

КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ПО ОСНОВАМ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Р. БОУЛДИНГ

**К Р А Т К И Й
СПРАВОЧНИК
ПО ОСНОВАМ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
ТЕХНИКИ**



ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ
СОЮЗА ССР

RADAR POCKET BOOK

By

R. Boulding

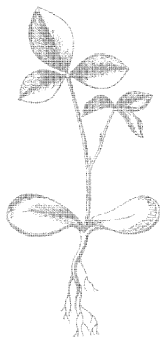
LONDON 1955

КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ПО ОСНОВАМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Р. БОУЛДИНГ

*Перевод с английского
БРУХАНСКОЙ О. В.*

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1958



Scan AAW

АННОТАЦИЯ

В книге изложены краткие сведения по основам радиолокационной техники, охватывающие вопросы распространения электромагнитных волн, генерирования и приема, антенно-волноводной техники, индикации, формирования импульсов различной формы и назначения, а также ряд вопросов, связанных с конструированием и применением элементов высокочастотной техники.

В книге приведен ряд формул, которые могут быть использованы в инженерных расчетах, а также некоторые справочные данные.

Книга рассчитана на лиц, знакомых с основными принципами радиолокационной техники, занимающихся вопросами разработки и эксплуатации радиолокационных средств военного и гражданского применения.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей книге в сжатой форме изложены основные принципы радиолокации, а также приведены схемы отдельных устройств радиолокационных станций и основные формулы для их расчета.

Автор надеется, что несмотря на малый объем книги, ему удалось достаточно полно осветить вопросы радиолокационной техники. Наибольшее внимание уделено радиолокационной технике сантиметрового диапазона волн; метровый диапазон, как устаревший, почти не рассматривается. Материал книги разбит на разделы, имеющие самостоятельное значение, что позволяет ознакомиться с конкретным вопросом, не прочитывая всей книги.

В книге принята рационализированная система единиц MKS, за исключением тех случаев, где применение других систем более целесообразно (на что специально указывается в тексте).

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	5
Глава I. Электромагнитные волны	7
Глава II. Основные принципы радиолокации	14
Глава III. Электронные лампы, кристаллические детекторы и полупроводниковые приборы	20
Глава IV. Расчет цепей	42
Глава V. Прямоугольные формы волн и управляющие импульсы	61
Глава VI. Радиолокационные передатчики	71
Глава VII. Радиолокационные приемники	84
Глава VIII. Передающие линии (фидеры)	99
Глава IX. Волноводы, рупорные излучатели и объемные резонаторы	113
Глава X. Антенные устройства и излучение	133
Глава XI. Передача данных и следящие системы	154
Глава XII. Электронно-лучевые трубки	168
Глава XIII. Радиолокационные системы индикации	175
Глава XIV. Схемы разверток	183
Глава XV. Схемы калибровки и стробирования	197
Глава XVI. Источники питания	215
Глава XVII. Измерения и контрольно-измерительные приборы	218
Приложение	230



Г Л А В А I

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Электромагнитные волны распространяются в свободном пространстве (вакууме) с постоянной скоростью $2,9979^2 \times 10^8$ м/сек. Скорость распространения электромагнитных волн обычно обозначается буквой c .

Электромагнитные волны имеют электрическую и магнитную составляющие, которые взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волн. В силу этого электромагнитные волны называются поперечными. Плоскость, в которой лежат электрическая составляющая и вектор распространения волны, носит название плоскости поляризации. По отношению к направлению распространения, которое в основном горизонтально, говорят, что волны вертикально или горизонтально поляризованы в соответствии с тем, вертикальна или горизонтальна электрическая составляющая.

Напряженность поля

В точке, отстоящей от излучающей антенны на расстоянии, превышающем несколько длин волн, электрическая и магнитная силы находятся в фазе и их величины обратно пропорциональны этому расстоянию. И та и другая изменяются синусоидально по времени.

Волны распространяются во все стороны от излучающей антенны. Фронтом волны (т. е. поверхностью, на которой фаза одинакова во всех точках в любой момент времени) является сфера, если не учитывать малых отклонений вблизи антенны, обусловленных ее размерами.

Практически рассматривается обычно энергия, протекающая через относительно малую поверхность на неко-

тором расстоянии от источника. Тогда фронт волны на этой поверхности можно считать плоским, а волну — плоской волной.

Полное сопротивление свободного пространства

В свободном пространстве напряженности электрических и магнитных полей (E и H) находятся в определенном соотношении в любой точке в данный момент времени. Отношение $\frac{E}{H}$, равное $\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ называется импедансом, или полным сопротивлением свободного пространства. Оно имеет размерность сопротивления. (E измеряется в вольтах на метр, а H — в амперах на метр.)

ϵ и μ представляют собой соответственно абсолютную диэлектрическую и абсолютную магнитную проницаемости свободного пространства, причем их величины по системе MKS составляют $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ и $\epsilon = 10^7/(4\pi c^2)$, откуда импеданс свободного пространства равен $4\pi c \times 10^{-7} = 377 \text{ ом}$.

Практически воздух эквивалентен свободному пространству. Скорость распространения электромагнитных волн в воздухе на 0,03% меньше из-за диэлектрической постоянной воздуха, которая несколько больше диэлектрической постоянной свободного пространства. Разница между величинами магнитной проницаемости свободного пространства и воздуха, а также всех обычно используемых немагнитных материалов незначительна.

Поток энергии

Для плоской волны поток энергии через плоскость в один квадратный метр равен $E \cdot H \text{ вт}$, где E и H — эффективные величины электрических и магнитных полей.

Это можно также выразить зависимостью $H^2 Z$ или E^2/Z , где Z — импеданс свободного пространства. Плотность энергии обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения.

Распространение электромагнитных волн в реальных условиях

Электромагнитные волны, так же как и световые, распространяются в свободном пространстве прямолинейно,

поэтому практически дальность обнаружения цели ограничивается кривизной земли. Вследствие преломления волн в атмосфере путь их распространения отклоняется к земной поверхности, благодаря чему эффективный радиогоризонт получается несколько больше геометрического горизонта.

Показатель преломления паров воды для радиолокационного диапазона частот больше, чем для световых волн; поэтому влажность среды, в которой происходит распространение, до некоторой степени важна, но практически не вызывает особых затруднений.

Во многих случаях можно производить расчет, считая, что волны распространяются прямолинейно, а радиус земли равен $\frac{4}{3}$ его действительной величины. Для случая распространения над морем более точным будет отношение 2:1.

Затухание

Для частот, используемых в радиолокации, величина поглощения электромагнитных волн атмосферными газами незначительна, хотя на более коротких длинах волн возникает поглощение из-за молекулярного резонанса.

Влияние дождя

Дождь может отрицательно влиять на работу радиолокационных станций по двум причинам:

1. Ввиду поглощения электромагнитных волн частицами воды.
2. Ввиду их рассеяния при распространении в среде с частицами воды.

Последняя причина обуславливает рассеянное отражение при шторме, что может замаскировать отраженный сигнал от таких объектов, как корабль или самолет, попавших в район шторма. Это в особенности касается объектов с незначительными размерами. Поглощение частицами воды в этом случае имеет большее значение. Для больших объектов, например для большого корабля, поглощение более существенно, чем рассеивание частицами воды.

Снег создает такой же эффект, как и дождь, но в меньшей степени.

Влияние тумана

Туман вызывает значительное затухание, особенно в том случае, если его плотность такова, что понижает оптическую видимость до десятков или единиц метров.

Сверхпреломление

При определенных условиях, связанных главным образом с хорошей теплой погодой, когда воздух на небольшой высоте теплее и суше, чем на поверхности земли, возникает так называемый «пространственный волновод». Такой «волновод» располагается в атмосфере вблизи поверхности земли и имеет толщину порядка десятка или нескольких десятков метров.

Пространственный волновод способствует распространению волн вокруг земли и тем самым увеличивает дальность горизонтального распространения. В отдельных случаях эхосигналы от скал и островов принимались на расстоянии нескольких сотен километров радиолокационными станциями, максимальная дальность действия которых не превышает 20—40 км. Вообще это явление не считается вредным, но в отдельных случаях оно может привести к путанице, возникающей вследствие прихода отраженных сигналов от далеко расположенных объектов, которые появляются на развертке индикаторов радиолокационных станций в местах, соответствующих меньшим дальностям и по времени не соответствующих приходу отраженных сигналов от очередного передатчика.

Замирание (фединг)

Кроме замирания, обычного для радиосвязи, в радиолокации может иметь место и другой вид замирания, связанный с изменением отраженной мощности в зависимости от положения цели.

При отражении от самолетов наблюдается чрезвычайно быстрое изменение силы сигналов, иногда в 10 раз в течение времени менее одной секунды. Это вызывает трудности работы некоторых радиолокационных станций, в которых необходимо сравнивать силы двух сигналов, отделенных друг от друга коротким промежутком времени.

Другое явление заключается в случайном перемещении эффективного «центра отражения» по поверхности цели.

Это явление называется «блестящей точкой». Оно может быть вредным, когда необходимо точно определить направление цели.

Отражение электромагнитных волн

Плоская волна, падающая на плоскую идеально проводящую поверхность конечных размеров, полностью отражается, причем, так же как и для световых волн, угол падения равен углу отражения. Если волна вертикально поляризована, она отражается без изменения фазы; если же она поляризована горизонтально, то фаза изменяется на 180° .

Электромагнитные волны отражаются также и от идеального изолятора, причем угол падения равен углу отражения, но энергия отраженной волны в этом случае будет меньше падающей, так как часть энергии поглощается в диэлектрике. Отношение амплитуд отраженной и падающей волн для вертикальной поляризации выражается формулой

$$\frac{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \sin \theta - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \cos^2 \theta}}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \sin \theta + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \cos^2 \theta}},$$

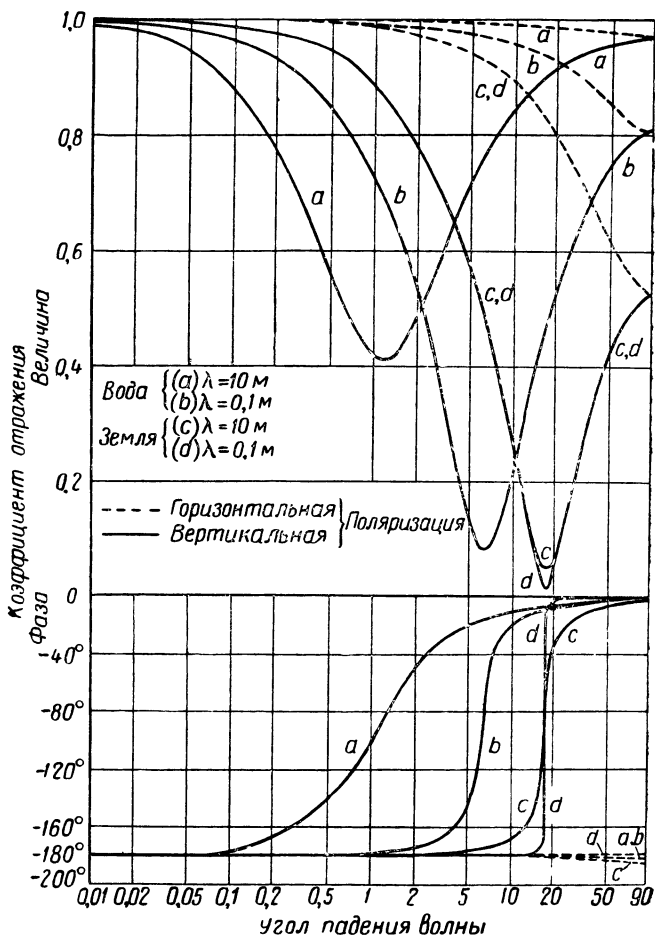
для горизонтальной поляризации формулой

$$\frac{\sin \theta - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \cos^2 \theta}},$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрические проницаемости первой и второй среды,

а θ — угол падения луча на отражающую поверхность.

В данном разделе все материалы, за исключением земли рассматриваются как идеальные проводники или как идеальные диэлектрики.



Р и с. 1.1 Коэффициенты отражения

Отражение электромагнитных волн от земной поверхности

Электрические параметры земли непостоянны и изменяются от места к месту, поэтому величина и фаза отраженной волны могут быть определены только в каждом отдельном случае. С изменением длины волны результаты расчета величины и фазы отраженной волны будут различны.

Расчет может быть произведен путем замены ϵ_2 в формулах, указанных выше, комплексным выражением $\{\epsilon_2 - j(\sigma/\omega)\}$, где σ — проводимость второй среды (т. е. земли) в $мо$ на метр, а $\omega = 2\pi f$; ϵ_1 остается без изменения, т. е. предполагается, что первая среда — свободное пространство или воздух (что практически одно и то же).

Расчет достаточно трудоемкий, но имеются графики, значительно упрощающие нахождение величины и фазы отраженной волны.

Для иллюстрации изменения отражения в зависимости от различных условий на рис. 1.1 представлены кривые величин и фаз коэффициента отражения для длин волн 10 м и 10 см при распространении над морем и землей с «усредненными» параметрами. При расчете этих кривых диэлектрическая проницаемость земли и моря принимается соответственно равной 10 и 80 (в соответствии с абсолютными величинами $8,8 \cdot 10^{-11}$ и $7,1 \cdot 10^{-10}$), а удельное сопротивление 300 и 0,24 $ом/м$ для земли и моря. Кривые на рис. 1.1 имеют лишь иллюстративный характер, так как данные для земли значительно изменяются в зависимости от типа почвы.

На основании анализа кривых рис. 1.1 можно сделать вывод, что отражение горизонтально поляризованных волн в противоположность вертикально поляризованным волнам почти не зависит от угла падения.

Г Л А В А II

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИИ

Если не принимать во внимание атмосферное поглощение, отражение от земли и моря и другие ограничивающие факторы, то можно определить максимальную дальность радиолокационной станции по уравнению

$$r = \sqrt[4]{\frac{W_t G A_e A_r}{W_r 16 \pi^2}} = \sqrt[4]{\frac{W_t K A_t A_e A_r}{W_r 16 \pi^2 \lambda^2}},$$

где

r — дальность;

W_t — мощность передатчика;

W_r — минимальная входная мощность приемника для создания полезного сигнала;

A_t — эффективная площадь передающей антенны;

A_r — эффективная площадь приемной антенны;

A_e — эффективная отражающая площадь цели;

G — коэффициент усиления передающей антенны по мощности;

$K = G \lambda^2 / A_t$ — коэффициент для специальных типов используемых передающих антенн;

λ — длина волны.

Анализ этого уравнения показывает, что:

- 1) Дальность пропорциональна корню четвертой степени из величины мощности передатчика.
- 2) Удвоение W_t увеличивает дальность только на 20%.
- 3) Для удвоения дальности мощность передатчика должна быть увеличена в 16 раз.

4) Дальность увеличивается при уменьшении длины волны, так как луч антенны становится уже, а G соответственно возрастает.

Эффективная отражающая площадь цели A_e является площадью предполагаемой цели, расположенной перпендикулярно лучу и отражающей всю падающую на нее энергию одинаково во всех направлениях, создавая в приемнике сигнал, величина которого равна сигналу, который был бы создан реальной целью.

Величина A_e для реальной цели зависит от многих факторов и может быть найдена только экспериментально. Для самолетов средней величины она составляет от 1 до 10 м^2 .

Коэффициент усиления передающей антенны G является отношением величины мощности, излучаемой в направлении максимального излучения, к величине мощности в случае излучения той же общей мощности равномерно во всех направлениях.

Влияние отражения от земли

Если положение цели определяется малым углом места (например, для кораблей и низко летящих самолетов), то волны, отраженные от земли, интерферируют с прямыми волнами и основное уравнение принимает вид:

$$r = \sqrt[8]{\frac{W_t K A_t A_e 16 \pi^2 h^4 H^4}{W_r \lambda^6}},$$

где h и H — высота над уровнем земли или моря соответственно радиолокационной антенны и цели.

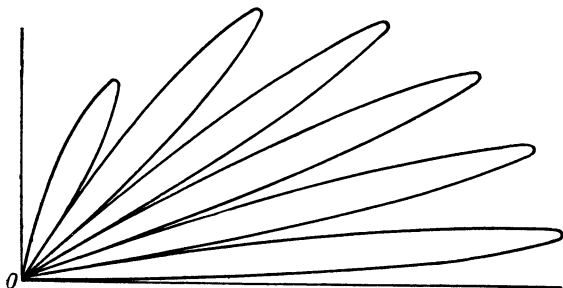
Эта формула применима только в том случае, если r значительно больше \sqrt{hH} и основывается на предположении идеального отражения от земли или моря с изменением фазы на 180° . Это предположение в основном правильно для малых величин угла места.

Следует заметить, что при этих условиях дальность будет пропорциональна корню восьмой степени из величины мощности передатчика. Этим объясняется трудность обнаружения низко летящего самолета на достаточно большом расстоянии.

При больших углах места проблема становится более сложной, так как увеличивается разность пути прямых и

отраженных волн и возникает несколько максимумов и минимумов вследствие того, что эффективная разность становится четным или нечетным числом полуволн.

Предположение об идеальном отражении с изменением фазы также становится менее допустимым.



Р и с. 2.1. Полярные диаграммы с учетом влияния отражений от земли

Влияние земли иллюстрируется в общем виде полярными диаграммами на рис. 2.1. Напряженность поля в любом направлении пропорциональна расстоянию точки на кривой полярной диаграммы от начала координат.

Для узких лучей и малых углов места, при которых отражения от земли не происходит, применяется уравнение, выведенное для распространения в свободном пространстве. Оно справедливо для большинства радиолокационных станций сантиметрового диапазона при значениях угла места, превышающих несколько градусов.

Длина волны

Первые образцы радиолокационных станций работали в метровом диапазоне волн главным образом из-за отсутствия необходимых генераторов более коротких волн.

Современные радиолокационные станции в большинстве своем работают в сантиметровом диапазоне волн, используя обычно трех- и десятисантиметровый диапазоны.

Из основного уравнения следует, что дальность увеличивается при уменьшении длины волны, так как для дан-

ного размера антенны луч становится уже. Для точных радиолокационных установок, например для станций оружейной наводки, необходим узкий луч, для поисковых станций желателен более широкий луч.

Если ширина луча задана, то основное уравнение может быть написано в следующем виде:

$$r = \sqrt[4]{\frac{W_t K \lambda^2 A_e}{256 W_r \theta^4}},$$

где θ — ширина луча (в радианах) в точках половинной мощности.

Данная формула базируется на предположении, что диполь помещен в круговой параболический отражатель, для которого $\theta = \lambda / (\text{диаметр})$, и что для приема и передачи используется одна и та же антенна.

Это уравнение показывает, что для определенной ширины луча дальность увеличивается при увеличении длины волны. Практически существует предел увеличения длины волны, так как для данной ширины луча диаметр антенны должен увеличиваться пропорционально длине волны.

Вопрос о длине волны на практике решается с учетом ряда факторов. В настоящее время имеется тенденция использовать длины волн в пределах 10—50 см для станций обнаружения, где более важна дальность, чем точность определения координат. Для точной работы на малых дальностях в большинстве случаев используются длины волн в пределах 3—10 см.

Длительность импульса и частота повторения

Длительность импульса должна быть малой, чтобы избежать наложения отраженных сигналов от двух целей, находящихся близко друг от друга, но которые требуется обнаружить раздельно. Сигналы, отраженные от двух целей, отстоящих одна от другой на расстоянии 150 м и имеющих один и тот же азимут, совпадают при длительности импульса свыше 1 мксек. Наличие двух целей можно установить по удвоению размера отраженного сигнала на экране индикатора, но при уменьшении расстояния между целями их различение становится затруднительным.

В станциях большой точности обычно используется длительность импульса от 0,1 до 1 мксек. Однако, если вместе

с точностью необходима большая дальность, приходится учитывать и другие соображения.

В станциях дальнего обнаружения, принимающих относительно слабый сигнал, обычно применяются импульсы с длительностью до 10 мксек. Это повышает среднюю мощность передатчика, а следовательно, и величину принимаемого сигнала относительно уровня шумов приемника.

Промежуток времени между двумя последовательными импульсами должен быть достаточно большим для того, чтобы избежать наложения на индикаторе последовательно поступающих отраженных сигналов.

С этой целью в станциях дальнего обнаружения используется низкая частота повторения импульсов примерно от 200 до 500 импульсов в секунду.

В станциях ближнего действия, использующих импульсы малой длительности для точного определения расстояния, желательно более высокая частота повторения импульсов. Часто это необходимо для поддержания постоянной величины средней мощности. В таких установках частота повторения импульсов берется в пределах 1000—2000 и более импульсов в секунду.

Измерение дальности

Основой измерения расстояния радиолокационным методом является определение времени между посылкой импульса передатчика и приемом соответствующего отраженного сигнала.

Это время, умноженное на половину скорости распространения волн, равно дальности до цели. 1 мксек соответствует 149,85 м, 6,673 мксек соответствует 1 км.

Изменение скорости распространения в воздухе в зависимости от атмосферных условий незначительно и практически не имеет значения.

Сравнительно простые радиолокационные станции обеспечивают измерение дальности с точностью 2—3%.

Точность станций, имеющих более сложные схемы и снабженных калибровочными устройствами, увеличивается в 10—20 раз.

Максимальная дальность действия станции зависит от ее назначения. Экспериментально были получены очень большие дальности (например, принят сигнал, отраженный от луны), однако практически для станций дальнего дей-

ствия не требуется дальность более 100—200 км, а для станций ближнего действия (например, орудийной наводки) — более $\frac{1}{5}$ этого расстояния.

Азимут и угол места

В радиолокационных станциях старых образцов, работавших в метровом диапазоне, азимут и угол места определялись путем сравнения фазы отраженного сигнала, принимаемого двумя или более диполями, расположенными раздельно.

В станциях сантиметрового диапазона азимут и угол места определяются при помощи направления радиолокационного луча на цель по максимуму принимаемого сигнала.

Этот способ обеспечивает точность от 2° до 5° . Более сложные методы определения направления антенны обеспечивают измерение угловых координат цели с точностью долей градуса (см. главу X).

ГЛАВА III

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ, КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Электрон является мельчайшей частицей, имеющей массу m , равную $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг (т. е. около $1/1840$ массы атома водорода). Он имеет отрицательный заряд e , равный $1,602 \cdot 10^{-19}$ кулона. Более точно, чем величины e и m в отдельности, известна величина, представляющая собой отношение заряда к массе $\frac{e}{m}$ и равная $1,759 \cdot 10^{11}$ к/кг.

Величина m вычислена для малых скоростей, так как согласно принципу относительности эффективная масса движущейся частицы увеличивается при увеличении скорости в соответствии с уравнением

$$\frac{m'}{m} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где m — масса при нулевой скорости;

m' — масса при скорости v ;

c — скорость света (приблизительно $3 \cdot 10^8$ м/сек). Увеличение массы в относительном смысле не имеет большого значения, если скорость мала по сравнению со скоростью света; например, если $v = \frac{c}{10}$, увеличение массы составит только 0,5%.

Электроны могут быть освобождены при нагревании излучающего тела (термоэлектронная эмиссия) или при столкновении электронов, движущихся с достаточной скоростью с другим телом, из которого выбиваются при этом «вторичные» электроны (вторичная эмиссия).

Термоэлектронная эмиссия

При нагревании тела средняя скорость электронов в нем повышается и любой электрон, обладающий скоростью, достаточной для преодоления электрической силы, стремящейся удержать его на поверхности тела, вырывается за пределы данного тела. Минимальная скорость, при которой электрон вырывается с поверхности тела, называется «работой выхода» и выражается в электронвольтах. Численное значение электронвольт характеризует величину скорости, которой должен обладать электрон для преодоления разности потенциала электрического поля в один вольт.

Эмиссия нагретого тела определяется формулой Дешмана

$$AT^2 e^{-\frac{W}{T}} \text{ а/с.м}^2,$$

где A и α — постоянные величины;

T — абсолютная температура (по шкале Кельвина);

W — работа выхода.

Для вольфрама $A = 60$, $\alpha = 11\,600$ и $W = 4,54$ в.

Эта формула справедлива для ламп, у которых все вылетающие с катода электроны достигают анода. Практически это условие выполняется не всегда. Образующееся около катода облако электронов (пространственный заряд) отталкивает часть электронов, которые должны были покинуть катод, уменьшая эмиссию.

В этом случае для катода и анода, выполненных в виде параллельных плоскостей, находящихся на расстоянии d см,

ток эмиссии равен $2,32 \frac{V^{3/2}}{d^2}$ мка/см², где V — напряжение между электродами. При этом предполагается, что температура катода достаточно высока и возможные ограничения, определяемые формулой Дешмана, отсутствуют.

Эмиссия катодов ламп

Наиболее распространенными являются катоды с оксидным покрытием (покрытие обычно состоит из смеси окиси бария и стронция и иногда кальция). Встречаются также катоды, выполненные из чистого вольфрама или из торированного вольфрама (содержащего небольшое количество окиси тория).

Чистый вольфрам употребляется только для специальных целей, например, в высоковольтных выпрямителях, когда никакой другой материал не подходит. Эмиссия, получаемая с катодов, выполненных из различных материалов, приведена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Материал	Рабочая температура, °К	Эмиссия, а/см ²	ма/вт
Чистый вольфрам . .	2500	0,26	4
Торированный вольфрам	1900—2000	1,2—2,8	50—100
Катод с оксидным покрытием	1000—1100	0,5—1,6	200—500

В таблице даны приблизительные значения максимальной эмиссии, получаемой при отсутствии ограничений, вызываемых пространственным зарядом. Фактические значения эмиссии могут значительно отличаться от табличных в зависимости от конструкции электродов, рабочей температуры катода и т. д. Катоды с оксидным покрытием, работающие в импульсном режиме, по эмиссии могут в 10—20 раз превышать вышеприведенные цифры.

Лампы, применяемые в радиолокационных станциях

Современные радиолокационные станции работают на частотах от 1000 до 10 000 Мгц и, естественно, требования, предъявляемые к лампам этих станций, отличны от требований, предъявляемых к лампам, используемым в аппаратуре обычной радиосвязи. Практически на данных частотах требуется обеспечить работу только ограниченного числа ламп. На передающей стороне такой лампой является только генераторная, так как последующего усиления колебаний не производится. На приемной стороне обычно с помощью кристаллического диода высокочастотный сигнал без предварительного усиления преобразуется в сигнал промежуточной частоты. В более ранних образцах радиолокационных станций применялось усиление высокочастотного сигнала, что требовало специальных устройств, обладающих достаточно высоким к. п. д. на этих частотах.

Остальные части станции обычно могут использовать стандартные радиолампы, так как рабочие частоты в них не превосходят 50 Мгц (промежуточная частота), а во многих устройствах и ниже. Следует заметить, однако, что в некоторых устройствах станции токи и напряжения имеют импульсный характер с относительно большой скважностью. Поэтому лампы должны выдерживать большие пиковые токи и напряжения, хотя средняя величина нагрузок мала.

Ограничения триодов, работающих на высоких частотах

Работоспособность триодов на относительно высоких частотах ухудшается из-за эффекта Миллера, заключающегося в увеличении полной входной проводимости лампы (т. е. в цепи сетка — катод) и уменьшении коэффициента усиления каскада из-за обратной связи через межэлектродную емкость анод — сетка.

При еще более высоких частотах возникает резонанс, определяемый индуктивностью выводов и межэлектродными емкостями. Дальнейшее ухудшение работы лампы вызывается тем, что изменение плотности потока электронов, достигающих анода, происходит не в фазе с изменением напряжения на сетке из-за наличия определенного времени пролета электронов. Это приводит не только к ухудшению работы, но и к полному отказу при сверхвысоких частотах.

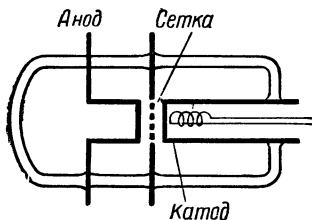
Лампы с дисковым впаем

На рис. 3.1 схематически изображена конструкция лампы, в которой отсутствуют недостатки, свойственные обычному триоду. Выводы анода и сетки выполнены в виде круглых дисков, впаянных в стеклянный баллон. Это обеспечивает малую индуктивность и способствует лучшему тепловому рассеянию. Расположение электродов обеспечивает малую величину емкости, а крайне малые межэлектродные расстояния, часто менее миллиметра, значительно сокращают время пролета электронов.

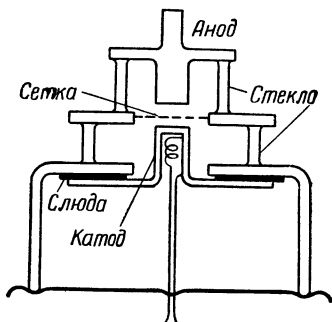
Время пролета электронов может быть также уменьшено при увеличении анодного напряжения и при работе с большой плотностью пространственного заряда.

Так как большинство радиолокационных ламп, к которым относятся эти соображения, работают в импульсном

режиме, с относительно продолжительным нерабочим временем, появляется возможность осуществить их работу со значительно повышенными токами и напряжениями, чем в непрерывном режиме.



Р и с. 3.1. Лампа с дисковым впаем



Р и с. 3.2. Маячковая лампа

Цепями накала мощность потребляется непрерывно и составляет значительный процент от общего потребления энергии. Поэтому целесообразно применение оксидных катодов, которые потребляют относительно малую мощность на накал, что способствует лучшему рассеянию тепла.

Маячковые лампы

Маячковые лампы имеют те же преимущества, что и лампы с дисковым впаем. Схематическое устройство маячковой лампы представлено на рис. 3.2.

Характеристика специальных триодов

Лампы, описанные выше, работая в двухтактной (пуш-пульной) схеме, могут давать выходную импульсную мощность до 200 кВт на частоте 600 Мгц. Другие типы ламп рассчитаны на половинную мощность при работе на удвоенной частоте.

Лампы меньших размеров обеспечивают выходную импульсную мощность 500 вт (пиковая мощность) на ча-

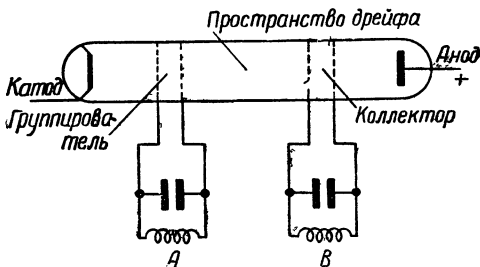
стоте 3000 Мгц. Они работают так же, как усилители, с достаточно высоким к. п. д.

Если входное напряжение приложено между сеткой и катодом, а выходное напряжение снимается между сеткой и анодом, то сетка будет являться экраном между анодом и катодом, уменьшая величину обратной связи между выходной и входной цепями. Такая схема известна под названием «схемы с заземленной сеткой».

КЛИСТРОН

Клистроном называется лампа, использующая принцип модуляции электронного пучка по скорости, действие которой зависит от времени пролета электронов. Принцип действия клистрона можно объяснить с помощью рис. 3.3, на котором изображена лампа, имеющая катод, анод и две пары сеток. Каждая пара сеток имеет собственный резонансный контур.

Электроны, излучаемые катодом, проходят через первую пару сеток, называемых «группирователем». В зависимости от фазы высокочастотного напряжения в цепи А движение электронов либо ускоряется, либо замедляется. Поэтому электроны, пройдя через первую пару сеток, будут иметь разную скорость и, следовательно, образуют в пространстве дрейфа группы движущихся электронов.



