром до 1 *мм*, выводов полупроводниковых приборов и т. п.) и второй мощ-

ностью 180—200 *вт* с более массивным стержнем для пайки толстых проводников и других деталей, требующих более сильного прогрева. Рекомендуется пользоваться только паяльниками, рассчитанными на питание переменным током через понижающий трансформатор на 12 или 36 *в*.

В качестве *механического монтажного инструмента* обычно используются пинцеты, плоскогубцы, круглогубцы, кусачки, нож-

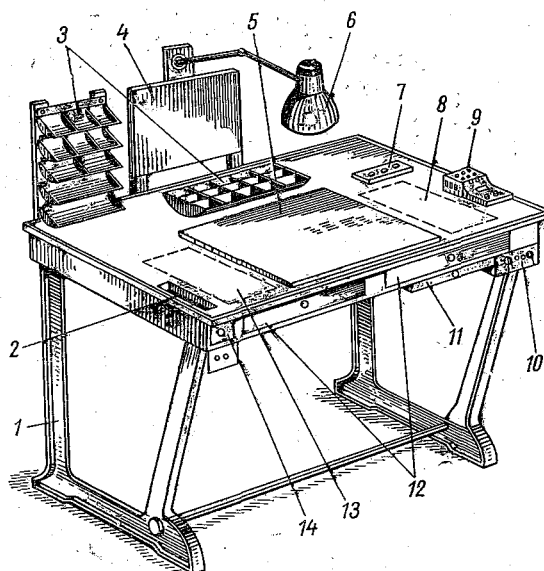


Рис. 11.4. Монтажный стол.

1 — металлический каркас стола; 2 — прорезь для сбрасывания отходов; 3 — кассы для мелких деталей; 4 — рамка для чертежа (схемы); 5 — резиновый коврик; 6 — осветитель; 7 — подставка для сосудов с флюсом; 8 — место для плоскогубцев, кусачек и др.; 9 — подставка для паяльника; 10 — гнезда для включения паяльника; 11 — выдвижная полка для крупных деталей; 12 — ящики для хранения инструмента; 13 — место для пинцета и припоя; 14 — ящик для отходов.

ницы, отвертки, боковые и торцовые гаечные ключи, металлические и деревянные молотки, напильники, надфили и др.

Измерительный инструмент необходим для измерения наружных и внутренних диаметров деталей и разметки отверстий на шасси (наиболее распространен штангенциркуль с отсчетом 0,1 *мм*). Диаметры проводов измеряют микрометром. Штангенциркуль и микрометр — точные измерительные инструменты, они требуют особенно бережного обращения. Их периодически необходимо протирать мягкой тканью и смазывать чистым вазелином.

Перечисленный монтажный инструмент лучше всего хранить в специальных кассетах, где для каждого инструмента имеется гнездо, а измерительный инструмент хранят отдельно, в специальных футлярах.

Подбор деталей радиосхем. Мы уже отмечали, что при замене дефектных деталей радиосхем следует применять точно такие же детали. Рассмотрим наиболее часто применяющиеся детали и основные правила их подбора.

Резисторы различной величины составляют обычно более 50% всех применяемых в схеме деталей. Выпускаемые промышленностью резисторы различаются по величине, допускам и мощности.

В зависимости от допуска (т. е. допускаемого отклонения от номинальной величины) резисторы делятся на три класса точности: первый класс (допуск $\pm 5\%$), второй ($\pm 10\%$) и третий ($\pm 20\%$).

Промышленностью выпускается большое количество резисторов различных номиналов. Номиналы сопротивлений выбраны так, чтобы можно было всегда подобрать резистор нужной величины. Например, для резисторов с допуском $\pm 10\%$ ряд стандартных номиналов представляет собой величины 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2, обозначающие омы, десятки ом, сотни ом, килоомы, десятки килоом, сотни килоом, мегомы, десятки мегом. Если нужно подобрать резистор, например, с номиналом 2 ком, то он может найтись среди резисторов с номиналами 1,8 или 2,2 ком. Для резисторов с другими допусками такие ряды больше (для допуска $+5\%$) или меньше (для допуска $\pm 20\%$).

Во многих радиотехнических целях вполне допустимо использовать резисторы третьего класса точности и даже резистор с сопротивлением, соседним по ряду.

Резистор в анодной цепи лампы, в цепи управляющих сеток ламп двухтактного УНЧ, в цепях эмиттера и базы транзисторов, в цепи гетеродинной сетки лампы преобразователя частоты, резистор фильтра анодной цепи, резистор автоматического смещения рекомендуется выбирать с допускаемым отклонением $\pm 10\%$. В качестве добавочных сопротивлений миллиампервольт-омметров лучше всего применять резисторы первого класса точности.

В табл. 11.5 приведены основные данные наиболее употребительных постоянных резисторов.

Промышленностью выпускаются и переменные резисторы, служащие для осуществления различных регулировок в схеме. Эти резисторы бывают либо непроволочные (типы СП, СПО и др.), либо проволочные (типы ПП, ППБ и др.).

Конденсаторы, так же как и резисторы, принадлежат к числу наиболее распространенных деталей современной

Таблица 11.5

Постоянные резисторы

Тип резистора	Пределы значений сопротивлений		Номинальная мощность, Вт	Диапазон рабочих температур, °С		Основные области применения
	от	до		от	до	
ВС (углеродистые)	27 Ом	10 Мом	0,25; 0,5; 1; 2; 5; 10	-60	+100	В радиоаппаратуре широкого применения, для цепей постоянного и переменного тока
УЛМ (углеродистые лакированные малогабаритные)	27 Ом	1 Мом	0,12	-60	+100	В радиоаппаратуре широкого применения, где требуются малогабаритные детали
МЛТ (металлизированные лакированные теплостойкие)	100 Ом	10 Мом	0,25; 0,5; 1; 2	-60	+120	В радиоаппаратуре широкого применения, для цепей постоянного и переменного тока
УЛИ (углеродистые лакированные измерительные)	1 Ом	1 Мом	0,1; 0,25; 0,5; 1	-60	+80	В измерительной аппаратуре; выпускаются с точностями ± 1 ; ± 2 ; $\pm 3\%$
МТ (металлизированные теплостойкие)	100	10 Мом	0,125; 0,25; 0,5; 1; 2	-60	+200	В радиоаппаратуре широкого применения, для условий повышенной температуры
ПЭ (проволочные эмалированные)	1	50 ком	7,5; 15; 20; 25; 50; 75; 150	-60	+70	В цепях постоянного тока для рассеивания больших мощностей
ПЭВТ (проволочные эмалированные влагостойкие теплостойкие)	3	56 ком	3-100	-60	+450	В цепях постоянного тока для рассеивания больших мощностей в условиях повышенной температуры и влажности

радиоаппаратуры. По конструкции они разделяются на конденсаторы постоянной и переменной емкости.

По материалу диэлектрика конденсаторы разделяются на бумажные, металлобумажные, электролитические, слюдяные, пленочные, керамические и с воздушным диэлектриком. Конденсаторы изготавливаются с номинальными значениями емкости от 1 пф до 5000 мкф.

В табл. 11.6 приведены данные наиболее употребительных типов конденсаторов постоянной емкости.

При выборе конденсатора для конкретной схемы следует обратить внимание на такую важную характеристику, как его потери, которые характеризуются отношением мощности потерь к полной реактивной мощности, запасаемой в конденсаторе. Это отношение обозначается величиной так называемого тангенса угла потерь ($\operatorname{tg} \delta$). Потери в конденсаторе определяются главным образом свойствами диэлектрика. Например, у конденсатора с воздушным диэлектриком $\operatorname{tg} \delta = 0,0001 \div 0,0003$, у конденсатора со слюдяным диэлектриком $\operatorname{tg} \delta \approx 0,001$, у конденсатора с бумажным диэлектриком $\operatorname{tg} \delta = 0,01 \div 0,02$.

При включении конденсатора C_1 параллельно колебательному контуру, имеющему собственную емкость C_k , в последний вносится дополнительное затухание

$$d_{\text{вн}} = \frac{C_1}{C_k + C_1} \operatorname{tg} \delta. \quad (11.7)$$

Поэтому к контурам с высокой добротностью могут подключаться те конденсаторы, которые имеют малые значения $\operatorname{tg} \delta$.

Для перестройки колебательных контуров радиоприемных устройств применяются конденсаторы переменной емкости (рис. 11.5). Промышленностью выпускается несколько типов переменных конденсаторов, главным образом для радиовещательных приемников. Для специальной аппаратуры переменные конденсаторы, как правило, конструируются отдельно, а запасные — входят в комплект ЗИП.

Для подгонки емкостей в высокочастотных колебательных контурах применяются так называемые подстроечные (или полупеременные) конденсаторы марки КПК, состоящие из двух керамических частей: неподвижного статора и подвижного диска-ротора. На ротор и статор нанесены серебряные обкладки, имеющие вид секторов, а диэлектриком служит керамический материал ротора. Выводы от обкладок соединены с контактными лепестками.

Конденсаторы КПК выпускаются в нескольких модификациях; они рассчитаны на номинальное напряжение 500 в, с различными пределами изменения емкости, например, 2—7; 8—30; 25—150; 75—200, 350—450 пф.

Таблица 11.6

Конденсаторы постоянной емкости

Тип конденсатора	Пределы значений емкости		Номинальные напряжения постоянного тока, в	Диапазон рабочих температур, °С		Основные области применения
	от	до		от	до	
КБГ (бумажные герметизированные)	470 пф	1 мкф	до 1500	-60	+70	Для работы в цепях постоянного и переменного токов (до 0,5 МГц) при напряжении не ниже 10 в
БМ (бумажные малогабаритные)	470 пф	0,05 мкф	до 300	-60	+70	Для работы в цепях постоянного и переменного токов (до 0,5 МГц) для малогабаритной аппаратуры
МБГ (металлобумажные герметизированные)	0,1	30 мкф	до 1000	-60	+100	Для работы в цепях постоянного и переменного токов (до 1000 Гц) и в качестве емкостей фильтра
МБМ (металлобумажные малогабаритные)	0,0051	1 мкф	до 1500	-60	+70	Там же, где и МБГ, но для малогабаритной аппаратуры
КСО (слюдяные опрессованные)	47 пф	0,06 мкф	до 500	-60	+70	Для работы в цепях постоянного и переменного токов, в качестве переходных емкостей в любых усилителях
КТК (трубчатые керамические)	2	1000 пф	до 500	-60	+80	Для работы в цепях высокой частоты (до сотен мегагерц)
КЭ (электrolитические)	0,5	5000 мкф	до 450	-60	+60	Для работы в цепях постоянного или пульсирующего тока, в качестве емкостей фильтра
ЭМ (электролитические малогабаритные)	0,5	25 мкф	до 60	-60	+60	Для работы в транзисторных схемах

Катушки индуктивности, в отличие от резисторов и конденсаторов, не выпускаются промышленностью в массовом количестве, так как размеры катушек, их форма, способ намотки, толщина и изоляция провода, материал каркаса и т. д. весьма сильно различаются и зависят от назначения катушки в каждой конкретной схеме.

Для катушек, работающих в контурах высокой частоты, промышленностью выпускаются сердечники, изготовленные из карбонильного железа, типов: СЦР (сердечники цилиндрические с резьбой), СЦГ (цилиндрические гладкие), СЦШ (цилиндрические со шпилькой).

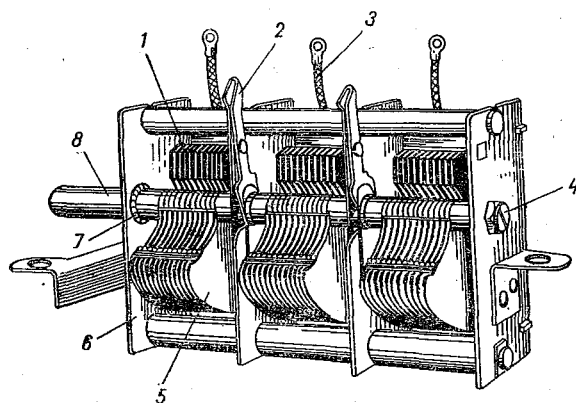


Рис. 11.5. Трехсекционный блок конденсаторов переменной емкости.

1 — ротор; 2 — статор; 3 — ось; 4 — токосъемник; 5, 6 — подшипники; 7 — корпус; 8 — вывод.

Перемещение сердечника внутри каркаса осуществляется либо при помощи резьбы на сердечнике, которая входит в нарезку на внутренней стороне каркаса, либо при помощи нарезной шпильки, запрессованной в сердечник. Поворот сердечника осуществляется отверткой из немагнитного материала.

В последнее время используются броневые сердечники типа СБ, представляющие собой магнитопровод, выполненный из карбонильной массы, внутри которого укладывается катушка. Настройка катушки осуществляется перемещением подстроечного сердечника.

Монтажные провода. Для монтажа радиоаппаратуры применяются провода из электротехнической меди, состоящие из одной или нескольких жил. Изоляцией в монтажных проводах служит резина, стекловолно, полихлорвинил, хлопчатобумажная пряжа, шелк и другие материалы. Толщина монтажных проводов выбирается в зависимости от силы и частоты проходящего по ним тока, а изоляция — от напряжения, под которыми провода

находятся, и условий работы радиоаппаратуры. От электрических помех монтажные провода защищаются экранирующей оплеткой.

Рассмотрим подробнее разновидности монтажного провода. Оголенный провод предназначен для соединения двух расположенных на небольшом расстоянии друг от друга точек схемы. Это круглый медный провод, мягкий, отожженный, марки ММ диаметром от 0,31 до 1,62 мм. Чтобы снизить потери иногда провод лудят или серебруют, а во избежание ненужных контактов на провод надевают изолирующую (кембриковую) трубку.

Наиболее часто при монтаже радиоаппаратуры применяют многожильные изолированные провода марки РПО. Этот провод имеет 10, 12 или 14 жил сечением 0,35—2,5 мм² в резиновой изоляции и оплетку из хлопчатобумажной пряжи, пропитанную противогнилостным составом. Иногда применяют провод марки РПОЭ (провод РПО с экранирующей оплеткой из медных луженых проволок).

Для монтажа с большим количеством изгибов применяют так называемые особо гибкие провода марок МГШД и МГШДО, имеющие волокнистую изоляцию.

При монтаже радиоэлектронной аппаратуры, предназначенной для работы в условиях резких колебаний климата (когда требуется повышенная электрическая прочность), применяют лакированные провода марки ЛПЛ с изоляцией из шелковой лакоткани.

Для монтажа схем слаботочной радиоаппаратуры используют провода марки МГВСЛ или МГВСЛЭ (с наружной экранирующей оплеткой). Эти провода эластичны, стойки к воздействиям тепла, холода и влаги.

Очень распространены провода МГШВ и МГШВЛ — монтажные провода с медными гибкими жилами с шелковой изоляцией в полихлорвиниловой оболочке (провод МГШВЛ имеет защитную лакировочную оплетку). Условия безотказной работы МГШВ: температура от —50 до +70°С, влажность до 98%; условия работы МГШВЛ: температура от —60 до +80°С, влажность до 100%.

Выбор сечения монтажных проводов производится в зависимости от величины проходящего по ним тока (в соответствии с данными табл. 11.7).

Заменяя в дефектном монтаже провод, следует по возможности подобрать точно такой же.

Проведение монтажных работ. При проведении монтажных работ следует пользоваться монтажными схемами. Если же таких схем нет, то нужно как можно более точно повторить расположение деталей и проводов, которое было в исправном изделии. При этом следует помнить, что «красивый монтаж», при котором проводники идут параллельно друг другу, увеличивает

Таблица 11.7

Сечение провода, мм ²	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4
Наибольший допустимый ток, а	0,7	1,0	1,3	2,5	3,5	4,0
Сечение провода, мм ²	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
Наибольший допустимый ток, а	5,0	7,0	10,0	14,0	17,0	20,0

паразитные связи между отдельным цепями, поэтому нужно стремиться к тому, чтобы длина соединительных проводов была наименьшей. Это особо важно при монтаже высокочастотных схем.

Одним из важнейших приемов монтажа, обеспечивающих надежный электрический контакт соединяемых элементов, является пайка. Пайка при ремонте производится электрическим паяльником с применением припоя и флюса.

В качестве припоя используется сплав олова и свинца в определенной пропорции. Обычно применяется припой марки ПОС-40, содержащий 40% олова и 60% свинца.

В качестве флюса обычно применяется канифоль, которая предотвращает окисление спаиваемых поверхностей при нагревании.

Жало паяльника перед проведением пайки должно быть хорошо очищено напильником и облужено. Температура паяльника не должна быть очень высокой, иначе олово выгорает и припой теряет свои качества.

Лужение контактов и проводников производится паяльником после их очистки. Для лужения на паяльник нужно взять немного припоя и, поместив деталь на поверхность канифоли, несколько раз провести по ней жалом паяльника. Следует отметить, что перед началом монтажа все контакты должны быть облужены, иначе может произойти так называемая холодная пайка (когда вместо пайки происходит склеивание контактов, в результате чего электрической связи между ними не будет или она будет неустойчивой).

Хорошие результаты дает применение жидких флюсов, например, канифоли, растворенной в спирте. Такой флюс наносится тонким слоем на поверхности, подлежащие пайке или лужению, при помощи палочки или кисточки. Пайка с применением кислоты при монтаже радиоаппаратуры не применяется, так как кислота приводит к повреждению изоляции.

Часто для лужения концов провода или выводов радиодеталей их окунают в жидкий припой, помещенный в подогреваемые ванночки.

Очень важной операцией является подготовка концов многожильных проводов к лужению. Дело в том, что снимая изоляцию ножом или ножницами, можно повредить проводящие жилы. Поэтому пользуются так называемыми обжигалками, представляющими из себя укрепленную на изолирующей ручке петлю из нихромовой, манганиновой или константановой проволоки. Для снятия изоляции проводник подводят под петлю и подают на петлю напряжение. Провод раскаляется и прожигает в изоляции кольцо, после чего изоляция легко снимается.

Лакированную изоляцию обычно снимают наждачной шкуркой, но в этом случае можно либо прорвать одну или несколько жил, либо оставить жилу неочищенной. Хорошим способом очистки жил многожильного провода является обжигание его в пламени спиртовки с последующей промывкой в спирте. Еще лучшие результаты получаются, если подлежащий очистке от лака конец провода опустить в нагретый до $100\text{--}150^\circ\text{C}$ 100%-ный раствор уксусной эссенции. За 5—10 сек лаковое покрытие растворяется полностью, провод впоследствии хорошо лудится, жилы не выгорают. После окончания пайки нужно тщательно проверить качество соединений с помощью пинцета.

В заключение приведем некоторые общие правила проведения монтажных работ.

1. Монтаж начинают с прокладки проводников, питающих накал ламп. Подогреватели большинства ламп соединяются свитыми друг с другом проводниками. Такое переплетение препятствует наводкам переменного тока.

2. Все проводники должны быть по возможности короткими. Следует вообще стараться избегать лишних проводников, используя при монтаже собственные выводы радиодеталей (лестки ламповых панелей, выводы конденсаторов, резисторов и т. п.).

3. Нельзя использовать шасси вместо проводника, даже при соединении общих точек схемы, так как это вызывает появление в шасси распределенных токов, приводящих к паразитным связям.

4. Во избежание перегрева и порчи резисторы припаиваются за выводы на расстоянии не менее 1—1,5 см от корпуса. Пайка конденсаторов должна производиться с такими же предосторожностями, чтобы не нарушить герметичности конденсатора.

5. Монтаж детали должен быть выполнен так, чтобы при выходе из строя ее можно было легко заменить без нарушения всей остальной схемы.

6. Детали, входящие в сеточную и анодную цепи лампы, должны быть разнесены возможно дальше друг от друга во из-

бежание паразитной емкостной связи. Это особенно важно на высоких частотах.

7. Постоянные сопротивления, используемые при ремонте, должны быть подобраны в соответствии с принципиальной схемой по величине, допуску и мощности рассеивания. Без особой необходимости не следует впаивать резисторы большей мощности, чем требуется, так как при этом увеличиваются габариты монтажа и возрастают паразитные связи.

8. Конденсаторы, предназначенные для замены дефектных, должны быть подобраны по типу, величине, допуску и величине рабочего напряжения. При определении рабочего напряжения следует учитывать как постоянную, так и переменную составляющие; сумма их не должна превышать номинальное значение рабочего напряжения, указанного на конденсаторе.

§ 11.4. РЕГУЛИРОВКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Под регулировкой понимают комплекс работ по доведению параметров аппаратуры до величин, соответствующих техническим требованиям.

Необходимость регулировочных работ после ремонта вызвана тем, что даже при тщательно выполненном монтаже и правильно подобранных деталях неизбежны отклонения от тех условий, при которых схема работала до отказа. Кроме того, возможны ошибки при монтаже, незамеченные замыкания и другие дефекты монтажа, которые могут быть выявлены только при регулировке.

Регулировочные работы включают в себя ряд процессов, к числу которых относятся: 1) настройка, т. е. приведение резонансных систем к заданным параметрам (обеспечение заданной частоты или диапазона частот с одновременным получением нужного усиления); 2) наладка, т. е. подгонка заданных режимов в отдельных каскадах, блоках и во всей установке в целом путем подбора в цепях сопротивлений, емкостей или индуктивностей.

Следует подчеркнуть, что регулировка, производимая в процессе ремонта, отличается от регулировки при эксплуатации. В первом случае нужных показателей добиваются всеми возможными способами, которые допускает данная аппаратура, во втором — только с помощью органов регулировки, вынесенных на панель управления.

Если производят средний или капитальный ремонт нескольких блоков и узлов сложной аппаратуры, то регулировку осуществляют в два этапа: сначала регулируют отдельные блоки и узлы, а затем проводят регулировку всей аппаратуры, что сокращает общее время регулировочных работ. В соответствии с этим различают три рода регулировки:

1) узловую регулировку, которая характерна для функционально самостоятельных каскадов (усилителей высокой частоты,

усилителей промежуточной частоты, систем автоматической подстройки частоты, видеоусилителей и т. п.).

2) блочная регулировка — регулировка входящих в систему отдельных функциональных блоков (блоков питания, передающих и приемных блоков, индикаторных блоков и т. п.).¹

3) комплексная регулировка — регулировка в целом радиоэлектронной системы, в состав которой входит ряд блоков взаимосвязанных посредством кабелей.

Все регулировочно-настроечные операции основаны на проведении различных электротехнических и радиотехнических измерений. В общем случае для осуществления регулировки бывает вполне достаточно радиоизмерительной аппаратуры, описанной в главе 10. Мы уже отмечали, что при всем многообразии радиоэлектронной аппаратуры она строится на базе ряда основных устройств. В соответствии с этим можно рекомендовать и ряд общих правил выполнения регулировочно-настроечных работ, которые можно уточнить в зависимости от схемы и конструкции устройства.

Регулировка выпрямительных устройств. После ремонта блок выпрямителя должен быть проверен и в случае необходимости отрегулирован с целью обеспечения требуемых величин: 1) выпрямленного напряжения; 2) напряжения и коэффициента пульсации; 3) нагрузочной (вольт-амперной) характеристики; 4) стабильности выходного напряжения.

Величину выпрямленного напряжения можно измерить непосредственно электронным вольтметром или с помощью осциллографа. По возможности следует пользоваться именно осциллографом, так как с его помощью можно не только измерить величину напряжения, но и видеть на экране ЭЛТ его форму.

Напряжение и коэффициент пульсации, а также нагрузочную характеристику выпрямителя определяют с помощью схемы, показанной на рис. 11.6а. В качестве нагрузки R_n используется реостат. С помощью автотрансформатора (ЛАТР-1 или ЛАТР-2) устанавливают по вольтметру V_1 номинальное значение напряжения сети переменного тока U_1 (110, 127 или 220 в). Выпрямленное напряжение U_2 измеряют вольтметром V_2 , предварительно установив такое значение сопротивления нагрузки R_n , при котором выпрямленный ток, измеряемый миллиамперметром mA_2 , станет равным заданной величине I_0 , указанной в инструкции по эксплуатации или в техническом описании.

Напряжение пульсации U_n измеряют приборами переменного тока 4 с большим внутренним сопротивлением, какими являются электронные вольтметры или осциллографы. Коэффициент пульсации K_n определяют по формуле

$$K_n = \frac{U_n}{U_2} 100\%. \quad (11.8)$$

¹ Регулировку первых двух родов часто называют автономной.

Нагрузочная характеристика выпрямителя — это зависимость выпрямленного напряжения на сопротивлении нагрузки от величины потребляемого тока. При снятии нагрузочной характеристики сопротивление R_H изменяют в пределах, необходимых для получения заданного изменения потребляемого тока. Полученные значения выпрямленного напряжения наносят на график $U_2 = f(I)$; получающаяся при этом зависимость (рис. 11.6 б) и является нагрузочной характеристикой.

Выпрямленное напряжение, напряжение и коэффициент пульсации и нагрузочная характеристика снимаются обычно

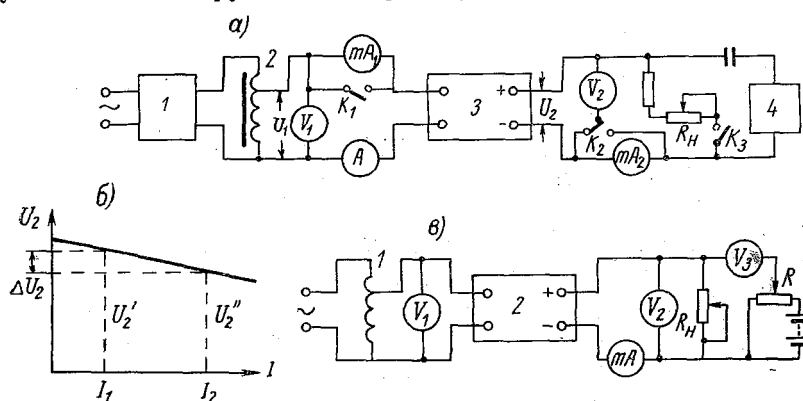


Рис. 11.6. К пояснению регулировки выпрямительных устройств.

а — схема для измерения напряжения, коэффициента пульсации и нагрузочной характеристики: 1 — стабилизатор напряжения, 2 — автотрансформатор, 3 — выпрямитель, 4 — прибор для измерения напряжения пульсации, K_1 , K_2 — ключи для замыкания миллиамперметров при измерениях, K_3 — ключ для отключения нагрузки; б — нагрузочная характеристика; в — схема для измерения стабильности: 1 — автотрансформатор, 2 — выпрямитель (стабилизированный).

у нестабилизированных выпрямителей. Для исследования стабилизированных выпрямителей пользуются схемой, показанной на рис. 11.6 в. Эта схема носит название схемы компенсации. После включения выпрямителя устанавливают стрелку вольтметра постоянного тока V_3 на нуль шкалы, изменяя сопротивление R . Затем, изменяя напряжение сети переменного тока с помощью автотрансформатора, определяют изменение выходного напряжения и вычисляют коэффициент стабилизации K_c по формуле

$$K_c = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}}}, \quad (11.9)$$

где U_1 — напряжение питающей сети; $U_{ст}$ — напряжение на нагрузке; $\Delta U_{ст}$ — изменение напряжения на нагрузке, вызванное изменением напряжения питающей сети ΔU_1 .

Если напряжение питающей сети изменится, например, на 30%, а выходное напряжение только на 0,15%, то коэффициент стабилизации такого выпрямителя $K_c = 30 : 0,15 = 200$.

Регулировка электронных стабилизаторов сводится к установке рабочей точки лампы обратной связи с помощью переменного резистора R .

Перечислим наиболее часто встречающиеся неисправности выпрямительных схем.

Причинами несоответствия величины выпрямленного напряжения номинальному значению могут являться неисправность вентиля (лампового или полупроводникового выпрямительного элемента), неисправность силового трансформатора, неисправность дросселя или конденсатора фильтра и др.

Повышенную пульсацию могут вызвать недостаточная емкость конденсатора фильтра, наличие замкнутых накоротко витков дросселя, асимметрия плеч вторичной обмотки трансформатора в двухполупериодном выпрямителе. Стабилизация может быть нарушена в результате плохой работы стабилизирующего элемента (лампового или полупроводникового стабилизатора).

Регулировка радиопередающих устройств. Наиболее распространенный метод регулировки радиопередающих устройств заключается в том, что сначала каждый каскад регулируется автономно, а окончательную регулировку выполняют в полностью собранном передатчике. Рассмотрим подробнее регулировку каждого каскада.

Регулировка задающего генератора заключается в его настройке на заданную частоту или диапазон частот и обеспечении необходимой стабильности и устойчивости колебаний.

Приемы регулировки зависят от схемы задающего генератора.

В схемах с трансформаторной (индуктивной) обратной связью заданная частота или диапазон частот достигается настройкой колебательного контура, а устойчивость генерации — изменением связи между катушками. Схемы с автотрансформаторной связью регулируются путем изменения связи и подбором оптимальной нагрузки (перемещением щупа по катушке).

Двухконтурные схемы регулируются установкой параметров контуров. Регулировка схем с емкостной связью осуществляется путем подбора связи в результате изменения емкости конденсатора. Схемы с кварцевой стабилизацией регулируются путем установки рабочей точки.

Если генератор рассчитан на работу в нескольких диапазонах длин волн, то регулировку следует начинать с коротковолнового диапазона.

Приведем последовательность операций, характерных для регулировки любого генератора.

Сначала генератор подключают к источникам питания, а к его выходу подсоединяют эквивалент нагрузки. Через 1—2 мин после включения накала ламп и напряжения смещения включают анодное напряжение. Затем проверяют режим ламп (замеряется электронным вольтметром) и правильность генерации (по величине анодного тока, измеряемого включенным в анодную цепь амперметром; скачкообразное увеличение анодного тока свидетельствует о срыве колебаний).

После этого настраивают контуры с помощью элементов регулировки, измеряя частоту волномером, слабо связанным с контуром. Для подбора нужной обратной связи следует выключить анодное напряжение, скачкообразно изменить число витков катушки или емкость конденсатора связи, после чего снова включить анодное напряжение и произвести настройку.

В кварцевых генераторах рабочая точка устанавливается по минимальному значению анодного тока, что свидетельствует о наступлении резонанса в контуре.

Следует отметить, что точного резонанса в контуре генератора обычно не добиваются, так как режим при этом оказывается неустойчивым. Наиболее устойчивым режим получается на пологой части резонансной кривой, так чтобы рабочая частота генератора была ниже собственной частоты контура.

Основной задачей регулировки буферных каскадов, умножителей и усилителей является получение на выходе напряжения достаточной величины. Для регулировки буферный каскад подключают к задающему или эталонному генератору и нагружают предварительно отрегулированными последующими каскадами. Между регулируемым каскадом и нагрузкой включают электронный вольтметр.

Подав на схему напряжение накала, смещения и анодное напряжение, приступают к проверке режимов лампы, а затем с помощью регулировочных элементов колебательных контуров производят так называемую укладку диапазона частот, согласовывая его с диапазоном частот задающего генератора.

При правильном подборе и установке параметров элементов контура напряжение на нагрузке не должно существенно изменяться, а должно оставаться в пределах указанной в технической документации величины на всем диапазоне частот.

В умножителях регулировка сводится к настройке на вторую или третью гармонику частоты, подаваемой на вход, а в усилителях — к настройке контура на основную частоту. Отметим, что в процессе регулировки умножителей и усилителей анодное напряжение вначале устанавливают на 40—50% ниже номинального, что необходимо для предотвращения выхода из строя лампы, так как анодный контур при сильной расстройке представляет собой малое сопротивление для переменной составляющей и большая часть мощности источника питания будет

рассеиваться на аноде. Установив по волномеру или осциллографу необходимое значение частоты, можно отрегулировать и режимы питания. Требуемый угол отсечки анодного тока устанавливают путем изменения напряжения смещения.

В результате регулировки выходного каскада и цепей модуляции необходимо получить нужное перекрытие по диапазону и мощность в антенне, подобрать оптимальную связь с антенной, установить глубину модуляции.

Порядок регулировки рассмотрим на примере одной из практических схем выходного каскада с включенными для регулировки измерительными приборами (рис. 11.7).

К управляющей сетке тетроды L подводятся одновременно напряжение возбуждения U_c с постоянной амплитудой, напряжение смещения E_c и модулирующее напряжение U_m , снимаемое со вторичной обмотки трансформатора Tr_1 . При этом лампа работает с отсечкой анодного тока.

Миллиамперметром mA_1 измеряют постоянную составляющую анодного тока, миллиамперметром mA_2 — сеточный ток, вольтметром V_1 — напряжение на аноде, вольтметром V_2 — напряжение смещения, ампер-

метром A (тепловой или термоэлектрической системы) — ток в антенне.

Настройку в резонанс контролируют по показаниям одного из миллиамперметров: в цепи сетки или анода.

Рассмотренный каскад включают в блок-схему, показанную на рис. 11.8, после чего можно производить регулировку. В качестве нагрузки вместо реальной антенны можно применить ее эквивалент (в длинноволновом и средневолновом диапазонах эквивалент состоит из последовательно соединенных емкости и сопротивления, в коротковолновом — из активного сопротивления).

Регулировку выходного каскада начинают при пониженном анодном напряжении и малом напряжении возбуждения. Вначале устанавливают минимальную связь с антенным контуром. От возбуждателя подают сигналы на частотах, соответствующих границам диапазона рабочих частот, и производят настройку

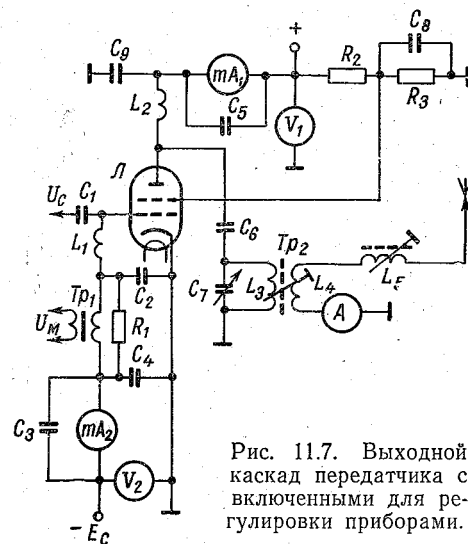


Рис. 11.7. Выходной каскад передатчика с включенными для регулировки приборами.

промежуточного контура L_3C_7 (см. рис. 11.7). За резонансом следят по минимальному показанию миллиамперметра mA_1 или по максимальному показанию миллиамперметра mA_2 . Если не удастся перекрыть заданный диапазон частот, то отключают анодное напряжение и скачком изменяют индуктивность промежуточного контура, после чего настройку повторяют вновь.

После настройки промежуточного контура устанавливают номинальное анодное напряжение и при слабой связи настраивают антенный контур в резонанс по максимальному показанию амперметра A . Затем, увеличивая связь с антенной, при постоянном значении амплитуды напряжения возбуждения устанавливают оптимальную связь по максимальному показанию амперметра в антенной цепи. При этом изменение связи неизбежно вызовет расстройку промежуточного контура, который нужно подстроить.

У правильно отрегулированного выходного каскада величина тока должна составлять 10—15% анодного тока для усилителя на триодах и 4—8% для усилителей на тетрадах и пентодах.

Максимальная мощность в антенне обычно достигается в критическом или недонапряженном режиме.

Установив максимальную мощность в эквиваленте антенны, переходят к регулировке цепей модуляции. Включив звуковой генератор, устанавливают величины частоты модуляции и выходного напряжения, приведенные в технической документации. По осциллографу определяют глубину модуляции, которая должна соответствовать указанной в документации. Точного соответствия можно добиться, изменяя напряжение смещения.

Комплексная регулировка передатчика. Произведя регулировку всех каскадов, входящих в схему передающего устройства, следует электрически соединить их и приступить к комплексной регулировке. Она неизбежна, так как взаимное влияние каскадов нарушит в некоторой степени режимы работы уже отрегулированных каскадов.

При комплексной регулировке необходимо последовательно проверить правильность соединения каскадов, надежность блокировки и сигнализации (которая имеется в схемах передатчиков средней и большой мощности), напряжение питания, диапазоны частот, режимы ламп, глубину модуляции, отсутствие самовозбуждения.

Комплексную регулировку начинают с задающего генератора, на который подают высокое напряжение; о наличии гене-

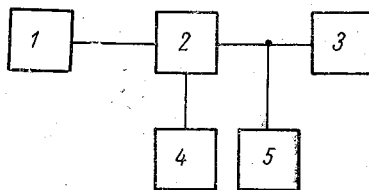


Рис. 11.8. Блок-схема регулировки выходного каскада.

1 — возбудитель (генератор высокой частоты); 2 — регулируемый каскад; 3 — эквивалент антенны; 4 — звуковой генератор; 5 — осциллограф.

рации судят по свечению лампочки накаливания (2,5 или 6,3 в), включенной в виток медной проволоки, располагаемой вблизи контура. Применяя волномер, убеждаются в перекрытии диапазона частот. Затем включают анодное напряжение следующего каскада (буфер, умножитель, усилитель) и аналогично определяют перекрытие диапазона. Настройка в резонанс производится по минимальному показанию амперметра в анодной цепи.

Выходной каскад настраивается в резонанс сначала при очень слабой связи с антенной по минимуму анодного тока. Далее по максимальному току в антенне подбирают связь с промежуточным контуром, и настраивают антенный контур в резонанс.

После того как установлены требуемые режимы ламп, можно определить мощность передатчика P_A по току в антенне I_A и сопротивлению эквивалента антенны R_A по известной формуле $P_A = I_A^2 R_A$.

Получить необходимую мощность передатчика по всему диапазону можно подбором напряжения смещения в выходном каскаде.

Отсутствие самовозбуждения проверяют по показаниям амперметров в анодной цепи выходного каскада и в антенном контуре в момент настройки в резонанс. При этом минимум тока в анодной цепи и максимум тока в антенном контуре должны наступить одновременно.

Работу передатчика при включенной антенне обычно проверяют с помощью контрольного приемника, устанавливаемого на расстоянии не менее 10 м.

Регулировка радиоприемных устройств. Задачами регулировки отремонтированного радиоприемного устройства является настройка всех контуров на необходимую частоту или диапазон частот, сопряжение контуров, а также обеспечение параметров, указанных в технической документации.

Регулировку приемников обычно начинают с последних каскадов. Это вызвано тем, что индикатор удобнее включать на выходе последнего каскада, а отрегулированные последующие каскады не влияют на регулировку предыдущих.

Рассмотрим типовую последовательность регулировки наиболее распространенных супергетеродинных радиоприемников.

Регулировка усилителей низкой частоты (УНЧ) имеет целью добиться: 1) отсутствия самовозбуждения; 2) нужного усиления; 3) заданной частотной характеристики; 4) заданной величины коэффициента нелинейных искажений.

Самовозбуждение может быть вызвано ошибками при монтаже, плохим экранированием, паразитной связью через источники питания, неверным включением или обрывом цепи обратной связи, дефектами ламп или транзисторов.

Если в УНЧ применена отрицательная обратная связь, то при возникновении самовозбуждения ее следует отключить. Если при этом самовозбуждение не прекратилось, то это указывает на наличие паразитной связи, а прекращение самовозбуждения является признаком неправильного включения обратной связи. Паразитную связь можно устранить, изменив взаимное расположение проводов сеточных цепей входных ламп, а если это не даст желаемого результата, нужно экранировать эти провода. При трансформаторной связи между каскадами и в двухтактных схемах УНЧ самовозбуждение часто можно устранить переключением концов одной из обмоток междуплампового трансформатора.

Паразитная связь через источник питания устраняется путем включения в анодную цепь каскадов предварительного усиления и цепи смещения развязывающих RC-фильтров. Усиление УНЧ обычно характеризуется чувствительностью, под которой понимают минимальную величину входного напряжения, при котором на выходе достигается номинальная мощность на заданной частоте (обычно эта частота принимается равной 400 или 1000 гц). Чувствительность измеряют по блок-схеме, приведенной на рис. 11.9. В качестве источника колебаний используют звуковые генераторы ГЗ-2, ГЗ-3, ГЗ-18 и им подобные. Реальную нагрузку УНЧ (громкоговоритель, телефоны и т. п.) можно заменить эквивалентом, имеющем характеристику реальной нагрузки. В качестве индикаторов применяют электронные вольтметры В7-29, ВК7-3 и им подобные или телефоны для слухового контроля, если применен эквивалент нагрузки.