Р и с. 3.3. Схема устройства клистрона

Когда электроны проходят через вторую пару сеток (коллектор), возбуждается второй резонансный контур В.

Если устройство соответствующим образом рассчитано, то клистрон будет работать в качестве усилителя, в кото-

ром входное напряжение подается в контур А, а выходное — снимается с контура В. Если же обеспечить необходимую обратную связь от В к А, то устройство будет являться генератором.

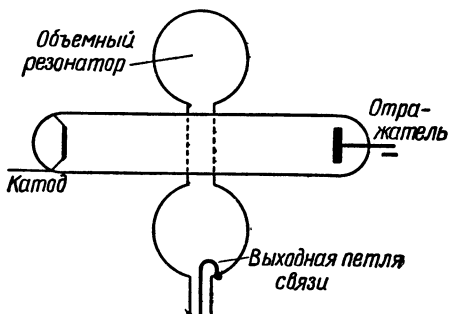
Используя объемные резонаторы, часто называемые «резонансными разрядниками», вместо сосредоточенной индуктивности и емкости можно создать генераторы с мощностью в несколько киловатт на частотах в несколько тысяч мегациклов. Однако в радиолокационной технике такие генераторные схемы не нашли широкого применения, так как они значительно уступают магнетронам.

Отражательный клистрон

В отражательном клистроне, схематически представленном на рис. 3.4, имеется один объемный резонатор, действующий как анод и заменяющий входной и выходной резонаторы ранее описанного клистрона. Отражательный клистрон вместо обычного анода имеет электрод, называемый отражателем, напряжение которого поддерживается отрицательным по отношению к катоду.

Здесь электроны, как и в схеме рис. 3.3, проходят через сетки, затем под действием отражателя меняют направление своего движения, проходя через сетки (выполняющие теперь роль коллектора) второй раз, и сосредоточиваются на стенках объемного резонатора.

Преимущество отражательного клистрона, работающего в качестве генератора, состоит в наличии у него един-



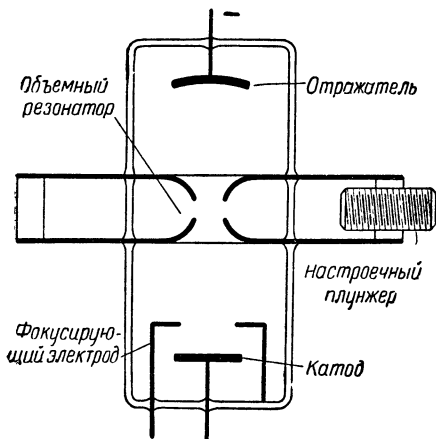
Р и с. 3.4. Отражательный клистрон

ственного настраиваемого контура. Незначительные изменения частоты обеспечиваются изменением напряжения отражателя, при этом увеличению отрицательного напряжения соответствует повышение частоты. Диапазон настройки, получаемый таким образом, довольно узкий — порядка 1%. Но этого достаточно для целого ряда случаев и особенно целесообразно при автоматической регулировке частоты.

Конструкция клистронов

В клистронах 10-см диапазона вполне возможно использование дискового впа (рис. 3.5). В этой конструкции часть резонатора, помещаемая внутри баллона клистрона, делается проходной, при этом отверстия выполняют роль сеток. Значительная часть резонатора располагается снаружи баллона, представляя собой мощный цилиндр, заключенный между двумя дисками. Для грубой регулировки частоты цилиндр имеет от 4 до 6 латунных плунжеров. Мощность снимается с помощью витка связи, находящегося внутри.

Резонатор для 3-см диапазона целиком помещается внутри стеклянного баллона. Грубая настройка дости-



Р и с. 3.5. Отражательный клистрон 10-см диапазона

гается изменением емкости между двумя отверстиями, которые передвигаются относительно друг друга. Центральная часть объема, в котором находятся отверстия, делается для этого достаточно гибкой. Движение снаружи передается через эластичную мембрану, образующую верхнюю часть баллона.

Входная и выходная мощности

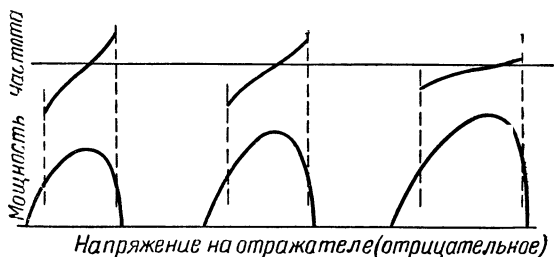
Мощность изменяется в зависимости от типа ламп, и приводимые ниже цифры дают лишь грубое представление о характере ее изменения. Например, десятисантиметровый клистрон обладает выходной мощностью от 100 до 200 *вт* при потребляемой мощности от 5 до 10 *вт* и напряжении 250 *в*. Отрицательное напряжение отражателя составляет 150—200 *в* по отношению к катоду.

Трехсантиметровые лампы обладают примерно $\frac{1}{4}$ вышеуказанной мощности. Однако это вполне достаточно для местного гетеродина приемника.

Электронная настройка и режимы генерации клистрона

Изменение напряжения на отражателе на один вольт приводит к изменению частоты на 1—2 *Мгц* соответственно в десяти или трехсантиметровом диапазоне. Полный диапазон изменения частоты практически достигает величины от 20 до 40 *Мгц*. Для достижения максимальной выходной мощности время между первым и вторым пролетом электронов мимо сетки или в отверстии резонатора должно приблизительно составлять $N + \frac{3}{4}$ цикла, где $N = 0, 1, 2, 3$ и т. д. Различные значения N соответствуют режимам по напряжению. Чем больше величина отрицательного напряжения на отражателе, тем меньше величина N и больше выходная мощность. Эта зависимость графически представлена на рис. 3.6.

Диапазон электронной настройки для любого из режимов определяется общей разностью частот между двумя точками на кривой (по обе стороны от максимального значения), при которых выходная мощность составляет $\frac{1}{2}$ максимальной величины для данного режима. Режим, соответствующий большим значениям отрицательного напряжения на отражателе, характеризуется большей мощностью и меньшим диапазоном перестройки. Выбор режима



Р и с. 3.6. Графическая зависимость выходной мощности и частоты клистрона от изменения напряжения на отражателе

должен осуществляться компромиссно между величиной мощности и диапазоном перестройки.

Следует заметить, что нельзя путать эти режимы по напряжению с различными режимами генерирования обычного резонатора, соответствующих различным конфигурациям магнитных и электрических полей внутри резонатора.

МАГНЕТРОН

В радиолокационных передатчиках сантиметрового диапазона широкое применение нашли мощные магнетроны с объемными резонаторами, используемые как генераторы колебаний. Действие подобных генераторов зависит от времени пролета электронов, пересекающих электрические и магнитные поля. Другие типы генераторов, называемых также магнетронами, не используются в радиолокационной технике.

Движение электронов в электрическом поле

На электроны, помещенные в электрическое поле с напряженностью Ve/m , действует сила Ve ньютон, где e — заряд электрона. Направление действия этой силы, параллельное направлению поля, таково, что заставляет электроны двигаться от более отрицательного к более положительному потенциалу. Действие силы вызывает ускорение Ve/m , где m — масса электрона. Таким образом, электрон в электрическом поле стремится двигаться так же, как и любое тело под влиянием силы притяжения.

Движение электронов в магнитном поле

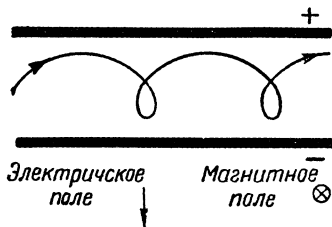
Электрон, движущийся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B под прямым углом к направлению силовых линий, подвергается действию силы Bev , направленной под прямым углом как к магнитному полю, так и к направлению движения электронов.

Так как эта сила действует всегда под прямым углом к направлению движения, магнитное поле, в противоположность электрическому, не может изменять скорость движения электронов, но может изменять направление их движения. Электрон в магнитном поле при отсутствии электрического будет двигаться по кругу, радиус которого определяется элементарными законами механики и оказывается равным mv/Be . Время одного пролета электрона по кругу, равное $2\pi m/Be$, не зависит от радиуса, а зависит только от напряженности магнитного поля. Плоскость, в которой движется электрон, перпендикулярна направлению поля. Для современных магнетронов время пролета электрона по кругу составляет $10^{-4} - 10^{-3}$ мксек.

Если электрон имеет начальную составляющую скорости в направлении магнитного поля, то в сочетании с круговым движением под воздействием магнитного поля движение электрона будет происходить по спирали.

Движение электронов в пересекающихся электрическом и магнитном полях

Движение электрона в электрическом и магнитном полях, расположенных друг к другу под прямым углом, более сложное. Электрическое поле стремится заставить



Р и с. 3.7. Движение электронов в пересекающихся электрическом и магнитном полях

электрон двигаться параллельно направлению поля с увеличивающейся скоростью, в то время как магнитное поле заставляет электрон двигаться по кругу. Результатом этого является циклоидальное движение электрона, изображенное на рис. 3.7. Форма траектории зависит от начальной скорости движения электрона. Средняя скорость движения электрона равна E/B , направление движения горизонтальное, т. е. под прямым углом к обоим полям. Вертикальная составляющая скорости в среднем равна нулю. Электрон не стремится, как это можно было бы предположить, двигаться в направлении положительного электрода, наоборот, он стремится двигаться по эквипотенциальной кривой.

Конструкция магнетрона

Схема устройства магнетрона с объемным резонатором представлена на рис. 3.8. Точками около катода изображено электронное облако.

Анод и катод имеют цилиндрическую форму. Анод делается из меди высокой проводимости и имеет ряд радиально расположенных щелей, соединенных, как показано на рисунке, с резонаторами. Эти резонаторы имеют распределенную индуктивность и емкость и образуют настроенные контуры. Типичная конструкция такого магне-

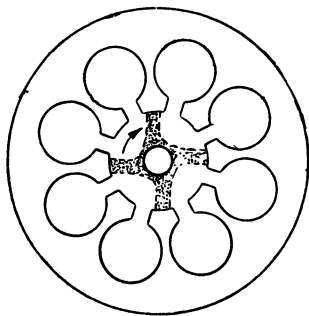
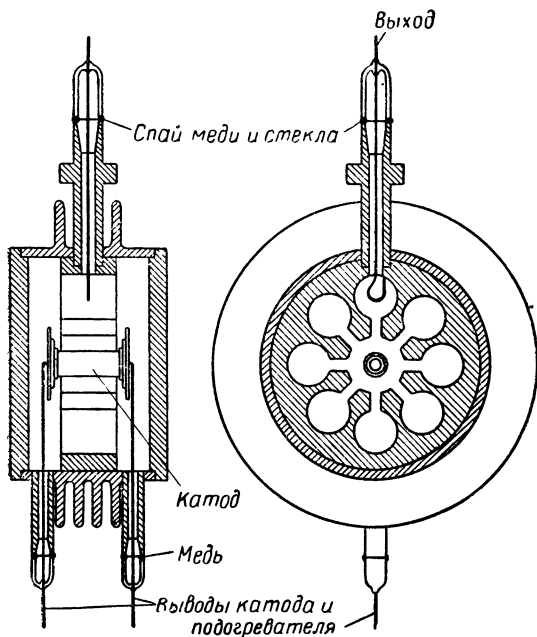


Рис. 3.8. Схема устройства магнетрона с объемным резонатором (точками около катода изображено электронное облако)

трона представлена на рис. 3.9. Осевое магнитное поле создается внешним постоянным магнитом. Иногда магнит является составной частью магнетрона. Такие магнетроны носят название пакетированных магнетронов.



Р и с. 3.9. Типичная конструкция магнетрона

Для работы магнетрона необходимо постоянство величины напряженности магнитного поля, поэтому при эксплуатации магнетронов требуется особенно аккуратное обращение с магнитом.

Нельзя подвергать магнит ударам, воздействию внешних магнитных полей, а также нельзя допускать соприкосновения с магнитными предметами, например стальным инструментом.

Мощность обычно снимается с помощью витка связи, помещенного в один из резонаторов. В некоторых случаях, особенно при работе на коротких волнах, щель в одном из резонаторов непосредственно соединяется с волноводом. Такое устройство выводов энергии возможно потому, что объемные резонаторы связаны между собой своими полями, представляя как бы общий источник энергии.

Катоды магнетрона

Для работы магнетрона требуется высокая пиковая величина эмиссии. Для этой цели более всего подходят оксидные катоды, обеспечивающие высокую эмиссию в импульсном режиме. Другим важнейшим фактором, определяющим высокую эмиссию, является вторичная эмиссия, создаваемая электронами, возвращающимися на катод. Эти электроны, ударяясь о катод, выбивают из него другие электроны.

Бомбардировка катода возвращающимися электронами создает достаточный разогрев его, и в некоторых типах магнетронов оказывается необходимым уменьшать накал магнетрона во избежание разрушения катода из-за перегрева.

Принцип действия магнетрона

В работающем магнетроне между анодом и катодом приложено постоянное электрическое поле, а высокочастотное поле, возникающее при генерировании, приложено между смежными анодными сегментами. В любой момент последовательные сегменты в соответствии с высокочастотным полем попеременно положительны и отрицательны.

Пространственный заряд имеет форму колеса со спицами, которое вращается с такой скоростью, что каждая «спица» проходит два анодных сегмента за цикл генерации (рис. 3.8). Часть электронов облака возвращается на катод вскоре после того, как покинет его (благодаря действию магнитного поля, отклоняющего их в сторону катода); другая часть электронов благодаря большей скорости или более удачному расположению в конце концов достигает анода.

Часть из них попадает на сегменты, которые в данный момент имеют положительный высокочастотный потенциал. Другая часть электронов попадает на отрицательные сегменты и отталкивается высокочастотным полем, отда-

вая ему некоторое количество своей энергии. Можно показать, что количество электронов, достигающих сегменты с отрицательным высокочастотным потенциалом, больше, чем количество электронов, попадающих на сегменты с положительным потенциалом. Из этого следует, что радиочастотное поле испытывает усиление энергии, создаваемой первоначально действием поля постоянного тока на электроны.

Следовательно, возможно поддерживать генерирование на частоте, определяемой главным образом резонансной частотой резонатора.

Напряжение отсечки, пороговое и нестабильное напряжение

Стремление электронов к катоду под действием магнитного поля при отсутствии колебаний предотвращает возможность попадания их на анод до тех пор, пока напряжение цепи анод — катод не достигнет определенной величины, называемой критической.

Для цилиндрического магнетрона величина критического напряжения (напряжения отсечки) определяется по формуле

$$\frac{eB^2r_a^2}{8m} [1 - (r_c/r_a)^2]^2,$$

где r_a и r_c — радиусы анода и катода.

Однако в магнетроне с объемным резонатором любое возмущение может вызвать начало генерирования при условии, если напряжение превысит величину так называемого нестабильного напряжения. Возникнув, колебания могут поддерживаться, если напряжение превышает пороговое напряжение. Оба эти напряжения меньше критического напряжения.

Пороговое напряжение определяется по формуле

$$\frac{\pi cr_a^2}{n\lambda} [1 - (r_c/r_a)^2] B - \frac{2\pi^2 c^2 r_a^2 m}{e\lambda^2 n^2},$$

где c — скорость света;

λ — длина волны;

n — номер вида колебания.

Нестабильное напряжение в большинстве случаев почти равно пороговому.

Виды колебаний

Высокочастотные напряжения на соседних анодных сегментах различаются по фазе на π радиан, т. е. на один полупериод.

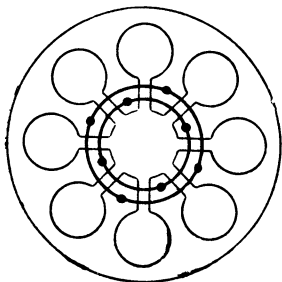
Число полных волн высокочастотного потенциала на всех анодных сегментах равно $n = N/2$, где N — число сегментов. Этот вид колебаний называется π -видом.

Система, состоящая из N отдельных резонансных систем, связанных вместе, может генерировать N типов волн. Каждый из этих видов волн соответствует различному распределению потенциала на аноде, причем разность фаз между соседними сегментами отлична от величины π . Такие виды колебаний нежелательны, так как каждый из них может возникать на любой из двух близких, но не равных частотах, что приводит к возможному перескакиванию с одного вида на другой, обуславливая неустойчивый режим.

Колебания π -вида соответствуют одной частоте и всегда используются на практике. Частоты всех видов примерно равны.

Соединением между собой всех четных и соответственно нечетных анодных сегментов, как показано на рис. 3.10, обеспечивается устойчивая генерация колебаний π -вида.

Такое соединение называется связкой.



Р и с. 3.10. Связки в магнетроне

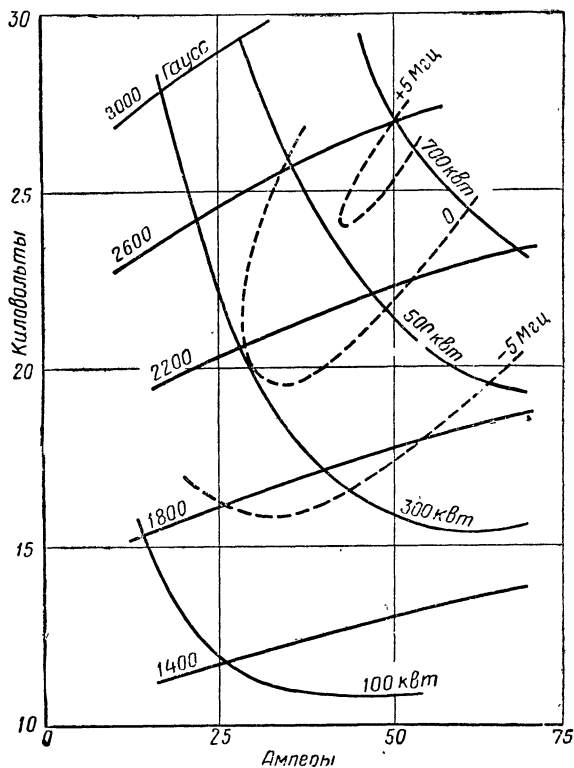
Влияние нагрузки. Величина затягивания

Недостаточно точное согласование нагрузки и фидера с магнетроном влияет на мощность магнетрона и частоту колебаний. Степень влияния зависит от величины КСВ и фазы. Практически фидер всегда не очень точно согласован с магнетроном. Однако принято считать, что для специальных установок достаточно, когда КСВ равен заданной величине независимо от фазы. Общее изменение частоты, которое может иметь место при изменении

нагрузки и КСВ, не превышающем 1,5, называется величиной затягивания. В практических случаях эта величина примерно равна 0,1—0,2%.

Входная мощность

Влияние изменения входной мощности, магнитного поля и т. д. иллюстрируется рис. 3.11. Эта диаграмма,



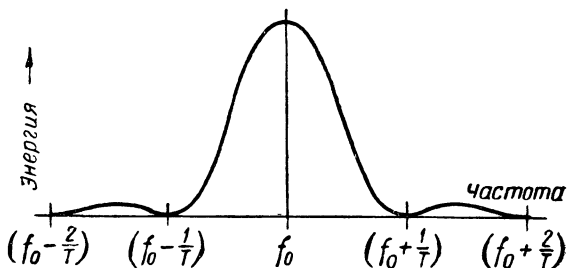
Р и с. 3.11. Типовые характеристики магнетрона

представляющая собой характеристические кривые, составлена для определенного магнетрона.

Диаграммы для разных магнетронов, естественно, различны, но характер их одинаков. Частота изменяется в зависимости от величины входной мощности; изменение частоты в мегагерцах на амперы называется величиной ухода частоты при изменении режима.

Частотный спектр магнетрона

Магнетрон, работающий в импульсном режиме, создает боковые полосы так же, как и несущую, аналогично любому модулированному генератору.



Р и с. 3.12. Частотный спектр импульсного магнетрона

Теоретически эти полосы простираются от нуля до бесконечности, но большая часть энергии сосредоточена в полосе шириной $2/T$ мегагерц, где T — длительность импульсов в микросекундах. Спектр частот магнетрона изображен на рис. 3.12. Для воспроизведения импульса с достаточной точностью приемник должен иметь полосу пропускания по крайней мере $2/T$.

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ТРИОДЫ (ТИРАТРОНЫ)

В радиолокационных станциях тиратроны используются главным образом как «выключатели» в модуляторных устройствах. Маломощные тиратроны применяются также в вспомогательных цепях управления.

Если отрицательное смещение на сетке тиратрона достаточно велико, ток в лампе отсутствует. При определенной, меньшей, величине смещения в тиратроне появляется ток, так же как в обычном триоде. Наступающая при возникновении тока ионизация газа приводит к сильному возрастанию тока (появляется дуговой разряд), а напряжение на аноде падает.

Отношение анодного напряжения к отрицательному напряжению на сетке, при котором наступает разряд, является постоянной величиной в пределах большей части характеристики. Это отношение называется коэффициентом управления.

Как только начинается разряд, сетка теряет возможность управления и погасить тиратрон можно только уменьшая анодное напряжение до величины, меньшей потенциала зажигания. Исключением из этого общего правила является разряд, протекающий при незначительной плотности тока и низком давлении газа. В этом случае, приложив большое отрицательное напряжение на сетку, можно погасить тиратрон.

Наиболее употребительными газами для заполнения тиратронов являются пары ртути и водород. Ток разряда в парах ртути не может возрастать со скоростью, большей чем 1000 *а/мксек*, и время деионизации ограничивает допустимую величину частоты повторения импульсов примерно до 1000 в секунду.

Большое значение имеет величина давления среды в тиратроне и, следовательно, температура. Слишком низкое давление приводит к чрезмерно большому времени зажигания, в то время как высокое давление уменьшает максимальное анодное напряжение. Температура среды в тиратроне не должна превышать 45—60° С.

В тиратроне, наполненном водородом, благодаря меньшей массе молекул водорода и их сравнительно большей подвижности скорость нарастания тока составляет 2500 *а/мксек*, а допустимая частота повторения импульсов — 3000—4000 в секунду.

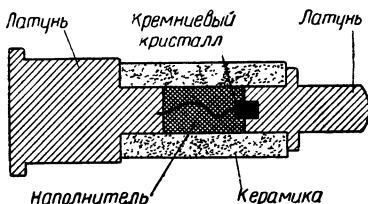
В течение времени разряда, когда тиратрон проводит ток, падение напряжения для паров ртути составляет 12—15 в, для водорода — 60—70 в.

В импульсном режиме тиратрон может работать при пиковом значении тока порядка нескольких сотен ампер. Для ограничения тока сетки тиратрон иногда снабжается дополнительным экранирующим электродом.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИОДЫ

Кристаллы обычно используются в качестве смесителей в сантиметровых радиолокационных приемниках, так как на этих частотах они имеют преимущества по сравнению с электронными лампами.

Наилучшим смесителем является кремниевый кристалл с вольфрамовым пружинным контактом, закрепленным внутри корпуса, как показано на рис. 3.13. Контактная пружина прочно закреплена в герметизированном корпусе.



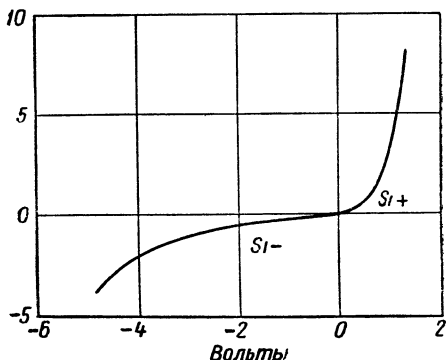
Р и с. 3.13. Кристаллический диод

Все устройство отличается достаточной прочностью и надежностью в эксплуатации.

Параметры кристалла зависят от примесей, вводимых в определенном количестве при производстве кристаллов. Потери преобразования уменьшаются при введении 0,005% бора; способность выдерживать перегрузку по току может быть увеличена при добавлении 0,1—0,2% алюминия или бериллия.

На рис. 3.14 изображена вольтамперная характеристика обычного кремниевого кристалла. Искусственные кристаллы имеют соотношение обратного и прямого сопротивления порядка 10 ом при величине обратного сопротивления от 200 до 300 ом. Эти кристаллы могут работать в диапазоне частот до 10 000 Мгц.

При низком входном напряжении кристалл ведет себя как квадратичный детектор. Однако при использовании кристалла в качестве смесителя требуется достаточно высокое входное напряжение, подаваемое от местного генератора — гетеродина. В этом случае работа происходит в прямолинейной части характеристики, и кристалл ана-



Р и с. 3.14. Вольтамперная характеристика кремниевого кристалла

логичен линейному детектору с достаточно хорошим к. п. д. Постоянная составляющая тока в этом случае достигает 0,5—1 *ма*.

Способность кристалла к перегрузкам

При чрезмерно большом токе наступает явление выгорания кристалла. Так как теплоемкость контактов очень мала, то предельно допустимый режим определяется общей входной энергией, а не величиной тока. Практически безопасной величиной энергии, не приводящей к выгоранию, является один эрг (10^{-7} джоулей).

Германиевые кристаллические диоды

Германиевые диоды нельзя сделать с такой же малой контактной емкостью, как кремниевые, поэтому граничная частота для них составляет около 100 *Мгц*. При работе на более низких частотах к. п. д. германиевых диодов больше, чем у кремниевых, главным образом из-за их низкого сопротивления. Германиевые диоды выдерживают значительно большее обратное напряжение (до 100—200 *в*) по сравнению с кремниевыми (4 *в*). Германиевые кристаллы используются в качестве второго детектора в супергетеродинном приемнике.

Кристаллические триоды (транзисторы)

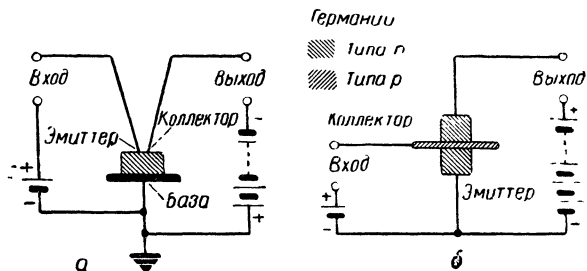
Германиевые кристаллы используются не только как детекторы, но и как усилители.

Достаточно чистый германий (не более 1 части примесей на 10^8 частей германия) подвергается обработке, при которой вносится необходимое количество примесей различного характера. Часть из них создает избыток электронов в германии, другая часть — недостаток электронов (называемый «положительными дырками»). Получающиеся в результате два типа кристаллов называются соответственно германием типа n и германием типа p .

В первом типе транзисторов (точечные транзисторы) контакты располагаются очень близко один к другому, как это схематически представлено на рис. 3.15, *а*. Входной контакт называется эмиттером, выходной — коллектором.

Второй тип транзисторов, называемых «плоскостными» (рис. 3.15, *б*), состоит из слоя германия типа p , расположенного между двумя кристаллами типа n (или наоборот, при обратной полярности батарей).

Действие транзисторов до сих пор еще не полностью объяснено, однако в некоторых случаях их применение более эффективно, чем применение электронных ламп.



Р и с. 3.15. Транзисторы:
а — точечный транзистор; *б* — плоскостной транзистор

Точечные транзисторы работают удовлетворительно при частотах до 200—300 $M\mu$ с коэффициентом усиления по мощности 20 $дб$. Плоскостные транзисторы имеют меньший к. п. д. на высоких частотах, но работа их более эффективна и стабильна по сравнению с точечными транзисторами на средних частотах. При этом их коэффициент усиления по мощности достигает 40 $дб$.

ГЛАВА IV

РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ

Хотя токи и напряжения в цепях радиолокационных станций изменяются периодически, в том смысле, что кривая этих изменений периодически повторяется, практически эту закономерность можно использовать в расчете только некоторых цепей. Проще рассматривать процессы в большинстве цепей как неустановившиеся, происходящие в такой короткий промежуток по сравнению с нерабочим временем, что их можно считать изолированными явлениями.

Синусоидально изменяющиеся напряжения и токи

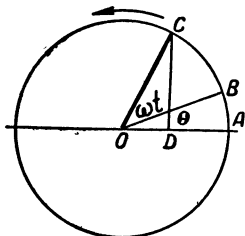
Простейшую форму напряжения переменного тока имеет напряжение, синусоидально изменяющееся во времени. Величина такого напряжения в момент t может быть представлена формулой $v = V \sin \omega t$, где v — мгновенная величина напряжения, V — пиковая или амплитудная величина напряжения и $\omega = 2\pi f$, где f — частота. В этом выражении отсчет времени ведется от момента прохождения напряжения через нуль. В более общем виде напряжение определяется уравнением $v = V \sin (\omega t + \theta)$, где θ — произвольное значение фазового угла, зависящее от принятого начального момента времени.

Графическое изображение

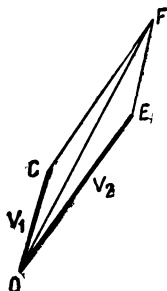
На рис. 4.1 окружность имеет радиус, соответствующий V , угол $BOA = \theta$, угол $COB = \omega t$. Радиус OC можно рассматривать как непрерывно вращающийся в направлении против часовой стрелки с угловой скоростью ω . Мгновенное напряжение $v = V \sin (\omega t + \theta)$ изображается вер-

тикальной линией CD, т. е. определяется высотой в данный момент времени точки C над горизонтальной линией, проведенной через центр окружности.

При наличии двух напряжений той же частоты, но различающихся по величине и фазе, например $v_1 = V_1 \sin(\omega t + \theta_1)$ и $v_2 = V_2 \sin(\omega t + \theta_2)$, можно графич-



Р и с. 4.1. Представление синусоидального тока или напряжения вращающимся вектором



Р и с. 4.2. Векторное сложение напряжений

чески найти их сумму, как это показано на рис. 4.2, где OC, OE и OF представляют соответственно V_1 , V_2 и результирующее напряжение; COEF представляет собой параллелограм, в котором стороны OC и OE наклонены к горизонтальной линии соответственно под углами θ_1 и θ_2 .

Ниже приводится математическое решение задачи сложения двух напряжений:

$$V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + V_2 \sin(\omega t + \theta_2) = V_3 \sin(\omega t + \theta_3),$$

где

$$V_3^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

и

$$\operatorname{tg} \theta_3 = \frac{V_1 \sin \theta_1 + V_2 \sin \theta_2}{V_1 \cos \theta_1 + V_2 \cos \theta_2}.$$

Такой же метод решения применим и к токам.

Активное, реактивное и полное сопротивления

Падение напряжения на активном (омическом) сопротивлении R , по которому течет ток $i = I \sin(\omega t + \theta)$, определяется по закону Ома:

$$v = V \sin(\omega t + \theta),$$

где $V = IR$.

В случае чистого индуктивного сопротивления L (активное сопротивление равно нулю) напряжение пропорционально скорости изменения тока и равно

$$v = \omega LI \cos(\omega t + \theta) = \omega LI \sin(\omega t + \theta + 90^\circ).$$

Изменение фазы равно 90° . Величина ωL , зависящая от частоты, называется реактивным сопротивлением цепи.

В цепи с емкостью C ток пропорционален скорости изменения напряжения, и выражение принимает вид

$$v = I/\omega C \sin(\omega t + \theta - 90^\circ).$$

Величина $1/\omega C$ является реактивным сопротивлением. Изменение фазы в этом случае отрицательно.

Таким образом, можно сделать вывод, что активное сопротивление подчиняется закону Ома. Когда же применяют закон Ома к цепи, содержащей индуктивности или емкости, то необходимо пользоваться понятием реактивного сопротивления* (ωL для индуктивности и $1/\omega C$ для емкости) и учитывать изменение фазы на 90° . В случае индуктивности напряжение опережает ток на 90° и отстает на ту же величину в случае емкости. При этих условиях становится возможным применить графический метод для расчета цепей, содержащих индуктивное и емкостное сопротивления.

Оператор j

Оператор $j = \sqrt{-1}$ является мнимой величиной. Выражения, содержащие коэффициент j , называются мнимыми, не содержащие j — действительными или вещественными; выражения, часть которых содержит j , называются комплексными.

Это математическое представление удобно для вычислений, если принять, что

$$j \sin(\omega t + \theta) = \cos(\omega t + \theta)$$

и

$$j \cos(\omega t + \theta) = -\sin(\omega t + \theta),$$

а реактивное сопротивление катушки индуктивности считать равным $j\omega L$ и конденсатора $-j/\omega C$. Например, напряжение цепи, содержащей $R_1 L$ и C , соединенных последовательно, по которым протекает ток $i = I \sin(\omega t + \theta)$, будет выражаться следующим равенством:

$$\begin{aligned} (R + j\omega L - j/\omega C) I \sin(\omega t + \theta) = \\ = RI \sin(\omega t + \theta) + I(\omega L - 1/\omega C) \cos(\omega t + \theta). \end{aligned}$$

Этот метод применим для расчета напряжений и токов в любой цепи как постоянного, так и переменного тока при условии, что для каждого элемента цепи активное (омическое) сопротивление R изменяется выражением $R + j\omega L - j/\omega C$ и j исключается в конце расчета, заменяя синус на косинус или наоборот в соответствии с необходимостью (при этом j^2 заменяется -1 , $j^3 = -j$, $j^4 = 1$ и т. д.).

Величина $R + j\omega L - j/\omega C$ называется полным сопротивлением цепи и обозначается обычно буквой Z . Величина $\omega L - j/\omega C$ представляет собой реактивное сопротивление и обычно обозначается буквой X . Таким образом, $Z = R + jX$.

Полная проводимость, активная и реактивная проводимости

Величина, обратная полному сопротивлению, называется полной проводимостью и обозначается обычно буквой Y . Можно написать равенство $Y = G + jB$, где G — активная проводимость, B — реактивная проводимость.

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{(R + jX)(R - jX)} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2},$$

откуда

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}, \quad B = \frac{-X}{R^2 + X^2}$$

и обратно

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2}, \quad X = \frac{-B}{G^2 + B^2}.$$

Экспонента $e^{j\omega t}$

Можно показать математически, что $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$, где $e = 2,71828\dots$ — основание натуральных или неперовых логарифмов. Часто в выражениях, содержащих $\cos \omega t$, проще употреблять при расчете оператор $e^{j\omega t}$ и заменять его эквивалентом в конце расчета, отбросив все мнимые члены. Соответственно при наличии $\sin \omega t$ процесс расчета тот же самый, но в конце расчета необходимо отбросить все действительные члены полученного выражения.

Примеры.

1. Необходимо найти напряжение цепи, содержащей R и L , соединенных последовательно, по которым течет ток с амплитудой I . Пусть $i = I \cos \omega t$. Примем $i = I e^{j\omega t}$, тогда напряжение выразится равенством

$$\begin{aligned} (R + j\omega L) I e^{j\omega t} &= (R + j\omega L) I (\cos \omega t + j \sin \omega t) = \\ &= RI \cos \omega t - \omega LI \sin \omega t + j(\omega LI \cos \omega t + RI \sin \omega t), \end{aligned}$$

которое после исключения мнимой части примет вид

$$RI \cos \omega t - \omega LI \sin \omega t.$$

2. Предположим, что напряжение $V \sin \omega t$ приложено к цепи, содержащей последовательно соединенные R и C . Необходимо определить ток.

В этом случае напряжение будет выражаться мнимой частью величины $V e^{j\omega t}$.

Ток определяется из уравнения

$$\begin{aligned} \frac{V e^{j\omega t}}{R - j/\omega C} &= \frac{V \omega C e^{j\omega t}}{R \omega C - j} = \frac{V \omega C e^{j\omega t} (R \omega C + j)}{R^2 \omega^2 C^2 + 1} = \\ &= \frac{V \omega C (\cos \omega t + j \sin \omega t) (R \omega C + j)}{R^2 \omega^2 C^2 + 1} = \\ &= V \omega C \frac{R \omega C \cos \omega t - \sin \omega t}{R^2 \omega^2 C^2 + 1} + j V \omega C \frac{R \omega C \sin \omega t + \cos \omega t}{R^2 \omega^2 C^2 + 1}. \end{aligned}$$

Взяв мнимую часть выражения, получим значение тока

$$V \frac{R\omega^2 C^2 \sin \omega t + \omega C \cos \omega t}{R^2 \omega^2 C^2 + 1}.$$

Преимущества такого метода расчета недостаточно очевидны, если рассматривать простые примеры. Однако эти преимущества несомненны при расчете сложных электрических цепей.

Применение ряда Фурье

Напряжение переменного тока, изменяющееся не по закону синусоиды, может быть выражено следующим рядом.

$$\begin{aligned} V = & A_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \\ & + A_4 \sin 4\omega t + \dots B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + B_3 \cos 3\omega t + \\ & + B_4 \cos 4\omega t + \dots \end{aligned}$$

Член A_0 представляет собой постоянную составляющую тока и равен нулю, если положительная и отрицательная полуволны равны между собой. Члены, содержащие выражения $\sin \omega t$ или $\cos \omega t$ или одновременно те и другие, называются основными, в то время как остальные называются второй, третьей и т. д. гармониками. Частоты гармоник являются кратными частоте основного члена. Если известна форма волны, то значения коэффициентов A и B могут быть подсчитаны по следующим формулам:

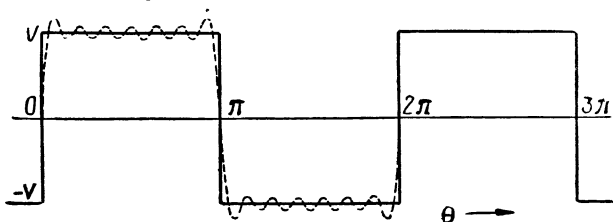
$$A_0 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} v dt; \quad A_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} v \sin n\omega t \cdot dt;$$

$$B_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} v \cos n\omega t \cdot dt.$$

Расчеты производятся для всех значений n , начиная с единицы. В общем случае будет бесконечное количество членов, но практически обычно достаточно взять несколько первых членов, причем число их зависит от конкретного случая.

Анализ напряжений прямоугольной и пилообразной формы

Напряжение прямоугольной формы (сплошная кривая на рис. 4.3) выражается бесконечным рядом Фурье, состоящим из суммы нечетных членов:

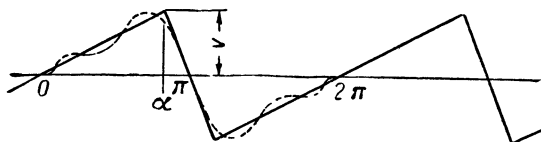


Р и с. 4.3. Напряжение прямоугольной формы (пунктирная кривая получена при пренебрежении всеми гармониками выше тринадцатой)

$$v = \frac{4V}{\pi} \left(\sin \theta + \frac{\sin 3\theta}{3} + \frac{\sin 5\theta}{5} + \frac{\sin 7\theta}{7} + \dots \right).$$

Анализ пилообразной формы кривой, показанной на рис. 4.4, приводит к следующему выражению:

$$v = \frac{2V}{\alpha(\pi - \alpha)} \left(\sin \alpha \sin \theta + \frac{\sin 2\alpha \sin 2\theta}{4} + \right. \\ \left. + \frac{\sin 3\alpha \sin 3\theta}{9} + \frac{\sin 4\alpha \sin 4\theta}{16} + \dots + \right. \\ \left. + \frac{\sin n\alpha \sin n\theta}{n^2} + \dots \right),$$



Р и с. 4.4. Напряжение пилообразной формы (пунктирная кривая получается при пренебрежении всеми гармониками выше третьей)

состоящему из суммы членов, в которых величина n изменяется от единицы до бесконечности.

Несмотря на то, что вышеприведенные выражения содержат бесконечное число членов, практически ошибка не будет значительной, если ограничиться конечным числом членов. Пунктирные кривые на рис. 4.3 и 4.4 получены расчетным путем отбрасывания всех гармоник выше тринадцатой для случая прямоугольной формы напряжения и выше третьей для пилообразной формы.

Необходимо заметить, что для получения более точной пилообразной формы требуется учесть большее число гармоник. Следствием анализа формы напряжения является прежде всего определение ширины полосы частот усилителя или другого устройства, исходя из требований точности воспроизведения формы кривой напряжения. Практически идеально прямоугольной формы напряжения не существует, так как невозможно получить бесконечно большую скорость изменения тока или напряжения в точках перегиба. Однако при принятии специальных мер можно получить форму кривой, достаточно близкую к прямоугольной.

Одиночный (непериодический) импульс

Дальнейший анализ, проводимый с помощью интеграла Фурье, показывает, что одиночный непериодический импульс содержит бесконечное число частот, расположенных на бесконечно малом расстоянии друг от друга.

Одиночный прямоугольный импульс (рис. 4.5) для-

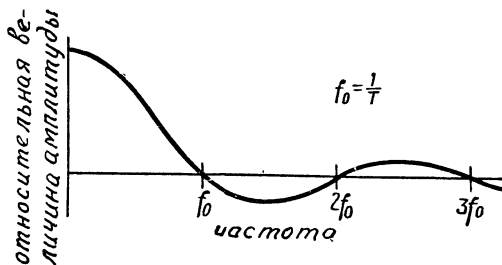


Рис. 4.5. Относительная величина амплитуд составляющих различных частот единичного импульса

тельностью T содержит все частоты от нуля до бесконечности, причем относительные величины составляющих различных частот определяются отношением

$$\frac{\sin \theta}{\theta},$$

где $\theta = \pi fT$, а f — частота компоненты. Если T измеряется в секундах или микросекундах, то f выражается соответственно в герцах или мегагерцах.

Пользуясь этим методом, можно подсчитать компоненты частот радиолокационного импульса, так как длительность импульса значительно меньше интервала между ними и импульс можно рассматривать как одиночный.

Анализ позволяет сделать вывод, что радиолокационный передатчик с теоретически идеальным генератором, вырабатывающим прямоугольные импульсы, излучает боковые полосы частот, расположенные справа и слева от теоретической частоты генератора, занимая практически диапазон, соответствующий величине $1/T$, выше и ниже несущей частоты.

Диапазон этих частот условно соответствует первой точке пересечения кривой с осью абсцисс на рис. 4.5.

Приемник и другие устройства должны пропускать эту полосу частот для того, чтобы сохранить достаточно точно форму импульса (см. также рис. 3.12).

Колебательные контуры

Если к контуру, изображенному на рис. 4.6, приложить возбуждающее напряжение, то генерация возникнет в том случае, если величина сопротивления не слишком велика.

Исходя из предположения, что конденсатор C был заряжен до напряжения V непосредственно перед замыканием цепи, напряжение на нем в любой момент времени t составит:

$$v = Ve^{-\alpha t} \cos \omega t,$$

где $\omega = 2\pi f$ и

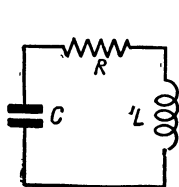
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2C}{4L}},$$

f — собственная частота колебаний контура;

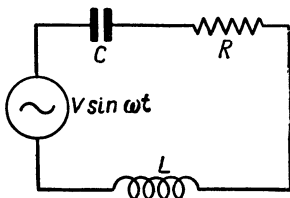
α — коэффициент затухания, равный $\frac{R}{2L}$.

Величина $\frac{\alpha}{f}$ называется логарифмическим декрементом. Он равен логарифму (при основании e) отношения соседних максимумов напряжения одного и того же знака.

Из выражения для частоты видно, что она становится мнимой, т. е. контур прекращает генерировать, если R^2 будет меньше $4L/C$. Если R равно этой величине, то говорят, что контур обладает критическим затуханием.



Р и с. 4.6. Простейший колебательный контур



Р и с. 4.7. Последовательный резонансный контур

Если контур постоянно соединен с источником переменного напряжения, имеющего частоту $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ как по-

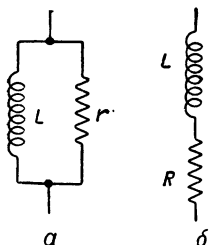
казано на рис. 4.7, то реактивное индуктивное сопротивление будет равно и противоположно по знаку реактивному емкостному сопротивлению, а полное сопротивление контура выразится величиной R . Ток будет равен $(V/R) \sin \omega t$.

Падение напряжения на индуктивности, по которой течет этот ток, выражается величиной $V (\omega L/R) \cos \omega t$, откуда отношение падения напряжения на индуктивности к величине напряжения, приложенного к контуру, равно $\omega L/R$. Практически индуктивность всегда обладает омическим сопротивлением, поэтому отношение $\omega L/R$ определяет добротность контура и обычно обозначается буквой Q .

Частота $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ называется резонансной частотой контура. Собственная частота несколько ниже, но разница незначительна, если затухание мало.

Последовательное и параллельное затухание

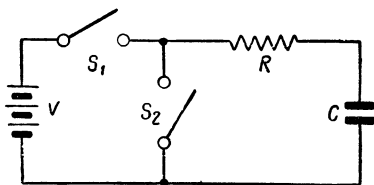
В дополнение к затуханию, создаваемому сопротивлением катушки индуктивности (которое можно рассматривать включенным последовательно с индуктивностью), практически затухание может быть увеличено внешней нагрузкой, включенной параллельно, как показано на рис. 4.8, а. Если затухание мало, эта схема эквивалентна изображенной на рис. 4.8, б, при условии, что $Rr = \omega^2 L^2$ (R на рис. 4.8, б эквивалентно r на рис. 4.8, а; омическое сопротивление катушки индуктивности L необходимо добавить к R).



Р и с. 4.8. Параллельное и последовательное затухание

Заряд и разряд конденсатора через сопротивление

Предположим, что в схеме, изображенной на рис. 4.9, конденсатор C первоначально не был заряжен, ключ S_2 разомкнут, а ключ S_1 замыкается в момент $t=0$. Ток, протекающий через R и C в момент t , определится

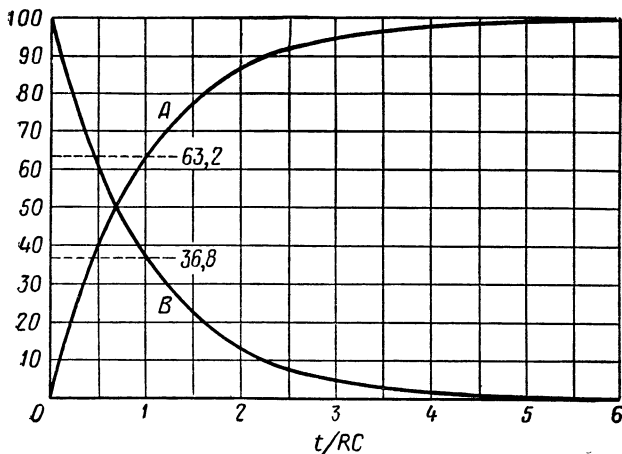


Р и с. 4.9. Заряд и разряд конденсатора через сопротивление

выражением $i = \frac{V}{R} e^{-t/RC}$. Напряжение на сопротивлении R равно $Ve^{-t/RC}$, а на конденсаторе C — $V(1 - e^{-t/RC})$. Кривые изменения напряжения по времени изображены на рис. 4.10, где кривая A показывает изменение на конденсаторе C , кривая B — на сопротивлении R . V прини-

мается произвольно равным 100. Единицей времени в этих графиках является произведение RC , называемое «постоянной времени» контура.

Из кривых видно, что за время, равное «постоянной времени», ток упадет до величины $1/e$ (36,8%) своего первоначального значения, в то время как напряжение на C возрастет до 63,2% приложенного напряжения.



Р и с. 4.10. Экспоненциальная кривая заряда и разряда цепи $R - C$

За время $t = 5RC$ ток упадет до 0,7%, а конденсатор C будет заряжен более чем на 99% величины полного заряда. Для практических целей можно считать процесс законченным через промежуток времени, в 5 раз превышающий постоянную времени.

Если после полного заряда конденсатора C ключ S_1 разомкнуть, а ключ S_2 замкнуть, то конденсатор будет разряжаться через сопротивление. Во время этого процесса изменение напряжения на конденсаторе C изображится кривой B . Напряжение на сопротивлении R не изменится, но станет противоположным по знаку. При повторении процесса его вновь можно считать законченным через промежуток времени $5RC$.

Ток в цепи, содержащей последовательно соединенные индуктивность и активное сопротивление

Если в схеме, изображенной на рис. 4.9, заменить конденсатор C катушкой индуктивности, то начальный ток при замкнутом ключе S_1 будет равен нулю. Он начнет увеличиваться по закону $i = (V/R)(1 - e^{-(R/L)t})$ и через промежуток времени $t = L/R$ достигнет 63,2% своего конечного значения. $t = L/R$ является постоянной времени контура, состоящего из сопротивления R и катушки индуктивности L . Эпюры тока (кривая A) и напряжения (кривая B) показаны на рис. 4.10.

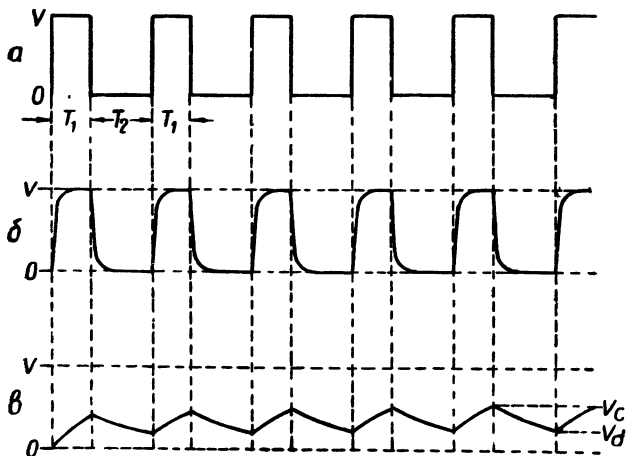
При установившемся режиме, практически при $t = 5L/R$, ключ S_1 разомкнут, а S_2 замкнут, и хорошо известный эффект индуктивности заставляет ток течь по катушке индуктивности L ; величина тока уменьшается экспоненциально, т. е. по кривой B .

Расчет контуров

Во многих радиолокационных схемах используются прямоугольные импульсы, и к расчету их целесообразно применить изложенный выше метод. Это будет проще, чем применение преобразований Фурье.

Предположим, что напряжение прямоугольной формы (рис. 4.11, a) приложено к схеме, состоящей из последовательно соединенных сопротивления R и емкости C . Если время, в течение которого напряжение подключено и отключено, значительно больше постоянной времени контура, то каждую часть цикла можно рассчитать самостоятельно и построить кривую изменения напряжения на конденсаторе C (рис. 4.11, b). В данном случае T_1 и T_2 соответственно в 10 и 15 раз больше постоянной времени цепи.

Если постоянная времени настолько велика, что указанный выше метод расчета не пригоден, то конденсатор не будет полностью ни заряжаться, ни разряжаться в течение каждого цикла и наступит установившийся режим (рис. 4.11, $в$), при котором пределы изменения напряжения на C будут, например, V_d и V_c . После определения величин этих напряжений становится возможным произвести расчет, начиная с соответствующих точек на кривых рис. 4.10.



Р и с. 4.11. Эюкура напряжений для цепи $R-C$ при прямоугольной форме входного напряжения:

a — приложенное напряжение; $б$ — напряжение на конденсаторе C при малой постоянной времени цепи; $в$ — напряжение на конденсаторе C при большой постоянной времени цепи

Можно показать математически, что

$$V_c = V \frac{(1-p)}{(1-pq)}$$

и

$$V_d = V \frac{q(1-p)}{(1-pq)},$$

где $p = e^{-T_1/RC}$ и $q = e^{-T_2/RC}$.

Величины V_c и V_d могут быть найдены методом подбора по кривым на рис. 4.10. При этом следует учесть, что напряжение повышается от величины V_d до V_c в течение времени T_1 заряда конденсатора и падает от V_c до V_d в течение времени T_2 разряда конденсатора.

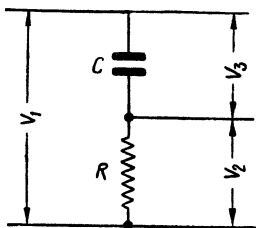
Этим же способом можно рассчитать контур, состоящий из индуктивности и активного сопротивления.

Дифференцирование

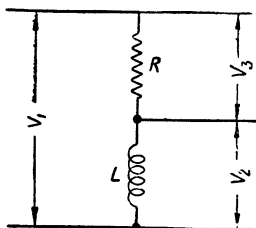
Ток (силой I ампер), текущий через конденсатор (емкостью C фарад), равен произведению емкости конденсатора C на скорость изменения напряжения на нем. Математически это записывается уравнением

$$I = C \frac{dV}{dt}.$$

Если в контуре рис. 4.12 приложенное напряжение V_1 является постоянным, то после окончания переходного процесса ток по цепи не течет и $V_3 = V_1$, а $V_2 = 0$.



Р и с. 4.12. Дифференцирующая цепь $R - C$



Р и с. 4.13. Дифференцирующая цепь

Однако если V_1 изменяется и постоянная времени RC мала*, то V_3 будет повторять изменения V_1 , причем падение напряжения V_2 на сопротивлении R будет незначительным; поэтому V_3 почти равно V_1 и ток через конденсатор C почти пропорционален скорости изменения V_1 . Так как падение напряжения на сопротивлении R пропорционально току, то V_2 пропорционально скорости изменения V_1 . Математически это выразится уравнением

$$V_2 = RC \frac{dV_1}{dt}.$$

* В данном случае она должна быть малой по сравнению с временем, необходимым для изменения рассматриваемого напряжения.

Известно, что математическая операция нахождения величины, пропорциональной скорости изменения данной величины, называется дифференцированием, и поэтому подобные цепи называются дифференцирующими.

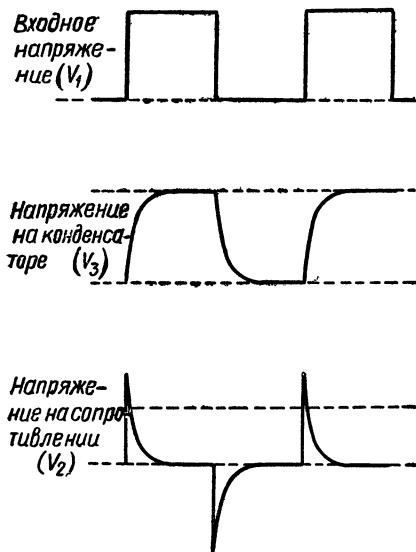
Схема, изображенная на рис. 4.13, также является дифференцирующей цепью, при условии если постоянная времени L/R мала. Уравнение для V_2 в этом случае имеет вид:

$$V_2 = (L/R) \frac{dV_1}{dt}.$$

Применение дифференцирующих цепей

Дифференцирующие цепи часто используются для создания остроконечных импульсов из прямоугольных.

На рис. 4.14 приведены эпюры напряжений на C и R ,



Р и с. 4.14. Образование остроконечных импульсов путем дифференцирования напряжения прямоугольной формы

когда к схеме, изображенной на рис. 4.12, приложено напряжение прямоугольной формы, причем постоянная времени RC мала по сравнению с длительностью прямоугольного импульса.

Выходные остроконечные импульсы используются во многих радиолокационных схемах, например для создания пусковых и калибровочных импульсов и в других случаях. Часто требуется только положительный импульс. При этом отрицательный импульс ограничивается лампой, имеющей смещение, равное напряжению отсечки.

Если пунктирная линия на рис. 4.14 для кривой V_2 показывает напряжение отсечки, то схема пропускает только импульсы, расположенные выше этой линии. Таким методом можно уменьшить длительность импульса у основания и сделать его более острым.

Интегрирующие цепи

Интегрирование — процесс, обратный дифференцированию. Если в цепях, изображенных на рис. 4.12 и 4.13, величины R , C и L таковы, что получается большая постоянная времени и вместо V_2 за выходное напряжение принимается V_3 , то скорость изменения выходного напряжения будет пропорциональна изменению входного напряжения. Математически это выражается уравнением

$$V_3 = 1/RC \int V_1 dt$$

для схемы рис. 4.12 и уравнением

$$V_3 = R/L \int V_1 dt$$

для схемы рис. 4.13. (Эти выражения справедливы для большой постоянной времени.)

Теорема Тевенина

Эта теорема часто используется для расчета токов и напряжений в цепях, содержащих только линейные элементы. Полное сопротивление линейных элементов не изменяется при изменении тока, протекающего через них. Такими элементами могут быть омическое сопротивление, индуктивность, емкость или их комбинация.

Теорема Тевенина сводится к следующему. Предположим, что имеется четырехполюсник. Генератор, подключен-

ный к клеммам 1 и 2, создает напряжение V между клеммами 3 и 4. Теперь предположим, что сопротивление нагрузки Z_1 подключено к клеммам 3 и 4. Тогда ток, протекающий в нагрузке, равен $\frac{V}{Z_1 + Z_2}$, где Z_2 — полное сопротивление цепи, измеренное между клеммами 3 и 4, если генератор, подключенный к клеммам 1 и 2, заменен сопротивлением, равным полному внутреннему сопротивлению генератора.

Теорема обратимости

Допустим, что генератор подключен к клеммам 1 и 2 вышеописанной цепи, а амперметр к клеммам 3 и 4. Если сопротивления генератора и амперметра равны, то величина тока не изменится, если генератор и амперметр поменять местами.

Если сопротивления генератора и амперметра порознь равны нулю, то отношение напряжения на входе к току на выходе называется взаимным полным сопротивлением четырехполюсника.

Сопротивление проводников переменному току (поверхностный эффект)

Если через проводник протекает переменный ток, то возникают вихревые токи, которые влияют на распределение тока по поперечному сечению проводника. Наибольшая плотность тока будет на поверхности проводника; величина ее уменьшается по направлению к центру проводника, поэтому эффективное сопротивление переменному току больше, чем постоянному.

Эффективное сопротивление проводника для очень высоких частот, используемых в радиолокационных установках, может быть достаточно точно подсчитано, если допустить, что весь ток протекает по тонкому поверхностному слою проводника. Толщина этого слоя в метрической си-

стеме единиц равна $\sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$, где ρ — удельное сопротивление материала проводника, μ — абсолютная магнитная проницаемость, f — частота в герцах.

Для меди при 20° С толщина слоя выразится величиной $\frac{0,066}{\sqrt{F}}$ мм, где F частота в мегагерцах.

Тепловой эффект импульсного тока

При расчете радиолокационных схем, работающих при больших значениях импульсного тока, необходимо учитывать, что тепловой эффект в проводниках пропорционален произведению квадрата эффективного значения тока на сопротивление.

Для синусоидальной формы напряжения эффективное значение в 1,11 раз (коэффициент формы кривой) больше среднего значения, но для прямоугольной формы напряжения, действующего только в течение $1/n$ части общего времени, эта величина равна \sqrt{n} . Так как значение n порядка 1000, то тепловой эффект, подсчитанный исходя из среднего значения тока (по показанию магнитоэлектрического прибора), будет уменьшен в 1000 раз.

Этим объясняется наличие соответствующих конденсаторов в измерительных приборах магнитоэлектрического типа, используемых в цепях, предназначенных для сильных токов.

Г Л А В А V

ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ФОРМЫ ВОЛН И УПРАВЛЯЮЩИЕ ИМПУЛЬСЫ

Периодичность, с которой следуют импульсы, называется частотой повторения импульсов. Управление этой частотой может осуществляться посредством:

- частоты источника переменного тока;
- задающего генератора;
- самовозбуждающегося мультивибратора;
- кварцевого генератора (в особых случаях).

Синхронизация

Схема, управляющая частотой повторения импульсов, может также управлять и другими цепями (например, разверткой). Управление можно осуществлять также, используя импульсы передатчика.

Важно, чтобы все блоки станции были синхронизированы. Это особенно относится к схемам развертки и калибровки. Другие схемы, например подсвечивающего импульса электронно-лучевой трубки, регулировки усиления и т. д., также должны быть синхронизированы, но точная синхронизация в этом случае не нужна.

При любом источнике управления прямоугольные запускающие импульсы обычно создаются мультивибратором с внешним возбуждением, имеющим, как правило, одно устойчивое и одно неустойчивое состояние. Эти импульсы используются затем для различных целей.

Переход от неустойчивого положения к устойчивому обычно происходит вскоре после окончания развертки дальности на индикаторе в течение времени, достаточного для приведения всей схемы в первоначальное состояние.

В связи с этим нет необходимости точно устанавливать момент восстановления схемы.

В особых случаях используются и другие методы, например когерентно-импульсная техника, нашедшая применение при индикации движущихся целей (глава VIII).

Мультивибраторы

Мультивибраторы, работающие в режиме самовозбуждения или запускаемые от внешнего источника, широко используются для создания импульсов прямоугольной формы.

На рис. 5.1 изображена типовая схема мультивибратора. Фактически это усилитель, в котором выходное напряжение подано обратно на вход. В результате глубокой обратной связи обе лампы попеременно запираются или отпираются.

Предположим, что лампа L_1 заперта. Лампа L_2 открыта и проводит ток, но напряжение на аноде этой лампы будет ниже подаваемого высокого напряжения вследствие падения напряжения на R_2 . В таком положении лампа остается до момента начала разряда конденсатора C_2 через R_3 , в результате чего напряжение на сетке лампы L_1 становится выше и лампа начинает проводить ток. Тогда анодное напряжение L_1 , а вместе с тем и напряжение на сетке L_2 начинает падать. Процесс является кумулятивным, и лампа L_2 быстро запирается. Этот переход происходит практически мгновенно, если паразитная емкость не слишком велика. Таким образом, создается первоначальное положение, но при этом лампы L_1 и L_2 поменялись ролями.

Процесс вновь повторяется, пока L_2 не начнет проводить ток, а L_1 не запрется и т. д. до бесконечности. В результате на анодах обеих ламп создается напряжение почти прямоугольной формы, в противофазе друг к другу и длительностью, зависящей прежде всего от постоянных времени R_4C_1 и R_3C_2 . Соответствующие эпюры приведены на рис. 5.1.

Сопротивления утечки R_3 и R_4 могут быть заземлены или соединены с положительным полюсом источника высокого напряжения. Предпочитается последнее, так как переход схемы из одного состояния в другое в этом случае более кратковременный.