Проверка чувствительности заключается в том, что после включения питания и прогрева ламп в течение 3—5 мин на вход УНЧ через экранированный провод от звукового генератора подается сигнал с частотой 400 или 1000 гц и напряжением, соответствующим указанной в технической документации минимальной чувствительности. Регулятор усиления (громкости) устанавливают в положение наибольшего усиления. При этом напряжение на выходе должно соответствовать номинальной мощности или превышать ее. Это соответствие проверяется по соотношению

$$U_{\text{вых}} \geq \sqrt{P_n R_n}, \quad (11.10)$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение; P_n — номинальная мощность; R_n — сопротивление нагрузки.

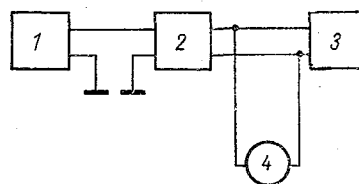


Рис. 11.9. Блок-схема проверки УНЧ.

1 — звуковой генератор; 2 — регулируемый УНЧ; 3 — нагрузка; 4 — индикатор.

Снижение выходного напряжения свидетельствует об уменьшении коэффициента усиления, причинами которого являются дефекты ламп или транзисторов, переходных конденсаторов, контактов в ламповых панелях и монтаже, трансформатора. Эти дефекты нужно устранить, после чего следует снова проверить чувствительность УНЧ.

По блок-схеме, указанной на рис. 11.9, можно провести проверку и частотные характеристики. Изменяя частоту звукового генератора в пределах диапазона частот УНЧ (от низшей до высшей), определяют на каждой частоте коэффициент усиления (отношение выходного напряжения к входному) и строят кривую зависимости $M=f(F_i)$, где M — коэффициент искажений, определяемый как отношение коэффициента усиления на данной частоте (K) к коэффициенту на частоте 400 или 1000 гц (K_0), т. е. $M = \frac{K}{K_0}$; F_i — текущее значение частоты.

Рекомендуется все измерения производить при постоянном напряжении на входе УНЧ (U_0), тогда коэффициент частотных искажений определяется из соотношения $M = \frac{U_{\text{вых}}}{U_0}$. Обычно проверка чувствительности и частотной характеристики производится одновременно, а величины коэффициента усиления и коэффициента частотных искажений выражаются в децибелах

$$K = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}; \quad M = 20 \lg \frac{K}{K_0}. \quad (11.11)$$

Нелинейные искажения, которые показывают, насколько форма исследуемых колебаний отличается от синусоиды, характеризуются коэффициентом нелинейных искажений K_f , определяемым по формуле

$$K_f = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}, \quad (11.12)$$

где $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ — напряжения 1, 2, 3, ..., n -й гармоник. Измерения K_f можно производить, если в качестве индикатора в блок-схеме рис. 11.9 использовать специальный измеритель нелинейных искажений, например, типа С6-1. Превышение измеренного коэффициента нелинейных искажений над указанным в технической документации свидетельствует о неточной настройке контуров или неверном режиме лампы.

Регулировка детектора и схемы автоматической регулировки усиления (АРУ) производится для того, чтобы добиться: 1) необходимого значения коэффициента передачи; 2) высокого входного сопротивления; 3) минимальных искажений.

В приемниках амплитудно-модулированных колебаний эти регулировки особых пояснений не требуют.

Diagram 6) shows a bridge circuit. The bridge consists of four arms: the top arm contains a variable resistor (2), the right arm contains a coil (3), the left arm contains a capacitor (4), and the bottom arm contains a variable resistor (5). The bridge is powered by an AC source (6) with terminals labeled 'om ym' and 'K ym'. The output voltage U is measured across the coil (3). To the right of the circuit, a graph shows the dependence of the output voltage U on the frequency f . The graph is a sinusoidal wave passing through the origin, labeled with $f_0 n$ on the horizontal axis.

1 — выход генератора ЧМ колебаний; 2 — измеритель частотной характеристики; 3 — экран ЭЛТ; 4 — вход осциллографа; 5 — частотный детектор; 6 — ограничитель.

Регулировка усилителей промежуточной частоты (УПЧ) обеспечивает настройку всех контуров на заданную частоту, получение необходимых коэффициента усиления и полосы пропускания. Сначала следует отрегулировать контуры фильтров

промежуточной частоты, что можно осуществить, собрав блок-схему рис. 11.11. Немодулированное напряжение генератора поступает на вход фильтра через катодный повторитель, который служит для ослабления связи генератора с фильтром. Детектор выпрямляет напряжение, поступающее с выхода фильтра и измеряемое электронным вольтметром постоянного тока. Частоту генератора устанавливают несколько ниже промежуточной, так как нужно учесть влияние дополнительной емкости, вносимой в контуры при подключении их к прибору. При настройке контуров сердечники катушек вращают с помощью отвертки или торцового ключа, сделанных из изоляционного материала. Если контур настроен в резонанс с частотой генератора, то измерительный прибор показывает максимальное значение. Такая

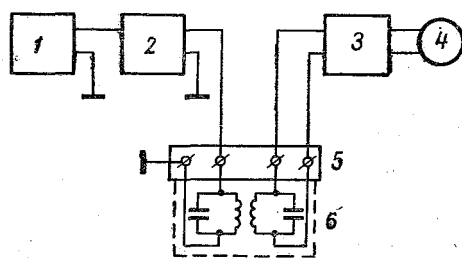


Рис. 11.11. Блок-схема регулировки контуров фильтров промежуточной частоты.
1 — генератор; 2 — катодный повторитель; 3 — детектор; 4 — электронный вольтметр постоянного тока; 5 — колодка с клеммами; 6 — контуры.

предварительная настройка контуров значительно сокращает время настройки УПЧ.

Настройка УПЧ приемников АМ колебаний выполняется после регулировки УНЧ и детектора, так как это позволяет включить прибор контроля регулировки на выходе приемника. Распространены два метода регулировки УПЧ: по стрелочному индикатору вольтметра, включенного на выходе приемника, и экрану осциллографа.

Блок-схема настройки УПЧ по вольтметру показана на рис. 11.12. В качестве генератора промежуточной частоты можно использовать Г4-1А или ему подобный, а в качестве нагрузки — громкоговоритель.

Амплитудно-модулированный сигнал от генератора через конденсатор C емкостью 200 нф подают на вход смесителя (преобразователя) и поочередно настраивают контуры УПЧ от последнего к первому по максимальным показаниям вольтметра (в качестве которого может быть использован, например, электронный вольтметр с большим входным сопротивлением типа В7-2А). При этом цепь АРУ следует отключить, чтобы она не влияла на настройку.

Настройку с помощью осциллографа производят, используя упоминавшиеся выше измерители частотных характеристик. Выход генератора частотно-модулированных колебаний подсоединяют к входу смесителя, а вход осциллографа — к нагрузке амплитудного детектора. На экране электроннолучевой трубки

получается изображение частотной характеристики УПЧ, на котором видны метки частоты. Настройкой контуров добиваются нужной формы характеристики и настройки УПЧ на заданную среднюю частоту.

Настройку контуров промежуточной частоты приемника ЧМ сигналов можно произвести, добиваясь максимальных показаний вольтметра, включенного параллельно входу ограничителя.

Регулировка каскадов высокой частоты заключается в настройке входных контуров, контуров УВЧ и гетеродина. Цель регулировки — настроить указанные контуры на требуемую частоту, для того чтобы получить заданную чувствительность, избирательность по зеркальному каналу и на частоте, равной промежуточной, перекрытие диапазона принимаемых частот и согласование их со шкалой приемника.

Перед регулировкой необходимо убедиться в наличии генерации гетеродина (например, по щелчку в громкоговорителе при замыкании металлической отверткой пластин переменного конденсатора гетеродинного контура).

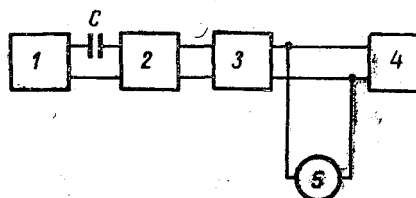


Рис. 11.12. Блок-схема настройки УПЧ по вольтметру.

1 — генератор промежуточной частоты; 2 — УПЧ; 3 — УНЧ; 4 — нагрузка; 5 — вольтметр переменного тока.

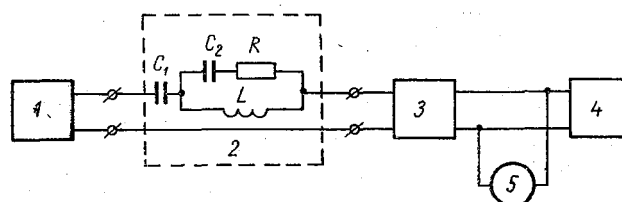


Рис. 11.13. Блок-схема регулировки высокочастотных контуров.

1 — генератор высокой частоты, 2 — эквивалент антенны ($C_1 = 200$ пф, $C_2 = 400$ пф, $R = 400$ ом, $L = 20$ мкГн), 3 — приемник, 4 — нагрузка, 5 — вольтметр.

Все высокочастотные контуры регулируют обычно одновременно, включив приемник в блок-схему, приведенную на рис. 11.13. В качестве генератора высокой частоты для АМ-приемника используется генератор Г4-1А или ему подобные. Генератор подключают к входу приемника (к гнездам «антенна» и «земля») через эквивалент антенны, представляющий контур RLC.

Обычно настройку входных контуров и контуров УВЧ производят по трем точкам, соответствующим частотам гетеродина.

Одну точку выбирают в середине диапазона частот, а две другие — примерно на границах диапазона. Эти точки, называемые точками (частотами) сопряжения, обычно отмечены на шкале приемника.

На генераторе и приемнике устанавливают частоту, соответствующую низшей частоте сопряжения данного диапазона. Вращением сердечника катушки контура гетеродина добиваются максимального напряжения на выходе. Величину напряжения на выходе генератора нужно поддерживать такой, чтобы на выходе приемника было примерно нормальное напряжение. Затем, не изменяя частоты приемника и генератора, вращением сердечников катушек контуров сначала УВЧ, а потом входных добиваются максимального напряжения на выходе, постепенно уменьшая величину напряжения генератора. Таким образом осуществляется сопряжение на данной частоте.

После этого генератор и приемник перестраивают на высшую частоту сопряжения и посредством подстроечных конденсаторов контуров сначала гетеродина, а затем УВЧ и входных контуров добиваются максимального показания вольтметра на выходе приемника. Точность сопряжения проверяется на средней частоте диапазона.

Для большей точности укладки диапазона и сопряжения частот операции настройки контуров на низшей и высшей точках сопряжения рекомендуется повторять до тех пор, пока не исчезнет увеличение выходного напряжения и не будет обеспечена требуемая чувствительность по всему диапазону.

В процессе регулировки контуров коротковолновых диапазонов нужно исключить настройку на частоту зеркального канала, что можно проверить по отсутствию сигнала на выходе приемника при подаче на вход сигнала с частотой, уменьшенной на величину, равную удвоенной промежуточной частоте.

Точность настройки контуров проверяется при помощи стержня из изоляционного материала, на одном конце которого закреплен сердечник из магнетодиэлектрика, а на другом — алюминиевая или латунная трубка. Если внести любой из концов стержня (называемого также пробной палочкой) в поле контурной катушки, то произойдет расстройка контура. Если контур был настроен точно, то эта расстройка вызовет заметное уменьшение показаний вольтметра, включенного на выходе приемника.

Правила техники безопасности. Наличие в радиоаппаратуре электрических напряжений делает ее безопасной только при условии точного соблюдения правил техники безопасности в условиях эксплуатации, особенно при выполнении контрольно-профилактических и ремонтных работ.

Правила техники безопасности для каждого конкретного прибора или устройства обычно излагаются в технической докумен-

тации, и они должны быть изучены так же тщательно, как схема и конструкция радиоаппаратуры.

Приведем наиболее важные сведения из техники безопасности, которыми следует руководствоваться при эксплуатации, ремонте и регулировке радиоаппаратуры.

При выполнении электромонтажных работ выделяются газы (пары свинца и его окислов при пайке, дым при обжигании проводов, пары бензина и спирта при промывке), длительное вдыхание которых приводит к головным болям, оседанию в дыхательных путях. В связи с этим указанные операции лучше всего проводить у открытого окна (летом) или у включенного вытяжного вентилятора (зимой). Если вентилятора нет, то необходимо не реже одного раза за 30—40 мин проветривать помещение.

При работе с паяльником следует остерегаться ожогов, которые могут быть вызваны прикосновением как к жалу паяльника, так и к расплавленному припою. При пайке мелких элементов схемы и голых проводов их следует поддерживать пинцетом или плоскогубцами (а не пальцами). Особо следует остерегаться разбрызгивания расплавленного припоя во время пайки (это может случиться, если паяльник сорвется с какого-либо вывода, который спружинит и может далеко отбросить мелкие частицы расплавленного припоя, что очень опасно для глаз).

Опасен для глаз и рук разрыв электроннолучевых трубок, так что при их смене нужно пользоваться защитными очками и перчатками.

Самым опасным является поражение электрическим током, которое может произойти при эксплуатации или ремонте аппаратуры (даже выключенной, если не были предварительно разряжены электролитические конденсаторы). Действие тока на человеческий организм зависит от силы тока, частоты, напряжения, продолжительности воздействия, пути прохождения тока через тело человека и индивидуальных особенностей организма человека.

Чем выше сила тока, тем серьезнее опасность поражения. Ток силой 0,1 а и более, как правило, для человека смертелен. Чем больше напряжение, тем меньше сопротивление кожи и больше опасность поражения. Часто используемые напряжения 380, 220 и даже 127 в могут вызвать очень опасное (вплоть до смертельного) поражение. Опасность поражения тем больше, чем ниже частота тока. Токи с частотой 50 кГц и выше смертельно опасны не представляют, но могут вызвать ожоги. Самыми опасными для человека являются токи с частотой порядка 50 гц, т. е. наиболее распространенной частотой питающей сети. Опасность поражения током повышается при увеличении времени воздействия тока на человека, так как сопротивление кожи понижается при длительном воздействии тока. Повышается опасность поражения, если руки работающего влажны. Очень опасно

прикосновение человека, находящегося в состоянии опьянения, к токоведущим частям аппаратуры.

Следует тщательно следить за исправностью шнура, штепсельных вилок и розеток питания.

Безопасными считаются напряжения до 40 в, однако даже при этих напряжениях следует избегать прикосновений к токоведущим элементам аппаратуры.

Характер воздействия электрического тока на человека при разных значениях силы тока приведен в табл. 11.8. Заметим, что данные табл. 11.8 ориентировочные, в зависимости от условий характер воздействия тока может быть несколько иным.

Таблица 11.8

Примерный характер воздействий электрического тока на человека

Ток, <i>ма</i>	Переменный ток с частотой 50—60 <i>гц</i>	Постоянный ток
0,6—1,5	Начало ощущения, легкое дрожание рук	Не ощущается
2—3	Сильное дрожание пальцев рук	Не ощущается
5—7	Судороги в руках	Зуд, ощущение нагрева
8—10	Руки трудно, но еще можно оторвать от электродов. Сильные боли в пальцах, кистях рук и руках	Усиление нагрева
20—25	Руки парализуются немедленно, оторвать их от электродов невозможно. Очень сильные боли. Затрудняется дыхание	Еще большее усиление нагрева, незначительное сокращение мышц рук
50—80	Паралич дыхания	Сильное ощущение нагрева. Сокращение мышц рук. Судороги, затруднительное дыхание
90—100	Паралич дыхания. При длительности 3 сек и более наступает паралич сердца	Паралич дыхания

При поражениях током следует оказать пострадавшему первую помощь и немедленно обратиться к врачу.

При выполнении ремонта или регулировки радиоэлектронной аппаратуры необходимо обязательно руководствоваться следующими основными правилами.

1. К работе можно допускать только лиц, хорошо изучивших ремонтируемое или регулируемое изделие, знающих технику безопасности и имеющих специальное удостоверение на право работы с электрическими и радиотехническими схемами.

2. Категорически запрещается производить монтаж и другие работы в схемах, находящихся под напряжением.

3. При регулировке выпрямительных, модуляторных и других устройств перед включением их в сеть необходимо обеспечить надежное заземление корпуса (шасси).

4. После выключения выпрямительных или других устройств необходимо полностью разрядить конденсаторы фильтра специальным разрядником.

5. Все работы со схемами, где имеется высокое напряжение, следует проводить в резиновых перчатках, а под ногами регулировщика и на верстаке должны быть резиновые коврики.

6. Рабочее место регулировщика, работающего с высоковольтными блоками, должно быть ограждено заземленной металлической сеткой и снабжено надписью, предупреждающей об опасности.

7. В случае поражения электрическим током следует немедленно обесточить сеть, освободить пострадавшего и производить искусственное дыхание до прихода врача.

Перечисленные правила являются наиболее общими, в каждом же конкретном случае они дополняются правилами, вытекающими из специфических особенностей радиоэлектронного устройства.

Вредно влияет на человеческий организм длительное и непрерывное облучение высокочастотными электромагнитными полями, которое может вызвать нарушение функций центральной нервной системы, сердечно-сосудистой системы, эндокринных желез и органов пищеварения. Наиболее интенсивно электромагнитные волны излучают антенны, открытые концы волноводных трактов и катоды мощных генераторных ламп. Не рекомендуется также находиться в непосредственной близости от генераторов СВЧ: магнетронов, клистронов и др.

Дозы облучения определяются так называемой плотностью потока мощности сверхвысокочастотных колебаний Π [мквт/см²], которую можно найти по формуле

$$\Pi = \frac{P_{\text{ср}} G}{4\pi R^2}, \quad (11.13)$$

где $P_{\text{ср}}$ — средняя излучаемая мощность в микроваттах; R — расстояние от антенны до места работы человека в сантиметрах; G — коэффициент усиления антенны.

Формула (11.13) справедлива при расчете плотности потока мощности по электрической оси антенны для дальней зоны,

т. е. для расстояний $R \geq \frac{L_1 L_2}{\lambda}$, где L_1 и L_2 — соответственно горизонтальный и вертикальный размеры антенны, λ — длина волны.

Для любого направления в дальней зоне в соответствии с диаграммой направленности плотность потока мощности снижается на величину, зависящую от азимута и угла места.

В ближней зоне величина P вычисляется по формуле

$$P = \frac{16P_{\text{ср}}}{\pi D^2}, \quad (11.14)$$

где D — диаметр раскрыва параболоида антенны.

Установленные санитарные нормы для облучения сверхвысокочастотными колебаниями приведены в табл. 11.9.

Таблица 11.9

Условия облучения	Наибольшее допустимое значение плотности потока мощности, мкВт/см^2
Облучение в течение всего 8-часового рабочего дня	10
Облучение в течение 2 час за рабочий день	100
Облучение в течение 12—15 мин	1000 (при условии обязательного пользования защитными очками)

Приведем основные правила техники безопасности при работе с аппаратурой, излучающей сверхвысокочастотные колебания, имея в виду, что при работе с этой аппаратурой также действуют все правила, приведенные на стр. 436—437.

1. Все генераторы СВЧ должны быть включены на поглощающие нагрузки (за исключением антенных измерений). Необходимо устанавливать минимально возможную мощность генератора, достаточную для работы аппаратуры.

2. Запрещается: смотреть в открытый конец волновода при любом уровне мощности; исправлять высокочастотный тракт тогда, когда в него поступает энергия СВЧ колебаний, нарушать экранирование блоков СВЧ.

3. Следует считать опасными зоны, в которых предполагается или обнаружено излучение, плотность потока мощности которого превосходит 1 мВт/см^2 .

4. Нельзя направлять излучатели (антенны) на людей и жилые помещения.

Основные выводы

1. Для обеспечения высокой надежности радиотехнической аппаратуры необходимо на всех этапах ее разработки, изготовления и эксплуатации соблюдать специальные правила. При эксплуатации эти правила сводятся к внимательному изучению эксплуатационной документации и самой аппаратуры, своевре-

менному проведению контрольно-профилактических и ремонтных работ.