Частота повторения самовозбуждающихся мультиви-

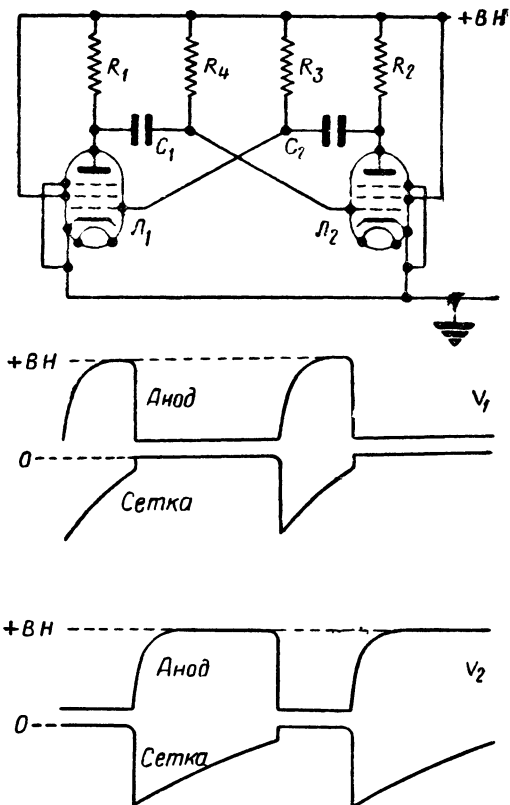


Рис. 5.1. Мультивибратор с самовозбуждением

браторов не является высокостабильной, что допустимо для целого ряда устройств. При желании можно стабилизировать частоту мультивибратора, подводя к сеточной цепи синусоидальное напряжение от стабильного генератора. Собственная частота мультивибратора должна быть достаточно близкой к частоте генератора или быть больше или меньше ее в кратное число раз, чтобы обеспечить

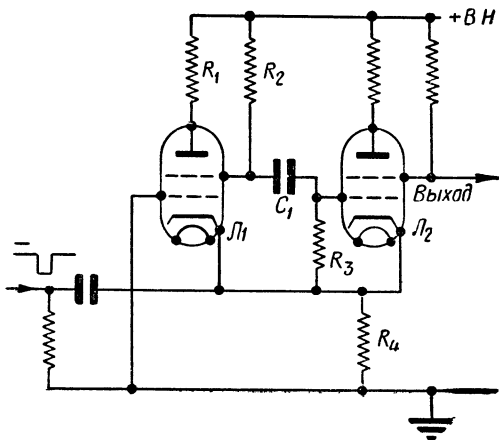
синхронизацию. Этот метод успешно применяется при точном измерении частоты, когда управляющий генератор может быть стабилизирован кварцем. Однако в радиолокационных схемах он не имеет широкого применения.

Другим методом стабилизации является применение ждущего мультивибратора, управляемого точно следующими запускающими импульсами.

Ждущий мультивибратор

На рис. 5.2 показана схема мультивибратора с катодной связью, в которой лампа \mathcal{L}_2 нормально проводит ток, а лампа \mathcal{L}_1 заперта напряжением смещения, создаваемым анодным током \mathcal{L}_2 , проходящим через сопротивление R_4 . Схема остается в этом режиме до тех пор, пока какая-либо причина не выведет схему из этого состояния.

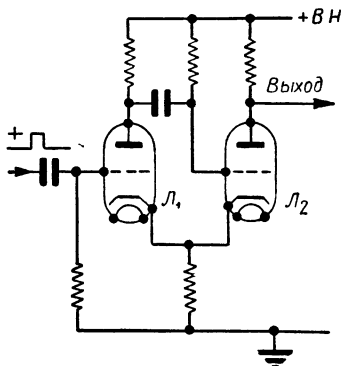
При подаче отрицательного запускающего импульса в общую для двух ламп катодную цепь смещение на сопро-



Р и с. 5.2. Ждущий мультивибратор

тивлению R_4 устраняется: лампа \mathcal{L}_1 становится проводящей, а лампа \mathcal{L}_2 запирается. Через промежуток времени, равный постоянной времени R_3C_1 , схема вернется в первоначальное состояние, оставаясь в этом состоянии до

момента подачи следующего пускового импульса. Данный мультивибратор, так же как мультивибратор с самовозбуждением, создает сигнал почти прямоугольной формы, но каждый цикл должен запускаться внешним импульсом,



Р и с. 5.3. Мультивибратор с катодной связью

так как схема лишена возможности повторять импульсы сама.

На рис. 5.3 показана другая схема, в которой лампа \mathcal{L}_1 заперта до момента поступления положительного пускового импульса, при котором она начинает проводить ток, а \mathcal{L}_2 запирается.

Цепи задержки

Когда необходимо ввести в цепь задержку, например обеспечить получение запускающего импульса через определенный интервал времени после приложения первоначального запускающего импульса, можно применить ждущий мультивибратор, в котором цикл работы соответствует необходимому интервалу. Напряжение на аноде в момент опрокидывания может быть использовано для получения требуемого второго запускающего импульса.

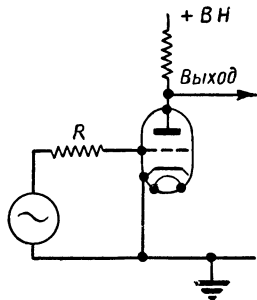
Для получения более точной задержки применяются искусственные линии задержки, в которых первоначальный

импульс подается на вход линии, а задержанный на соответствующий интервал времени импульс снимается с выхода линии.

Еще один способ предусматривает использование точной схемы развертки, обеспечивающей появление запускающего импульса тогда, когда напряжение развертки достигает определенной величины. Существует также способ, при котором электрический импульс преобразуется в ультразвуковое колебание с помощью пьезокристалла. Эти колебания распространяются в трубке, наполненной ртутью, со скоростью звука. Другой кристалл вновь преобразует эти колебания в электрические импульсы. Эти устройства имеют специальное применение и обычно не используются в обычных радиолокационных станциях. Иногда заставляя звуковые волны отражаться от дальнего конца трубки, наполненной ртутью. В этом случае нет необходимости в двух кварцах, можно обойтись одним кристаллом для двух преобразований.

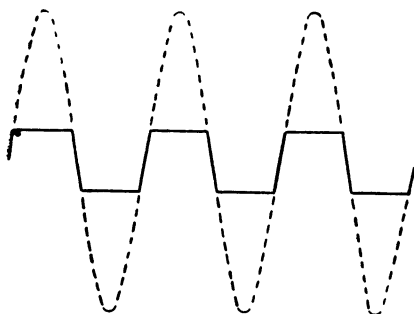
Преобразование синусоидальных колебаний в колебания прямоугольной формы

Ограничение амплитуды синусоидального напряжения, приложенного к сетке лампы в схеме рис. 5.4, достигается при достаточно большой величине этого напряжения. При этом ограничение положительной полуволны в анодной цепи достигается отсечкой анодного тока лампы, а другой



Р и с. 5.4. Схема для получения напряжения прямоугольной формы из синусоидального

полуволны — за счет тока сетки в цепи сопротивления R , препятствующего повышению напряжения на сетке выше напряжения на катоде. Форма выходного напряжения показана на рис. 5.5 сплошной линией. Крутизна кривой может в зависимости от требований меняться в определенных пределах, если входное напряжение достаточно большое. Частота прямоугольных колебаний в схеме равна частоте источника переменного тока.

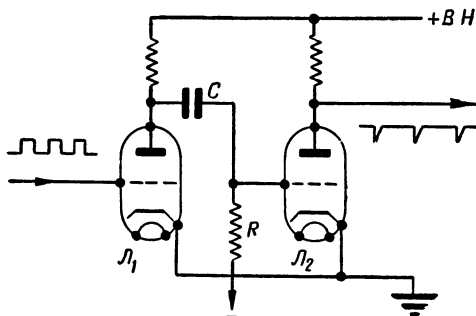


Р и с. 5.5. Форма выходного напряжения схемы, изображенной на рис. 5.4

Запускающие импульсы

На рис. 5.6 приведена одна из схем, с помощью которой можно получить короткие импульсы для запуска мультивибраторов.

Напряжение прямоугольной формы подается на сетку лампы \mathcal{L}_1 , на выходе которой имеется дифференцирующая цепь $R-C$ с малой постоянной времени. Смещение на сетке \mathcal{L}_2 больше напряжения отсечки, так что только положительные импульсы на сетке создают анодный ток (см.



Р и с. 5.6. Схема для получения коротких импульсов

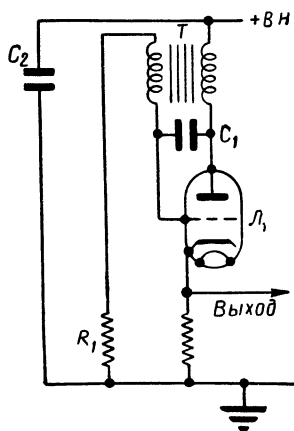
рис. 4.14). Поэтому выходное напряжение \mathcal{L}_2 состоит из ряда очень коротких импульсов, которые могут быть использованы для включения других цепей.

Блокинг-генератор

Схема блокинг-генератора, изображенная на рис. 5.7, может быть использована для создания коротких остроконечных импульсов.

Трансформатор T обеспечивает значительно большую положительную обратную связь, чем в обычном генераторе. Величина емкости C_1 незначительна и образуется главным образом за счет межвитковой емкости трансформатора T и паразитных емкостей. Емкость C_2 имеет достаточно большую величину. Обмотки трансформатора T и емкость C_1 образуют вместе колебательный контур с высокой собственной частотой колебаний.

После включения питания возникает анодный ток, напряжение на сетке становится положительным и се-

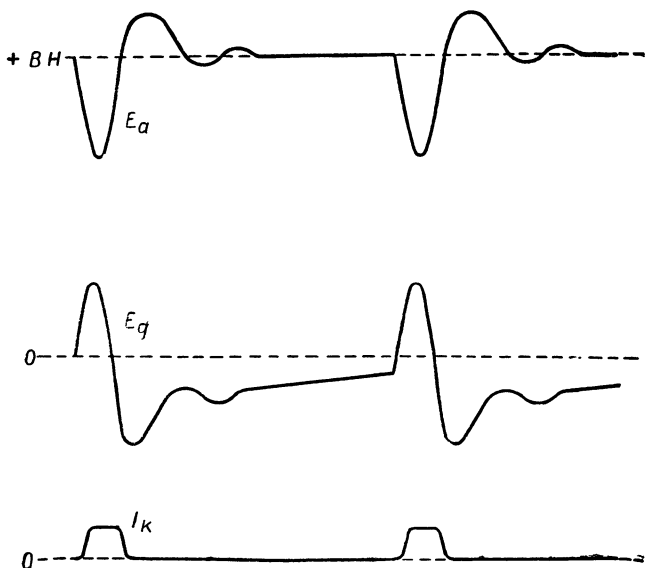


Р и с. 5.7. Блокинг-генератор

точный ток заряжает конденсатор C_1 до напряжения, достаточного для запираания лампы \mathcal{L}_1 при отрицательном полупериоде колебаний. Вследствие запираания лампы обратная связь прекращается и последующие колебания быстро затухают главным образом из-за потерь в железе трансформатора. На рис. 5.8 изображены обычные для подобной схемы эпюры анодного и сеточного напряжения и тока в катode.

Когда конденсатор C_1 разрядится через сопротивление R настолько, что лампа \mathcal{L}_1 снова начнет проводить ток, процесс повторится снова.

Блокинг-генератор часто используется для управления всем комплексом устройств радиолокационной станции, так как импульсы, создаваемые генератором, служат для запуска других цепей.

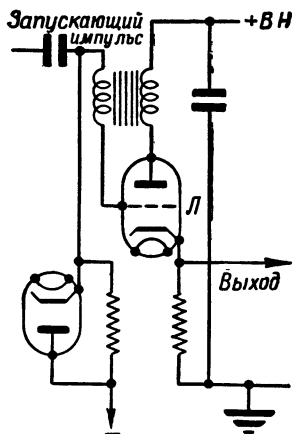


Р и с. 5.8. Эшюры напряжений в блокинг-генераторе

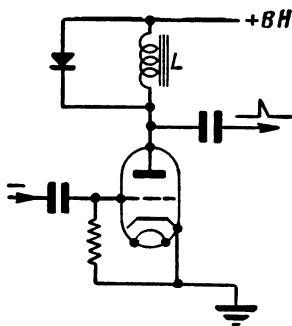
Блокинг-генератор с внешним запуском (ждуший блокинг-генератор)

Блокинг-генератор может давать очень короткие выходные импульсы, которые часто используются в качестве калибровочных импульсов для калибровки или для других целей, когда требуются короткие импульсы. В этих случаях необходима схема с внешним запуском, а не с самовозбуждением. Подобная схема изображена на рис. 5.9.

Для работы необходимо иметь внешнее напряжение смещения. Дополнительно напряжение смещения, создаваемое сеточным выпрямлением, не используется. Диод в схеме предотвращает чрезмерное увеличение отрицательного смещения на сетке.



Р и с. 5.9. Блокинг-генератор с внешним запуском



Р и с. 5.10. Схема получения импульсов за счет выброса на индуктивности

Схема с индуктивностью в анодной цепи

Схема, изображенная на рис. 5.10, вырабатывает импульсы положительной полярности всякий раз, когда ток в лампе резко прекращается при подаче достаточно большого отрицательного напряжения на сетку. Германиевый диод, включенный параллельно индуктивности, подавляет дальнейшие колебания. Импульсы, создаваемые в подобных схемах, могут быть достаточно острыми для использования их в качестве калибровочных.

ГЛАВА VI

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ПЕРЕДАТЧИКИ

Основными частями радиолокационного передатчика являются:

- 1) генератор;
- 2) модулятор для управления генератором;
- 3) мощный усилитель для усиления колебаний генератора (применяется только в передатчиках старого образца, работающих в метровом диапазоне);
- 4) фидерная и антенная системы;
- 5) механизм вращения антенны;
- 6) источник питания.

Кроме того, существует ряд вспомогательных устройств для проверки, испытаний, охлаждения и т. д.

Длительность импульса, частота повторения импульсов и мощность

Длительность импульсов обычно не превышает нескольких микросекунд. Для обеспечения большей точности используются короткие импульсы — $0,1$ — 1 *мксек*. В установках, не требующих большой точности, но обладающих большой дальностью действия, применяются импульсы большей длительности (до 10 *мксек*). Частота повторения импульсов лежит в пределах от 200 до 2000 *гц*. Отношение длительности импульса

время от начала одного импульса до начала другого называется «скважностью». В большинстве радиолокационных станций эта величина берется приблизительно в пределах $0,0005$ — $0,002$. Средняя мощность равна величине импульсной мощности, умноженной на скважность. Импульсная мощность в радиолокационных станциях значи-

тельно больше мощности обычных устройств связи, но величина средней мощности незначительна.

Передатчики метрового диапазона

В настоящее время этот диапазон волн используется редко. Генераторы метрового диапазона строятся на лампах, работающих по пушпульной схеме, за которыми следуют оконечные, также пушпульные, усилительные каскады, работающие на антенну. Резонансным контуром в таких передатчиках является короткая передающая линия (Лехерова система), так как даже на этих сравнительно длинных волнах непрактично использовать цепи, состоящие из сосредоточенных индуктивности и емкости.

Передатчики сантиметрового диапазона

Большинство современных радиолокационных систем работает в сантиметровом диапазоне волн, обычно в диапазоне от 3 до 10 см. В качестве источника генерирования колебаний широко используется магнетрон, за исключением ряда специальных маломощных установок. В некоторых случаях (главным образом в экспериментальных установках) применяются мощные клистроны.

Для работы магнетрона требуются высоковольтные импульсы постоянного тока, подаваемые на магнетрон в течение времени, равного длительности импульса. Это осуществляется высоковольтным источником постоянного тока и модулятором, производящим включение и выключение.

Использование импульсного трансформатора наряду с конструктивными преимуществами обеспечивает возможность работы модулятора при более низком напряжении, чем необходимое для магнетрона.

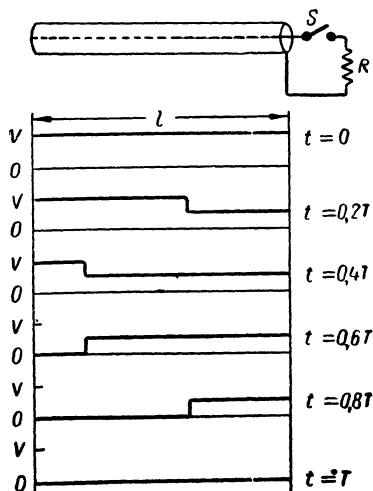
При работе в диапазоне 3—10 см обеспечивается импульсная мощность соответственно до 200—1000 квт.

Генерирование коротких прямоугольных импульсов для передатчиков. Искусственные линии

Для управления модулятором радиолокационного передатчика иногда используются импульсы блокинг-генератора. Для создания мощного импульса требуемой длительности может быть использована искусственная линия. При этом последующего усиления не требуется.

Рассмотрим передающую линию с волновым сопротив-

лением Z_0 (см. гл. VIII), представленную на рис. 6.1. На вход линии подается напряжение V от источника постоянного тока (не показанного на рисунке). При замыкании ключа S к линии подключается нагрузка с сопротивле-



Р и с. 6.1. Получение импульсов при разряде передающей линии

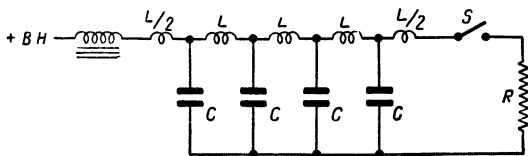
нием $R = Z_0$, по которой после подключения источника напряжения течет ток

$$V(Z_0 + R) = V/2R.$$

Напряжение на нагрузочном конце линии падает до величины $V/2$. Это эквивалентно приложению напряжения $V/2$ к нагрузочному концу передающей линии. В результате создается волна напряжения $V/2$, которая распространяется вдоль линии, уменьшая постепенно напряжение в каждой точке линии от V до $V/2$. От конца линии волна отражается без изменения фазы и, распространяясь в обратном направлении, гасит оставшееся напряжение на линии. К тому моменту времени, когда волна дойдет до начала линии, линия будет полностью разряжена и ток че-

рез сопротивление R прекратится. Поэтому на сопротивлении R создается прямоугольный импульс тока длительностью $T = 2l/v$, где l — длина линии, а v — скорость распространения волны вдоль передающей линии. На рис. 6.1 (внизу) показаны кривые напряжения в линии в различные моменты времени.

В инженерной практике используется искусственная линия, состоящая из сосредоточенных индуктивностей и емкостей (рис. 6.2), так как линия с распределенными постоянными была бы слишком длинна (порядка нескольких метров на наносекунду). Искусственная линия не яв-



Р и с. 6.2. Искусственная линия

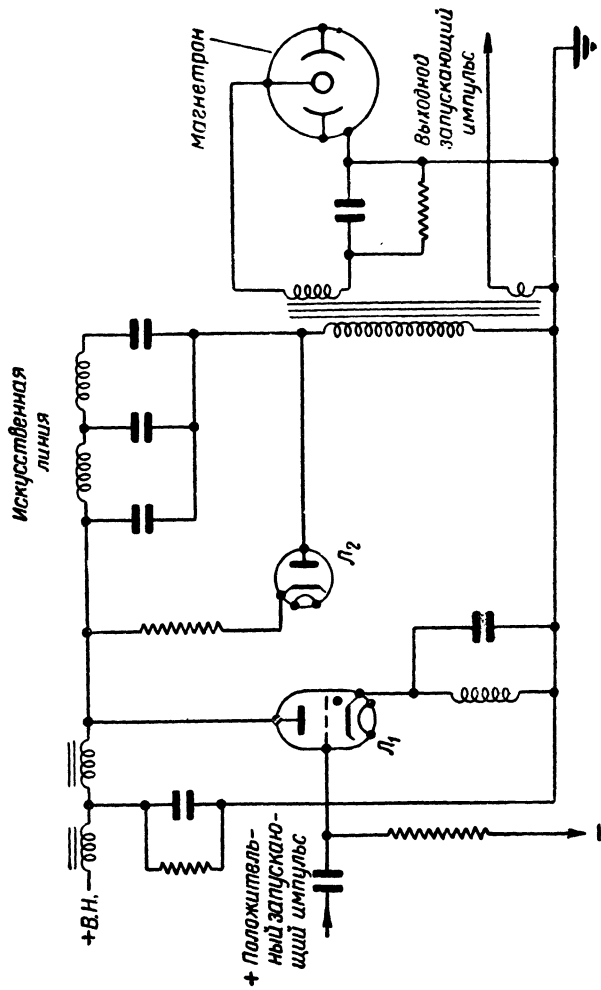
ляется точным эквивалентом однородной линии с распределенными постоянными, и поэтому в ней создается некоторое искажение формы импульса, но при соответствующем расчете искажение может быть сведено к незначительной величине. Для передатчиков обычно удовлетворительной является искусственная линия, состоящая из 3—4 секций L — C .

В качестве ключа S могут быть применены тиратрон, поджигаемый искровой разрядник или соответствующая жесткая лампа.

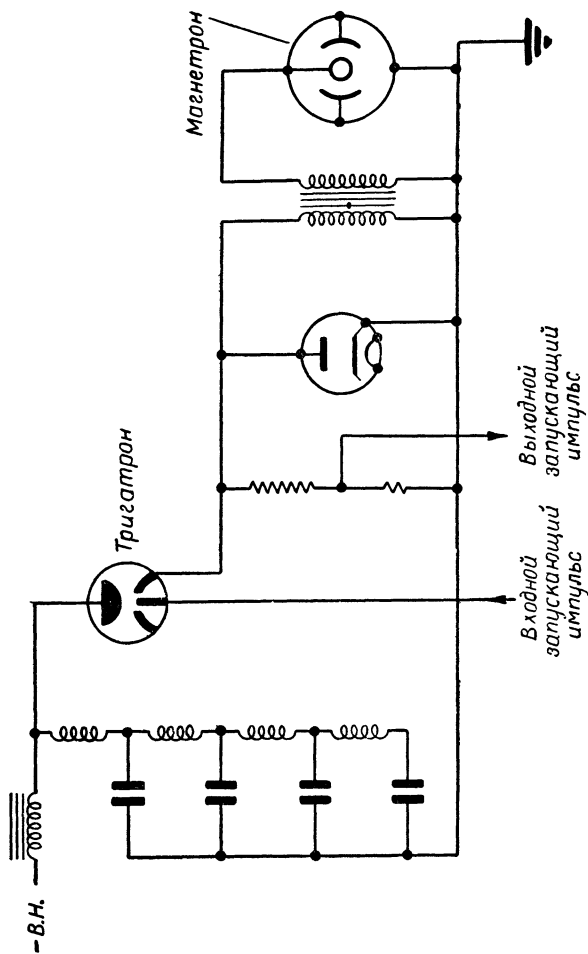
Линия может быть заряжена от источника высокого напряжения через дроссель, который фактически обладает бесконечно большим сопротивлением на частотах, соответствующих длительности импульса.

Модуляторы

Примером модуляторной схемы, использующей искусственную линию, является схема, изображенная на рис. 6.3. Ключом служит тиратрон L_1 , зажигаемый положительным импульсом, подаваемым на его сетку. Магнетрон питается через импульсный трансформатор, имеющий специальную обмотку для обеспечения выходного запуска-



Р и с. 6.3. Модулятор с искусственной линией и тиратроном



Р и с. 6.4. Модулятор с искусственной линией и управляемым искровым разрядником (тригатроном)

ющего импульса, совпадающего с моментом начала генерирования колебаний магнетроном. Этот импульс может быть, кроме того, использован для запуска развертки или для других целей.

Так как магнетрон не является нагрузкой с постоянным сопротивлением, теоретически невозможно согласовать его точно с фидерной системой. Демпфирование колебаний и подавление импульса обратной полярности осуществляется при помощи диода L_2 .

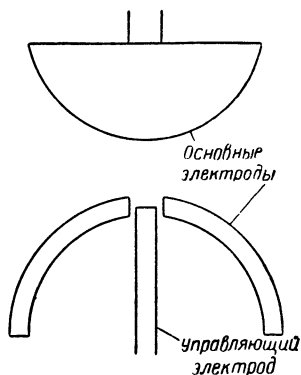
На рис. 6.4 показана другая схема модулятора, отличающаяся от предыдущей не принципиально, а деталями. В качестве ключа используется управляемый искровой разрядник, называемый тригатроном.

В обоих случаях анод магнетрона имеет потенциал земли, что практически чрезвычайно важно, так как выходная цепь (коаксиальный кабель или волновод) соединена с анодом. На катод подается отрицательный импульс высокого напряжения.

Управляемый искровой разрядник или тригатрон

Тригатрон состоит из двух электродов, имеющих форму полусферы, обычно выполненных из молибдена (рис. 6.5). Искровой промежуток разрядника не пробивается нормальным рабочим напряжением, приложенным к основным электродам, но если к управляющему электроду подвести запускающий импульс, то произойдет пробой в основном искровом промежутке.

Тригатрон может быть вакуумным или наполненным; в последнем случае удовлетворительные результаты дает наполнение смесью аргона с 5% кислорода. Из-за влияния искрового разряда необходимо через каждые 100 ч регулировать электроды и время от времени их заменять.



Р и с. 6.5. Искровой разрядник

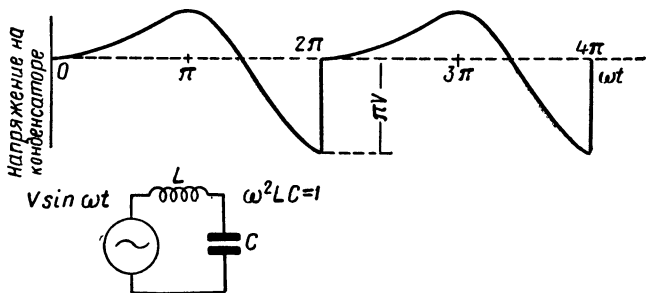
Импульсный трансформатор

Для точного воспроизведения формы импульсов необходимо по возможности уменьшать влияние индуктивности рассеяния, а также паразитной и междувитковой емкостей. Потери в железе должны быть сведены до минимума путем применения соответствующих материалов в виде очень тонких пластин.

Вторичная обмотка часто выполняется бифилярной. Это избавляет от необходимости рассчитывать трансформатор накала на импульсное напряжение, а также от необходимости обеспечения достаточно малой емкости, что необходимо из соображений величины нагрузки.

Резонансный заряд

Искусственную линию можно зарядить от источника переменного тока без выпрямителя, если зарядный дроссель и емкость линии создают резонанс на частоте источника питания (см. рис. 6.6). Если C не заряжен в момент



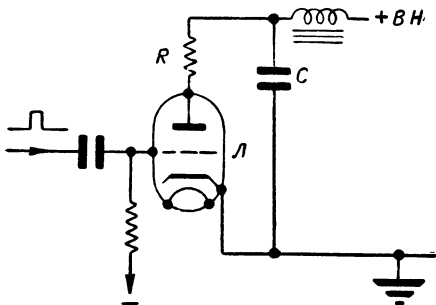
Р и с. 6.6. Резонансная кривая искусственной линии

времени $t = 0$, когда цепь замкнута, то напряжение на C в любой последующий момент (не учитывая потери) равно $\frac{1}{2}V (\sin \omega t - \omega t \cos \omega t)$. Если линия разряжается в конце каждого периода колебаний питающего напряжения, то возобновляется первоначальное состояние, при котором напряжение на конденсаторе C равно нулю. Этот

процесс может повторяться бесконечно. Принято считать, что разряд, формирующий импульс, происходит мгновенно, так как длительность импульса значительно меньше периода колебаний питающего напряжения.

Модулятор на жестких лампах

Для управления модулятором, изображенным на рис. 6.7, можно использовать блокинг-генератор, дающий импульсы соответствующей длительности, или другие импульсные схемы. R является нагрузкой (магнетрон или



Р и с. 6.7. Модулятор на жесткой лампе

другой генератор). Лампа L нормально заперта и проводит ток только в том случае, если на сетку подается положительный импульс достаточной величины. Емкость конденсатора C должна быть достаточно большой для того, чтобы анодный ток не создавал на нем заметного падения напряжения во время прохождения импульса.

Недостатком схемы является необходимость иметь большую величину напряжения источника питания, а также большую величину напряжения на сетке, достаточную для того, чтобы лампа отпиралась и проводила ток без значительного падения напряжения внутри самой лампы. Напряжение управляющего импульса сравнимо с величиной напряжения выходного мощного импульса.

Эти затруднения можно преодолеть, применив модифицированную схему катодного повторителя с катодным выходом, показанную на рис. 6.8. Первоначально лампы L_1

и L_2 заперты отрицательным смещением на сетке. На лампу L_1 подается входной импульс малой мощности, сформированный в предыдущих каскадах, в результате чего она отпирается. Ток в сопротивлении R_1 , имеющим значительную величину, приводит к возрастанию напряжения во входной цепи и в том числе напряжения на сетке лампы L_2 , которая вследствие этого становится проводящей, а емкость C разряжается через магнетрон.

После прекращения импульса обе лампы вновь запираются. Диод L_3 обеспечивает разряд конденсатора C в течение нерабочего периода и является одновременно демпфером для обратного выброса напряжения на магнетроне в конце импульса.

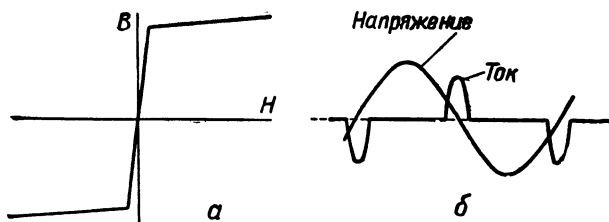
Магнитный модулятор

Работа магнитного модулятора основана на явлении насыщения железа дросселя. Сопротивление дросселя с железным сердечником большое, когда железо не насыщено, и малое, когда оно насыщено. Если схема рассчитана так, что дроссель переходит из ненасыщенного состояния в состояние насыщения в нужный момент, то она действует как переключатель. Такой «ключ» не является идеальным, так как величины полного сопротивления насыщения и ненасыщения соответственно не равны нулю и бесконечности.

Магнитные материалы типа никелевых сплавов имеют очень высокую магнитную проницаемость для магнитной индукции определенного значения, при которой материал внезапно насыщается и практически дифференциальная проницаемость становится равной проницаемости воздуха. Кривая намагничивания подобных материалов показана на рис. 6.9, а.

Если приложить синусоидальное переменное напряжение к проводнику, сделанному из этого материала, то ток будет иметь форму, изображенную на рис. 6.9, б. Внезапное изменение полного сопротивления в момент насыщения позволяет устройству, называемому пульсатором, действовать как переключатель.

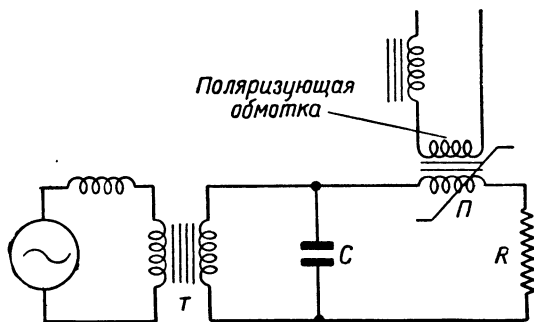
На рис. 6.10 показана схема, предназначенная для резонансного заряда конденсатора C . Параллельно C подключены последовательно соединенные пульсатор P и нагрузка R . Сопротивление пульсатора в отсутствие насыщения (которое наступает только один раз в течение периода



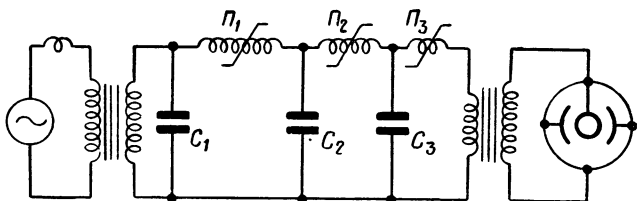
Р и с. 6.9. Дроссель насыщения:
а — $V = f(H)$; б — форма напряжения и тока

питающего напряжения) очень велико и незначительно влияет на величину напряжения на конденсаторе C до тех пор, пока ток в пульсаторе P не повысится настолько, что возникнет насыщение. После насыщения полное сопротивление пульсатора P очень незначительно и емкость C быстро разряжается через нагрузку R . Затем цикл повторяется.

Скорость нарастания и уменьшения величины тока в цепи R хотя и является высокой, все же недостаточна для создания необходимых импульсов. Практически необходимо вместо нагрузки R включать последующие каскады пульсатора, как показано на рис. 6.11. В последнем каскаде конденсатор C_3 может быть заменен соответствующей



Р и с. 6.10. Магнитный модулятор



Р и с. 6.11. Трехкаскадный магнитный модулятор

щей схемой формирования импульсов, например искусственной линией. Конечной нагрузкой в подобной схеме является магнетрон, питаемый от импульсного трансформатора. Скорость нарастания и уменьшения тока в пульсаторе увеличивается от каскада к каскаду.

Обычно благодаря действию зарядных токов в обмотках пульсаторов нет необходимости в смещении от внешнего источника во всех пульсаторах, кроме первого.

ГЛАВА VII

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ПРИЕМНИКИ

Радиолокационные приемники обычно являются супергетеродинными. В метровом диапазоне применяются один или два высокочастотных каскада усиления на частоте сигнала, за которыми следует диод или кристаллический детектор. В сантиметровом диапазоне усиление частоты сигнала не применяется, так как оно не приводит к увеличению отношения уровня сигнала к шуму. Вместо этого сигнал подается непосредственно на кристаллический смеситель, после которого следует от 6 до 10 каскадов усиления промежуточной частоты. Окончательно сигнал усиливается до необходимого уровня на видеочастоте.

Обычно первые два или три каскада усиления промежуточной частоты помещают возможно ближе к смесителю, для того чтобы избежать забивания входного сигнала помехами, которые могут быть приняты длинными проводниками.

Чувствительность приемника

Минимальный уровень полезного сигнала на входе приемника определяется величиной отношения сигнал/шум (S/N) на выходе. Так как практически все шумы на выходе определяются шумом входного или, иначе говоря, первого каскада приемника, то увеличение числа каскадов приемника выгодно только до тех пор, пока это создает увеличение выходного напряжения до нужного уровня. Отношение сигнал/шум и, следовательно, минимальная величина принимаемого сигнала не улучшается при увеличении числа каскадов усилителя.

Результирующий шум на выходе приемника, кроме рассмотренных выше помех, обуславливается шумами галактики, принимаемыми антенной из эфира, шумами теплового возбуждения и дробовым эффектом в лампах.

Шумы теплового возбуждения

Напряжение шума теплового возбуждения возникает вследствие беспорядочного движения электронов в проводнике. Величина шума для активного сопротивления определяется формулой

$$\bar{E}^2 = 4kTR(f_2 - f_1),$$

где \bar{E}^2 — эффективное напряжение, создаваемое беспорядочным движением электронов;

k — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ джоулей на градус Кельвина);

R — сопротивление;

T — абсолютная температура по шкале Кельвина ($273^\circ \text{K} = 0^\circ \text{C}$);

f_1 и f_2 — предельные величины частот (в герцах) используемого диапазона.

Энергия шумов теплового возбуждения равномерно распределяется по всему спектру от нуля до значения частот больше тех, которые обычно используются в радиолокационной технике. Например, для данного активного сопротивления энергия шумов, компоненты частот которых лежат в пределах от нуля до 1000 *гц*, та же, что и для диапазона частот от 1 до 1,001 *Мгц*. Энергия шумов пропорциональна абсолютной температуре.

Для элементов схемы, не являющихся активными сопротивлениями, например для угольного сопротивления, для кристаллов и т. д., энергия шума больше вычисленной по приведенной выше формуле на величину температурного коэффициента шума. Существует понятие «эквивалентной температуры шума». Допустим, что в устройстве, имеющем какое-то сопротивление, создается шум в 10 раз больший, чем в однородном омическом сопротивлении такой же величины. Тогда говорят, что это устройство обладает эквивалентной температурой шума 2900°K , считая, что его действительная температура 290°K , принимаемая за стандартную комнатную температуру. (Такое допущение оправдано тем, что получаются простые цифры, а именно $4 \cdot 10^{-21}$ джоуль для произведения kT .)

Дробовой эффект (шот-эффект)

Дробовой эффект проявляется в виде шума, создаваемого неравномерной эмиссией электронов с катода лампы. Пространственный заряд лампы значительно уменьшает или сглаживает этот эффект. В тетрадах и пентодах наблюдается неравномерность анодного тока из-за непрерывного колебания количества электронов, поступающих на анод и на другие электроды, что приводит к образованию дополнительного падения напряжения на анодной нагрузке и в конечном итоге шума на выходе. Это имеет место и в триодах, однако уровень шумов пентодов значительно больше уровня шумов триодов.

Шум-фактор приемника

Шум-фактор приемника можно определить как отношение величины шум/сигнал на выходе приемника к величине шум/сигнал на входе приемника, или, короче, как отношение усиления шума к усилению сигнала. При этом учитываются те шумы, компоненты частот которых лежат в пределах полосы пропускания приемника. Поэтому шум-фактор тем больше, чем шире полоса пропускания.

Шум-фактор зависит от элементов схемы. Он может быть порядка 10—20. Большая часть шум-фактора обусловливается усилителем, остальная часть — кристаллическим смесителем. Шум, принимаемый антенной из окружающего ее пространства, приблизительно равен шуму, который создавался бы в омическом сопротивлении, равном сопротивлению излучения антенны. По сравнению с шумами, создаваемыми кристаллическим смесителем, эта величина шумов не играет значительной роли.

Кристаллические смесители

В кристаллических смесителях обычно применяются кремниевые кристаллы, помещаемые в приемно-передающей части антенно-фидерной системы.

В качестве гетеродина используется клистрон, часть выходной мощности которого (примерно 1 мвт) подается на кристалл, где происходит смешение колебаний гетеродина с сигналами, принимаемыми антенной. Потери пре-

образования в смесителе составляют от 5 до 10 дБ, а его эффективное полное сопротивление составляет 300—600 ом. Отношение сигнал/шум кристалла увеличивается (из-за гетеродина) по мере повышения тока покоя. Это отношение может достигнуть максимума до того, как ток кристалла станет максимальным. Практически наилучшее соотношение достигается регулировкой.

Усилитель промежуточной частоты

Обычно усилитель промежуточной частоты состоит из 6—10 каскадов. Общее усиление в нем достигает 80—100 дБ, причем напряжение на выходе может составлять величину от долей вольта до 10—20 в в зависимости от усиления видеокаскадов. На вход усилителя промежуточной частоты подается напряжение порядка нескольких микровольт.

Связь между каскадами осуществляется с помощью настроенных индуктивностей или трансформаторов, причем настройка ведется покаскадно для обеспечения заданной полосы пропускания. Например, если промежуточная частота 45 МГц, а требуемая полоса пропускания 10 МГц, то входные и выходные каскады могут быть настроены на 45 МГц, а все остальные каскады — попеременно на 40 и 50 МГц.

При расширении полосы пропускания улучшается форма импульса, но одновременно увеличивается выходное напряжение шума. В инженерной практике обычно берется среднее решение между точностью воспроизведения формы импульса и нужной величиной отношения сигнал/шум. Обычно является достаточной полоса пропускания, определенная по точкам половинной мощности, как $2/T$, где T — длительность импульса.

Величина промежуточной частоты в какой-то степени зависит от несущей частоты. Для метрового диапазона промежуточная частота выбирается от 2 до 10 МГц, для сантиметрового диапазона — от 30 до 60 МГц.

В качестве второго детектора может быть использован диод или германиевый кристалл. Ручная регулировка усиления может осуществляться обычными способами — изменением напряжения смещения в одном или нескольких каскадах или изменением напряжения на экранирующих сетках.

Видеоусилители

Видеоусилители необходимы для получения достаточной величины сигнала, модулирующего электронно-лучевую трубку (в зависимости от системы индикации может быть использована модуляция яркости луча или модуляция отклонения).

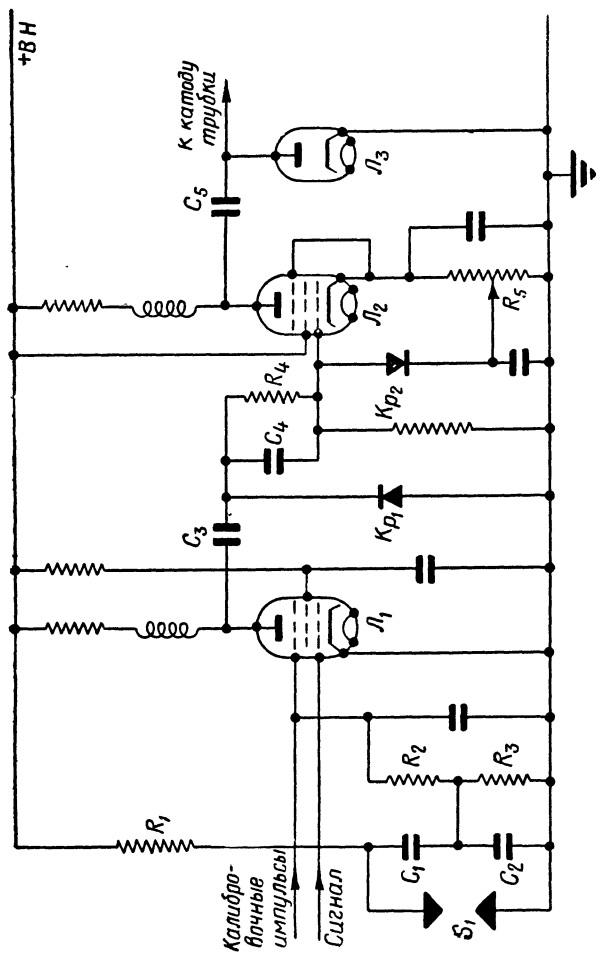
Видеосигналы используются также для управления схемой автоматического сопровождения и другими специальными схемами.

Кроме сигналов, поступающих от усилителя промежуточной частоты, видеоусилитель усиливает также калибровочные импульсы. В корабельной радиолокационной установке требуется, чтобы на экране индикатора кругового обзора была видна курсовая черта.

Рассмотрим обычную схему видеоусилителя (рис. 7.1), предназначенного для работы с индикатором кругового обзора.

Сигналы отрицательной полярности, соответствующие эхосигналам цели, поступают с выхода усилителя промежуточной частоты на сетку лампы L_1 , усиливаются лампами L_1 и L_2 и в виде отрицательных импульсов подаются на катод электронно-лучевой трубки, создавая яркостное изображение цели. Индуктивности в анодных цепях являются корректирующими, способствуя сохранению формы импульса. Кристаллический диод Kp_2 ограничивает амплитуду сигнала до величины, определяемой величиной переменного сопротивления R_5 . Сопротивление R_4 ограничивает ток, проходящий через диод Kp_2 , благодаря чему форма импульса не искажается при перегрузке лампы L_1 . Сопротивление R_4 шунтируется малой емкостью C_4 для того, чтобы пропустить крутой фронт импульса. Наличие кристаллического диода Kp_1 дает возможность конденсатору C_3 быстро разрядиться, как только сигнал прекращается. Диод обеспечивает восстановление постоянной составляющей, подаваемой на катод электронно-лучевой трубки, предотвращая возможность установления слишком большого положительного потенциала на катоде после прекращения сигнала цели.

Отрицательные импульсы калибратора подаются на антидлинатронную сетку лампы L_1 и запирают ее. Цепь $R_1C_1C_2R_2R_3$ обеспечивает подачу сигналов курсовой линии от антенны в момент замыкания выключателя S_1 . Конденсатор C_1 разряжается, создавая курсовую черту на экране.



Р и с. 7.1. Схема видеоусилителя

Существует много разновидностей схем видеоусилителей, применение которых определяется в зависимости от предъявляемых к ним требований.

Автоматическая подстройка частоты (АПЧ)

В связи с необходимостью поддерживать величину промежуточной частоты независимо от изменения частот клистрона и магнетрона в большинстве радиолокационных станций применяется автоматическая подстройка частоты.

Кроме ухода частоты из-за повышения температуры, на частоту магнетрона сильно действует изменение нагрузки, которое может быть следствием отражения мощных эхосигналов от ближайших объектов. Кроме того, изменение нагрузки может быть вызвано недостатками во вращающихся переходах, а также рядом других факторов.

Достаточно совершенная система автоматической подстройки частоты позволяет иметь узкую полосу пропускания приемника, удовлетворяя требованиям сохранения формы импульса.

Существует несколько схем автоматической подстройки частоты, одна из которых представлена на рис. 7.2. Необходимым элементом данной схемы является трансформатор L_1L_2 дискриминатора. Он настраивается на точное значение промежуточной частоты с помощью конденсаторов C_1 и C_2 .

Сигнал, поступающий от кристаллического смесителя схемы автоматической подстройки частоты, усиливается и подается на первичную обмотку трансформатора, а также в среднюю точку вторичной обмотки через конденсатор C_3 . При резонансе напряжение во вторичной обмотке L_2 отличается по фазе от входного напряжения на 90° , и поэтому напряжение, подаваемое на лампу L_1 , состоит из двух компонентов v_p и v_d , на 90° отличающегося от входного напряжения (векторная диаграмма *a*). в фазе с входным напряжением, поступающим от кристалла. То же самое относится к лампе L_2 , но компонент, отличающийся на 90° , имеет противоположное направление. Поэтому величина напряжений v_1 и v_2 на лампах L_1 и L_2 дискриминатора равны и результирующие выпрямленные токи создают одинаковые по величине, но противоположные по фазе напряжения на сопротивлениях R_2 и R_3 .

Напряжение на сетке лампы L_3 определяется смеще-

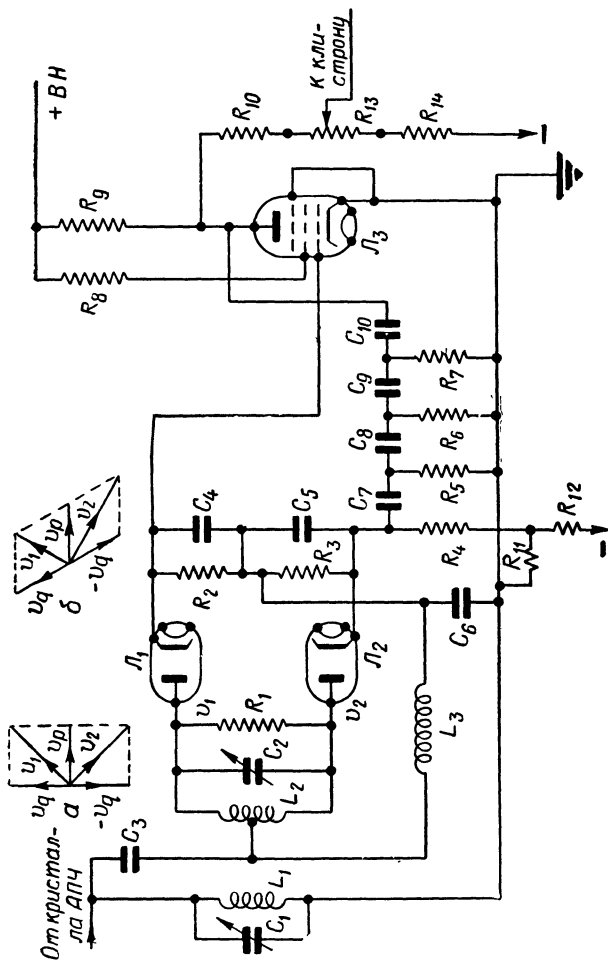


Рис. 7.2. Схема АПЧ

нием, подаваемым через сопротивление R_4 с делителя R_{11} , R_{12} (пренебрегая влиянием цепи R_{5-7} C_{8-10}). Напряжение на отражательном электроде клистрона определяется током, протекающим через лампу L_3 , и величиной переменного сопротивления R_{13} .

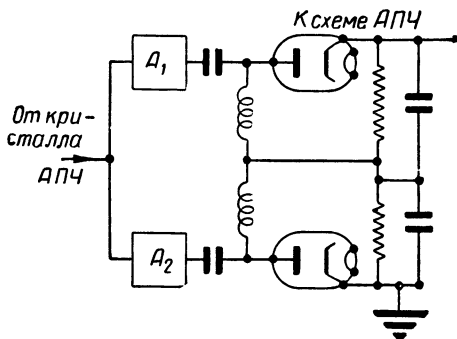
Теперь предположим, что по какой-то причине величина промежуточной частоты падает ниже заданной величины. Из векторной диаграммы (б) видно, что напряжение на сопротивлении R_3 будет больше напряжения на R_2 и напряжение на лампе L_3 упадет. Это приведет к уменьшению анодного тока и созданию большего отрицательного напряжения на отражательном электроде клистрона, что в свою очередь приводит к уменьшению частоты клистрона, корректируя таким образом промежуточную частоту. (Предполагается, что эта схема используется в том случае, если частота гетеродина ниже частоты магнетрона. В других случаях требуется обратное подключение диодов или переключение вторичной обмотки L_2 .) Полное сопротивление L_3 и C_6 соответственно высокое и низкое на промежуточной частоте и наоборот на частоте повторения импульсов.

На частотах, значительно отличающихся от точной величины промежуточной частоты, выходное напряжение дискриминатора слишком мало и схема не будет действовать. Чтобы избежать этого, лампу L_3 заставляют работать в качестве фазосдвигающего генератора $R=C$, используя цепи C_{8-10} R_{5-7} . Напряжение на отражателе клистрона заставляют меняться в достаточно широких пределах (с частотой порядка одного герца), при этом оно проходит через величину, необходимую для действия схемы. Когда появляется это напряжение и сетка лампы L_3 становится отрицательной, выходное напряжение дискриминатора в то же самое время стремится сделать ее положительной или наоборот. Генерирование прекращается, и лампа L_3 с этого момента действует как усилитель постоянного тока, удерживая клистрон на нужной частоте с помощью импульсов дискриминатора, как это было описано вначале.

Используемый в этой схеме генератор предназначен, таким образом, для обеспечения поиска по частоте в достаточно широком диапазоне, для того чтобы схема АПЧ могла быть приведена как в начальный, так и в любой другой момент к нужной номинальной частоте, если по какой-либо причине она перестала регулировать. Перво-

начальная регулировка схемы осуществляется сопротивлением R_{13} при отключенных дискриминаторе и цепи обратной связи.

В некоторых схемах специальный трансформатор дискриминатора, показанный на рис. 7.2, заменяется резонансными усилителями, из которых один подает напряжение на лампу \mathcal{L}_1 , другой — на лампу \mathcal{L}_2 (рис. 7.3).



Р и с. 7.3. Схема дискриминатора для системы АПЧ

Эти усилители настроены один на частоту выше точного значения промежуточной частоты, другой — ниже. На частоте, соответствующей точной величине промежуточной частоты, их выходные напряжения равны по величине, но противоположны по фазе. Если же частота отклоняется от этого точного значения, с одного из усилителей снимается большее напряжение на выходе, чем с другого, и разность напряжений управляет потенциалом на сетке лампы \mathcal{L}_3 , как и в описанном выше случае. Кроме этого отличия, схемы действуют аналогично.

АПЧ с использованием тиратронов

Вместо усилителя постоянного тока и генератора RC , описанных выше, можно применить схему на тиратронах.

Выходное напряжение дискриминатора любой из описанных выше схем усиливается по видеочастоте и подается в форме импульсов, следующих с частотой повторения основных импульсов, на вход схемы, изображенной на рис. 7.4. Схема рассчитана так, что при слишком

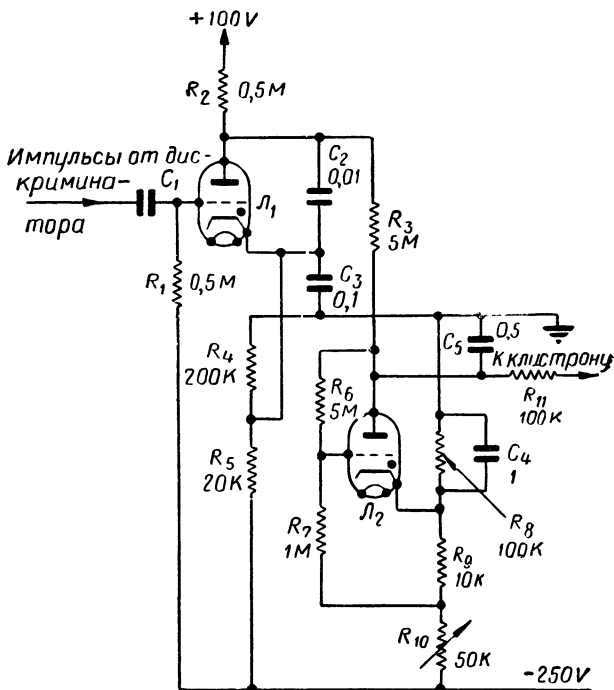
низкой частоте клистрона импульсы являются положительными, при слишком высокой — отрицательными. Если частота равна номинальной, импульсы отсутствуют.

В отсутствие импульсов лампа L_1 запирается по сетке отрицательным смещением. Конденсатор C_5 заряжается через цепочку сопротивлений R_2, R_3, R_6, R_7 , и когда его напряжение становится достаточно большим, лампа L_2 начинает проводить ток, так как величина смещения на ее сетке, определяемая сопротивлениями R_8, R_9, R_{10} , имеет соответствующую величину. Напряжение на конденсаторе C_5 , а следовательно, и на отражателем электроде клистрона падает до тех пор, пока лампа L_2 не запрется, после чего цикл повторяется вновь.

Таким образом, напряжение, приложенное к клистрону, изменяется в очень широких пределах с относительно низкой частотой (примерно один герц). В какой-то момент этого изменения, когда напряжение на отражателе клистрона повышается, а частота колебаний падает, от дискриминатора поступают положительные импульсы сразу же после момента прохождения частоты клистрона через точную величину в направлении уменьшения частоты. Эти импульсы имеют достаточную амплитуду для отпирания лампы L_1 , после чего падение потенциала на положительном конце цепочки сопротивлений $R_3... R_7$ остановит рост напряжения на конденсаторе C_5 . Тогда этот конденсатор начнет разряжаться через сопротивление R_3 и в результате будет повышаться частота клистрона. Когда она станет несколько выше точного значения, дискриминатор начнет выдавать отрицательные импульсы. Эти импульсы запирают лампу L_1 , так как к тому времени конденсатор C_2 разрядится и анодный ток будет очень небольшой величины, поэтому повышается потенциал на аноде лампы L_1 и одновременно на конденсаторе C_5 , который заряжается через сопротивление R_3 , и т. д. Это заставляет еще раз частоту клистрона понизиться, после чего цикл повторяется. Таким образом, частота изменяется примерно 50—100 раз в секунду в незначительном диапазоне в пределах полосы пропускания приемника в ту и другую сторону от точного значения промежуточной частоты. Лампа L_2 в дальнейшей работе схемы не играет никакой роли, если лампа L_1 не потеряет по какой-либо причине способность управления. Лампа L_2 предназначена для поиска по частоте в достаточно широком диапазоне.

Численные значения элементов схемы, приведенные на

рис. 7.4, даны только для того, чтобы показать порядок используемых величин. Переменное сопротивление R_{10} регулируется так, чтобы клистрон генерировал в заданном диапазоне.



Р и с. 7.4. Схема АПЧ на триодах

Временная автоматическая регулировка усиления (средство борьбы с местными помехами)

Для того чтобы избежать перегрузки приемника, при непосредственном попадании на вход его мощных импульсов генератора и мощных отраженных сигналов от

объектов, расположенных вблизи радиолокационной станции, необходимо запереть приемник во время передачи импульсов генератором и работать при уменьшенном коэффициенте усиления в течение нескольких микросекунд после окончания каждого импульса. Это обеспечивается временной автоматической регулировкой усиления, схемы которой различаются по сложности и составу элементов

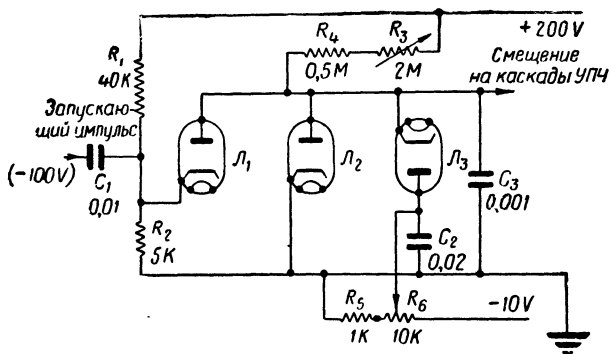


Рис. 7.5. Схема временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ)

в зависимости от типа радиолокационных станций. Принципиальная схема временной автоматической регулировки представлена на рис. 7.5.

В состоянии покоя лампа L_2 проводит ток, и напряжение на ее аноде, а следовательно, и напряжение смещения в каскадах промежуточной частоты в основном равны потенциалу земли. Коэффициент усиления приемника имеет нормальную величину.

В момент излучения передатчика на катод лампы L_1 подается отрицательный запускающий импульс порядка 20—100 в. Этот импульс может быть получен от вспомогательной обмотки импульсного трансформатора магнетрона или же снят с сопротивления, включенного в заземленный конец схемы магнетрона. Под влиянием этого импульса лампы L_1 и L_3 отпираются. Так как величина импульса значительна, то падение напряжения на лампах достаточно для получения отрицательного смещения и за-

пирания приемника. По окончании импульса напряжение смещения быстро повышается (становится менее отрицательным) до тех пор, пока лампа L_3 не запрется. Напряжение, при котором это происходит, зависит от величины сопротивления R_6 . В дальнейшем напряжение продолжает повышаться с меньшей скоростью, определяемой временем, которое необходимо для заряда конденсатора C_3 через сопротивления R_3 и R_4 . Это повышение напряжения продолжается до тех пор, пока лампа L_2 проводит ток, когда смещение равно нулю и восстановлена нормальная величина коэффициента усиления. В описанном выше случае это занимает примерно от 12 до 125 мксек в зависимости от величин R_3 и R_6 . Следует заметить, что скорость повышения напряжения определяется сопротивлением R_3 , но начальный момент зависит от величины R_6 .

Цифры, указанные на рис. 7.5, показывают только приблизительное значение величин.

Дифференцирование (средство борьбы с местными помехами)

В некоторых установках, в частности в Морских радиолокационных станциях с индикатором кругового обзора, сигналы, отраженные от близлежащих объектов, крупных волн или сильного дождя, могут изображаться на экране в виде интенсивных местных помех. Это может скрыть изображение мелких объектов и исказить картину изображения.

В этом случае возможно уменьшить постоянную времени одного из промежуточных видеокаскадов до величины порядка длительности импульса (введя, таким образом, дифференцирование), что способствует устранению большего количества местных помех и прояснению изображения. При таком способе несколько уменьшается усиление, но его можно компенсировать путем переключения сопротивлений различной величины в точках схемы, удобных для этой цели.

Автоматическая регулировка громкости

Так как средняя величина выходного напряжения радиолокационного приемника определяется в основном компонентами шума, работа системы АРГ, используемой

в связной аппаратуре, будет протекать почти полностью в шумах и не принесет существенной пользы. Однако АРГ иногда удачно используется в радиолокационных станциях для уменьшения усиления в случае сильных местных помех. Эффект в значительной мере сходен с тем, что дает метод дифференцирования.

Отличным от этого случаев является применение АРГ для слежения за одним определенным эхосигналом (см. главу XV).

Г Л А В А VIII

ПЕРЕДАЮЩИЕ ЛИНИИ (ФИДЕРЫ)

В радиолокационных станциях передающие линии используются для передачи высокочастотной энергии от передатчика к антенне и от антенны к приемнику.

Существуют три основных типа передающих линий: открытая двухпроводная линия, коаксиальный фидер и волновод.

Первый тип, использовавшийся в станциях метрового диапазона, в настоящее время является устаревшим в основном из-за больших потерь энергии на ультракоротких волнах за счет непосредственного излучения самого фидера. Кроме потери энергии, препятствием для использования открытых двухпроводных линий в современных станциях являются чрезмерные помехи.

Коаксиальные фидеры могут быть использованы для длины волн, начиная от очень больших величин до величин порядка 10 см; при работе на более коротких волнах обычно применяются волноводы. Строгой границы по диапазону частот в этой области не существует. И те и другие могут быть использованы для работы в десяти-сантиметровом диапазоне.

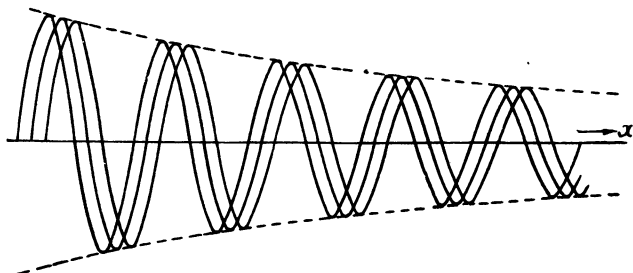
Распространение вдоль однородной линии

Если к концу однородной бесконечно длинной линии приложить переменное напряжение, то в любой точке напряжение будет изменяться синусоидально и в любой момент времени будет наблюдаться сдвиг фаз между напряжениями в разных точках линии. При затухании будут также различаться амплитуды напряжения.

В любой момент времени мгновенное напряжение бу-

дет изменяться синусоидально вдоль линии, уменьшаясь по амплитуде в случае затухания.

На рис. 8.1 показано распределение напряжения вдоль однородной линии для трех моментов времени, отстоящих друг от друга на $1/8$ часть периода. Кривые имеют форму волны, распространяющейся вдоль линии с одинаковой скоростью. Тому же закону подчиняется и ток в линии.



Р и с. 8.1. Распределение напряжения вдоль однородной линии

Если напряжение, приложенное к входному концу, равно $V \sin \omega t$, то напряжение в точке на расстоянии x равно

$$V e^{-\alpha x} = \sin(\omega t - \beta x),$$

где α — постоянная затухания;

β — постоянная фазы.

Комплексная величина $P = \alpha + j\beta$ называется постоянной распространения.

Приведенное выше выражение для напряжения показывает, что волна распространяется вдоль линии со скоростью ω/β .

Полное сопротивление на входе бесконечно длинной линии есть величина конечная. Она называется волновым сопротивлением (обычно обозначается Z_0). Ток в любой точке линии равен напряжению в этой точке, деленному на Z_0 . Если линия конечной длины имеет на конце нагрузку, полное сопротивление которой равно Z_0 , то полное сопротивление на входе ее тоже равно Z_0 .

Параметры линии

Если L , C , R , G представляют собой соответственно последовательно включенную индуктивность, параллельно включенную емкость, последовательно включенное сопротивление и параллельно включенную активную проводимость (на единицу длины линии), то можно вывести следующие формулы:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}};$$

$$P = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}.$$

В фидерах, используемых в радиотехнике, R и G относительно малы по сравнению с ωL и ωC . Поэтому формулы могут быть упрощены:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}; \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{Z_0} + Z_0 G \right);$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC}.$$

Необходимо заметить, что Z_0 является активным сопротивлением и что затухание, очевидно, не зависит от частоты. Однако практически этого не получается, так как с повышением частоты R увеличивается вследствие скинэффекта; G также возрастает (в основном из-за диэлектрических потерь и в меньшей степени из-за омической утечки).