2. Специфичность радиоэлектронной аппаратуры заключается в том, что на устранение неисправности затрачивается сравнительно немного времени, тогда как отыскание неисправности может длиться долго. Поэтому при выявлении причины неисправности нужно руководствоваться определенной методикой.

3. После проведения ремонта радиоэлектронной аппаратуры необходима ее регулировка, которая в общем случае разбивается на три части: узловую, блочную и комплексную. Все регулировочно-настроечные операции основаны на проведении различных электротехнических и радиотехнических измерений. Имеется ряд общих правил выполнения регулировочно-настроечных работ, которые при работе с конкретным радиотехническим устройством уточняются в зависимости от схемы и конструкции.

4. При эксплуатации и ремонте радиотехнической аппаратуры необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. Опасность возникает при работе с устройствами, находящимися под напряжением и при работе в поле излучения сверхвысоко-частотной энергии. Каждый работающий с радиоэлектронной аппаратурой должен твердо знать, неуклонно соблюдать правила техники безопасности и периодически сдавать экзамены по технике безопасности (иметь удостоверение на право работы с электротехническими и радиотехническими схемами).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Дайте определение внезапным и постепенным отказам.
2. На какие основные этапы (с точки зрения надежности) подразделяется время работы радиоаппаратуры?
3. В аппаратуре *А*, состоящей из 300 элементов, за 40 час работы отказало 8 элементов. В аппаратуре *Б* за то же время из 800 элементов отказало 17 элементов. Для какой аппаратуры характерна большая опасность отказов?
4. Аппаратура *А* в течение 100 час нормальной непрерывной эксплуатации имеет среднюю наработку на отказ 15 час. Аппаратура *Б* в течение 150 час имеет среднюю наработку на отказ 17 час. Для какой аппаратуры характерна большая вероятность безотказной работы?
5. Поясните принцип резервирования.
6. Перечислите основные виды эксплуатационной документации и изложите содержание каждого документа.
7. Приведите данные, характеризующие нормальные, сложные и тяжелые условия эксплуатации радиоаппаратуры.
8. Каково содержание контрольно-профилактических работ?
9. Перечислите виды ремонта. В чем их различие?
10. Какова последовательность ремонтных работ?
11. Поясните понятие восстанавливаемости радиоаппаратуры.
12. Перечислите основные способы испытаний радиоаппаратуры, позволяющие найти неисправность. Каковы особенности каждого из них?
13. Опишите характерные неисправности резисторов и конденсаторов. Каковы правила их подбора при ремонте радиоаппаратуры?

14. Каковы общие правила монтажа радиоаппаратуры?
15. Что включается в понятие «регулировка радиоаппаратуры»?
16. Изобразите блок-схемы и поясните последовательность регулировки выпрямительных устройств.
17. В какой последовательности регулируются радиопередающие устройства? Каковы задачи регулировки каждого каскада радиопередатчика?
18. Изобразите блок-схемы, с помощью которых производится регулировка радиоприемных устройств.
19. Перечислите основные правила техники безопасности при работе с радиоаппаратурой.
20. Рассчитайте плотность потока мощности по оси антенны, создаваемую параболической антенной 3-см радиолокатора, имеющей диаметр раскрытия 3 м, коэффициент усиления 100 при излучаемой средней мощности 200 Вт в дальней ($R=800$ м) и ближней зонах. Каковы допустимые условия работы в дальней зоне при воздействии полученного значения плотности потока мощности?

ГЛАВА 12

ЛАБОРАТОРИЯ ОСНОВ РАДИОТЕХНИКИ

§ 12.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРИИ ОСНОВ РАДИОТЕХНИКИ

Изучение радиотехники, как и любой другой науки, невозможно без практического закрепления теоретических знаний, получаемых учащимися во время лекций и уроков. Практические навыки по радиотехнике учащиеся могут получить только в лаборатории, непосредственно участвуя в постановке и выполнении эксперимента, связанного с тем или иным теоретическим материалом.

Цель данной главы — оказать помощь в организации лаборатории основ радиотехники, изготовлении макетов, составлении заданий, выборе оборудования, проведении лабораторного практикума. Учащимся материал данной главы должен помочь в подготовке к лабораторным работам, их проведении и подготовке отчета к утверждению преподавателем.

Для лучшего усвоения материала лабораторную работу рекомендуется по возможности проводить непосредственно после изучения соответствующего раздела теории.

Оборудование лаборатории. Каждое учебное заведение может оборудовать лабораторию основ радиотехники в зависимости от возможности приобретения радиотехнических элементов, приборов, инструмента. Здесь многое зависит от творческого подхода к вопросу привлечения учащихся к процессу изготовления, наладки и подготовки приборов к работе.

Дадим некоторые общие рекомендации по выбору оборудования для лаборатории основ радиотехники.

Наиболее удобным рабочим местом для выполнения лабораторной работы является лабораторный стенд, например, такой, как показан на рис. 12.1. На стенде размещаются все измерительные приборы, исследуемый лабораторный макет, инструмент и др. Стенд должен иметь блок питания с различными номиналами переменного и постоянного тока и софит для освещения рабочего места.

Лаборатория должна быть оборудована комплектом радиоизмерительных приборов, желательно новейших типов. Однако приобретение их техникумами не всегда возможно, поэтому вполне допускается использование исправных приборов прежних выпусков.

Необходимый минимум радиоизмерительных приборов должен включать:

1. Генератор стандартных сигналов Г4-18, Г4-1А (ГСС-6) или Г4-42А.

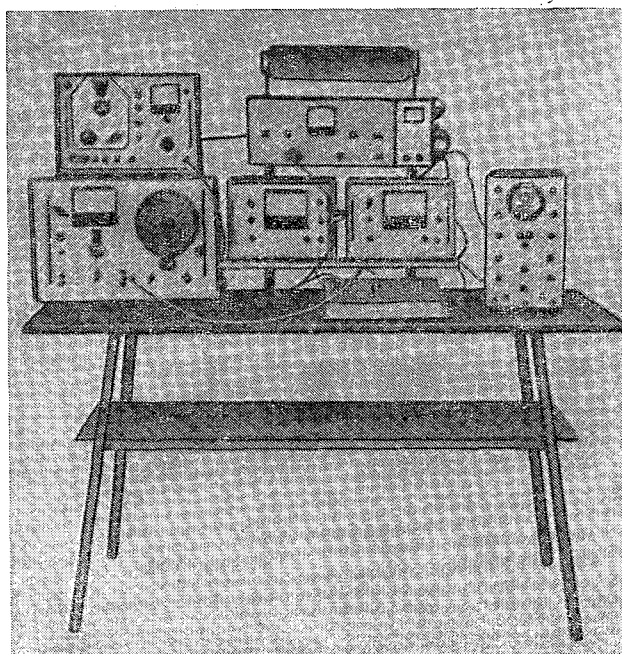


Рис. 12.1. Лабораторный стенд.

2. Генератор сигналов ГЗ-9 (ГС-6), ГЗ-16 или ГЗ-39.
3. Генератор звуковых частот ГЗ-33, ГЗ-36 или ГЗ-2(ЗГ-10).
4. Ламповый вольтметр ВКС-7, ВЗ-13, ВК7-9, ВЗ-7 или ВЗ-20.
5. Осциллограф С1-5 (СИ-1), С1-1(ЭО-7) или С1-20.

Отметим, что приведенный выше перечень примерный, возможно применение и других типов радиоизмерительных приборов, имеющих сходные с перечисленными приборами технические данные. Количество приборов должно выбираться из условия обеспечения каждого рабочего места во время проведения лабораторной работы полным комплектом необходимого оборуду-

Дования. Каждый пр
по эксплуатации,
подготовке к лаб.
Исследователю
или установке

Выбор должен иметь описание и инструкцию, которыми учащиеся могут пользоваться при лабораторной работе и ее выполнении. При выполнении лабораторных работ макеты могут быть изготовлены учащимися под руководством преподавателя. Такой макет и установку удобно изготовить из толстой фанеры, внутри которого может быть установлен автономный источник питания. Передняя панель делается из прозрачного органического стекла, на которой нанесено изображение исследуемой схемы. Коммутация элементов осуществляется с помощью проволочных перемычек в панели должны быть предусмотрены соответствующие гнезда.

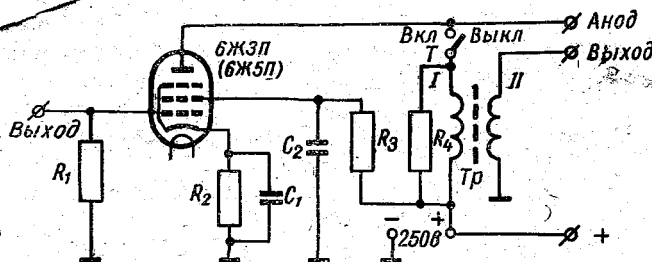


Рис. 12.2. Схема усилителя к ГСС.

Для выполнения ряда лабораторных работ рекомендуется использовать одноламповый усилитель высокой частоты для увеличения напряжения на выходе (до 5 в) или уменьшения выходного сопротивления генератора. В дальнейшем этот усилитель будем называть усилителем к ГСС (рис. 12.2). Он может работать в двух режимах:

а) как усилитель мощности, нагрузкой которого является понижающий трансформатор; усиление по напряжению незначительно, а выходное сопротивление мало; рабочий диапазон усилителя 100—250 кГц;

б) как усилитель напряжения, нагрузкой которого может быть резонансный контур или активное сопротивление; сопротивление нагрузки включается между клеммами «+» и «анод»; для работы в данном режиме тумблер T следует поставить в положение «Выкл.»

Рекомендуются следующие значения элементов схемы: лампы 6Ж3П или 6Ж5П, $R_1=R_4=10\text{ ком}$, $R_2=200\text{ ом}$, $R_3=50\text{ ком}$, $C_1=C_2=0,1\text{ мкф}$, трансформатор Tr собирается на сердечнике типа СБ-5, обмотка I имеет 600 витков, обмотка II — 30 витков провода ПЭЛШО-0,12.

Порядок выполнения лабораторных работ и составления отчета. Ниже приводятся примерные правила лабораторных работ, которые в конкретных условиях могут видоизменяться и уточняться.

1. Каждая группа заранее разбивается на бригады человека; учащиеся бригады обязаны знать свой график выполнения работ.
2. При подготовке к работе учащиеся должны:
 - а) заранее ознакомиться с описанием очередной лабораторной работы и описаниями аппаратуры, используемой при выполнении работы;
 - б) изучить теоретический материал, на котором основывается данная работа, и подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Перед началом работы проверяется готовность каждого учащегося к выполнению данной работы. За теоретические знания, показанные учащимся при опросе, ставится оценка. Если учащийся не подготовлен, то он готовится к работе в лаборатории.

4. Учащиеся, допущенные к работе, выполняют ее в соответствии с описанием.

5. Работа считается законченной после просмотра и утверждения отчета преподавателем.

6. Отчет по работе составляется каждым учащимся самостоятельно.

Отчет оформляется на обычных тетрадных листах клетчатой бумаги, которые сшиваются между собой. Графики выполняются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в отчет. На титульном листе отчета указывается наименование учебного заведения, шифр группы, фамилия и инициалы учащегося, порядковый номер и наименование лабораторной работы, дата составления и утверждения отчета.

Приводимое в § 12.2 описание каждой лабораторной работы построено по единому образцу, включающему следующие разделы:

1. Номер и наименование лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Материал для подготовки. В этом разделе указываются параграфы из данного учебника, которые необходимо повторить при подготовке к работе. Кроме этого, можно ознакомиться с требуемым материалом по книгам, например, перечисленным в указателе литературы на стр. 482 данного учебника, или другим пособиям, рекомендованным преподавателем.
4. Описание исследуемого макета или установки.
5. Оборудование и приборы.
6. Пояснение к работе. Здесь даются некоторые практические

ские указания, которыми следует руководствоваться при подготовке и проведении работы.

7. Задание. В отдельных работах задание разбивается на две части: расчетную и лабораторную.

8. Содержание отчета.

9. Контрольные вопросы, на которые учащийся должен ответить при сдаче (защите) работы.

При описании работы предполагается, что учащимися освоены методы работы с основными электроизмерительными и радиоизмерительными приборами (во время лабораторного практикума по общей электротехнике и основам электроники) и они умеют использовать осциллограф для измерения амплитуд, частот и сдвига фаз (по фигурам Лиссажу), коэффициента модуляции (см. § 10.8).

Особое внимание при проведении лабораторных работ следует обратить на выполнение правил техники безопасности, которые должны быть вывешены на видном месте, а их знание учащимися должно периодически проверяться преподавателем.

В заключение отметим, что перечень описываемых в § 12.2 лабораторных работ является примерным, в каждом учебном заведении он может быть уточнен (сокращен, видоизменен или дополнен).

§ 12.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа 1. Колебательные контуры

Цель работы — изучить процессы в последовательном, параллельном и связанных колебательных контурах, снять резонансные кривые и определить основные параметры контуров по резонансным кривым.

Материал для подготовки: §§ 2.1, 2.2, 2.3, 2.4.

Описание исследуемых макетов. В данной работе исследуются два макета: макет I (одиночный контур) и макет II (связанные контуры).

Макет I (его схема показана на рис. 12.3 а) позволяет получать последовательный и параллельный колебательные контуры и возбуждать в них колебания. Свободные колебания можно получить, подсоединив переключателем P_5 к схеме поляризованное реле P , обмотка которого подключается к сети переменного тока. Контакты a и c периодически замыкаются с частотой 50 гц. При замкнутых контактах конденсатор C_k заряжается через сопротивление R_k до напряжения источника E ; при разомкнутых контактах a и c конденсатор C_k разряжается через катушку L_k . В контуре $L_k C_k$ возникают свободные колебания.

Переключатели P_1 и P_2 служат для преобразования схемы последовательного контура в параллельный. Перемычка P_3 необ-

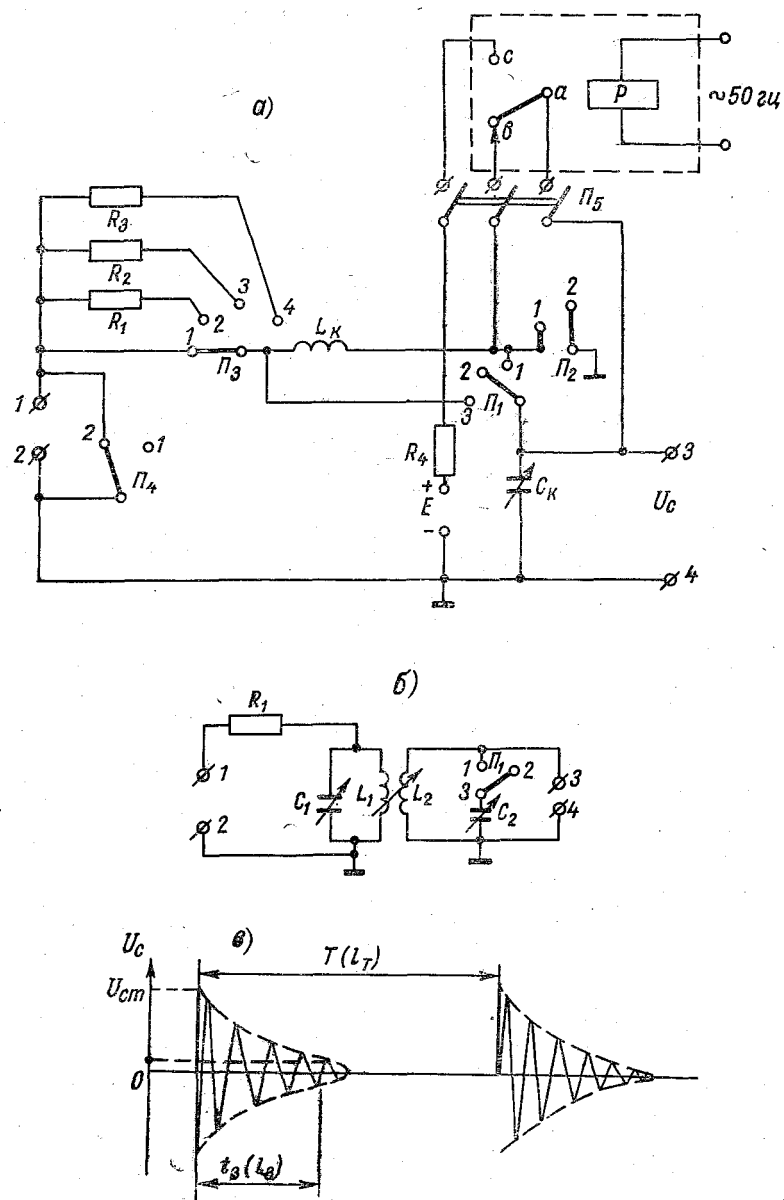


Рис. 12.3. К лабораторной работе 1.

а — схема макета I; б — схема макета II; в — осциллограмма свободных колебаний.

ходима для подключения к контуру одного из добавочных сопротивлений R_1 , R_2 или R_3 . Назначение переключки Π_4 — коммутировать схему для получения свободных колебаний.

Номиналы элементов макета такие: $R_1=100$ ом; $R_2=3$ ком, $R_3=R_4=50$ ком, конденсатор C_K — переменной емкости (25—500 пф). Индуктивность катушки L_K может быть подсчитана по приближенной формуле:

$$L_K = \frac{0,08 D^2 W^2}{3D + 9b + 10c}, \quad (12.1)$$

где $D = \frac{D_{\max} + D_{\min}}{2}$ — средний диаметр намотки в сантиметрах; b — длина намотки в сантиметрах; c — толщина намотки в сантиметрах; W — число витков (D , b , c и W должны быть подобраны так, чтобы величина L_K составляла примерно 160 мкГн).

Макет II (его схема показана на рис. 12.3 б) представляет собой два колебательных контура, индуктивную связь между которыми можно изменять, сближая или отдаляя друг от друга катушки L_1 и L_2 .

Номиналы элементов схемы такие: $R_1=50$ ком, C_1 и C_2 — переменные конденсаторы (25—500 пф), $L_1=L_2=160$ мкГн. Переключателем Π_1 можно отключать конденсатор C_2 .

Оборудование и приборы: Макеты I и II, два ламповых вольтметра, генератор Г4-1А с усилителем к ГСС, осциллограф, поляризованное реле.

Пояснение к работе и задание.

Расчетная часть. 1. Рассчитать по заданным преподавателем величинам $D_{\max}$, $D_{\min}$, W , b и c индуктивность катушки одиночного контура L_K .

2. Определить собственную частоту контура f_0 по заданной емкости C_K и рассчитанной индуктивности L_K .

Лабораторная часть. 1. Ознакомиться с исследуемыми макетами, проверить наличие приборов и оборудования и записать основные технические данные приборов.

2. Собрать схему для снятия резонансной кривой последовательного контура (положения переключателей следующие: $\Pi_1—1$, $\Pi_2—2$, $\Pi_3—1$, $\Pi_4—1$; реле P к схеме не подключено). К клеммам 1—2 подключить генератор Г4-1А через усилитель к ГСС. К клеммам 3—4 подключить ламповый вольтметр.

3. Включить приборы и снять зависимость напряжения на конденсаторе U_C от частоты f генератора. Для этого:

а) установить частоту колебаний напряжения Г4-1А, равной f_0 , и, изменяя C_K , настроить контур в резонанс по максимуму напряжения U_{cm} на вольтметре. Измерить и записать напряжение на входе контура $U_{вх}$ и в дальнейшем поддерживать его постоянным;

б) уменьшить частоту Г4-1А до значения, при котором $U_C \approx 0,3 U_{cm}$; затем постепенно увеличить частоту и записывать значения напряжения через каждые 2—3 деления верньера установки частоты генератора; закончить запись на частоте колебаний, при которой напряжение на конденсаторе вновь уменьшится до $U_C \approx 0,3 U_{cm}$; полученные данные занести в таблицу:

	$U_{вх} =$					$R =$				
Деления										
Частота										
U_C										

в) определить цену деления верньера вблизи резонансной частоты f_0 ;

г) переключателем Π_3 ввести в контур сопротивление R_1 и повторить пп. «а» и «б»;

д) переключателем Π_3 ввести в контур сопротивление R_2 и повторить пп. «а» и «б».

4. Построить на одном графике три резонансные кривые $U_C = \varphi(f)$ для пп. «б», «г» и «д» и определить полосы пропускания и рассчитать добротности контуров.

5. Собрать схему для снятия резонансной кривой параллельного контура (положения переключателей следующие: $\Pi_1 - 3$, $\Pi_2 - 1$, $\Pi_3 - 4$, $\Pi_4 - 1$; реле P к схеме не подключено). К клеммам 1—2 и 3—4 подключены те же приборы, что и в п. 2.

6. Снять зависимость $U_C = \varphi(f)$. Для этого выполнить работы, аналогичные п. 3 (а, б, в), и составить соответствующую таблицу.

7. Измерить напряжение U_3 на сопротивлении R_3 на резонансной частоте и на частотах, на которых $U_C = 0,3 U_{cm}$.

Рассчитать общий ток контура для трех значений Q по формуле

$$I_k = \frac{U_3}{R_3}.$$

8. Снять зависимость напряжения U_C от частоты при постоянном общем токе контура (источника). Для этого следует подключить ламповый вольтметр к сопротивлению R_3 и поддерживать напряжение на R_3 постоянным, изменяя выходное напряжение Г4-1А.

Данные занести в таблицу:

	$I_k =$					$U_3 =$				
Деления										
Частота										
U_k										

9. По данным пп. 6 и 8 построить резонансные кривые.

10. Собрать схему для исследования свободных колебаний в контуре (положения переключателей следующие: P_1-2 , P_2-2 , P_3-1 , P_4-2 , P_5 —замкнут). К клеммам 3—4 подключить осциллограф, на экране которого при включении реле P должна быть видна осциллограмма, подобная показанной на рис. 12.3 в.

11. Зарисовать осциллограммы при положениях переключателя P_3 1, 2, 3.

12. Определить время затухания колебаний t_3 , при котором амплитуда колебаний уменьшается до величины $0,1 U_m$. Время затухания определяется из условия, что период $T = \frac{1}{50}$ сек = 20 мсек. Замерив расстояния на экране, соответствующие t_3 и T (l_3 и l_T), t_3 определяют из пропорции $t_3 : l_3 = T : l_T$.

13. Подготовить схему для снятия резонансных кривых связанных контуров (макет II). К клеммам 1—2 подключить генератор Г4-1А, к клеммам 3—4 — осциллограф и ламповый вольтметр.

14. Провести измерения в следующем порядке:

а) настроить контур L_1C_1 на частоту колебаний Г4-1А $f_0 \approx 200$ кГц; для этого следует отключить конденсатор C_2 ; а о настройке контура можно судить по максимуму напряжения на катушке L_2 ;

б) настроить контур L_2C_2 на частоту $f_0 \approx 200$ кГц; для этого подключить конденсатор C_2 параллельно катушке L_2 , установить минимальную связь между катушками (разнести их как можно дальше) и изменением емкости конденсатора C_2 настроить контур L_2C_2 по максимуму напряжения на контуре. После этого следует подстроить контур L_1C_1 , так как вносимое вторым контуром сопротивление могло изменить настройку;

в) снять зависимость напряжения U_2 на контуре L_2C_2 от частоты генератора при слабой, критической и сильной связи.

При слабой связи настраивают оба контура в резонанс, а затем увеличивают связь до тех пор, пока напряжение перестанет возрастать. Такая связь называется критической. При дальнейшем увеличении связи напряжение будет уменьшаться. Это удобно наблюдать по экрану осциллографа.

Характеристики снимаются аналогично п. 3 (б). Данные записываются в таблицу, построенную по следующей форме:

$U_{вх} =$									
Деления									
Частота									
U_2									

15. По данным таблиц построить на одном графике три резонансные кривые и определить полосы пропускания частот.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Принципиальные схемы исследуемых цепей и блок-схемы измерительных установок. 4. Расчеты параметров контуров. 5. Таблицы по пп. 3, 6, 8, 14 задания. 6. Резонансные кривые контуров. 7. Параметры контуров, полученные при анализе резонансных кривых. 8. Осциллограммы напряжения на контуре при затухающих колебаниях. 9. Время затухания t_z , определенное по осциллограммам. 10. Краткий анализ полученных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова собственная частота колебательного контура с параметрами $L=160 \text{ мГн}$, $C=100 \text{ пФ}$?
2. Как построить резонансную кривую?
3. Как определить добротность по резонансной кривой?
4. Начертите схему для снятия резонансной кривой параллельного контура, если источником сигнала служит генератор с малым выходным сопротивлением.
5. Почему для измерения напряжения высокой частоты используется ламповый вольтметр?
6. Нарисуйте резонансные кривые последовательного контура при трех значениях добротности.
7. Нарисуйте резонансные кривые связанных контуров при слабой, сильной и критической связи между контурами.

Лабораторная работа 2. Длинная линия

Цель работы — экспериментальное изучение процессов в двухпроводной длинной линии.

Материал для подготовки: §§ 2.5, 10.6.

Описание исследуемого макета. Двухпроводная линия укреплена на лабораторном столе. К началу линии подводится энергия от высокочастотного генератора, например, ГЗ-9.

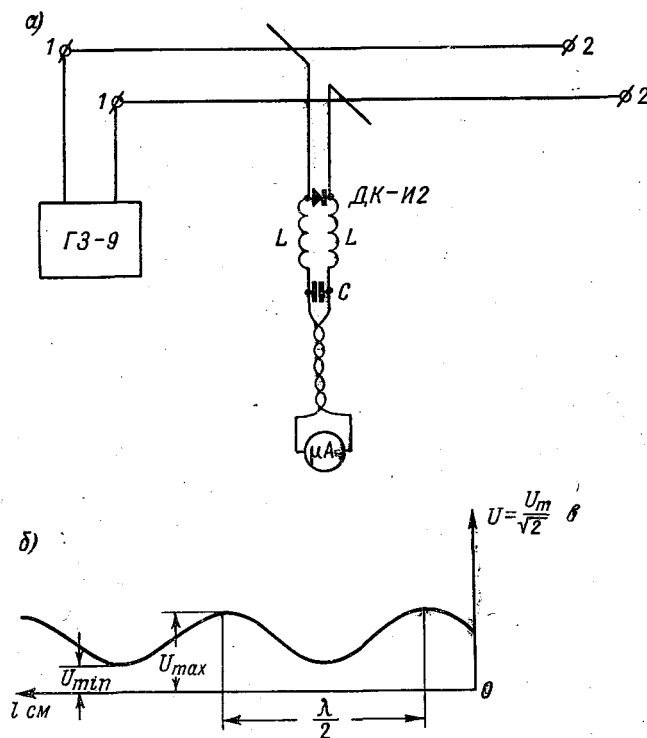


Рис. 12.4. К лабораторной работе 2.

а — схема установки; б — график для режима смешанных волн в длинной линии.

Рядом с линией укреплена сантиметровая шкала, по которой можно производить отсчет расстояний вдоль линии. По проводам линии передвигается диполь, напряжение с которого после детектирования диодом, например, типа ДК-И2 поступает через фильтр LC на индикатор (микроамперметр). Схема установки показана на рис. 12.4 а.

На конце линии имеются клеммы, к которым можно подключить различные сопротивления нагрузки.

Оборудование и приборы: исследуемый макет, генератор ГЗ-9, индикатор, набор сопротивлений и отрезков длиной линии.

Пояснения к работе. В работе требуется определить основные параметры, характеризующие колебательные процессы в длинных линиях. В процессе работы учащиеся должны рассчитать волновое сопротивление линии, коэффициенты КБВ и КСВ, длину распространяющейся в длинной линии волны.

Так как показания прибора индикатора не прямо пропорциональны напряжению высокой частоты, то график следует строить в относительном масштабе. В первом приближении зависимость показаний прибора α от амплитуды напряжения высокой частоты квадратичная, т. е.

$$U_{\max} = A \sqrt{\alpha_{\max}},$$

где $\alpha_{\max}$ — число делений шкалы прибора при максимальном отклонении стрелки гальванометра; A — коэффициент пропорциональности. С учетом этого КБВ и КСВ можно определить из соотношений:

$$\text{КБВ} = \sqrt{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}}, \quad \text{КСВ} = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}}.$$

При построении графиков распределения амплитуд напряжения в линии по оси абсцисс откладывается расстояние от конца линии. На рис. 12.4 б показан график для режима смешанных волн.

Задание.

Расчетная часть. По известному расстоянию между проводами линии D и диаметру провода линии d рассчитать волновое сопротивление линии $Z_{\text{л}}$, пользуясь формулой (2.31).

Лабораторная часть. 1. Ознакомиться с лабораторной установкой, проверить наличие приборов и оборудования и записать основные технические данные приборов.

2. Включить генератор высокой частоты в сеть и через 3—4 мин подключить его к входу линии (клеммы 1—1).

3. Передвигая индикатор вдоль линии, убедиться в наличии высокочастотных колебаний.

4. Определить длину волны, измерив по шкале расстояние l между двумя ближайшими точками, в которых показания прибора максимальны.

5. Перемещая индикатор вдоль линии, записать показания прибора в 12—15 точках для следующих значений сопротивлений нагрузки, подключаемых к клеммам 2—2: а) $R_{\text{н}} = \infty$; б) $R_{\text{н}} > Z_{\text{л}}$; в) $R_{\text{н}} < Z_{\text{л}}$; г) $R_{\text{н}} = 0$.

Данные записать в таблицу:

Номер точки	1	2	3	...
α при $R_H = \infty$				
α при $R_H > Z_L$				
α при $R_H < Z_L$				
α при $R_H = 0$				

6. Проследить за изменением показаний прибора индикатора при перемещении короткозамыкающего шлейфа от конца линии к индикатору.

7. Повторить п. 6, перемещая вдоль линии короткозамкнутый отрезок линии (шлейф) длиной $\lambda/4$.

8. По данным п. 5 построить графики распределения напряжения в линии.

9. Рассчитать КБВ и КСВ.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Краткое описание и эскиз лабораторной установки. 4. Схема индикатора. 5. Таблица измерений по п. 5 задания и кривые распределения амплитуд напряжения в линии. 6. Измеренные и рассчитанные значения λ , f , КБВ, КСВ. 7. Выводы по пп. 6 и 7 задания.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую линию считают длинной?
2. Где применяются длинные линии?
3. Как распределены токи и напряжения в разомкнутой и замкнутой накоротко линиях?
4. Чему равно входное сопротивление разомкнутой и замкнутой накоротко линий длиной $\lambda/4$?
5. Что такое узлы и пучности стоячей волны? Как изменяется во времени напряжение в пучности?
6. Чему равно входное сопротивление линии, нагруженной на сопротивление, равное Z_L ?
7. Какую линию называют согласованной?

Лабораторная работа 3. Снятие диаграммы направленности антенны

Цель работы — исследовать поле излучения полуволнового вибратора и влияние на диаграмму направленности рефлектора.

Материал для подготовки: §§ 3.2, 10.8.
 Описание лабораторной установки. Установка состоит из двух антенн: передающей и приемной (рис. 12.5 а).

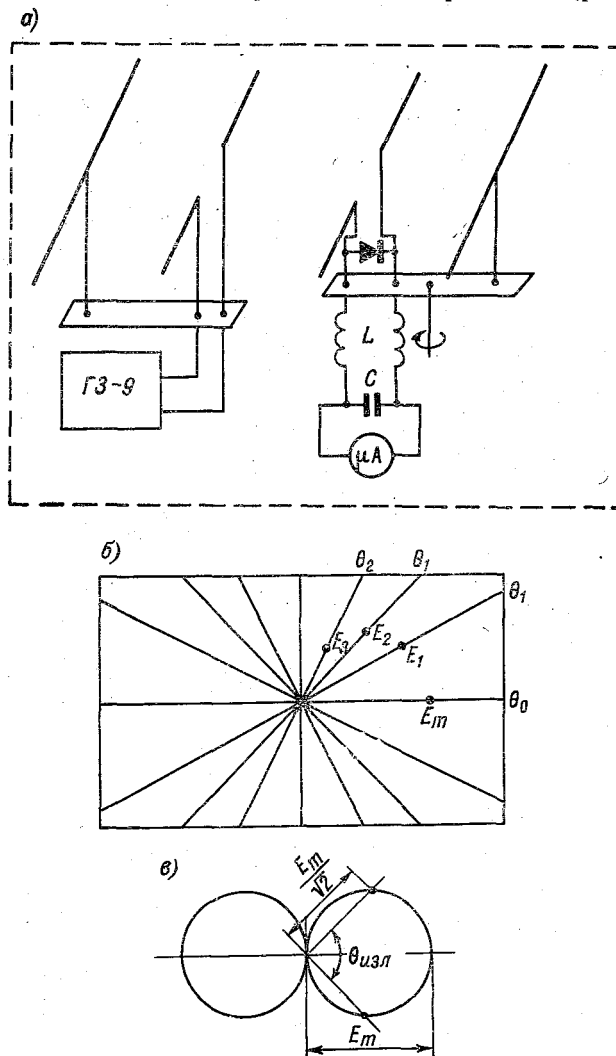


Рис. 12.5. К лабораторной работе 3.

а — схема установки; б — построение диаграммы направленности в полярных координатах; в — определение угла излучения.

Передающая антенна (полуволновый вибратор с рефлектором) закреплена неподвижно, а приемная антенна (полуволновый вибратор со съемным рефлектором) может поворачиваться во-

Во второй части работы используется генератор низкой частоты, хотя генераторы с внешним возбуждением работают обычно на высокой частоте. Это вызвано тем, что усилители осциллографа искажают форму импульсов, следующих с высокой частотой.

З а д а н и е.

1. Ознакомиться с исследуемыми макетами, проверить наличие приборов и оборудования и записать основные технические данные приборов.

2. Собрать схему генератора с простой схемой выхода и настроить генератор. Записать показания всех приборов.

3. Собрать схему генератора со сложной схемой выхода и настроить генератор. Записать показания всех приборов.

4. Собрать схему генератора на макете II. Установить на выходе звукового генератора $U_c=0$.

5. Установить анодное напряжение $E_a=250$ в, напряжение на экранирующей сетке $E_{c2}=150$ в. При малом напряжении возбуждения и частоте 10 кГц настроить анодный контур в резонанс.

6. Подключая поочередно осциллограф к измерительным точкам, зарисовать осциллограммы токов и анодного напряжения при трех значениях каждого из четырех напряжений U_c , E_{c1} , E_a и E_{c2} (при постоянстве трех остальных).

7. Повторить п. 6 при расстройке контура.

8. Зарисовать форму импульсов при умножении частоты. Для этого следует уменьшить частоту генератора сначала в два, а затем в три раза.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Схемы генераторов, используемые в данной работе. 4. Показания приборов, полученные при выполнении пп. 2 и 3.5. Осциллограммы токов и анодного напряжения согласно пп. 6, 7, 8.6. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие режимы работы ламп используются в генераторах?
2. От чего зависит угол отсечки?
3. Какой угол отсечки выбирают в генераторах?
4. Какой угол отсечки выбирают в удвоителях и утроителях частоты?

Лабораторная работа 5. Исследование генераторов с самовозбуждением

Цель работы — исследовать простейшие схемы автогенераторов.

Материал для подготовки: §§ 5.3, 11.4.

Описание исследуемого макета. Макет (рис. 12.7) представляет собой одноламповый автогенератор. С помощью

переключателей Π_3, Π_5, Π_6 автогенератор можно включать по одной из трех схем: а) с индуктивной обратной связью (Π_3 и Π_6 в положении 1, Π_5 в положении 2); б) индуктивная трехточка (Π_3 и Π_5 в положении 2, Π_6 в положении 2, 3, 4 в зависимости от величины необходимой обратной связи); в) емкостная трехточка (Π_3 в положении 2, Π_5 и Π_6 в положении 1). Переключатели Π_1, Π_2, Π_4 служат для переключения схемы питания с последовательной (Π_1 в положении 1, Π_2 и Π_4 в положении 2) на параллельную (Π_1 в положении 2, Π_2 и Π_4 в положении 1).

Значения элементов схемы такие: $R_c = 100 \text{ ком}$ (подбирается при настройке), $C_p = 1000 \text{ нф}$, $C_1 = 5 \text{ нф}$, $C_2 = 15 \text{ нф}$, $C_K = C_c =$

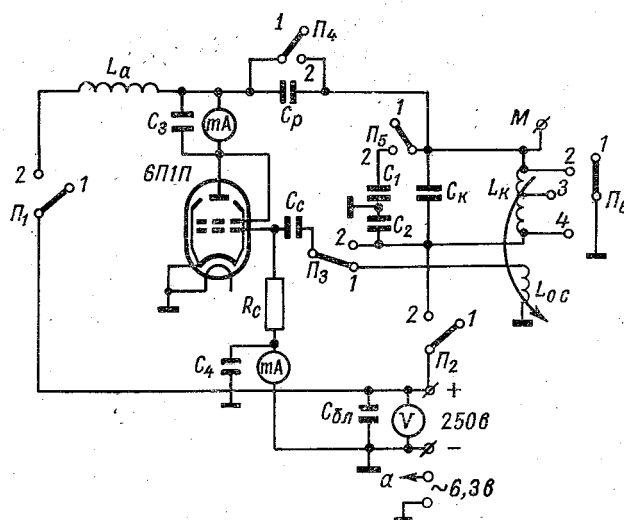


Рис. 12.7. К лабораторной работе 5.

Схема исследуемого макета.

$= 100 \text{ нф}$, $C_{бл} = C_3 = C_4 = 10\,000 \text{ нф}$, $L_a = 2 \text{ мкн}$, $L_K = 250 \text{ мкн}$, $L_{oc} = 30 \text{ мкн}$.

Оборудование и приборы: исследуемый макет, осциллограф, ламповый вольтметр, измеритель частоты.

Пояснение к работе. В данной работе необходимо проверить режим работы автогенераторов и измерить генерируемую ими частоту. С помощью переключателя Π_6 можно изменить число витков катушки обратной связи и убедиться в том, что при слабой связи, когда не выполняется баланс амплитуд, генерация отсутствует. Изменяя величину сопротивления в цепи сетки R_c , можно наблюдать изменение амплитуды колебаний. Ламповый вольтметр, осциллограф и частотомер подключаются к контуру автогенератора (точка М). Наличие генерации в схеме

можно обнаружить с помощью неоновой лампочки. Можно измерить частоту и без частотомера с помощью осциллографа. (§ 10.8).

Задание.

1. Ознакомиться с устройством макета, проверить наличие приборов и оборудования и записать технические данные приборов.

2. Составить схему автогенератора с индуктивной обратной связью и параллельным питанием.

3. Включить приборы, измерить и записать: напряжение на контуре U_a , напряжение обратной связи U_{oc} (на управляющей сетке лампы), токи анода I_a и сетки I_c , частоту генерации f .

4. Составить схему автогенератора с индуктивной обратной связью и последовательным питанием и повторить измерения, указанные в п. 3.

5. Составить схему индуктивной трехточки с параллельным питанием. Провести измерения согласно п. 3 для трех значений коэффициента обратной связи (три положения переключателя P_6).

6. Составить схему емкостной трехточки (схема питания любая). Провести измерения согласно п. 3.

7. Результаты измерений свести в таблицу:

Схема		E_a	U_a	U_{oc}	I_a	I_c	f
Индуктивная обратная связь (последовательное питание)							
Индуктивная обратная связь (параллельное питание)							
Индуктивная трехточка	$L_{oc\ 1}$						
	$L_{oc\ 2}$						
	$L_{oc\ 3}$						
Емкостная трехточка							

Содержание отчета: 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Схемы генераторов, собираемые в ходе работы. 4. Таблица измерений. 5. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение автогенератора?
2. Каковы условия самовозбуждения генератора?
3. От чего зависит частота колебаний автогенератора?
4. Что называют нестабильностью генератора и каковы способы повышения стабильности?

Лабораторная работа 6. Исследование схемы амплитудной модуляции

Цель работы — исследовать работу схемы сеточной модуляции.

Материал для подготовки: §§ 5.5, 10.8.