Рассогласование полных сопротивлений. Отражение

Если линия конечной длины нагружена полным сопротивлением Z_r (не равным Z_0), то волны напряжения и тока частично отражаются от конца линии и устанавливаются новые волны, распространяющиеся в обратном направлении. К этим волнам применимы формулы, приведенные выше для волн, распространяющихся в прямом направлении, но член $\sin(\omega t - \beta x)$ необходимо заменить членом $\sin(\omega t + \beta x)$, так как эти волны распространяются в противоположном направлении. По этой же причине $e^{-\alpha x}$ заменяется на $e^{\alpha x}$.

Причина отражения волн может быть объяснена следующим образом.

Пусть V_1 и V_2 — амплитуды напряжения прямой и отраженной волн в точке подключения нагрузки, а I_1 и I_2 — соответствующие токи.

Учитывая, что в однородной линии амплитуда напряжения в Z_0 раз больше амплитуды тока, получим соотношения

$$V_1/I_1 = Z_0 \text{ и } V_2/I_2 = Z_0.$$

Но общее напряжение на нагрузке равно $V_1 + V_2$, а величина тока равна $I_1 - I_2$, откуда

$$(V_1 + V_2) = Z_r (I_1 - I_2).$$

Решая эти уравнения, находим, что

$$V_2/V_1 = \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0} = K,$$

где K — коэффициент отражения.

Если Z_r омическое сопротивление, K — действительное число, имеющее положительный или отрицательный знак в зависимости от того, больше или меньше Z_r величины Z_0 . Положительное значение Z_r показывает, что волна напряжения отражается без изменения фазы, отрицательное значение показывает, что фаза отраженной волны изменяется на 180° .

Если Z_r — величина комплексная, равная, например, $R_r + jX_r$, то K также является комплексной величиной и ее значение равно

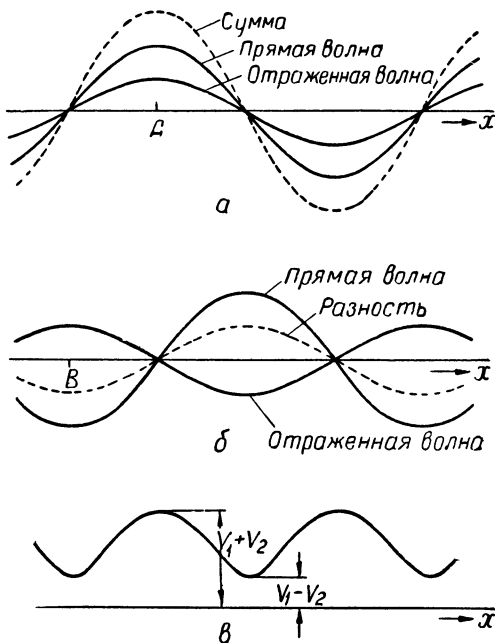
$$K = \left[\frac{(Z_0 - R_r)^2 + X_r^2}{(Z_0 + R_r)^2 + X_r^2} \right]^{1/2}.$$

При наличии какой-либо неоднородности полного сопротивления по длине, например в точках между началом и концом линии, прямые волны частично отражаются от этой неоднородности, и частично распространяются дальше.

Стоячие волны

При взаимодействии прямой и отраженной волн появится ряд точек, расположенных на расстоянии полуволны друг от друга, в которых обе волны в один и тот же момент достигают максимального значения, изменяясь в одинаковом

направлении. В точках, расположенных по середине по отношению к предыдущим, т. е. на четверть периода позже, волны достигнут максимального значения также одновременно, но изменяясь в противоположных направлениях. Это



Р и с. 8.2. Образование стоячих волн в однородной линии

показано на рис. 8.2, а и 8.2,б. Максимум в точке А является суммой максимальных значений напряжения прямой и отраженной волн, в то время как в точке В изображена их разность. Кривая на рис. 8.2, в показывает изменение результирующей кривой максимумов для различных точек вдоль линии. Отношение величины $V_1 + V_2$ и $V_1 - V_2$ называется коэффициентом стоячей волны (КСВ). Он обычно обозначается буквой S и равен отношению $(1 + \kappa) / (1 - \kappa)$.

Иногда S определяют, как отношение $(1 - \kappa) / (1 + \kappa)$, т. е. величиной, обратной предыдущей. Такое неустановившееся определение не вызывает, однако, недоразумения, так как в первом случае S никогда не может быть меньше единицы, а во втором — больше единицы.

Коэффициент стоячей волны по току численно равен коэффициенту по напряжению, но точки максимального тока соответствуют точкам минимального напряжения и наоборот.

Полное входное сопротивление

Полное входное сопротивление линии длиной l с оконечной нагрузкой Z_r определяется равенством

$$Z_i = Z_0 \left(\frac{Z_r \cos hPl + Z_0 \sin hPl}{Z_0 \cos hPl + Z_r \sin hPl} \right),$$

где

$$\cos hPl = \frac{e^{Pl} + e^{-Pl}}{2};$$

$$\sin hPl = \frac{e^{Pl} - e^{-Pl}}{2}.$$

Если пренебречь величинами R и G , то выражение примет следующий вид:

$$Z_i = Z_0 \left(\frac{Z_r \cos \beta l + jZ_0 \sin \beta l}{Z_0 \cos \beta l + jZ_r \sin \beta l} \right).$$

Отношение $\frac{\text{напряжение на входном конце линии}}{\text{ток в нагрузке}}$, называемое полным сопротивлением, на конце линии равно

$$Z_0 \sin hPl + Z_r \cos hPl,$$

которое упрощается и принимает вид

$$Z_r \cos \beta l + jZ_0 \sin \beta l,$$

если пренебречь величинами R и G .

При $Z_r = Z_0$ полное входное сопротивление и полное сопротивление на конце линии равны по величине. В особом случае, когда $l = \lambda/4$, $Z_i = Z_0^2/Z_r$.

Следовательно, четвертьволновая линия может быть использована в качестве преобразователя полного сопротивления. В этом случае, если дальний конец линии разомкнут, полное входное сопротивление равно нулю (эквивалентно последовательному резонансу контура). Если же дальний конец замкнут накоротко, то полное входное сопротивление равно бесконечности (параллельный резонанс). Практически, так как R и G не равны нулю, входное сопротивление будет соответственно очень малым или очень большим, а не нулевым или бесконечно большим. Достаточно точно фактические значения определяются величинами $Z_0 a l$ и $Z_0 / a l$.

Соотношение между полным сопротивлением нагрузки и коэффициентом стоячей волны

Определив величину коэффициента стоячей волны и положение точек с минимальным значением напряжения, можно определить полное сопротивление нагрузки.

Для этого случая применима формула

$$Z_r = Z_0 \left[\frac{2S - j(S^2 - 1) \sin \varphi}{(S^2 + 1) + (S^2 - 1) \cos \varphi} \right],$$

где $\varphi = \frac{4\pi a}{\lambda}$ радиан ($720 \frac{a}{\lambda}$ градусов),

a — расстояние первой точки минимума напряжения от нагрузки.

Полное сопротивление на входном конце фидера можно подсчитать по формуле

$$Z_0 \left[\frac{2S + j(S^2 - 1) \sin \theta}{(S^2 + 1) + (S^2 - 1) \cos \theta} \right],$$

где $\theta = \frac{4\pi b}{\lambda}$ радиан,

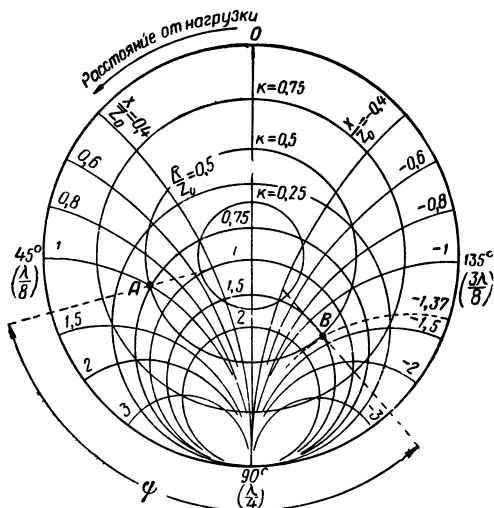
b — расстояние от входного конца до ближайшего минимума напряжения.

Ниже приводится соответствующая формула, выраженная через k :

$$Z_0 \frac{(1 - k^2) + j2k \sin \theta}{(1 + k^2) + 2k \cos \theta}.$$

Диаграмма Смита

Многие аналитические расчеты, приведенные выше, можно выполнить графическим методом с помощью диаграммы Смита, схематически представленной на рис. 8.3.



Р и с. 8.3. Диаграмма Смита

Диаграмма состоит из трех семейств окружностей, представляющих собой коэффициент стоячей волны κ , активное сопротивление R/Z_0 и реактивное сопротивление X/Z_0 (последние две величины выражаются через Z_0).

Радиусы окружностей соответственно равны:

$$\kappa, \frac{1}{1 + R/Z_0}, Z_0/X.$$

Для однородной линии (с волновым сопротивлением Z_0) с оконечной нагрузкой $Z_r = R + jX$ полное сопротивление линии в любом месте ее определяется положением точки на окружности радиуса κ .

Пример. Пусть точка А представляет нагрузку (в этом случае $R/Z_0 = 0,75$; $X/Z_0 = 1$; $\kappa = 0,5$); полное сопротивление

ние, измеренное на расстоянии x от нагрузки, представлено точкой B и равно $1,5 - j 1,37$ (угол $\psi \frac{360^\circ}{\lambda}$ представляет собой расстояние в электрических градусах).

Если диаграмма предназначена для решения различных задач, то количество окружностей может быть сколь угодно велико, лишь бы не потерялась ясность рисунка.

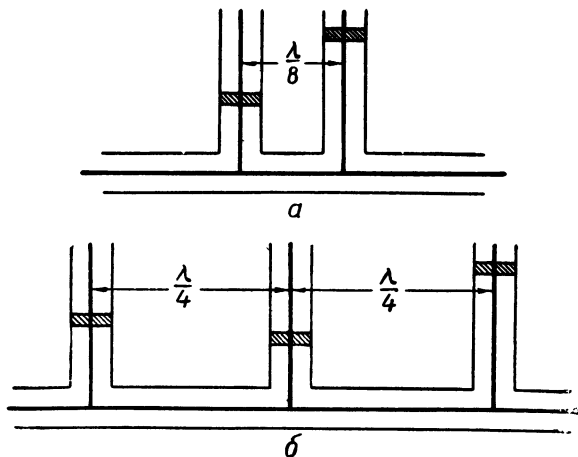
Для расчета специального случая на диаграмму наносят только те окружности, которые требуются для решения данной задачи.

Один полный круг диаграммы соответствует 180 электрическим градусам (π — радиан), или половине длины волны.

Согласование полных сопротивлений

Согласование полных сопротивлений необходимо для устранения взаимодействия энергий прямой и отраженной волн, возникновения больших величин напряжений в результате образования стоячих волн, облегчающих условия пробоя, и т. п.

Так как короткозамкнутый отрезок линии представляет



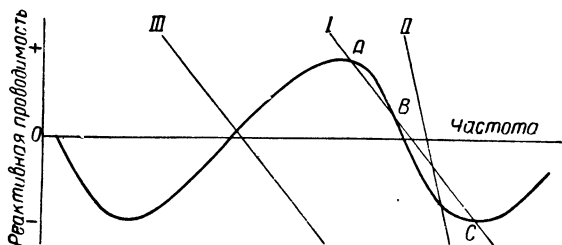
Р и с. 8.4. Применение регулируемых шлейфов для согласования полных сопротивлений

собой реактивное сопротивление, величина которого зависит от его длины, для согласования могут быть использованы 2 шлейфа, помещенные недалеко от нагрузки (рис. 8.4, а). Длины шлейфов подбираются независимо друг от друга передвижением закорачивающих плунжеров до достижения полного согласования, при котором $KCB = 1$. Такое устройство позволяет выполнить согласование только в определенных пределах. Устройство же, показанное на рис. 8.4, б, с тремя шлейфами теоретически обеспечивает согласование при любой степени расстройки, хотя практически значительная расстройка вызывает много затруднений.

Эффект длинной линии

Полное входное сопротивление фидера, соединенного с нагрузкой, при недостаточном согласовании зависит, помимо других причин, от электрической длины линии. Незначительное изменение частоты изменяет электрическую длину, а следовательно, и полное входное сопротивление. Это изменение полного сопротивления может повлиять на частоту генератора, т. е. магнетрона, работающего на входной конец линии. Линия ведет себя нестабильно, если длина ее достаточна для возникновения указанного эффекта.

На рис. 8.5 показано изменение полного входного сопротивления длинного фидера в зависимости от частоты. Прямая I, пересекающая кривую, показывает соотношение между частотой генератора и величиной реактивного сопротивления подключенного к нему, т. е. входного реактивного сопротивления фидера. Эта прямая пересекает кривую в трех точках — А, В, С. Точки А и С характеризуют стабильный режим, точка В — нестабильный. Таким образом, воз-



Р и с. 8.5. Эффект длинной линии

никнет неопределенность, и заранее нельзя сказать, будет ли генератор работать на частоте, соответствующей точке *A* или *C*. Следующие друг за другом импульсы могут быть на различных частотах.

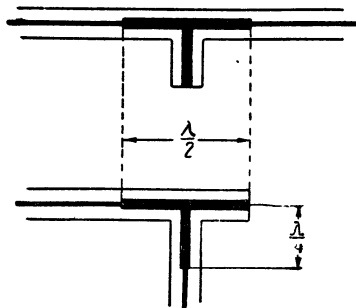
Для того чтобы избежать этого явления, необходимо или применить генератор, слабо реагирующий на изменение сопротивления фидера, или укоротить фидер так, чтобы его входное полное сопротивление не сильно изменялось с изменением частоты в рабочем диапазоне. Каждая из этих мер приводит к тому, что прямая *II* пересекает кривую только в одной точке.

Если нельзя применить ни одно из этих средств, то изменяется длина фидера таким образом, что линия *I* передвигается в положение линии *III*, тогда кривая будет пересекаться только в одной точке, что создаст удовлетворительные условия работы. Но в этом случае необходимо ввести в фидер какое-либо устройство для регулировки фазы, обеспечивающее соответствие электрической длины линии генерируемой частоты, питающей линию.

Заметим, что все эти соображения отпадают, если длина фидера такова, что импульс передатчика прекращается до момента возвращения отраженной волны от дальнего конца линии.

Конструкция коаксиального фидера

В качестве гибкого фидера применяется концентрический (коаксиальный) кабель с соответствующим диэлектриком, например полиэтиленом.



Р и с. 8.6. Крепящий шлейф для коаксиального фидера

Жесткий фидер имеет форму трубы, внутри которой помещается проводник, укрепленный на диэлектрических шайбах.

Можно укрепить внутренний проводник и другим способом, используя для этого четвертьволновый шлейф, полное сопротивление которого при резонансе бесконечно.

Диаметр внутреннего проводника делается больше в точках его крепления (как показано на рис. 8.6), чем компенсируется в некоторой степени влияние того, что полное сопротивление шлейфа бесконечно только на одной частоте. Эти меры позволяют работать в полосе частот шириной от 20 до 30% от среднего значения.

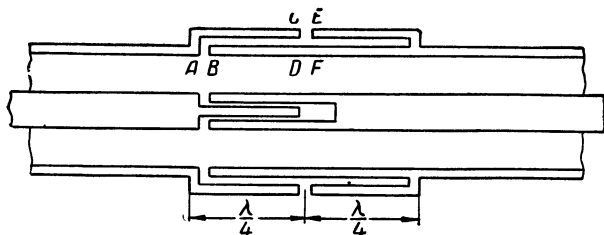
Предельные размеры

Полное сопротивление коаксиальной линии пропорционально логарифму отношения диаметров наружного и внутреннего проводников. Для данной величины полного сопротивления это отношение постоянно. При большой мощности, например в фидерах передатчика, необходимо иметь достаточное расстояние между проводниками во избежание пробоя, опасность которого увеличивается при большом КСВ. Однако нельзя допускать, чтобы внутренний диаметр наружного проводника превосходил величину 0,6 от рабочей длины волны в свободном пространстве, иначе появится опасность того, что линия будет являться одновременно и волноводом и коаксиальной линией. Взаимодействие двух видов передач приведет к недопустимым условиям работы. Это относится к воздушной изоляции. Для твердой изоляции соответствующая величина составляет $0,6 / \sqrt{\epsilon}$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика по отношению к воздуху.

Вращающиеся переходы

Полное сопротивление между точками E и F на рис. 8.7 бесконечно, так как эти точки находятся на конце короткозамкнутого четвертьволнового отрезка. Полное сопротивление между точками C и D также бесконечно, несмотря на то, что между точками C и E могут появиться случайные соединения из-за грязи и по другим причинам.

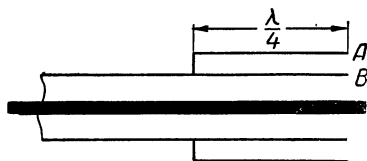
Полное сопротивление между точками A и B равно нулю. Такое устройство обеспечивает идеальное соединение между двумя половинами вращающегося сочленения при отсутствии трущихся контактов, практическое применение которых становится нецелесообразным.



Р и с. 8.7. Вращающийся коаксиальный переход

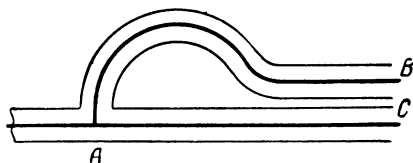
Симметрирующее переходное устройство

Однопроводная коаксиальная линия (ее внешняя поверхность) обязательно имеет потенциал земли, а несущая внутренняя жила имеет высокочастотный потенциал. Если же



Р и с. 8.8. Симметрирующее переходное устройство

требуется симметричное питание, например диполя, то можно применить устройство, показанное на рис. 8.8. Оно содержит второй внешний проводник длиной $\lambda/4$. Так как полное сопротивление между точками A и B бесконечно, то проводник, который первоначально был наружным, эффективно изолируется от земли на выходном конце.



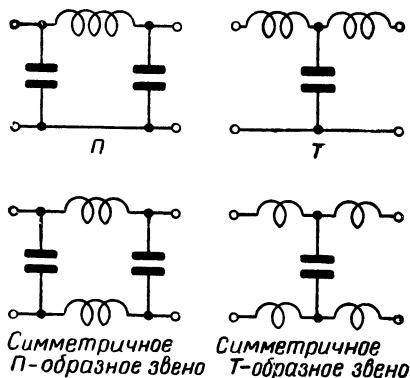
Р и с. 8.9. Симметрирующее переходное устройство (полуволновый тип)

Такое устройство носит название симметрирующего переходного устройства, или четвертьволнового экрана.

Другой тип симметрирующего устройства показан на рис. 8.9. Длины двух отрезков в нем AB и AC отличаются друг от друга на полволны.

Искусственные линии

Любая цепь, представленная на рис. 8.10, может заменить короткий отрезок однородной линии. Полная искус-



Р и с. 8.10. Типы звеньев искусственной линии

венная линия состоит из ряда таких звеньев, включенных последовательно.

При этом получается не полное, но достаточно близкое соответствие действительной передающей линии, если каждое звено эквивалентно незначительной части длины волны.

Искусственные линии используются в качестве устройств, создающих задержку, и применяются в тех случаях, когда действительные линии оказываются слишком длинными для этих целей.

Искусственные линии могут быть также использованы для формирования импульсов.

В качестве фидеров искусственные линии обычно не применяются.

ГЛАВА IX

ВОЛНОВОДЫ, РУПОРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ И ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Практически целесообразно применять волноводы только на сверхвысоких частотах, так как размеры их должны быть порядка рабочей длины волны. В десятисантиметровом диапазоне используются и волноводы и коаксиальные фидеры, но на более коротких волнах, например в трехсантиметровом диапазоне, почти всегда применяются волноводы, так как при этом обеспечиваются низкое затухание и большие величины пропускаемой мощности на ультравысоких частотах.

Волноводы представляют собой металлические трубы круглого или прямоугольного сечения, причем последние имеют более широкое применение. Для обеспечения малого затухания используется медь с высокой проводимостью, а в некоторых случаях внутренняя поверхность волновода покрывается серебром для обеспечения еще лучшей проводимости.

Типы волн

Законы распространения энергии в волноводе те же, что и в свободном пространстве, но картина поля иная, так как на поверхности идеального проводника не может быть ни тангенциальной составляющей электрического поля, ни перпендикулярной ей составляющей магнитного поля (в этом случае медь рассматривается как идеальный проводник). Более того, можно показать, что для распространения необходимо наличие электрической или магнитной составляющих поля, расположенных в направлении распространения, в то время как при распространении в свободном пространстве

электрическая и магнитная составляющие расположены перпендикулярно по отношению к направлению распространения.

Волны, имеющие продольную магнитную составляющую (т. е. расположенную в направлении распространения), называются волнами типа H или TE (поперечно-электрические); волны, имеющие продольную электрическую составляющую, называются волнами типа E или TM (поперечно-магнитные).

Существуют различные типы волн, характеризующиеся различным расположением электрических и магнитных составляющих поля. Наибольшее практическое значение имеют волны типа H_{01} (или TE_{01}) в прямоугольных волноводах и волны типа E_{01} (или TM_{01}) и H_{11} (или TE_{11}) в круглых волноводах. Круглые волноводы применяются только там, где нужна осевая симметрия, например во вращающихся переходах.

Прямоугольный волновод. Волна типа H_{01}

Расположение электрических и магнитных силовых линий в прямоугольном волноводе при распространении волны типа H_{01} показано на рис. 9.1.

Электрическое поле везде перпендикулярно широкой стороне волновода, а интенсивность его изменяется синусоидально от 0 у стенок волновода до максимальной величины в середине. Магнитные силовые линии представляют собой замкнутые витки (петли), которые движутся вдоль

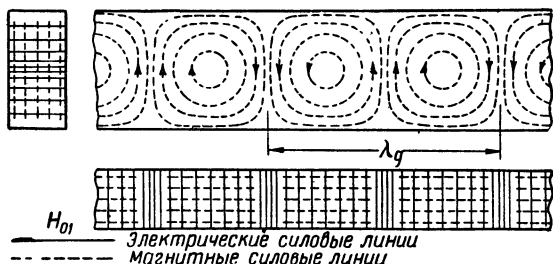


Рис. 9.1. Прямоугольный волновод. Электрическое и магнитное поля

волновода в направлении распространения с так называемой фазовой скоростью.

В любой точке интенсивность обоих полей изменяется синусоидально во времени.

Длина волны в волноводе и критическая частота

Частота, соответствующая длине волны (в свободном пространстве), равной удвоенному размеру широкой стороны волновода, называется критической частотой f_c . Частоты ниже этой величины передаваться по волноводу не могут.

Фазовая скорость больше скорости света c и равна

$$\frac{c}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}},$$

где f — действительная частота, передаваемая по волноводу.

Поэтому длина волны в волноводe λ_g больше, чем длина волны в свободном пространстве λ_0 . Соотношение между ними определяется равенством

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2},$$

где λ_c — длина волны в свободном пространстве, соответствующая критической частоте волновода.

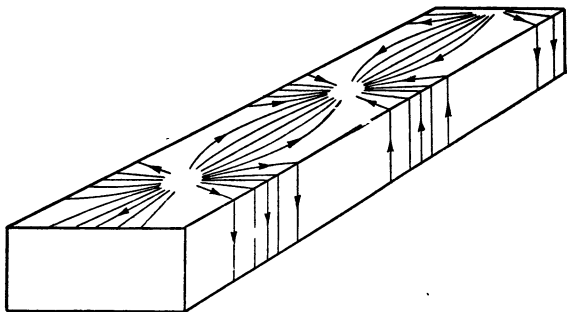
Хотя вся картина поля перемещается вдоль волновода быстрее скорости света, «пакет» волн, образующих импульс, распространяется с более низкой скоростью, называемой групповой скоростью, равной

$$c \sqrt{1 - (f_c/f)^2}.$$

Чем больше узкая сторона волновода, тем больше допустимая величина передаваемой мощности. Однако размер узкой стороны должен быть меньше половины длины волны в свободном пространстве во избежание образования других типов волн.

Применяются волноводы различных размеров, но наиболее распространенными является $76,22 \text{ мм} \times 38,1 \text{ мм}$ ($3 \times 1\frac{1}{2}$ дюйма) для десятисантиметрового диапазона и

25,4 мм × 12,7 мм (1 × 1/2 дюйма) для трехсантиметрового диапазона. Внутренние размеры волноводов соответственно равны 72 мм × 34 мм и 22,9 мм × 10,2 мм.



Р и с. 9.2. Линии тока в стенках волновода

На рис. 9.2 показаны линии тока в стенках волновода. Ток проходит по очень тонкому слою внутренней поверхности волновода.

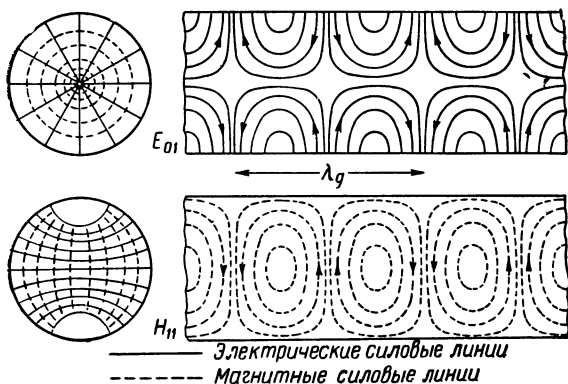
Типы волн высшего порядка

При достаточно больших размерах волновода картина поля в поперечном сечении его получается более сложной, так как витки магнитного поля могут располагаться в несколько рядов. Практически выбирают такие размеры, при которых типы волн высшего порядка не могут существовать в волноводе.

Круглые волноводы

Низшим типом волны является H_{11} . Критическая частота в этом случае равна $3,41/a$, где a — внутренний диаметр волновода.

Следующим типом волны является E_{01} с критической частотой $2,61/a$. Картины полей этих типов волн показаны на рис. 9.3. Благодаря осевой симметрии поля волны типа E_{01} используются во вращающихся переходах. Для устранения других, нежелательных типов волн диаметр волновода



Р и с. 9.3. Круглый волновод. Электрическое и магнитное поля

делается достаточно малым. Однако это не приводит к подавлению волн типа H_{11} , в связи с чем приходится принимать другие меры.

Формулы, определяющие соотношение фазовой и групповой скоростей, критической длины волны и длины волны в волноводе, те же, что и для прямоугольного волновода.

Полное сопротивление и согласование

Требование согласования полных сопротивлений во избежании большого КСВ, рассмотренное применительно к коаксиальным линиям, полностью относится и к волноводам.

В отношении определения понятия «полное сопротивление волновода» возникают затруднения, так как его нельзя просто определить как отношение напряжения к току. Существует несколько различных определений, базирующихся на понятии волнового сопротивления и понятии характеристического сопротивления волновода.

$$\begin{aligned}
 &\text{а) Волновое сопротивление} = \\
 &= \frac{\text{напряженность поперечного электрического поля}}{\text{напряженность поперечного магнитного поля}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}}
 \end{aligned}$$

Напряженности полей измеряются соответственно в вольтах на метр и в амперах на метр, а полное сопротивление — в омах.

б) Характеристическое сопротивление =

$$= \frac{(\text{напряжение})^2}{\text{передаваемая мощность}} = \frac{2b\eta}{a \sqrt{1 - (f_c/f)^2}}.$$

В формуле берется эффективное напряжение, измеренное между средними точками широких сторон волновода (прямоугольной формы).

В вышеприведенных выражениях, относящихся к волнам типа H_{01} в прямоугольном волноводе, $\eta = 377 \text{ ом}$ (волновое сопротивление свободного пространства); a и b — внутренние размеры широкой и узкой сторон волновода.

На основании формул для указанных двух размеров волноводов получаются данные, приведенные в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Размер	Диапазон, см	Волновое сопротивле- ние, ом	Характери- стическое сопротивле- ние, ом
76,2 мм × 38,1 мм ($3 \times 1\frac{1}{2}$ дюйма)	10	524	495
25,4 мм × 12,7 мм ($1 \times \frac{1}{2}$ дюйма)	3	498	443

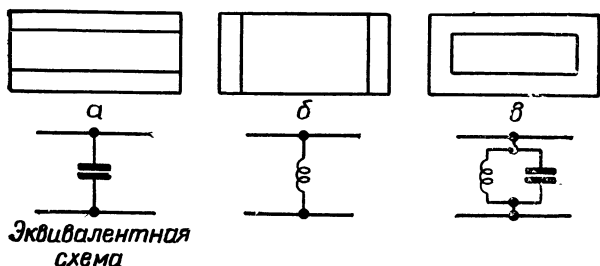
Можно избежать многозначности, связанной с различными определениями, используя понятие «нормализованного» сопротивления, т. е. сопротивления, выраженного в относительных величинах (величина в омах, отнесенная к размерам волновода). Практическое значение такого определения заключается в том, что оно связывает отсутствие отражений и, следовательно, стоячих волн ($KCB = 1$) с наличием согласования сопротивлений.

Согласующие элементы

Тонкая металлическая перегородка (диафрагма), установленная в волноводе перпендикулярно направлению распространения волн, действует как сосредоточенное сопро-

тивление. Диафрагмы используются для подавления нежелательных отражений и по действию аналогичны индуктивности или емкости, шунтирующих коаксиальную или двухпроводную линии передач.

На рис. 9.4 показаны схемы емкостной, индуктивной и резонансной диафрагм и их эквиваленты.



Р и с. 9.4. Реактивные диафрагмы для волноводов

При достаточно большой передаваемой мощности предпочтение отдается индуктивному типу диафрагмы, так как емкостной тип облегчает возникновение разряда в поперечном сечении волновода.

Согласование сопротивлений двух волноводов различного сечения осуществляется с помощью конического соединения, обеспечивающего постепенный переход от поперечного сечения одного волновода к другому. Кроме того, согласование может быть осуществлено включением отрезка волновода с промежуточным сечением, что аналогично применению четвертьволнового трансформатора в передающих линиях. Таким образом, можно соединить волновод с магнетроном, в котором выход имеет форму щели в одном из объемных резонаторов.

Металлическая пластина, помещенная поперек волновода, действует как короткозамкнутая цепь. Разомкнутую цепь в волноводе создать сложно, так как открытый конец волновода будет излучать большую мощность.

Для согласования нагрузки с волноводом, так же как и в коаксиальных линиях, применяются короткозамкнутые шлейфы. Регулировка их осуществляется специальными поршнями.

В реальных волноводных трактах имеется много точек с различными сопротивлениями. Каждая такая точка должна быть согласована самостоятельно. Одно согласующее устройство на конце волновода нельзя использовать, так как фазовая скорость, а следовательно, и разность фаз в различных точках изменяется с изменением частоты.

В волноводах, так же как и в коаксиальных фидерах, проявляется эффект длинной линии.

Регуляторы фазы и аттенюаторы

Диэлектрик, введенный в волновод, изменяет скорость распространения волны и создает разность фаз. Его влияние незначительно, если он помещен около стенки волновода, и увеличивается до максимума при перемещении диэлектрика к центру, где электрическое поле наиболее интенсивно.