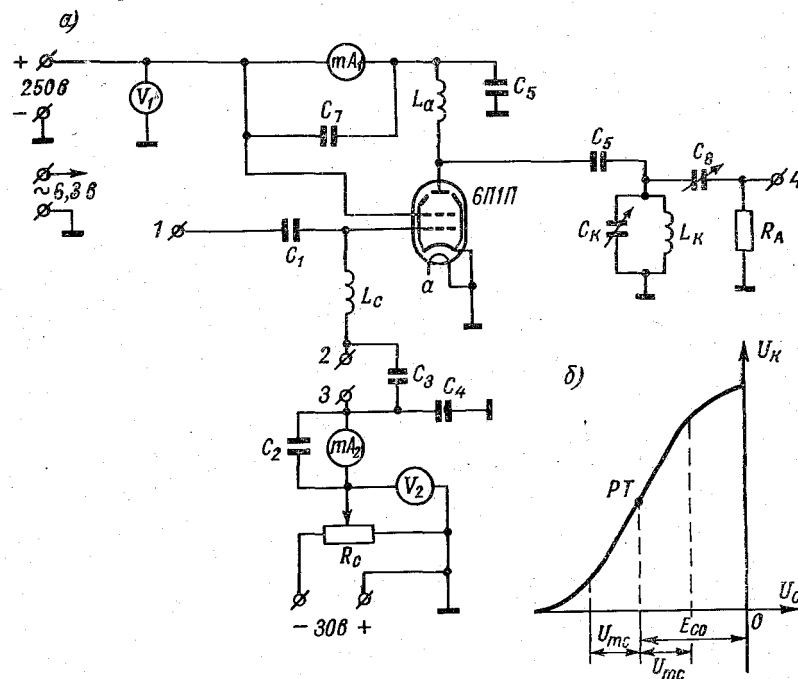


Рис. 12.8. К лабораторной работе 6.
а — схема макета; б — выбор рабочей точки.

Описание исследуемого макета. Макет (рис. 12.8 а) представляет собой схему генератора на лампе 6П1П с внешним возбуждением, на сетку которого подается напряжение смещения с потенциометра R_c , напряжение низкой (модулирующей) частоты (на клеммы 2, 3) и напряжение высокой частоты (на клемму 1). К выходу схемы (клемма 4) можно подключить осциллограф и ламповый вольтметр. Нагрузкой является контур $L_K C_K$ и эквивалент антенны $C_8 R_A$.

Значения элементов схемы такие: $R_A=300$ ом, $R_c=20$ ком, $C_1=100$ пф, $C_2=C_3=C_6=500$ пф, $C_5=20$ мкф, $C_7=10$ мкф, $L_a=L_c=20$ мГн, $L_k=250$ мкГн.

Оборудование и приборы: исследуемый макет, генераторы Г4-1А и ГЗ-2, осциллограф, ламповый вольтметр.

Пояснение к работе. Для выполнения работы к исследуемому макету подключаются оба генератора, осциллограф и ламповый вольтметр. При амплитудной модуляции амплитуда тока в контуре генератора меняется в соответствии с напряжением сигнала звуковой частоты. Модуляция возможна лишь в том случае, если усиление генератора максимально при наибольшем положительном напряжении, подаваемом от модулятора, и минимально при наибольшем отрицательном напряжении. Зависимость усиления каскада от напряжения на сетке (от смещения) называют модуляционной характеристикой. Можно снять такую зависимость, если при $U_c=\text{const}$, $E_a=\text{const}$ изменять смещение на сетке E_c и измерять напряжение сигнала на анодном контуре U_a . Рабочая точка PT выбирается в середине прямолинейного участка характеристики, а амплитуда напряжения низкой частоты, подаваемого на сетку, ограничивается рабочим (т. е. прямолинейным) участком. На рис. 12.8 б показано, как по модуляционной характеристике можно найти амплитуду модулирующего напряжения и напряжение смещения E_{co} .

Если амплитуда напряжения звуковой частоты будет больше U_{mc} , то огибающая высокочастотного сигнала будет недопустимо искажена.

Задание.

1. Ознакомиться с устройством макета, проверить наличие приборов и оборудования и записать технические данные приборов.

2. Составить схему сеточной модуляции, подключив к макету оба генератора, осциллограф и ламповый вольтметр.

3. Включить установку и установить напряжение на выходе звукового генератора $U_\Omega=0$ (по вольтметру генератора).

4. Снять зависимость напряжения высокой частоты на нагрузке U_k от напряжения смещения E_c при постоянном напряжении сигнала высокой частоты на сетке U_c . Данные измерений записать в таблицу:

	$E_a =$				$U_c =$				$f_H =$			
E_c в												
U_k в												

5. По данным таблицы построить модуляционную характеристику $U_k = f(E_c)$.

6. Определить рабочий участок и выбрать рабочую точку на модуляционной характеристике.

7. На сетку лампы подать смещение, соответствующее рабочей точке, а на выходе звукового генератора установить частоту $F = 1000$ гц, напряжение, соответствующее границе рабочего участка, и определить коэффициент модуляции по осциллограмме.

8. Зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузке при $U_a < U_{mc}$ и $U_a > U_{mc}$.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Рабочая схема (принципиальная). 4. Модуляционная характеристика и таблица, по которой она строилась. 5. Осциллограммы модулированного напряжения, расчет коэффициента модуляции. 6. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют модуляцией?
2. Что такое коэффициент модуляции?
3. Почему искажается сигнал, если $U_a > U_{mc}$?

Лабораторная работа 7. Исследование входной цепи и УВЧ приемника

Цель работы — исследовать входную цепь и резонансный усилитель высокой частоты с одиночным колебательным контуром.

Материал для подготовки §§ 6.2, 6.3, 11.4.

Описание исследуемого макета. Макет (рис. 12.9) представляет собой схему входной цепи (с эквивалентом антенны) и однокаскадного резонансного УВЧ. Входная цепь состоит из эквивалента антенны (C_1, L_1, R_1) и колебательного контура ($L_3 C_3$). С помощью переключателя P_1 можно осуществить емкостную (через конденсатор C_2) или индуктивную (через катушку L_2) связь антенного контура с входным контуром ($L_3 C_3$). Индуктивность катушки L_2 велика, поэтому собственная частота последовательного контура, состоящего из C_1, L_1, R_1 и L_2 , будет значительно меньше собственной частоты контура $L_3 C_3$. Переключателем P_2 можно подключить входную цепь к входу УВЧ, который собран на лампе 6К4П по схеме параллельного питания. Нагрузкой служит контур $L_5 C_{10}$. Переключатель P_3 позволяет включить между анодом и сеткой конденсатор C_5 , увеличивающий проходную емкость. Переключатель P_4 позволяет осуществить непосредственное включение контура в анодную цепь или использовать индуктивную связь контура с анодной цепью

лампы. С помощью переключателя Π_5 можно увеличить выходную емкость каскада (подключаются конденсаторы C_8 и C_{12}). Значения элементов схемы такие: $R_1=250 \text{ ом}$, $R_2=R_4=470 \text{ ком}$, $R_3=330 \text{ ом}$, $R_5=50 \text{ ком}$, $C_1=200 \text{ нф}$, $C_2=5 \div 10 \text{ нф}$, $C_4=C_6=C_7=C_9=C_{11}=0,025 \text{ мкф}$, $C_5=C_8=8 \div 30 \text{ нф}$, $C_{12}=100 \text{ нф}$, $L_1=20 \text{ мкгн}$, $L_2=7 \text{ мкгн}$, $L_3=L_4=L_5=1 \text{ мкгн}$, $L_6=45 \text{ мкгн}$.

Оборудование и приборы: исследуемый макет, генератор Г4-1А, ламповый вольтметр.

Пояснение к работе. Если на вход (клемма 1) подавать напряжение от генератора Г3-9 и измерять напряжение на конденсаторе контура (клемма 2), то можно определить диапазон частот входного контура. При максимальной емкости конденсатора C_3 вольтметр покажет наибольшее напряжение на частоте генератора, соответствующей наименьшей частоте диапа-

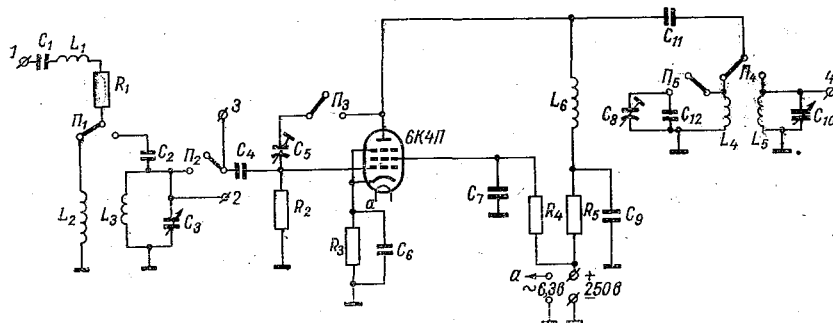


Рис. 12.9. К лабораторной работе 7.

Схема исследуемого макета.

зона контура; при минимальной емкости C_3 вольтметр покажет наибольшее напряжение на частоте генератора, соответствующей наибольшей частоте диапазона контура. Коэффициентом передачи данной входной цепи является отношение напряжения U_c на конденсаторе C_3 к напряжению на входе $U_{вх}$.

Если подать сигнал от генератора на сетку лампы УВЧ (клемма 3), а вольтметр подключить к клемме 4, то можно определить диапазон частот УВЧ и его коэффициент передачи, а также изменение коэффициента передачи по диапазону.

По указанным схемам можно снять резонансные кривые входной цепи и УВЧ и определить их полосы пропускания.

Если подать сигнал на клемму 1 при замкнутом переключателе Π_2 , а вольтметр подключить к клемме 4, то можно снять общую резонансную кривую входной цепи и усилителя, определить полосу пропускания и коэффициент передачи.

При включении конденсатора C_5 можно видеть, что наличие емкости между анодом и сеткой может привести к самовозбуждению усилителя. Переключатель Π_5 может зашунтировать

контур емкостью C_3 . Влияние этой емкости на коэффициент передачи схемы эквивалентно влиянию выходной емкости лампы и емкости монтажа. Методика снятия резонансных кривых изложена в лабораторной работе 1.

Задание.

1. Ознакомиться с устройством макета, проверить наличие приборов и оборудования и записать технические данные приборов.

2. Подсоединить к исследуемому макету генератор и ламповый вольтметр и включить их.

3. Определить диапазон частот входного контура при емкостной связи. Для этого установить максимальную емкость C_3 , а затем, изменяя частоту генератора, добиться резонанса и отсчитать частоту $f_{\min}$. После этого установить минимальную емкость C_3 и таким же образом определить $f_{\max}$.

4. Определить зависимость коэффициента передачи входной цепи по диапазону частот контура при индуктивной, емкостной и индуктивно-емкостной связи. Для этого следует изменять емкость C_3 и, изменяя частоту генератора, добиваться резонанса. Напряжение на входе должно оставаться постоянным. Для каждого вида связи нужно снять 8—10 точек.

Данные опыта занести в таблицу:

Вид связи		$U_{\text{вх}} = \text{const} =$							
Индуктивная	f кГц								
	U_c в								
	$K = \frac{U_c}{U_{\text{вх}}}$								
Емкостная	f кГц								
	U_c в								
	K								
Индуктивно-емкостная	f кГц								
	U_c в								
	K								

5. По данным таблицы на одном графике построить зависимость $K = \varphi(f)$.

6. Снять и построить резонансную кривую входной цепи при индуктивной связи на средней частоте диапазона $f_{\text{ср}}$. Определить полосу пропускания входной цепи. Все последующие резонансные кривые (согласно пп. 8 и 15) строить на этом же графике.

7. Собрать и включить схему для снятия резонансной кривой УВЧ. Генератор подключается к клемме 3, а вольтметр — к клемме 4.

8. Снять и построить резонансную кривую УВЧ и определить полосу пропускания на частоте $f_{\text{ср}}$.

9. Определить диапазон частот УВЧ (см. п. 3) при непосредственном включении контура в анодную цепь.

10. Произвести измерения, указанные в п. 3, для индуктивной связи контура L_5C_{10} с анодной цепью. Определить зависимость коэффициента передачи УВЧ по диапазону частот контура (см. п. 4).

Данные опыта занести в таблицу:

$U_c =$									
f кГц									
$U_{\text{вых}}$									
$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_c}$									

11. По данным таблицы построить зависимость $K = \varphi(f)$.

12. Собрать схему для снятия общей резонансной кривой, подключив генератор к клемме 1, а вольтметр — к клемме 4.

13. Снять зависимость коэффициента передачи по диапазону при индуктивной связи входной цепи с антенной.

Данные занести в таблицу:

$U_{\text{вх}} =$									
f кГц									
$U_{\text{вых}}$									
$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$									

14. По данным этой таблицы построить зависимость $K=f(f)$.
15. Снять и построить общую резонансную кривую. Определить полосу пропускания и коэффициент передачи на частоте $f_{\text{ср}}$.

16. Установить на генераторе частоту $f_{\text{ср}}$ и включить конденсатор C_5 . Выключить генератор и проверить, не возбудился ли усилитель. Выключить C_5 .

17. Включить конденсатор C_8 и проверить, как изменяется коэффициент передачи при проведении измерений п. 13.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Принципиальная схема исследуемого макета. 4. Таблицы, графики, резонансные кривые. 5. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое диапазон частот входной цепи и усилителя?
2. Каково назначение входной цепи приемника?
3. От чего зависит резонансная частота антенны?
4. Каково назначение усилителей высокой частоты радиоприемников?
5. Как определить резонансную частоту анодной цепи усилителя?

Лабораторная работа 8. Преобразователь частоты

Цель работы — изучить работу преобразователя частоты супергетеродинного приемника.

Материал для подготовки: §§ 5.3, 6.6, 11.4.

Описание макета. Макет (рис. 12.10) представляет собой схему преобразователя частоты, который состоит из смесителя, собранного на лампе 6А2П, и гетеродина на лампе 6Ж1П. Смеситель включен по схеме последовательного питания.

Гетеродин представляет собой автогенератор, собранный по трехточечной схеме с индуктивной обратной связью. Напряжение на витки обратной связи катушки L_2 подается с сопротивления R_9 через конденсатор C_{11} . С сопротивления R_6 снимается напряжение гетеродина $U_{\text{г}}$ на первую сетку смесительной лампы. Это напряжение может быть измерено с помощью лампового вольтметра. Переключатель Π позволяет переключать вольтметр с измерения $U_{\text{вых}}$ на измерение $U_{\text{г}}$. Входное напряжение определяется по показаниям генератора. Значения элементов схемы такие: $R_1=160 \text{ ком}$, $R_2=20 \text{ ком}$, $R_3=220 \text{ ом}$, $R_4=47 \text{ ком}$, $R_5=$
 $=R_8=10 \text{ ком}$, $R_6=22 \text{ ком}$, $R_7=50 \text{ ком}$, $R_9=1 \text{ ком}$, $C_1=C_6=$
 $=200 \text{ пф}$, $C_2=82 \text{ пф}$, $C_3=C_4=C_7=0,015 \text{ мкф}$, $C_5=C_8=560 \text{ пф}$, $C_{10}=180 \text{ пф}$, $C_{11}=0,03 \text{ мкф}$, $L_1=200 \text{ мкГн}$, $L_2=40 \text{ мкГн}$.

Оборудование и приборы: макет преобразователя, генератор Г4-1А, ламповый вольтметр.

Пояснение к работе. На управляющие сетки пентода 6А2П подается напряжение сигнала с частотой f_c и напря-

жение гетеродина с частотой f_r . Анодный контур смесителя настроен на промежуточную частоту $f_{\pi} = |f_r - f_c|$.

Отношение напряжения промежуточной частоты на контуре $C_5 L_1$ к напряжению сигнала на входе называется коэффициентом передачи преобразователя. Для данной схемы этот коэффициент зависит от напряжения гетеродина и смещения на сигнальной (третьей) сетке. В данной работе нужно определить частоту гетеродина и промежуточную частоту. Для этого на вход

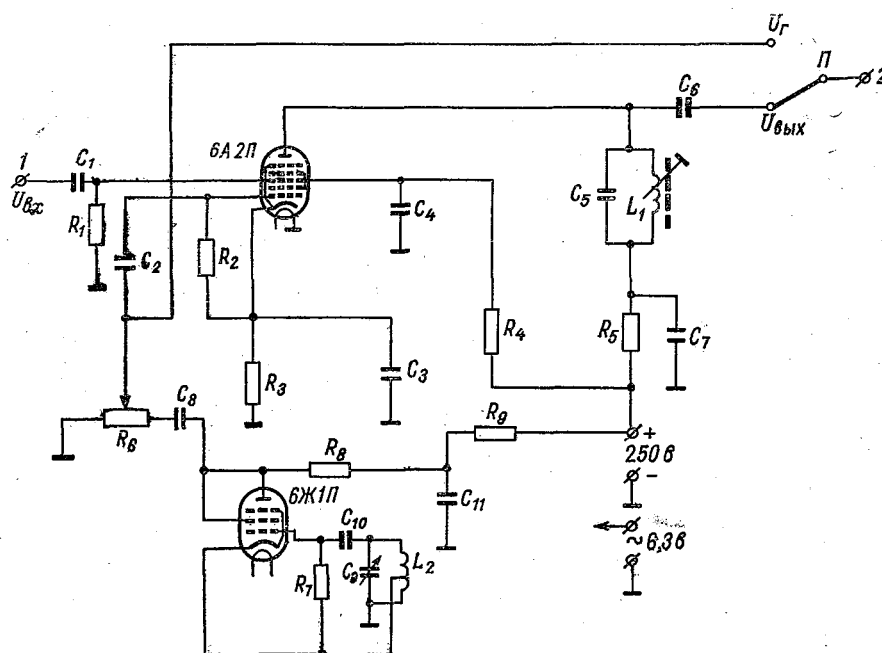


Рис. 12.10. К лабораторной работе 8.

Схема исследуемого макета.

(клемму 1) подается напряжение от генератора. Изменяя частоту напряжения на входе, получим на анодном контуре максимальное напряжение на двух частотах f_1 и f_2 . Искомые частоты определяются по формулам:

$$f_r = \frac{f_1 + f_2}{2}; \quad f_{\pi} = \frac{|f_1 - f_2|}{2}.$$

Методика снятия частотных характеристик (резонансных кривых) изложена в лабораторной работе 1. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ измеряется ламповым вольтметром, подключаемым к клемме 2.

Задание.

1. Ознакомиться с устройством макета, проверить наличие приборов и оборудования и записать технические характеристики приборов.

2. Собрать схему преобразователя, подсоединить к ней генератор и вольтметр и включить их.

3. Определить значение частоты гетеродина f_{Γ} и промежуточной частоты f_{Π} .

4. Снять зависимость коэффициента передачи преобразователя частоты $K_{\Pi\Phi}$ от напряжения гетеродина U_{Γ} . Данные занести в таблицу:

$U_{\text{вх}} = \text{const} =$									
$U_{\Gamma} \text{ в}$									
$U_{\text{вых}} \text{ в}$									
$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$									

5. По данным таблицы построить график зависимости $K_{\Pi\Phi} = \varphi(U_{\Gamma})$.

6. Определить значения коэффициента передачи преобразователя для частот: а) $f_1 = f_c$; б) $f_2 = f_{\Pi}$; в) $f_3 = f_c + 2f_{\Pi}$ (зеркальный канал).

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Схема преобразователя. 4. Таблица с данными по п. 5 задания и график. 5. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему напряжение на выходе преобразователя частоты проходит через максимум при нескольких значениях частоты генератора?

2. Каковы преимущества и недостатки супергетеродинного приемника по сравнению с приемником прямого усиления?

3. От чего зависит коэффициент передачи преобразователя?

Лабораторная работа 9. Исследование амплитудного детектора

Цель работы — исследовать физические процессы при диодном детектировании, а также влияние параметров схемы на работу диодного детектора. Изучить схемы сеточного и анодного детекторов.

Материал для подготовки: §§ 6.3, 6.4, 6.6, 11.4.

Описание макета. Исследуемый диодный детектор (рис. 12.11) собран на одной половине двойного диода 6Х2П (вторая половина не используется). Нагрузкой-детектора служат сопротивления R_7, R_8, R_9 и конденсаторы C_8, C_9, C_{10} .

Для получения большого значения напряжения на детекторе сигнал от генератора усиливается усилителем высокой частоты, собранным на пентоде 6ЖЗП.

Назначение переключателей в схеме следующее: Π_1 изменяет сопротивление в цепи катода лампы 6ЖЗП; Π_2 изменяет анодную нагрузку лампы 6ЖЗП; Π_3 включает диод 6Х2П в схему; $\Pi_4\Pi_5$ изменяют соответственно сопротивление и емкость нагрузки диодного детектора; $\Pi_6\Pi_7$ позволяют подключать осциллограф к разным точкам схемы.

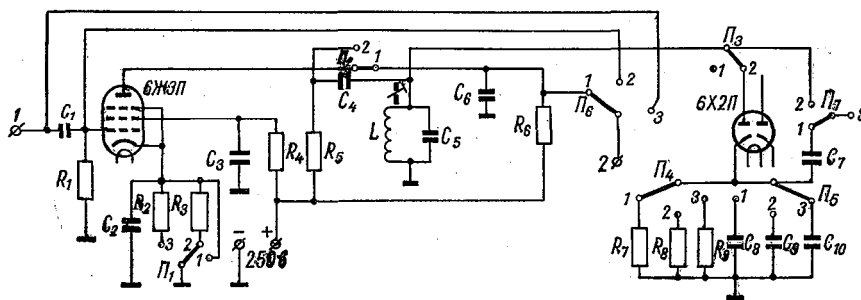


Рис. 12.11. К лабораторной работе 9.

Схема исследуемого макета.

Значения элементов схемы такие: $R_1=100$ ком, $R_2=36$ ком, $R_3=200$ ом, $R_4=300$ ком, $R_5=20$ ком, $R_6=56$ ком, $R_7=47$ ком, $R_8=270$ ком, $R_9=2,0$ Мом, $C_1=180$ пф, $C_2=20$ мкф, $C_3=2$ мкф, $C_4=C_5=330$ пф, $C_6=470$ пф, $C_7=0,02$ мкф, $C_8=62$ пф, $C_9=560$ пф, $C_{10}=0,01$ мкф, $L=200$ мкГн.

Оборудование и приборы: исследуемый макет, генератор Г4-1А, осциллограф, усилитель к ГСС.

Пояснение к работе. В данной работе требуется определить основные параметры детектора: коэффициент передачи K_d и входное сопротивление $R_{вх}$. Для определения значения K_d необходимо с помощью осциллографа измерить амплитуду напряжения несущей частоты $U_{т вх}$, коэффициент модуляции m , амплитуду напряжения на выходе детектора $U_{т вых}$ и рассчитать K_d по формуле (6.7).

Величина $R_{вх}$ определяется по формуле

$$R_{вх} = \frac{2\pi f_0^2 L_K}{\Pi_d - \Pi_0}, \quad (12.2)$$

где f_0 — частота колебаний; L_K — индуктивность катушки контура; Π_0 — полоса пропускания контура при отключенном детек-

торе; P_d — полоса пропускания контура при подключении детектора.

Исследование схем анодного и сеточного детекторов ограничивается измерением коэффициента передачи при малых и больших значениях напряжения на входе.

Полоса пропускания определяется по методике лабораторной работы 1.

Задание.

Расчетная часть. По формуле (6.9) определить величину $R_{вх}$ диодного детектора при разных значениях сопротивления нагрузки.

Лабораторная часть. 1. Ознакомиться с устройством макета, проверить наличие приборов и оборудования и записать технические данные приборов.

2. Составить схему усилителя высокой частоты и последовательного диодного детектора. На вход (клемма 1) подключить генератор, к клемме 3 подключить осциллограф. Переключатели P_1 и P_2 поставить в положение 2, P_3 — в положение 1, P_7 — в положение 2. Включить приборы и источник питания макета.

3. Изменяя частоту генератора, добиться максимального напряжения на контуре. Определить полосу пропускания контура P_0 , затем поставить переключатель P_3 в положение 2 и вновь определить полосу пропускания P_d . Рассчитать входное сопротивление $R_{вх}$ по формуле (12.2) и сравнить его с результатом, полученным при выполнении расчетного задания.

4. Поставить переключатели P_4 и P_5 в положение 2. Подать от генератора модулированное напряжение. Зарисовать форму сигнала. По осциллограмме определить коэффициент модуляции m и определить амплитуду огибающей $U_{m\Omega}$.

5. Поставить переключатель P_7 в положение 1. Зарисовать форму сигнала. Измерить амплитуду напряжения на нагрузке $U_{m\text{вых}}$.

6. Рассчитать коэффициент передачи детектора по формуле (6.7).

7. Зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузке при различных значениях R_n и C_n . Для каждого значения определить коэффициент передачи.

8. Определить коэффициент передачи детектора при слабых (0,1—0,3 в) и сильных (5—6 в) сигналах (при положении 2 переключателей P_4 и P_5).

9. Составить схему сеточного детектора. Для этого переключатели P_1 и P_2 поставить в положение 1. Осциллограф подключить к клемме 2 и включить установку.

10. Зарисовать осциллограммы напряжения на входе (P_6 в положении 3), на сетке (P_6 в положении 2) и на нагрузке (P_6 в положении 1). Определить коэффициент передачи.

11. Зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузке и определить коэффициент передачи для двух значений напряжения на входе (при $m=80\%$): а) $U_{вх}=0,1$ в; б) $U_{вх}=5$ в (подается через усилитель к ГСС).

12. Составить схему анодного детектора. Для этого переключатель $П_1$ поставить в положение 3. Повторить п. 11.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Осциллограммы напряжений, расчетные величины (m , K_d , $R_{вх}$). 4. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается процесс детектирования?
2. Как определить коэффициент передачи детектора?
3. Каковы преимущества и недостатки различных схем детекторов?
4. Какую роль играет конденсатор C_n ? Как его емкость влияет на качество детектирования?

Лабораторная работа 10. Исследование частотного детектора

Цель работы — исследовать работу ограничителя и частотного дискриминатора.

Материал для подготовки: §§ 6.6, 11.4.

Описание исследуемого макета (рис. 12.12). Ограничитель собран на лампе 6ЖЗП. С помощью переменного сопротивления R_4 устанавливается малое (8—10 в) постоянное напряжение на аноде. Оно измеряется вольтметром. Делитель R_2R_3 рассчитан так, чтобы на экранирующей сетке напряжение было около 35 в. Дискриминатор собран на лампе 6Х2П.

Значения элементов схемы такие: $R_1=R_2=100$ ком, $R_3=27$ ком, $R_4=150$ ком, $R_5=R_6=430$ ком; $C_1=C_4=C_5=250$ пф, $C_2=C_3=0,025$ мкф, $C_6=4700$ пф, $C_7=C_8=2000$ пф; $L_1=L_2=450$ мкГн, $L_3=10$ мГн.

Оборудование и приборы: исследуемый макет, генератор Г4-1А, два ламповых вольтметра, усилитель к ГСС, осциллограф.

Пояснение к работе. В работе требуется снять амплитудную характеристику ограничителя и частотную характеристику дискриминатора.

Зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды напряжения на входе называется амплитудной характеристикой ограничителя. Порог ограничения — это наименьшая амплитуда напряжения на входе, при которой начинается ограничение.

Зависимость напряжения на выходе детектора от частоты сигнала называется частотной характеристикой дискриминатора.

Для снятия амплитудной характеристики ограничителя нужно

менять напряжение на входе от 0 до 5 в. Для измерения напряжения на входе (клемма 1) и на выходе (клемма 2) ограничителя используются ламповые вольтметры. Для снятия частотной характеристики к выходу дискриминатора (клемма 3) следует подключить ламповый вольтметр с большим входным сопротивлением. Изменение частоты определяется по шкале генератора.

Задание.

1. Ознакомиться с устройством макета, проверить наличие приборов и оборудования и записать основные технические данные приборов.

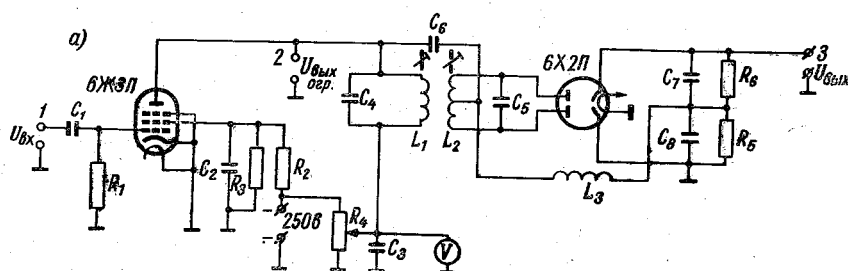


Рис. 12.12. К лабораторной работе 10.

Схема исследуемого макета.

2. Снять амплитудную характеристику ограничителя. Для этого при малом напряжении на входе настроить генератор на резонансную частоту ограничителя по максимуму напряжения на выходе (клемма 2). Затем, изменяя напряжение на входе от нуля, записывать напряжение на входе и выходе. Напряжение на входе увеличивать до тех пор, пока напряжение на выходе не перестанет возрастать. Данные занести в таблицу:

$U_a = \quad f =$									
$U_{вх}$					...				
$U_{вых.огр}$									

3. По данным таблицы построить амплитудную характеристику ограничителя $U_{вых.огр} = \varphi(U_{вх})$. Определить порог ограничения.

4. Снять частотную характеристику дискриминатора. Для этого, незначительно изменяя частоту генератора, измерять постоянное напряжение на выходе детектора.

Данные занести в таблицу:

$U_{\text{вх}} = \quad f =$									
Δf					...				
$U_{\text{вых}}$									

5. По данным этой таблицы построить частотную характеристику дискриминатора.

6. Включить на выход детектора осциллограф. Включить в генераторе внутреннюю модуляцию и убедиться, что при малых значениях коэффициента модуляции напряжение на выходе постоянно.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приборов. 3. Схема детектора. 4. Таблицы с данными опыта и графики. 5. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение частотного детектора?
2. Поясните принцип работы дискриминатора.
3. Какова роль ограничителя в детекторе?
4. Объясните назначение деталей схемы.

Лабораторная работа 11. Исследование радиовещательного приемника

Цель работы — экспериментально определить основные параметры радиовещательного приемника.

Материал для подготовки: глава 6, § 11.4, описание исследуемого радиоприемника.

В работе может быть использован любой радиовещательный приемник II или III класса (например, «Муромец», «Рекорд-66», «Маяк» или им подобный). В конструкцию приемника необходимо внести одно изменение: предусмотреть возможность переключения выхода приемника на динамик или эквивалентное сопротивление (активное сопротивление, равное по величине сопротивлению звуковой катушки динамика).

Оборудование и приборы: исследуемый радиоприемник, генераторы Г4-1А и ГЗ-2, ламповый вольтметр, эквивалент антенны (см. рис. 11.13).

Пояснение к работе. В работе снимаются следующие основные характеристики радиоприемника: чувствительность,

избирательность, полоса пропускания и полоса воспроизводимых частот (по кривой верности).

Характеристики снимаются при следующих стандартных условиях: частота модуляции 400 или 1000 гц, глубина модуляции 30%.

Чувствительностью приемника называют такое напряжение на входе приемника, при котором его выходные параметры равны нормальным ($P_{\text{вых}} = P_{\text{норм}}$, $U_{\text{вых}} = U_{\text{норм}}$).

Мощностью $P_{\text{норм}}$ принято называть величину $0,1P_{\text{ном}}$ ($P_{\text{ном}}$ — записанная в паспорте приемника номинальная выходная мощность, т. е. максимальная электрическая мощность сигнала с частотой 400 гц, подводимого к динамику приемника. При этом сигнале нелинейные искажения не должны превышать величины, установленной для приемников данного класса).

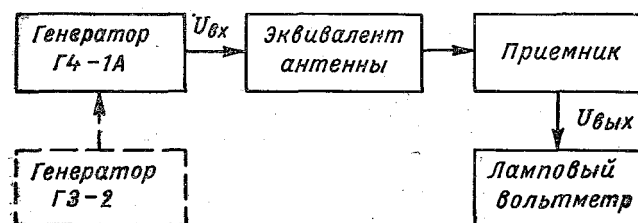


Рис. 12.13. К лабораторной работе 11.
Блок-схема исследования приемника.

Величину $U_{\text{норм}}$ можно рассчитать по формуле

$$U_{\text{норм}} = \sqrt{P_{\text{норм}} Z_{\text{зв}}} = \sqrt{0,1 P_{\text{ном}} Z_{\text{зв}}},$$

где $P_{\text{ном}}$ и $Z_{\text{зв}}$ (полное сопротивление звуковой катушки динамика) — характеристики приемника, указанные в его паспорте.

В паспорте приемника обычно записывается так называемая реальная чувствительность, т. е. чувствительность, определяемая при условии, что выходное напряжение в 10 раз превышает напряжение шумов ($U_{\text{шум}} = 0,1 U_{\text{норм}}$).

Для определения чувствительности нужно собрать блок-схему, показанную на рис. 12.13.

При вышеуказанных стандартных условиях подать на вход приемника от генератора Г4-1А такой сигнал, при котором $U_{\text{вых}} = U_{\text{норм}}$. Напряжение на входе приемника будет чувствительностью приемника. Для определения реальной чувствительности выключают модуляцию и с помощью регулятора громкости приемника устанавливают $U_{\text{вых}} = 0,1 U_{\text{норм}}$. Это напряжение вызвано собственными шумами приемника. Затем вновь включают модуляцию и устанавливают с помощью генератора $U_{\text{вых}} =$

$=U_{\text{норм}}$. Напряжение на входе представляет собой реальную чувствительность.

Избирательность приемника определяется по трем паразитным каналам: а) прямого прохождения; б) зеркальному; в) соседнему.

Избирательность S по паразитному каналу показывает, во сколько раз величина сигнала на частоте данного канала должна быть больше, чем сигнал на частоте основного канала, чтобы на выходе получить нормальную мощность.

При определении избирательности по паразитному каналу от генератора на вход приемника подается сигнал с частотой 1 МГц. Величина этого напряжения $U_{\text{вх0}}$ должна быть установлена такой, чтобы напряжение на выходе приемника было равным нормальному.

Затем, не изменяя частоты настройки приемника ($f_c = 1$ МГц), подать от генератора напряжение на частоте паразитного канала $f_{\text{пар}}$, равной: а) для канала прямого прохождения $f_{\text{пар}} = f_c = 1$ МГц; б) для зеркального канала $f_{\text{пар}} = f_c + 2f_{\text{ц}}$; в) для соседнего канала $f_{\text{пар}} = f_c \pm 10$ кГц.

Величина этого напряжения ($U_{\text{вх. пар}}$) должна быть увеличена так, чтобы напряжение на выходе приемника было равно $U_{\text{норм}}$.

Избирательность по паразитному каналу определяется как отношение $\frac{U_{\text{вх. пар}}}{U_{\text{вх0}}}$. В паспорте приемника избирательность

обычно указывается в децибелах.

Полоса пропускания приемника определяется в следующем порядке:

а) приемник настраивают на частоту генератора $f_c = 1$ МГц, а напряжение на входе $U_{\text{вх}}$ увеличивают до тех пор, пока величина $U_{\text{вых}}$ не станет равной $U_{\text{норм}}\sqrt{2}$;

б) изменяют частоту генератора (при $U_{\text{вх}} = \text{const}$) в обе стороны до тех пор, пока напряжение на выходе приемника не станет равным нормальному.

Разность между крайними частотами (f_1 и f_2) называется полосой пропускания приемника (по высокой частоте).

Кривой верности называют зависимость выходного напряжения от частоты модуляции F_m при постоянном значении напряжения высокой частоты на входе приемника. Для снятия кривой верности приемник точно настраивают на частоту $f_c = 1$ МГц при частоте модуляции $F_m = 1000$ Гц и коэффициенте модуляции $m = 30\%$.

Так как генератор Г4-1А может создавать модулированные колебания только на частоте 400 Гц, то при снятии кривой верности модуляцию колебаний осуществляют от генератора ГЗ-2,

подключаемого к клеммам «Внешняя модуляция» генератора Г4-1А.

Напряжение $U_{вх}$ устанавливают таким, чтобы $U_{вых} = 0,5 \sqrt{P_{ном} Z_{зв}}$. Затем, изменяя с помощью генератора ГЗ-2 частоту модуляции F_m , записывают значение $U_{вых}$. Следует внимательно следить за тем, чтобы оставались постоянными несущая частота $f_c = 1 \text{ МГц}$ и глубина модуляции $m = 30\%$. По полученным данным строится график $U_{вых} = \varphi(F_m)$. Полоса воспроизводимых частот определяется по кривой верности на уровне $\frac{U_{вых}}{\sqrt{2}}$.

З а д а н и е.

1. Ознакомиться с исследуемым приемником, проверить наличие приборов и оборудования и записать технические данные приборов.

2. Собрать схему для испытания приемника и включить все приборы.

3. Определить чувствительность и реальную чувствительность приемника в диапазоне средних волн.

4. Определить избирательность приемника по трем паразитным каналам.

5. Определить полосу пропускания (при $f_0 = 1 \text{ МГц}$).

6. Снять кривую верности приемника при $f_0 = 1 \text{ МГц}$, $m = 30\%$.

Данные занести в таблицу:

$f_0 = 1 \text{ МГц}; \quad U_{вх} = \quad ; \quad m = 30\%$									
$F_m \text{ Гц}$									
$U_{вых} \text{ В}$									

7. По данным таблицы построить график (кривую верности). По графику определить полосу воспроизводимых частот.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические данные приборов и приемника. 3. Блок-схема измерений и схема эквивалента антенны. 4. Результаты измерений, расчетов, таблицы, графики. 5. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими основными качественными показателями характеризуется приемник?
2. Какой канал называют зеркальным?

3. Как устраняются в приемниках помехи по зеркальному каналу и каналу прямого прохождения?

4. Что такое полоса пропускания приемника и полоса воспроизводимых частот?

Лабораторная работа 12. Обнаружение неисправности в радиоприемнике

Цель работы — обнаружить неисправный каскад в радиоприемнике методом покаскадной проверки и составить карты напряжений и сопротивлений.

Материал для подготовки: глава 6, § 11.2, 11.3, описание приемника, справочник по электронным приборам.

В данной работе можно использовать радиоприемник, исследуемый в лабораторной работе 11. Перед работой в схему радиоприемника преподавателем вводится неисправность (нарушается контакт, ставится заведомо неисправная лампа и т. п.). Не рекомендуется расстраивать контуры высокой и промежуточной частоты, нарушать работу гетеродина).

Оборудование и приборы: радиоприемник, генераторы Г4-1А и ГЗ-2, ламповый вольтметр, ампервольтметр (авометр) АВО-5М.

Пояснение к работе. Обнаружение неисправности в приемнике, как правило, самая трудоемкая часть ремонта. При отыскании неисправности сначала обнаруживают неисправный блок (УНЧ, УПЧ и т. п.), затем в блоке неисправный каскад, а в каскаде неисправную деталь (лампу, резистор и т. п.). Этот метод требует определенной последовательности испытаний, логического анализа результатов испытания.

Испытания проводятся в следующем порядке: внешний осмотр, покаскадная проверка и выявление неисправного каскада, нахождение неисправности в каскаде. Внешний осмотр приемника позволяет выявить неисправность органов управления приемника, шнура питания, гнезд на задней стенке приемника, наличие и целостность предохранителей, положение переключателя напряжения сети.

Покаскадная проверка приемника начинается с проверки исправности динамика и выходного трансформатора. Для этого при выключенном питании на первичную обмотку выходного трансформатора подается от звукового генератора напряжение частотой 400 *гц*. Если динамик и выходной трансформатор исправны, то приступают к проверке блока питания приемника. С помощью омметра измеряют сопротивление на выходе выпрямителя. Если оно превышает 10 *ком*, то значит в цепях анодов и экранирующих сеток короткого замыкания нет и можно включать напряжение сети. После включения сети нужно измерить анодное и накальное напряжения. При несоответствии этих напряжений номинальным необходимо отыскать и устранить неисправность в блоке питания.

Если приемник, включенный в сеть, молчит, то проверку начинают с усилителя низкой частоты. Для этого на гнездо «Звукосниматель» (при соответствующем положении переключателя) подается напряжение от звукового генератора. Если на выходе звука нет, то неисправен блок УНЧ. Затем подают напряжение порядка 2—3 в от звукового генератора на сетку лампы оконечного каскада. Если он исправен, то на выходе будет звук. Также испытывается предоконечный каскад, только напряжение на него надо подавать в несколько десятков раз меньше.