Такой диэлектрик, как смесь бакелита с графитом, будучи помещен в волновод, создает в нем затухание.

Во избежание отражений элемент, сделанный из этого материала, должен иметь концы переменного сечения. Такое устройство дает возможность получить затухание до 20—30 дб.

Для получения переменного затухания можно перемещать в волноводе пластину из материала, обладающего электрическими потерями. Соответствующая регулировка осуществляется через щель в волноводе.

При большой передаваемой мощности вместо пластинки в волновод помещают стеклянную трубку, по которой циркулирует вода.

Пропускаемая мощность

Максимальная мощность, которую может передать волновод, ограничивается диэлектрической прочностью воздуха внутри волновода, которая при нормальной температуре и давлении равна $2,9 \cdot 10^6$ в/м. Если принять за безопасную рабочую величину $1,5 \cdot 10^6$ в/м, то по формуле для характеристического сопротивления, определяющей отношение между мощностью и напряжением, можно вычислить, что стандартный волновод размером $76,2 \text{ мм} \times 38,1 \text{ мм}$ ($3 \times 1\frac{1}{2}$ дюйма) пропускает мощность 2,6 мвт в диапазоне 10 см, а волновод $25,4 \text{ мм} \times 12,7 \text{ мм}$ ($1 \times 1\frac{1}{2}$ дюйма) — 265 квт в трехсантиметровом диапазоне.

Если КСВ значительно больше единицы, максимальная пропускаемая мощность будет меньше; например, при $КСВ = 1,5$ мощность уменьшится примерно на 30% при условии, что пиковое напряжение остается таким же по величине.

Для аппаратуры, размещенной на самолетах, находящихся на большой высоте, максимально допустимая мощность приблизительно пропорциональна давлению воздуха. Когда требуется передавать возможно большую мощность, волноводы герметизируются и в них создается небольшое избыточное давление. Шероховатость и острые выступы на внутренней поверхности волновода снижают максимально допустимое напряжение.

Затухание в волноводах

Ток в стенках волновода создает потери из-за омического сопротивления материала.

Для прямоугольного волновода, передающего волну типа H_{01} , затухание определяется следующим выражением:

$$\alpha = \frac{R_s}{b\eta_0} \left[\frac{1 + \frac{2bf_c^2}{af^2}}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \right] \text{ nep/м}$$

(умножив на 8,7, получим децибелы),

где R_s — поверхностное удельное сопротивление материала волновода;

η_0 — волновое сопротивление свободного пространства;

f — рабочая частота;

f_c — критическая частота волновода;

a и b — широкая и узкая стороны волновода (внутренние размеры).

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_m}{2\sigma_m}},$$

где μ — магнитная проницаемость;

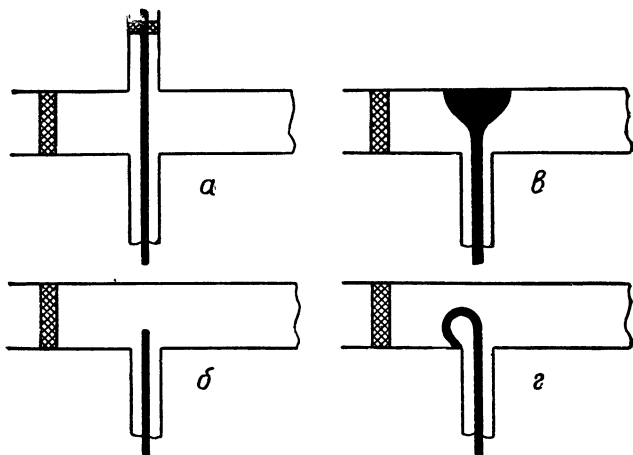
σ_m — проводимость материала волновода.

Затухание, рассчитанное по этой формуле для медных волноводов при $\mu_m = 4\pi \cdot 10^{-7}$, $\sigma_m = 5,8 \cdot 10^{-7}$, равно 2 дБ на 100 м для волновода десятисантиметрового диапа-

зона ($76,2 \text{ мм} \times 38,1 \text{ мм}$) и 11 дБ на 100 м для волновода трехсантиметрового диапазона ($25,4 \text{ мм} \times 12,7 \text{ мм}$). Затухание увеличивается в том случае, если внутренняя поверхность волновода грязная или окислившаяся.

Связь коаксиального фидера с волноводом

На рис. 9.5 показаны различные способы связи коаксиального фидера с волноводом. На рис. 9.5 а внутренний



Р и с. 9.5. Способы связи коаксиального фидера с волноводом

проводник коаксиального фидера проходит через волновод и заканчивается четвертьволновым шлейфом. Согласование достигается регулировкой длины этого шлейфа, а также поршнем, замыкающим левый конец волновода.

На рис. 9.5 б внутренний проводник заканчивается зондом. Согласование достигается различной степенью погружения этого зонда внутрь волновода и регулировкой положения замыкающего поршня волновода, так же как и в предыдущем случае.

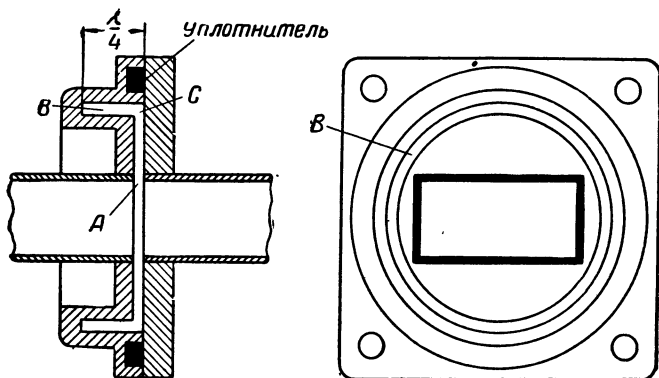
На рис. 9.5 в показано согласование, известное под названием «пуговичного».

На рис. 9.5 г изображена петля связи.

Соединение волноводов

Соединение двух отрезков волноводов осуществляется с помощью дроссельных фланцев, как показано на рис. 9.6. Четвертьволновая щель B имеет полное сопротивление, равное бесконечности в точке C , и создает нулевое сопротивление в промежутке A , находящемся на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины волны от C . Таким образом, два отрезка волновода эффективно соединяются при отсутствии действительного контакта.

Теоретически контур щели должен соответствовать поперечному сечению волновода, но в целях упрощения тех-



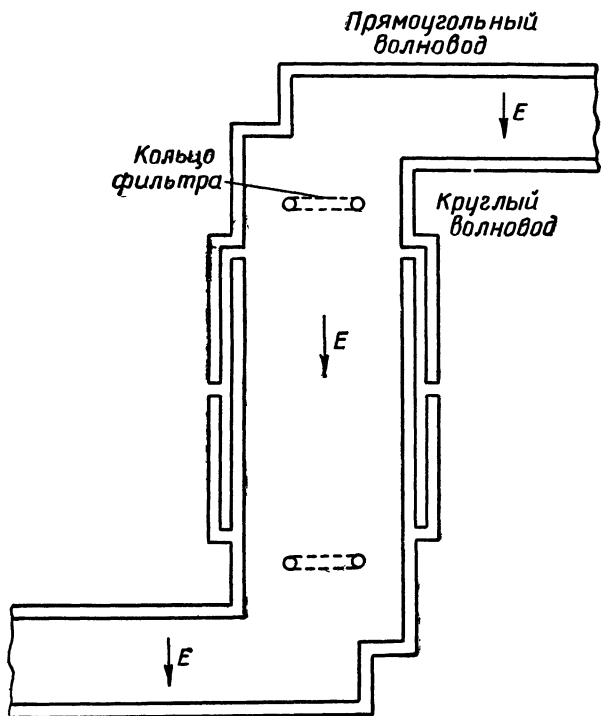
Р и с. 9.6. Дроссельный фланец для волноводов

нологии изготовления он делается круглым. При расчете радиуса щели необходимо иметь в виду, что ток максимален в центральной части широкой стороны волновода.

Вращающийся переход

На рис. 9.7 представлен наиболее распространенный вид вращающегося перехода, в котором волны типа H основного прямоугольного волновода преобразуются в волны типа E в отрезке круглого волновода. Так как волны типа E имеют осевую симметрию, то верхняя часть всего устройства может вращаться относительно нижней части без нежелательных явлений.

В основе соединения двух половин круглого волновода, так же как и в коаксиальных линиях, лежит принцип четвертьволновой линии. Для того чтобы в круглой части вол-



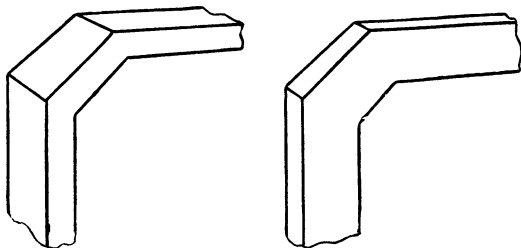
Р и с. 9.7. Вращающийся переход для волновода

новода не появились волны типа H_{11} , используются резонансные фильтрующие кольца.

В другом типе перехода имеет место преобразование типа волны и передача энергии из волновода в коаксиальный фидер и снова в волновод. При этом вращающимся переходом является коаксиальная часть.

Угловые волноводные переходы

Если позволяют габариты, лучшим является постепенный плавный переход достаточной длины (несколько длин волн). При необходимости экономии места могут использо-

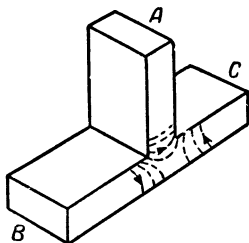


Р и с. 9.8. Угловые волноводные переходы

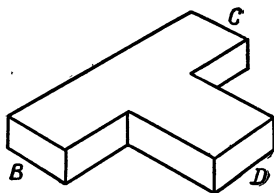
ваться изгибы, изображенные на рис. 9.8. При соответствующем расчете они могут применяться для работы в полосе частот примерно $\pm 10\%$.

Волноводные ответвители

Энергия, поступающая в колено *A* Т-образного волновода (рис. 9.9) равномерно распределяется в коленах *B* и *C*. Направление линий электрического поля вблизи места стыка показывает, что волны в коленах *B* и *C* находятся в про-



Р и с. 9.9. Т-образный последовательный ответвитель



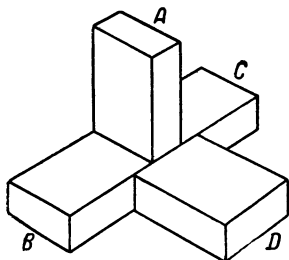
Р и с. 9.10. Т-образный параллельный ответвитель

тивофазе. Такое устройство называется Т-образным последовательным ответвителем.

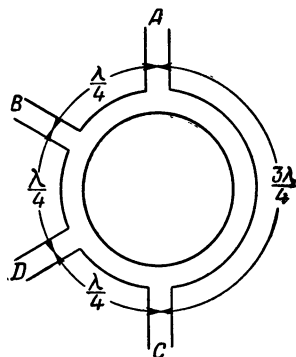
На рис. 9.10 показан Т-образный параллельный ответвитель; в этом случае волны в коленах *B* и *C* находятся в фазе, если энергия подается в колено *D*.

Т-мост

На рис. 9.11 показана комбинация последовательного и параллельного ответвителя. Эта конструкция обладает рядом преимуществ.



Р и с. 9.11. Т-мост



Р и с. 9.12. Кольцевой мост

Энергия, подаваемая в колено *A*, создает волны в противофазе в ответвлениях *B* и *C*, в то время как энергия, подаваемая в переход *D*, создает в ответвлениях *B* и *C* волны, находящиеся в фазе. Однако энергия, подаваемая в колено *A*, не создает волны в ответвлении *D* и наоборот. Ответвления *A* и *D* называются сопряженными, а соединение такого рода называются мостовыми.

Кольцевой мост

Кольцевой мост, показанный на рис. 9.12, представляет собой прямоугольный волновод, изогнутый по кругу, с рядом ответвлений, расположенных так, как показано на рисунке.

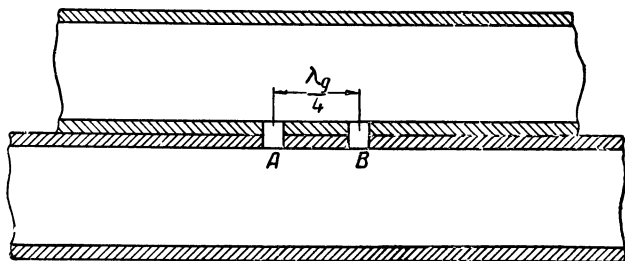
Обозначения элементов соответствуют рис. 9.11. Устройство эквивалентно Т-мосту.

Кольцевой мост целесообразно использовать в качестве антенного переключателя в обычной цепи передача — прием (см. гл. X.).

Направленные ответвители

Направленные ответвители используются для передачи энергии из одного волновода в другой таким образом, что волны, создаваемые во втором волноводе, распространяются только в одном направлении.

Величина связи между волноводами определяется как отношение амплитуд волн основного и вспомогательного волноводов.

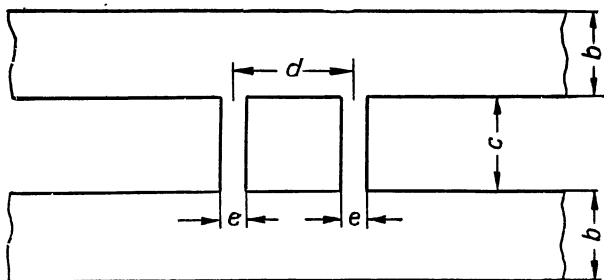


Р и с. 9.13. Направленный ответвитель с двумя отверстиями связи

Направленность определяется отношением амплитуд волн, распространяющихся в нужном направлении во вспомогательном волноводе, к амплитудам волн, распространяющихся в нежелательном направлении.

В конструкции, изображенной на рис. 9.13, волны, возбуждаемые во вспомогательном волноводе через два отверстия А и В, усиливаются в нужном направлении и ослабляются в нежелательном направлении. Геометрические размеры устройства до некоторой степени зависят от частоты.

Ответвитель с двумя шлейфами (рис. 9.14) имеет более сильную связь и менее зависим от частоты, чем ответвитель с двумя отверстиями. Размеры c , d и e зависят от величины



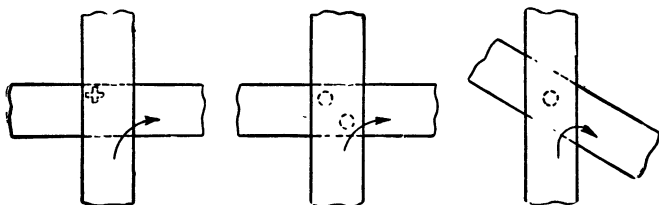
Р и с 9.14. Направленный ответвитель с двумя шлейфами

связи; примерные размеры (в сантиметрах) приводятся в табл. 3 для двух величин коэффициента связи для волновода $76,2 \text{ мм} \times 38,1 \text{ мм}$ ($3 \times 1\frac{1}{2}$ дюйма), работающего в диапазоне 10 см.

Т а б л и ц а 3

Коэффициент связи, дБ	c	d	e
20	2,9	3,48	0,36
10	2,5	3,55	1,2

Изменение частоты на 5% изменяет коэффициент связи всего лишь на один децибел. Направленность равна примерно 10—20 дБ.



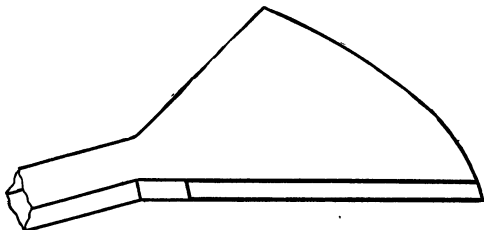
Р и с. 9.15. Различные виды связи в направленных ответвителях

Возбуждение энергии через отверстия ответвителя определяется частично магнитной, частично электрической связью. Результат взаимодействия может быть усилен в желательном направлении и ослаблен в нежелательном благодаря выбору соответствующих размеров и расположения отверстий. При этом можно получить много разнообразных решений, частично представленных на рис. 9.15.

В закрытом конце вспомогательного волновода должен быть помещен диэлектрик для поглощения энергии, распространяющейся в нежелательном направлении, и для предотвращения отражения ее.

Рупорные излучатели

Если волновод служит излучателем, то для достижения согласования сопротивления волновода с сопротивлением



Р и с. 9.16. Рупорный излучатель

свободного пространства свободный конец его делается в виде раструба. Расширение может быть в плоскости E , в плоскости H или одновременно в обеих плоскостях. Первые две разновидности носят название секторных рупоров, третья — пирамидального рупора.

Угол раструба обычно небольшой, и это ограничивает возможность получения достаточного раскрыва при допустимой длине рупора. По этой причине обычно рупорный излучатель применяется совместно с параболическим зеркалом для получения достаточно узкого луча.

Рупорный излучатель, изображенный на рис. 9.16, дает луч шириной от 5 до 15° в вертикальной плоскости и от 20 до 30° в горизонтальной плоскости. Он используется для облучения антенны, имеющей форму усеченного парабо-

лоида и создающей веерообразный луч, узкий в горизонтальной плоскости и относительно широкий в вертикальной. Этот тип антенны обычно используется в морских радиолокационных установках, где требуется хорошая разрешающая способность в азимутальной плоскости и более широкий луч в вертикальной плоскости для компенсации качки корабля.

Волноводы с непрерывным проводом

Если конец коаксиального кабеля выполнен в виде рупора, а внутренний проводник не прерывается (см. рис. 9.17), то по этому проводнику может распространяться пространственная волна и, следовательно, он будет выполнять функции волновода.

Теоретически поле вокруг волновода простирается до бесконечности, но если фазовая скорость в проводнике меньше, чем в свободном пространстве, то большая часть энергии будет распространяться внутри воображаемого цилиндра достаточного диаметра, расположенного concentрически по отношению к проводнику.



Р и с. 9.17. Волновод с непрерывным проводом

Необходимое уменьшение фазовой скорости (на несколько процентов) можно получить при помощи видоизменения покрытия поверхности проводника; простейшим методом является покрытие проволоки тонким слоем эмали. Величина затухания такого волновода сравнима с затуханием волновода обычного типа.

Этот вид волновода разработан недавно и является экспериментальным.

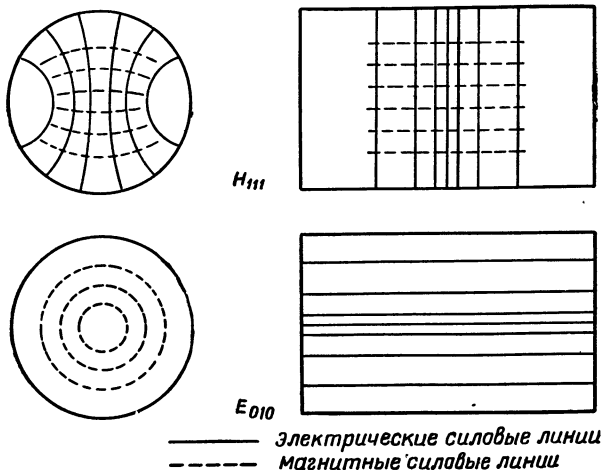
Объемные резонаторы

Если волновод замкнуть с обеих сторон и возбуждать в нем колебания соответствующей частоты, то отражение от обоих концов приведет к образованию стоячих волн. Волновод в этом случае превращается в объемный резонатор.

Колебания в объемном резонаторе соответствуют волнам типа H или E , распространяющимся по волноводам, и

каждый из этих двух основных типов может быть любого порядка в соответствии с различными частотами.

Практически в объемных резонаторах или эхорезонаторах, как их иногда называют, возбуждается два или три



Р и с. 9.18. Объемный резонатор цилиндрического типа вида колебаний, частоты которых близки друг к другу. Сконструировать эхорезонатор для одной определенной частоты представляет значительные трудности.

С целью простоты изготовления эхорезонаторы делают цилиндрической формы с одним свободно перемещающимся концом для регулировки длины волны.

Низшими типами колебаний в цилиндрическом объемном резонаторе является колебание типа H_{111} и E_{010} , картины полей которых представлены на рис. 9.18.

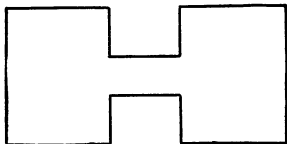
Длина волны для типа H_{111} равна

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{0,0859}{a^2} + \frac{0,25}{l^2}}},$$

для волны типа E_{010} $\lambda = 2,61 a$,

где a и l — соответственно радиус и длина цилиндра.

Для специальных назначений, например для клистронов и разрядников приема-передачи, применяются резонаторы проходного типа. Одна из разновидностей показана на рис. 9.19.



Р и с. 9.19. Объемный резонатор проходного типа

Добротность Q объемных резонаторов очень высока по сравнению с обычным резонансным контуром, содержащим сосредоточенную индуктивность и емкость. Практически величина добротности достигает 10 000—50 000.

Объемные резонаторы возбуждаются с помощью петли связи или зонда, а также электронного пучка, как в случае клистрона. Энергия может выводиться подобным же образом.

ГЛАВА X

АНТЕННЫЕ УСТРОЙСТВА И ИЗЛУЧЕНИЕ

Основным типом антенны является диполь. Одиночный диполь характеризуется нерезко выраженным направленным излучением. Поэтому необходимо применять ряд диполей одновременно или же использовать отражатель для концентрации излучаемой энергии и распространения ее в требуемом направлении. Первый метод используется в антенных устройствах метрового диапазона, второй — сантиметрового.

В современных радиолокационных станциях обычно применяются одни и те же антенны для приема и передачи.

Полярные диаграммы направленности

Полярная диаграмма показывает характер изменения напряженности поля на данном расстоянии от излучателя

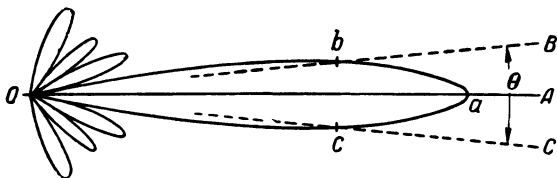


Рис. 10.1. Полярная диаграмма направленности антенны

в зависимости от направления. На диаграмме, изображенной на рис. 10.1, относительная напряженность поля в точках A и B (предполагается, что они равно удалены от

антенны, находящейся в точке O) соответственно пропорциональна длине отрезков O_a и O_b . Диаграмму направленности можно построить как для вертикальной, так и для горизонтальной плоскостей.

В соответствии с принципом обратимости полярная диаграмма одинакова для приема и передачи.

Боковые лепестки

Практически нельзя избежать наличия нежелательных лучей, называемых боковыми лепестками (рис. 10.1), даже в антеннах, предназначенных для узконаправленного излучения. Количество и величина боковых лепестков зависят от конструкции антенны. При расчете антенны боковые лепестки должны быть сведены до минимума во избежание ложных отражений.

Полярные диаграммы направленности специальной формы

Используя отражатели особой формы, можно создать антенное устройство с полярной диаграммой направленности, предназначенной для специальных целей.

Пример подобной диаграммы показан на рис. 10.2. Напряженность поля в точке P определяется длиной отрезка OP , пропорциональной косекансу угла возвышения θ (в пределах зоны действия, т. е. углов, заключенных между линиями OA и OB). В этих пределах антенна будет давать постоянные по интенсивности эхосигналы от самолета, летящего на данной высоте.

Такого типа антенны называются косеканс-квадратными антеннами и применяются в радиолокационных станциях дальнего обнаружения. Практически диаграмма имеет форму, представленную на рис. 10.2, б.

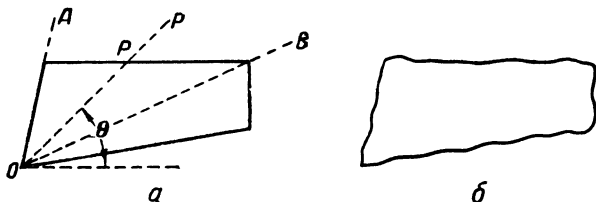
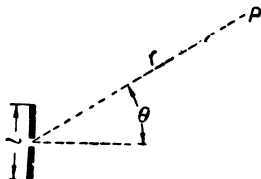


Рис. 10.2. $\cos^2 \theta$ полярная диаграмма направленности: а — теоретическая форма; б — практически получаемая форма

Этот же тип диаграмм, но перевернутый, применяется в самолетных радиолокационных станциях, использующих радиально-круговую развертку.

Излучение короткого вибратора (диполя)

Если к середине короткого диполя длиной l (меньшей длины волны) подводится ток I (рис. 10.3), то электриче-



Р и с. 10.3. Диполь

ские и магнитные поля в точке P на расстоянии r определяются следующими формулами:

$$E = \frac{\omega I l}{8\pi\epsilon c^2 r} \cos \theta = \frac{\omega I l}{2 \cdot 10^7 r} \cos \theta$$

(скорость c принимается равной $3 \cdot 10^8$);

$$H = \frac{\omega I l}{8\pi r c} \cos \theta = \frac{\omega I l}{24 \cdot 10^8 \pi r} \cos \theta$$

(I , E и H являются эффективными значениями).

Диполь не является изотропным излучателем, т. е. он не излучает энергию во все стороны равномерно. Средняя величина энергии, приходящаяся на единицу поверхности в точке P , равна

$$EH = \frac{\omega^2 I^2 l^2}{48 \cdot 10^{15} \pi r^2} \cos^2 \theta,$$

а вся излучаемая энергия равна

$$\frac{\omega^2 I^2 l^2}{18 \cdot 10^{15}} = \frac{20\pi^2 I^2 l^2}{\lambda^2} = R_0 I^2,$$

где $R_0 = 20\pi^2 (l^2/\lambda^2)$ и называется сопротивлением излучения антенны.

Для полуволнового вибратора ($l = \lambda/2$) напряженность поля может быть получена путем замены $\cos \theta$ в равенствах для E и H выражением

$$\frac{4 \cos \left(-\frac{\pi}{2} - \sin \theta \right)}{\pi \cos \theta}.$$

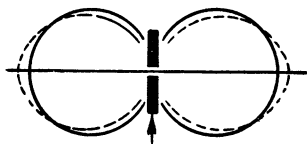
Для бесконечно тонкого полуволнового вибратора сопротивление излучения равно 73 ом. Если диаметр равен $1/100$ длины, величина сопротивления излучения уменьшается на 20%. Действительная физическая длина полуволнового вибратора на 5—10% меньше теоретической.

Ширина полосы пропускания диполя

Шириной полосы пропускания диполя является вся полоса частот, в которой мощность излучения для данной величины напряжения на входе равна или больше половины максимальной величины, т. е. мощности на частоте резонанса. Толстый диполь имеет более низкую эффективную индуктивность и поэтому более широкую полосу пропускания, чем тонкий диполь. Точный расчет полосы пропускания достаточно сложен. Приближенный же расчет показывает, что полосы пропускания диполей, имеющих отношение длины к диаметру 100 и 10 000, равны соответственно 15 и 8%.

Диаграммы направленности диполя

На рис. 10.4 показана форма диаграммы направленности в вертикальной плоскости для вертикального диполя, излучающего в свободное пространство. Сплошные линии, являющиеся кругами, относятся к короткому диполю, пунктирные линии — к полуволновому диполю.



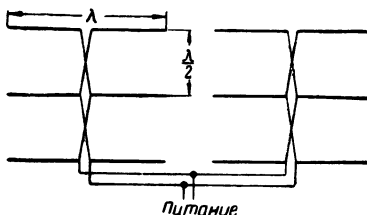
Диполь

Р и с. 10.4. Полярная диаграмма диполя:
сплошная линия — короткий диполь
пунктирная линия — полуволновый диполь

Очевидно, что благодаря симметрии диаграмма направленности вертикального диполя в горизонтальной плоскости представляет собой круг, в центре которого помещен диполь.

Многовибраторная антенна (для метрового диапазона)

Для получения узкого луча используется многовибраторная антенна, показанная на рис 10.5. Количество и расположение вибраторов зависит от требований, предъявляемых



Р и с. 10.5. Многовибраторная антенна

к ширине луча. Полярная диаграмма такой системы похожа на диаграмму, изображенную на рис. 10.1, но имеющую такие же лепестки в обратном направлении, если за системой не помещается металлический лист или проволочная сетка.

Двойной вибратор

Двойной вибратор (рис. 10.6) используется в тех случаях, когда сопротивление излучения полуволнового вибратора (60—70 ом) слишком мало для согласования с обычным фидером. В схеме двойного вибратора питание подводится к первому диполю, а второй питается от первого. Токи в обоих диполях текут в одном направлении, как это показано на рисунке. Таким образом, токи удваиваются, а мощность увеличивается в четыре раза. Сопротивление излучения увеличивается в четыре раза, так как оно определяется входным током.

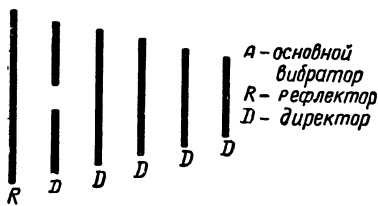


Р и с. 10.6. Двойной вибратор

Антенна типа Яги

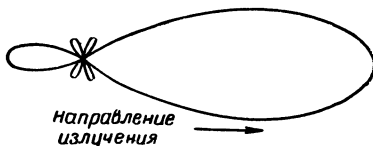
Антенна типа Яги (рис 10.7) состоит из основного полуволнового вибратора, питаемого в центре, 3—10 вспомогательных вибраторов (называемых директорами), распо-

ложенных перед ним, и одного вибратора (называемого рефлектором), расположенного за основным. Директоры короче основного вибратора, рефлектор длиннее.



Р и с. 10.7. Антенна типа Яги

Токи, наводимые в директорах и рефлекторах, изменяют картину поля, создаваемого основным вибратором. Полярная диаграмма приобретает вид, изображенный на рис. 10.8.



Р и с. 10.8. Полярная диаграмма направленности антенны типа Яги

Антенна типа Яги широко используется при работе на волнах порядка 1—2 м. Ее можно сделать в виде цельно-металлической конструкции с двойным вибратором в качестве основного элемента.

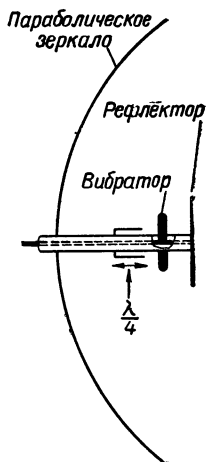
Вибратор в параболическом зеркале

Эта конструкция (рис. 10.9) широко используется в сантиметровом диапазоне волн. Вибратор помещается в фокусе зеркала, и если диаметр зеркала равен нескольким длинам волн, то обеспечивается получение узкого пучка отраженных лучей. Полярная диаграмма имеет вид, изо-

браженный на рис. 10.1. Точки b и c на диаграмме являются точками половинной мощности ($Ob^2 = Oc^2 = = 1/2 Oa^2$). Ширина луча θ в этих точках приблизительно равна λ/D радиан, где D диаметр зеркала, а λ — длина волны. Величина боковых лепестков, изображенных произвольно на диаграмме, зависит от конструкции антенны. Расположение боковых лепестков определяется также конструкцией антенны.

Теоретическая ширина луча, получаемая при диаметре зеркала 2 м и длине волны 10 см, равна $2^\circ,9$. Однако в действительности ширина луча получается большей.