Если при переходе к предыдущему каскаду напряжение генератора приходится увеличивать для достижения прежней громкости, то значит каскад неисправен.

Проверка блока УПЧ производится аналогично, только на сетки ламп каскадов УПЧ подается от генератора Г4-1А модулированное напряжение промежуточной частоты 465 кГц. На усилитель высокой частоты подается модулированное напряжение произвольной частоты (обычно 1 МГц) и делается вывод о его исправности. Работа гетеродина проверяется на всех диапазонах по напряжению на гетеродинной сетке смесителя, которое измеряется ламповым вольтметром.

Неисправная деталь, отсутствие контакта или короткое замыкание в неработающем каскаде находится методом измерения рабочего режима лампы. Под режимом лампы понимают совокупность приложенных к ее электродам постоянных напряжений и проходящих в их цепях постоянных токов. Для каждой лампы приемника, усилителя или другого устройства существует определенный оптимальный режим. Этот режим указывается в прилагаемых к устройству картах напряжений и сопротивлений (см., например, рис. 11.3 и табл. 11.4). Наличие карт напряжений и сопротивлений облегчает отыскание неисправности в каскаде методом измерения режима работы лампы в неисправном каскаде и сравнением его с режимом лампы работающего каскада.

В данной работе после устранения неисправности требуется составить карту напряжений и сопротивлений усилителя низкой частоты и определить токи в отдельных цепях схемы. Токи при измерении режима работы лампы определяются косвенным путем. Измеренное напряжение делят на известное сопротивление. Например, ток катода равен напряжению между катодом и шасси, деленному на сопротивление между катодом и шасси.

Задание.

Домашнее задание. 1. Изучить принципиальную схему исследуемого приемника.

2. Составить покаскадную функциональную схему приемника.

3. Выписать из справочника типовые режимы работы ламп приемника.

Лабораторная часть. 1. Ознакомиться с исследуемым приемником, проверить наличие приборов и оборудования и записать технические данные приборов.

2. Включить измерительные приборы и приступить к обнаружению неисправности.

3. Произвести внешний осмотр приемника и записать результаты осмотра.

4. Не включая приемника в сеть, снять заднюю и нижнюю крышки. С помощью звукового генератора проверить динамик и выходной трансформатор.

5. Измерить и записать сопротивление на выходе выпрямителя (на конденсаторе фильтра) с помощью авометра.

6. Включить приемник в сеть. Измерить авометром напряжение на выходе выпрямителя и накальное напряжение.

7. Проверить каскады УНЧ; проверку следует начать с оконечного каскада.

8. Проверить работу каскадов УПЧ и преобразователя частоты с помощью генератора Г4-1А.

9. Проверить входную цепь и УВЧ с помощью генератора Г4-1А на частоте $f_c = 1 \text{ МГц}$, а затем на одной частоте каждого диапазона.

10. Измерить ламповым вольтметром напряжение, подаваемое от гетеродина на сетку смесительной лампы.

Примечание. Обнаруженную при испытаниях, выполненных в пп. 3—10, неисправность следует устранить.

11. Проверить приемник в работе и убедиться в его исправности. Выключить приемник.

12. Снять карту сопротивлений УНЧ.

13. Включить приемник в сеть и снять карту напряжений УНЧ.

14. Определить токи анода, катода и экранирующей сетки одной из ламп УНЧ.

15. Сравнить полученные результаты с типовым режимом данной лампы.

Содержание отчета. 1. Наименование и цель работы. 2. Основные технические характеристики приемника и приборов. 3. Функциональная схема приемника. 4. Типовые режимы ламп приемника. 5. Результаты измерений и испытаний всех каскадов. 6. Карты напряжений и сопротивлений УНЧ. 7. Рабочий режим одной из ламп УНЧ. 8. Краткие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертите блок-схему исследуемого приемника.

2. Покажите на принципиальной схеме приемника точки, к которым подключаются измерительные генераторы и приборы.

3. Какие неисправности наиболее часто встречаются в блоке питания приемника?

4. Каково назначение каждой лампы приемника?

5. Как составляются карты напряжений и сопротивлений?

6. Как определяются токи в цепях ламп работающего устройства?

ЛИТЕРАТУРА

К главам 1—6

1. Баркан В. Ф., Жданов В. К. Радиоприемные устройства. Изд-во «Советское радио», М., 1967.
2. Гуткин Л. С. Современная радиоэлектроника и ее проблемы. Изд-во «Советское радио», М., 1968.
3. Жеребцов И. П. Радиотехника. Изд-во «Связь», М., 1965.
4. Изюмов Н. М., Линде Д. П. Основы радиотехники. Изд-во «Энергия», М.—Л., 1965.
5. Овчинников Н. И. Основы радиотехники. Воениздат, М., 1968.
6. Окунь Е. Л. Радиопередающие устройства. Изд-во «Судостроение», Л., 1967.
7. Пруслин З. М., Смирнова М. А. Радиотехника и электроника. Изд-во «Высшая школа», М., 1968.

К главам 7—9

1. Барсуков Ф. И., Максимов М. В. Радиотелеметрия. Воениздат, М., 1962.
2. Белоцерковский Г. Б. Основы импульсной техники и радиолокации. Изд-во «Судостроение», Л., 1965.
3. Вайсман Г. М. Автоматика и телемеханика в метеорологии. Гидрометеониздат, Л., 1967.
4. Качурин Л. Г. Электрические измерения аэрофизических величин. Изд-во «Высшая школа», М., 1967.
5. Коковин Н. С. Радиотелеметрия зондирования атмосферы. Гидрометеониздат, Л., 1966.
6. Маклаков А. Ф. [и др.] Эксплуатация и ремонт метеорологических приборов. Гидрометеониздат, Л., 1965.
7. Маклаков А. Ф. [и др.] Эксплуатация и ремонт речных и морских гидрологических приборов. Гидрометеониздат, Л., 1968.
8. Ошеров В. Е. Аппаратура факсимильной связи. Гидрометеониздат, Л., 1966.
9. Радиосвязь и вещание. Под ред. Н. И. Чистякова. Связьиздат, М., 1961.
10. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии (радиометеорология). Гидрометеониздат, Л., 1966.

К главам 10—12

1. Белевцев А. Т. Монтаж и регулировка радиоаппаратуры. Изд-во «Высшая школа», М., 1966.
2. Зарх И. М. Справочное пособие по монтажу и регулировке радиоаппаратуры. Лениздат, 1966.
3. Казиник М. Л. Лабораторные работы по радиотехнике. Изд-во «Высшая школа», М., 1968.
4. Лившиц Н. С., Телешевский Б. Е. Радиотехнические измерения. Изд-во «Высшая школа», М., 1968.
5. Малинский В. Д. Сборник лабораторных работ по усилительным и радиоприемным устройствам. Изд-во «Высшая школа», М., 1964.
6. Лабораторные работы по курсу «Теоретические основы радиотехники». Изд. МЭИ.
7. Пашков А. Н., Корсаков В. П. Поверителю радиоизмерительных приборов. Воениздат, М., 1962.
8. Рабинович А. Г. Регулировка радиотехнических устройств. Изд-во «Судостроение», Л., 1967.
9. Старосельский Р. Е. Руководство по организации и оборудованию учебного кабинета электроники и радиотехники. Изд-во «Высшая школа», М., 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Общие сведения о современной радиотехнике и истории ее развития	5
§ 1.1. Радиотехника и области ее применения	—
§ 1.2. Краткая история развития радиотехники и ее применения в гидрометеорологии	8
§ 1.3. Классификация радиотехнических средств	12
Классификация радиосредств по диапазонам волн (12). Классификация радиосредств по степени их сложности (16). Классификация радиосредств по информационным признакам (17)	
Основные выводы	20
Контрольные вопросы и упражнения	—
Глава 2. Колебательные контуры	21
§ 2.1. Свободные колебания в контуре	24
§ 2.2. Вынужденные колебания в последовательном контуре	28
Резонанс напряжений (31). Резонансные кривые (33). Полоса пропускания (35)	
§ 2.3. Вынужденные колебания в параллельном контуре	36
Резонанс в параллельном контуре (36). Резонансные кривые (38)	
§ 2.4. Вынужденные колебания в связанных контурах	40
Резонанс напряжений (41). Резонансные кривые (43). Полоса пропускания (44). Настройка (44)	
§ 2.5. Колебательные процессы в системах с распределенными параметрами	46
Основные выводы	55
Контрольные вопросы и упражнения	—
Глава 3. Антенно-фидерные устройства	57
§ 3.1. Излучение и прием электромагнитных волн	—
Свободные колебания в открытом колебательном контуре (58). Вынужденные колебания в открытом колебательном контуре (59). Процессы в приемной антенне (62)	
§ 3.2. Классификация и технические показатели антенн	63
Классификация антенн (63). Основные технические показатели антенн (66). Особенности антенн, работающих в режиме приема (72)	
31*	483

§ 3.3. Антенны разных диапазонов длин волн	72
Антенны дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн (73). Антенны дециметровых волн (77). Антенны метровых волн (80). Антенны дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн (81)	
§ 3.4. Фидерные устройства	86
Открытые (воздушные) двухпроводные линии (87). Коаксиальная линия (87). Волноводы (88). Согласование фидерной линии с антенной (88)	
Основные выводы	90
Контрольные вопросы и упражнения	91
Глава 4. Распространение радиоволн	93
§ 4.1. Общие сведения о распространении радиоволн	—
Законы распространения радиоволн (93). Идеальная радиопередача (94). Влияние атмосферы на распространение радиоволн (95). Влияние земной поверхности на распространение радиоволн (100)	
§ 4.2. Распространение дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн	101
Волны длиной более 1000 м (101). Волны длиной 1000—100 м (103)	
§ 4.3. Распространение дециметровых волн	104
§ 4.4. Распространение радиоволн короче 10 м	107
§ 4.5. Сведения о распространении инфракрасных и видимых волн	112
Основные выводы	114
Контрольные вопросы и упражнения	115
Глава 5. Радиопередающие устройства	116
§ 5.1. Генераторы с внешним возбуждением	117
Режимы работы ламп в генераторе (117). Работа генератора с внешним возбуждением (119). Схемы питания генераторов (122)	
§ 5.2. Умножители частоты и выходные усилители	125
Умножители частоты (125). Выходные усилители (126)	
§ 5.3. Генераторы с самовозбуждением	129
Трехточечные схемы автогенераторов (133). Схема Шембея (136). Автогенераторы, работающие в режиме прерывистой генерации (137). RC-генераторы синусоидальных колебаний (141). Особенности генераторов на транзисторах (142)	
§ 5.4. Генераторы сверхвысоких частот	144
Генераторы метровых волн (145). Клитроны (146). Лампы бегущей и обратной волны (148). Магнетроны (150)	
§ 5.5. Модуляция	151
Амплитудная модуляция (151). Частотная модуляция (156). Амплитудная манипуляция (160). Импульсная модуляция (161). Сверхрегенеративный режим работы передатчиков (162)	
Основные выводы	162
Контрольные вопросы и упражнения	163

Глава 6. Радиоприемные устройства	165
§ 6.1. Основные технические характеристики радиоприемных устройств	166
§ 6.2. Входные цепи	168
Разновидности схем входных цепей (168). Особенности входных цепей на сверхвысоких частотах (170)	
§ 6.3. Усилители высокой частоты	171
УВЧ на электронных лампах (171). УВЧ на транзисторах (176). Параметрические и молекулярные усилители (178)	
§ 6.4. Детектирование и детекторы	180
Диодные детекторы (180). Сеточное, анодное и катодное детектирование (185)	
§ 6.5. Усилители низкой частоты	188
Основные характеристики и схемы усилителей низкой частоты (188). УНЧ на транзисторах (197)	
§ 6.6. Схемы радиоприемников	199
Приемники прямого усиления (199). Супергетеродинные приемники (202). Усилители промежуточной частоты (208). Приемники частотно-модулированных колебаний (209)	
§ 6.7. Регулировки в радиоприемниках	214
§ 6.8. Сведения о приемниках СВЧ	217
Основные выводы	220
Контрольные вопросы и упражнения	221
Глава 7. Системы радиосвязи	223
§ 7.1. Общие сведения о радиосвязи в гидрометеорологической службе	—
Организация радиосвязи в гидрометеорологической службе (223). Виды радиосвязи в гидрометеорологической службе (224)	
§ 7.2. Аппаратура радиосвязи сети сбора	232
Радиостанция «Недра-П» (233). Радиостанция РСО-5 (234). Радиостанция РСО-30 (237). Радиопередатчик мощностью 250 вт (242). Радиопередатчики мощностью 1 кВт (244). Радиоприемник Р-311 (244)	
§ 7.3. Аппаратура радиосвязи сети обмена	245
Радиорелейная аппаратура Р-60/120 (246). Магистральный радиопередатчик (248). Магистральный радиоприемник (249). Радиосвязь через искусственные спутники (251)	
§ 7.4. Аппаратура радиосвязи сети распространения	254
Длинноволновый радиопередатчик мощностью 70 кВт (254). Радиоприемник «Волна» (256). Распространение гидрометеорологической информации с помощью ИСЗ (256)	
Основные выводы	257
Контрольные вопросы	258
Глава 8. Радиолокационные системы	259
§ 8.1. Радиолокация и ее физические основы	260
Импульсный метод (262). Метод непрерывного излучения (270)	

§ 8.2. Радиолокационное определение координат цели и обзор пространства	271
Определение координат цели и обзор пространства при импульсном методе (271). Определение координат цели при использовании метода непрерывного излучения (275)	
§ 8.3. Метеорологические РЛС, работающие по принципу активной радиолокации	277
Системы для определения скорости и направления ветра	—
Система «Метеор» — РКЗ (278). «Малахит» — А-22 (280). Другие системы (280)	
Системы для определения характеристик облачности и осадков	281
Метеорологическая радиолокационная станция МРЛ-1 (285). Метеорологическая радиолокационная станция МРЛ-2 (300). Перспективы применения метеорологических радиолокаторов (304). Сведения о радиолокационном измерении осадков (305). Применение РЛС для определения градоопасных зон (306)	
Некоторые специальные метеорологические радиолокаторы	307
Применение радиолокационных средств для исследования неоднородностей атмосферы (307). Применение радиолокационных средств для исследования ледников (307). Светолокационная аппаратура для измерения высоты нижней границы облаков (309)	
§ 8.4. Применение РЛС, работающих по принципу пассивной радиолокации	311
Системы, использующие искусственное излучение (311). Системы, использующие естественное излучение (312)	
Основные выводы	316
Контрольные вопросы и упражнения	317
Глава 9. Радиотелеметрические системы	318
§ 9.1. Общие сведения о радиотелеметрии и радиотелеметрических системах	318
РТС с частотным разделением каналов (321). РТС с временным разделением каналов (324). Понятие об РТС с кодовым и комбинированным разделением каналов (328)	
§ 9.2. Радиотелеметрические системы, размещаемые на поверхности земли и воды	329
Автоматическая станция М-36 (АРМС-Н) (329). Дрейфующая автоматическая станция ДАРМС (331). Радионизмерители волн (ГМ-32) и течений (ГМ-33) (332). Радиооповеститель селя РОС (336)	
§ 9.3. Радиотелеметрические системы для температурно-ветрового зондирования атмосферы	336
Радиотелеметрия системы «Малахит» — А-22 (337). Радиотелеметрия системы «Метеор» — РКЗ (339). Сведения об РТС метеорологических ракет (342)	
§ 9.4. Радиотелеметрия метеорологических спутников	343
Телевизионная аппаратура (345). Инфракрасная аппаратура (347). Сведения о приемной аппаратуре космических метеорологических систем (349)	
Основные выводы	351
Контрольные вопросы и упражнения	—

Глава 10. Радиоизмерения	353
§ 10.1. Общие сведения о радиоизмерениях	—
§ 10.2. Погрешности измерения	355
Систематические погрешности (355). Грубые погрешности (356). Случайные погрешности (356). Основные методы оценки точности измерений (357). Абсолютные и относительные погрешности (359)	
§ 10.3. Радиоизмерительные приборы общего применения (361)	
Магнитоэлектрические индикаторы (361). Система обозначений радиоизмерительных приборов (362)	
§ 10.4. Измерение напряжений и сопротивлений	363
Универсальный вольтметр В7-2 (365). Электронный милливольтметр В3-13 (366). Вольтметр ВК7-7 (368). Вольтметр ВК7-3 (369). Вольтметр ВК7-9 (369). Ампервольтметр АВО-5М (369)	
§ 10.5. Измерение мощности	370
Электрический метод (371). Фотометрический метод (371). Калориметрический метод (372). Метод, основанный на использовании термосопротивлений (372). Метод механического действия (374)	
§ 10.6. Измерения частоты и длины волны	375
Методы измерения звуковых частот (376). Методы измерения высоких частот (378)	
§ 10.7. Измерительные генераторы	381
Звуковые генераторы (381). Высокочастотные генераторы (382). Генераторы сверхвысоких частот (384)	
§ 10.8. Некоторые другие радиоизмерительные приборы	385
Измерители активного сопротивления и параметров катушек индуктивности и конденсаторов (385). Измерители напряженности поля и помех (390). Испытатели радиоламп и полупроводниковых приборов (391)	
Основные выводы	392
Контрольные вопросы и упражнения	—
Глава 11. Эксплуатация и ремонт радиоэлектронной аппаратуры	394
§ 11.1. Основы теории надежности и ее приложения к практике использования радиоэлектронной аппаратуры	394
§ 11.2. Основные правила эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры	401
Эксплуатационная документация (401). Условия эксплуатации (404). Контрольно-профилактические работы (404)	
§ 11.3. Ремонтные работы	405
Восстанавливаемость радиоаппаратуры (407). Способы испытаний (408). Устранение неисправностей радиоаппаратуры (411)	
§ 11.4. Регулировка радиоэлектронной аппаратуры	421
Регулировка выпрямительных устройств (422). Регулировка радиопередающих устройств (424). Регулировка радиоприемных устройств (428). Регулировка усилителей низкой частоты (428). Регулировка детектора и схемы автоматической регулировки усиления (430). Регулировка усилителей промежуточной частоты (431). Регулировка каскадов высокой частоты (433). Правила техники безопасности (434)	

Основные выводы	438
Контрольные вопросы и упражнения	439
Глава 12. Лаборатория основ радиотехники	441
§ 12.1. Организация лаборатории основ радиотехники	—
Оборудование лаборатории (441). Порядок выполнения лабораторных работ и составления отчета (444)	
§ 12.2. Описание лабораторных работ	445
Лабораторная работа 1. Колебательные контуры (445). Лабораторная работа 2. Длинная линия (451). Лабораторная работа 3. Снятие диаграммы направленности антенны (453). Лабораторная работа 4. Исследование генератора с внешним возбуждением (456). Лабораторная работа 5. Исследование генераторов с самовозбуждением (459). Лабораторная работа 6. Исследование схемы амплитудной модуляции (462). Лабораторная работа 7. Исследование входной цепи и УВЧ приемника (464). Лабораторная работа 8. Преобразователь частоты (468). Лабораторная работа 9. Исследование амплитудного детектора (470). Лабораторная работа 10. Исследование частотного детектора (473). Лабораторная работа 11. Исследование радиовещательного приемника (475). Лабораторная работа 12. Обнаружение неисправности в радиоприемнике (479)	
Литература	482

Вайсман Гений Михайлович

Верле Юрий Сергеевич

ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ И РАДИОСИСТЕМЫ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

Отв. редактор Н. М. Потиевский

Редактор Л. К. Сурыгина. Переплет художника Е. И. Васильева
Худож. редактор И. Н. Кошаровский. Техн. редактор М. И. Брайнина
Корректоры: М. А. Гальперина и З. Т. Тимченко

Сдано в набор 5/III 1970 г. Подписано к печати 19/VI 1970 г. Бумага 60×90^{1/16}.
Бум. тип. № 2. Бум. л. 15,25. Печ. л. 30,5. Уч.-изд. л. 31,29. Тираж 15 500 экз. М-13484.
Индекс МЛ-153.

Гидрометеорологическое издательство. Ленинград. В-53, 2-я линия, д. № 23.
Заказ № 176. Цена 1 руб. 23 коп.

Ленинградская типография № 8. Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР. Ленинград, Прачечный пер., д. 6.