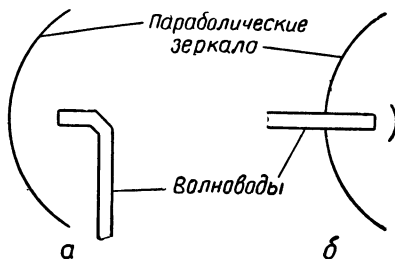
Вибратор питается коаксиальным фидером с симметрирующим преобразователем, как показано на рис. 10.9. Небольшой пассивный вибратор или круглый рефлектор исключает непосредственное прямое излучение от вибратора.



Р и с. 10.9. Вибратор в параболическом зеркале

Волноводный излучатель

Вместо вибратора, изображенного на рис. 10.9, можно использовать открытый конец волновода (рис. 10.10 а и б).



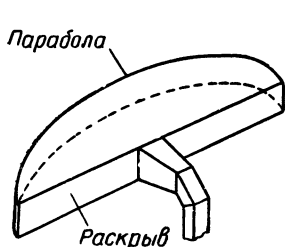
Р и с. 10.10. Параболическое зеркало, облучаемое волноводом:
а — непосредственное облучение; б — облучение с отражением

Во избежание попадания пыли и влаги внутрь волновода «открытый» конец его закрывают пластиной из изоляционного материала.

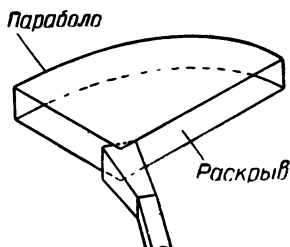
Антенна типа параболического цилиндра

Антенна типа параболического цилиндра, питаемая волноводом с рупорным излучателем, изображена на рис. 10.11. Антенна состоит из сектора параболического зеркала, закрытого сверху и снизу плоскими металлическими пластинами. Диаграмма излучения такой антенны узкая в горизонтальной плоскости и довольно широкая в вертикальной. Подобные антенны целесообразно применять в корабельных радиолокационных станциях, так как они обеспечивают устойчивое сопровождение цели при бортовой и килевой качке.

Ширина луча (в градусах) в горизонтальной плоскости составляет $100 (\lambda/b)$, в вертикальной — $100 (\lambda/h)$, где b — ширина, h — высота раскрыва. Уровень излучения боковых лепестков равен примерно 5% от излучения по основному лепестку.



Р и с. 10.11. Антенна типа параболического цилиндра



Р и с. 10.12. Антенна типа половины параболического цилиндра

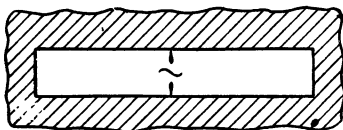
Антенна, имеющая форму половины параболического цилиндра

Антенна этого типа (рис. 10.12) является обычной антенной типа параболического цилиндра, у которой отсечена половина, а излучатель повернут так, чтобы вся энергия направлялась в оставшуюся половину.

Эта антенна обладает лучшей диаграммой направленности по сравнению с ранее описанной и меньшим уровнем боковых лепестков вследствие того, что излучатель не находится в зоне формируемого луча.

Щелевые антенны

Щель в бесконечной металлической пластине (практически очень большой величины), возбужденная с помощью генератора, подключенного между средними точками ее сторон (рис. 10.13), будет излучать энергию. Полярная ди-

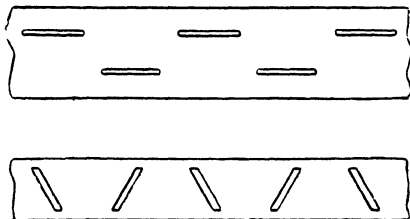


Р и с. 10.13. Щелевая антенна

аграмма направленности ее будет такой же, как и у обычного диполя, имеющего форму и размер щели, с той лишь разницей, что плоскости магнитного и электрического полей поменяются местами. Вертикальная щель создает горизонтальную поляризацию.

Многощелевые антенны

Если в узкой или широкой стенке волновода вырезать щели на расстоянии половины длины волны (рис. 10.14), то



Р и с. 10.14. Многощелевые антенны

ток в стенках будет прерван и щели станут излучателями. Необходимый поворот фазы между соседними щелями достигается их расположением в шахматном порядке или наклонно в зависимости от использования широкой или узкой стороны волновода. Шахматный порядок дает поляризацию, перпендикулярную направлению волновода, наклонный — параллельную. Луч антенны будет узким в плоскости, расположенной вдоль волновода, и широким в плоскости, поперечной волноводу. Если фазовая скорость в волновode изменяется передвижением пластинки диэлектрика, то может быть получено качание луча.

Полярная диаграмма направленности параболического отражателя

Ширина основного луча параболического отражателя, облучаемого равномерно по всей его поверхности, равна примерно $60 (\lambda/D)^0$ в точках половинной мощности и $140 (\lambda/D)^0$ у основания, определяемого первыми точками нулевой мощности. Эти соотношения действительны для диаметров (D), превосходящих λ примерно в 5 раз.

Практически диполь или другой излучатель не дает равномерного облучения. Поэтому по краям зеркала интенсивность меньше, чем в центре. В результате ширина луча практически получается на 20—30% больше расчетной. Одновременно уменьшается и интенсивность излучения на боковых лепестках, что является безусловным преимуществом.

Коэффициент усиления и эквивалентная площадь излучения антенны

Коэффициентом усиления передающей антенны является отношение величины энергии, приходящейся на единицу поверхности в направлении максимального излучения, к величине энергии, получаемой при излучении антенной всей энергии одинаково во всех направлениях.

Коэффициент усиления полуволнового вибратора равен 1,63, вибратора Герца (более короткого по сравнению с λ) — 1,5.

Теоретическая величина коэффициента усиления равномерно облучаемого круглого параболического зеркала равна $(\pi D/\lambda)^2$.

Эквивалентная или действующая площадь раскрыва антенны представляет собой отношение мощности, принимаемой антенной (в направлении максимального приема), поступающей в согласованную нагрузку, к величине мощ-

ности, приходящейся на единицу площади при данном положении антенны, если считать, что форма колебаний не нарушается антенной.

На основании принципа обратимости усиление антенны одинаково при использовании ее как для передачи, так и для приема. Можно показать, что усиление антенны равно $\frac{4\pi A}{\lambda^2}$, где A — эквивалентная площадь приема. Для идеаль-

ного случая равномерно облучаемой параболы эта формула превращается в приведенную выше формулу $(\pi D/\lambda)^2$.

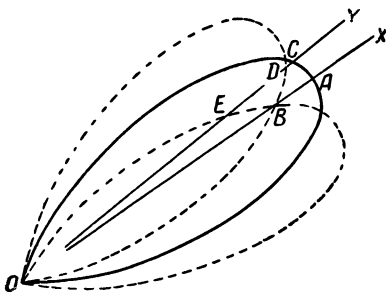
Практически эквивалентная площадь антенны равна примерно 60% теоретической (т. е. физической) площади. На основании этого величина $KA A_r$ в основном уравнении для расчета дальности действия радиолокационной станции становится равной $0,09 \pi^3 D^4 = 2,8 D^4$ для обычной антенной системы, имеющей параболический отражатель диаметром D м. Основное уравнение радиолокации для свободного пространства принимает вид:

$$\text{дальность (в километрах) равна } 0,0005 \frac{D}{\sqrt{\lambda}} \sqrt[4]{\frac{W_t}{W_r}}$$

(предполагается, что эффективная отражающая поверхность цели равна $3,5 \text{ м}^2$).

Определение азимута

Из рис. 10.15 видно, что азимутальное изменение интенсивности сигнала вблизи максимума диаграммы направленности антенны мало. Таким образом, метод определения



Р и с. 10.15. Принцип равносигнальной зоны

азимута путем вращения антенны и нахождения направления максимальной энергии неприменим в тех случаях, когда требуется точное определение положения цели по азимуту. Однако для радиолокационных станций обнаружения сантиметрового диапазона с достаточно узким лучом такой метод обеспечивает нужную точность.

Если антенна перемещается в пределах небольшого угла в обе стороны от среднего положения, то от цели, находящейся на направлении X , будут получены одинаковые сигналы для двух положений луча, а от цели на направлении Y будут получены сигналы, интенсивности которых значительно отличаются. Этот метод, называемый методом равносигнальной зоны, обеспечивает точное определение максимального сигнала, а следовательно, и положения цели по азимуту.

Определение угла места цели

В радиолокационных станциях сантиметрового диапазона с узким лучом, позволяющим, кроме случая очень малого угла места, устранить влияние отражения от земли, угол места определяется таким же способом, как и азимут.

В первых радиолокационных станциях метрового диапазона невозможно было устранить влияние отражения от земли из-за сложности создания узкого луча.

Если бы земля была идеальным проводником, то сигналы, принимаемые двумя горизонтальными диполями на различной высоте один над другим, были бы в фазе, но отличались по величине интенсивности. Сравнение этих величин с помощью гониометра или другим способом позволяло бы определить угол места. Однако земля не является идеальным проводником, что делает этот метод недостаточно точным. Для достижения большей точности иногда прибегают к созданию «искусственной» земли, состоящей из ковриков, выполненных из плетеной проволоки, и размещаемых вокруг радиолокационной станции.

Метод равносигнальной зоны

В многовибраторной антенне метрового диапазона питание может подаваться в обе половины, причем фаза сигнала первой половины попеременно отстает и опережает фазу сигнала второй половины.

Это периодическое изменение фазы будет перемещать

луч антенны то вправо, то влево (или вверх и вниз). Необходимое изменение фазы может быть создано механическим или электронным способом.

При работе в сантиметровом диапазоне перемещение луча антенны (переключение лепестков) может быть обеспечено механическими колебаниями дипольного или волноводного излучателя в параболической антенне. Эти колебания весьма незначительны и происходят около среднего положения излучателя. При другом способе излучатель, смещенный относительно центральной оси отражателя, вращается вокруг этой оси. Создающееся перемещение луча антенны по конусу обеспечивает получение равносигнальной зоны и, следовательно, создает возможность определения азимута и угла места цели. Оба сигнала для этих целей разделяются с помощью переключателя, связанного с осью антенны. Такое эксцентричное расположение излучателя сопряжено с трудностями обеспечения достаточной механической прочности, так как вращение происходит обычно с большой скоростью. Регулируя положение симметрирующего устройства, возможно получить такую величину стоячих волн тока во внешнем питающем фидере за точкой подключения излучателя (рис. 10.9), что излучение этой части, сложенное векторно с излучением самого излучателя, дает отклонение луча без необходимости создавать асимметрию излучателя механическим путем.

Точность измерения азимута и угла места цели

Без использования метода равносигнальной зоны точность углового измерения может быть получена в пределах половины ширины луча. Метод равносигнальной зоны повышает точность почти в 10 раз.

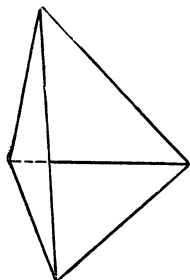
При больших размерах цели и требуемой высокой точности определения угловых координат может получиться неопределенность вследствие большого телесного угла, под которым видна цель.

В случае использования радиолокационной станции для передачи данных на счетно-решающий прибор системы оружейной наводки, где для точной работы счетно-решающего прибора необходимо обеспечить постоянную скорость изменения пеленга, случайные перемещения действующего центра отражения с одного конца самолета к другому могут ограничить получаемую точность. Это случайное перемещение известно под названием «блестящей точки».

Трудности могут быть также вызваны замиранием и колебаниями сигнала, обусловленными отражениями от вращающегося винта самолета.

Угловой отражатель

Отражатель, состоящий из трех плоских проводящих листов, расположенных взаимно перпендикулярно (рис. 10.16), отражает падающую на него волну в противоположном направлении.



Р и с. 10.16. Угловой отражатель

Угловой отражатель или группа их, установленных в различных направлениях, могут использоваться для усиления эхосигнала от морских буев или метеорологических шаров.

Эквивалентная отражающая поверхность углового отражателя, плоскости которого являются треугольниками со стороной a , равна $4\pi a^4/3\lambda^2$. Например, если $a = 50$ см, эквивалентная отражающая поверхность для длины волны 3,2 см используемой обычно в гражданских морских радиолокационных станциях равна 256 м².

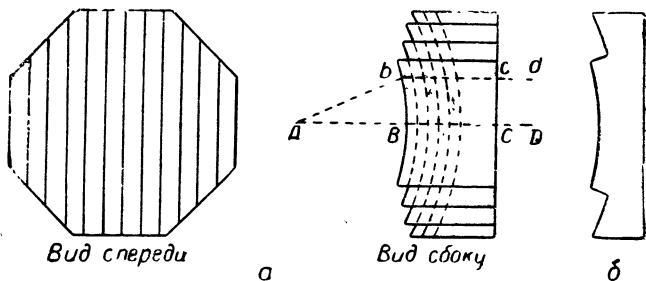
Линзы

Для создания узкого луча вместо параболического отражателя можно использовать линзы.

Оптическая линза, выполненная из соответствующего диэлектрика, слишком тяжела для использования в практических условиях. Тот же эффект дает конструкция, состоящая из ряда металлических пластин, как показано на рис. 10.17 а.

Пластины действуют аналогично волноводу, увеличивая фазовую скорость волны, в результате чего время, необходимое для прохождения пути $Abcd$, получается таким же, что и для прохождения пути $ABCD$. Вогнутые линзы этого типа эквиваленты выпуклым оптическим линзам.

Из соображений экономии и уменьшения веса, пластины могут быть сделаны ступенчатыми, как показано на рис. 10.17 б. При этом удаленные пластины должны быть достаточного размера, чтобы изменения фазы соответство-



Р и с. 10.17. Линза

вали целому числу волн. Тогда результирующая фаза выходящего луча не будет изменяться. Такая ступенчатая конструкция, уменьшая длину пути внутри линз (где эффективная длина чувствительна к изменению частоты), увеличивает полосу пропускания всего устройства.

Металлические пластины, образующие линзу, должны быть параллельны плоскости поляризации.

Антенные переключатели

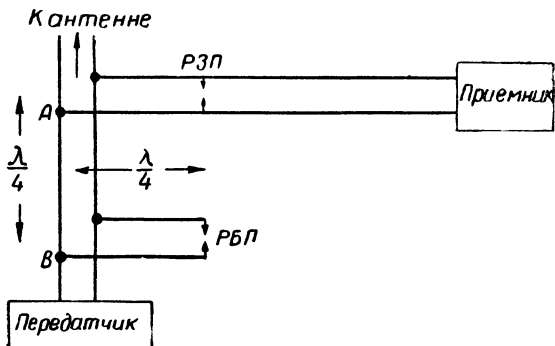
В большинстве радиолокационных станций одна и та же антенна используется для передачи и приема. Переключение осуществляется электронным способом по схеме, показанной на рис. 10.18. Фидеры для ясности рисунка изображены двухпроводными линиями, а переключатели — так, как изображаются искровые разрядники. Т. Р. — переключатель передачи-приема, называемый камерой защиты приемника. Т. В. — переключатель передатчика, называемый камерой блокировки передатчика.

Действие схемы зависит от того, равно ли входное сопротивление четвертьволновой линии нулю или бесконечности, что в свою очередь определяется тем, закорочена или разомкнута линия на конце.

Когда включается передатчик, оба искровые разрядника пробиваются, образуя короткое замыкание линий. Так как переключатель приема-передачи замкнут накоротко, параллельное (входное) сопротивление цепи приемника равно бесконечности в точке А и поэтому не является нагрузкой для основного фидера (при этом пренебрегают незначительной

величиной мощности, необходимой для поддержания разряда). Ветвь переключателя передатчика также имеет бесконечное сопротивление в точке *В*.

Когда передатчик не генерирует, искровые разрядники не подожжены и переключатель передатчика закорачивает линию в точке *В*, в результате чего создается бесконечное сопротивление в точке *А*, находящейся на расстоянии четверти длины волны от передатчика. Поэтому антенна подключается непосредственно к приемнику без нагрузки со стороны передатчика.

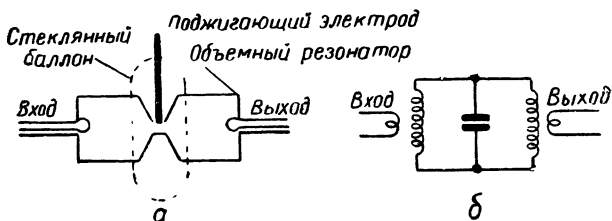


Р и с. 10.18. Принципиальная схема антенного переключателя

В некоторых случаях сопротивление неработающего передатчика существенно отличается от сопротивления фидера. В этом случае можно обойтись без разрядника блокировки передатчика.

Антенный переключатель приемника

Схема, представленная на рис. 10.18, применявшаяся в первых радиолокационных станциях метрового диапазона для использования ее в станциях сантиметрового диапазона, должна быть преобразована. Необходимость этого вызвана главным образом тем, что сопротивление зажатого искрового разрядника не равно нулю, и поэтому часть энергии попадает в цепь приемника и кристалл смесителя перегорает.



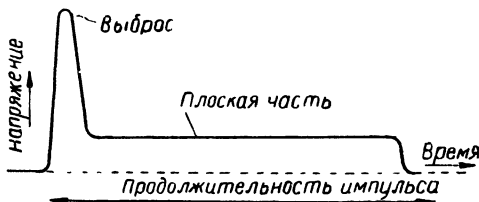
Р и с. 10.19. Разрядник защиты приемника

Переключатели приема-передачи для сантиметрового диапазона имеют объемный резонатор (рис. 10.19 а), трансформаторное действие которого повышает напряжение на искровом разряднике до величины, достаточной для его зажигания. Одновременно обеспечивается малое напряжение на выходе его, т. е. на входе приемника. Эквивалентная схема устройства изображена на рис. 10.19 б. Такой разрядник обычно называют разрядником защиты приемника.

Полость резонатора настраивается с помощью плунжеров, которые могут быть выполнены в виде винтов, как в случае клистрона.

В тщательно рассчитанном и выполненном разряднике величина потерь для режима приема может не превосходить одного децибела, а величина просачивающейся мощности во время излучения импульса не превышает 50 мвт.

Разрядник не пробивается одновременно с возникновением импульса передатчика, так как для возникновения разряда необходимо определенное время ионизации. За это время в приемник может пройти значительная мощность.



Р и с. 10.20. Кривая мощности, проходящей через разрядник

На рисунке 10.20 выброс показывает первоначальное пробивное напряжение, а плоская часть величину напряжения после пробоя.

Продолжительность выброса очень мала, примерно 0,01 мксек. Однако для того чтобы кристалл не перегорел, общая энергия, подводимая к нему в это время в течение выброса, не должна превышать 1 э (10^{-7} джоуля).

Для ускорения времени пробоя разрядника в момент возникновения импульса передатчика в разряднике должно быть достаточное количество ионов.

С этой целью в разрядник вводится добавочный «поджигающий» электрод, соединенный с источником отрицательного напряжения в несколько сот вольт. Средняя мощность, соответствующая плоской части кривой, не должна превышать 100 мвт.

Время восстановления разрядника

Для обеспечения возможности приема сигналов, отраженных от целей, находящихся на близком расстоянии от радиолокатора, разрядник должен быстро приходить в первоначальное состояние (т. е. деионизироваться) после прекращения импульса передатчика. Было найдено, что лучшим наполнением камеры разрядника являются пары воды при давлении 10 мм. Время восстановления при этом составляет 2—3 мксек, что соответствует дальности от 300 до 500 м. Сигналы, отраженные от объектов, находящихся на более близком расстоянии, также могут быть приняты, но они будут ослаблены вследствие затухания в частично ионизированной камере разрядника. Однако это не опасно, так как сигналы от близко расположенных целей достаточно сильные.

Добавление небольшого количества водорода или аргона в камеру разрядника делают разрядник работоспособным и при низких температурах, когда пары воды замерзают. При этом увеличивается время восстановления разрядника, но кристалл будет защищен от перегорания.

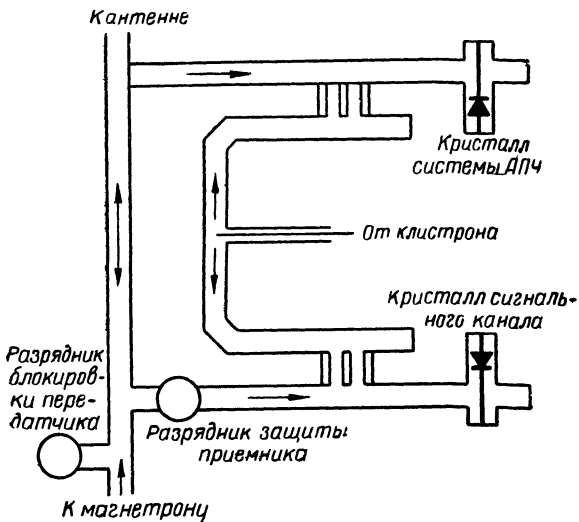
Разрядник блокировки передатчика

Разрядник блокировки передатчика может быть таким же, как и разрядник защиты приемника, но в него не требуется вводить добавочный электрод, так как необходимость быстрого действия его не предусматривается.

Использование разрядников с волноводами

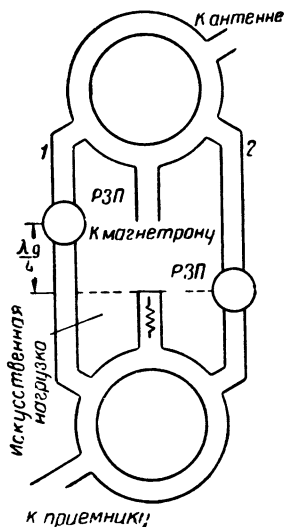
Принципы использования разрядников в случае волноводных систем такие же, как и в случае коаксиальных фидеров, с той лишь разницей, что разрядники соединяются с волноводом при помощи отверстия, а не петли связи.

На рис. 10.21 изображена обычная радиочастотная головка или переключатель для волноводной системы.



Р и с. 10.21. Радиочастотная головка для волноводной системы

Более сложная система с двумя кольцевыми мостами показана на рис. 10.22. Действует она следующим образом. Во время передачи энергия не подается непосредственно к антенне, а направляется в два волноводных ответвления — 1 и 2. Разрядники защиты приемника пробиваются, образуя короткозамкнутую цепь, которая отражает энергию, направляя ее в верхний кольцевой мост. Благодаря различному пути, проходимому отраженной энергией в ответвителях,



Р и с. 10.22. Радиочастотная головка с двумя кольцевыми мостами

вследствие различного положения разрядников защиты приемника, фаза такова, что энергия, попав в верхний кольцевой мост, направляется только в антенну и не может попасть обратно в магнетрон.

Мощность, просачивающаяся через разрядники, поступает к нижнему кольцевому мосту с такой фазой, что вся она полностью поступает в искусственную нагрузку, а не в приемник (предполагается, что обе половины моста по величине просачивающейся мощности одинаковы). Таким образом, получается двойная защита. Подобная схема применяется в радиолокационных станциях большой мощности.

В режиме приема энергия от антенны проходит через два кольцевых моста к приемнику, не попадая ни в

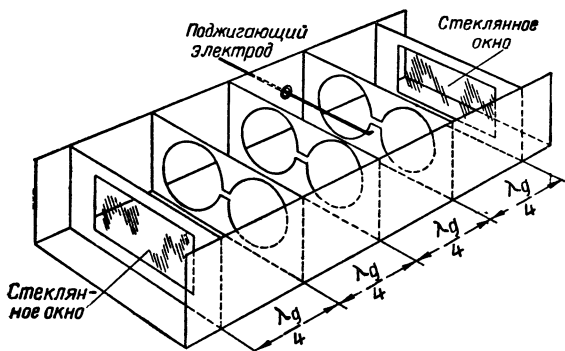
приемник, ни в искусственную нагрузку.

Такое же устройство можно сделать, используя Т-образные волноводные мосты вместо кольцевых.

Широкополосные разрядники защиты приемника

При расчете некоторых мощных радиолокационных станций необходимо учитывать, что объемный резонатор обладает острой формой резонансной кривой и что магнетрон создает мощность не на одной частоте, а в спектре частот и, наконец то, что номинальные частоты магнетронов одного и того же типа различаются от экземпляра к экземпляру. Для преодоления этих затруднений служит широкополосный разрядник, схема которого изображена на рис. 10.23.

Разрядник состоит из трех волноводных секций, образованных перегородками с отверстиями связи в них. Настройка секций покаскадная, величина добротности Q каждой сек-



Р и с. 10.23. Широкополосный разрядник защиты приемника

ции невысока, благодаря чему обеспечивается широкополосность.

При работе величина просачивающейся мощности после каждой секции уменьшается, так что суммарная величина проходящей мощности становится очень малой. Стеклянные окна разрядника предотвращают нарушение герметичности и, следовательно, возможность выхода газа. Поджигающий электрод помещается около одного или около нескольких внутренних отверстий.

Описанный разрядник является законченным самостоятельным волноводным устройством. При желании он может быть удален и заменен другим.

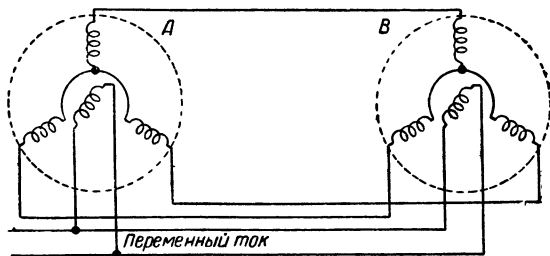
ГЛАВА XI

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ И СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ

В некоторых радиолокационных станциях, например станциях орудийной наводки и станциях дальнего обнаружения, необходимо обеспечить непрерывную передачу на достаточное расстояние данных дальности, азимута и угла места одной или нескольких целей. Большинство способов, применяемых для этой цели, основано на применении сельсинов.

Сельсин-датчик

Ротор сельсина-датчика имеет одну обмотку, статор — три обмотки, расположенные под углом 120° относительно друг друга. При соединении двух сельсинов, как показано на рис. 11.1, и данном положении ротора *A* в статорных обмотках будут наводиться напряжения, вследствие чего в статоре *B* возникнет результирующее поле, параллельное направлению поля ротора *A*. Поэтому ротор сельсина *B* будет вращаться в том же направлении, что и ротор сельсина *A*.



Р и с. 11.1. Сельсинная передача

Если привод антенны с помощью зубчатой передачи связать с ротором *A*, то можно обеспечить передачу азимутального и угломестного положения антенны на сельсин *B*. Можно также передать величину дальности, связав зубчатой передачей сельсин с потенциометром дальности.

Получаемая точность передачи равна примерно одному градусу, но возможно получить и большую точность, если добавить второй сельсин, связанный с первым при помощи редуктора с передаточным числом, например 36 : 1. В этом случае один сельсин будет двигаться медленно, другой быстро.

Расположение обмоток статора похоже на расположение обмоток трехфазного альтернатора. Однако необходимо заметить, что сельсин питается только однофазным переменным током. Соединение трех обмоток может быть осуществлено в виде звезды (как показано на рисунке) или треугольника.

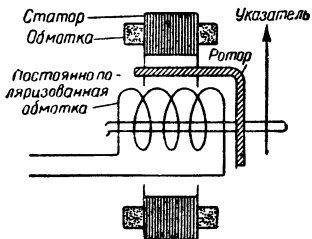
Для некоторых целей применяется статор с двумя обмотками, сдвинутыми на угол 90° , аналогично двухфазной электрической машине

Обычно сельсины питаются напряжением частотой 50—60 гц или 400—500 гц и не предназначены для передачи большой мощности.

Сельсин-приемник

Там, где требуется обеспечить только указание угла с помощью стрелки, обычно второй сельсин *B* заменяется сельсин-приемником. Он имеет такие же статорные обмотки, как и датчик, но ротор набирается из листов мягкого железа соответствующей формы и имеет постоянно поляризованную обмотку (см. рис. 11.2). Это исключает необходимость применения контактных колец, что уменьшает трение, улучшая тем самым точность показаний.

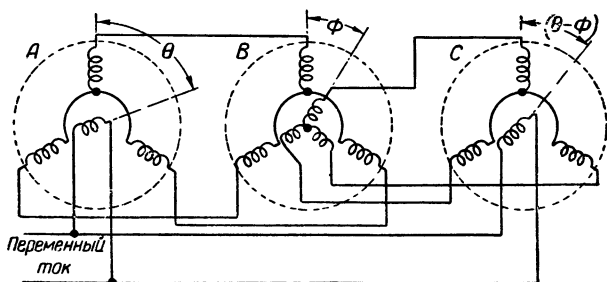
Задний конец вала опирается на диафрагму, которая слегка колеблется под влиянием переменного потока. Вследствие этого еще больше уменьшается статическое трение.



Р и с. 11.2. Сельсин-приемник

Дифференциальный сельсин

Дифференциальный сельсин имеет по три обмотки на статоре и роторе; он используется в том случае, когда сельсин-приемник должен указывать сумму или разность двух отдельных величин, имеющих на входе (рис. 11.3). Если



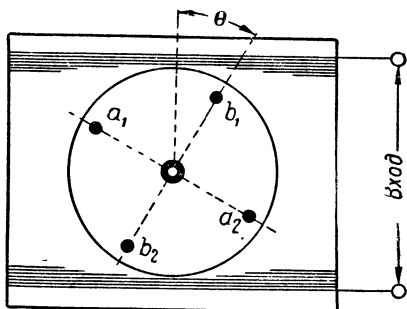
Р и с. 11.3. Дифференциальный потенциометр

ротор *A* повернуть на угол θ от произвольного исходного положения, то поле, наводимое в статоре *B*, также отклонится на тот же угол. Если ротор *B* повернуть на угол ϕ , направление поля статора *B* по отношению к ротору отклонится на угол $\theta - \phi$, а ротор *C* примет соответствующее положение, как показано на рисунке.

Синус-косинусный потенциометр

Схема потенциометра изображена на рис. 11.4. Потенциометр обеспечивает получение двух значений напряжения на выходе, соответственно пропорциональных синусу и косинусу угла поворота подвижной части при подаче на вход одного напряжения. Подвижная часть состоит из двух пар взаимно перпендикулярных контактов.

Синус-косинусный потенциометр используется для получения напряжения, прикладываемаемого к сельсин-приемнику, имеющему две статорные обмотки, а также для создания напряжения, используемого для вращения линии развертки индикатора кругового обзора.



Р и с. 11.4 Синус-косинусный потенциометр

Сельсинный маломощный привод

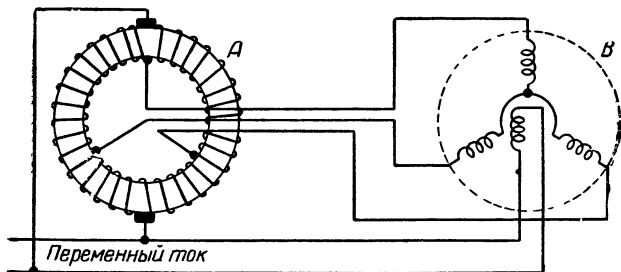
Сельсин этого типа подобен бесконтактному сельсину, но больше по размерам и мощности; точность передачи несколько ниже. Мощность сельсина может достигать нескольких сотен ватт, но этого обычно не требуется, так как мощность, необходимая для вращения антенны (или другой нагрузки) на приемном конце, должна быть приложена механически к ротору на передающем конце.

Ротор в зависимости от требований может вращаться непрерывно или с перерывами по времени. Обычно между сельсином и нагрузкой имеется редуктор с зубчатой передачей, который, во-первых, обеспечивает требуемую точность передачи и, во-вторых, уравнивает числа оборотов, так как скорость вращения антенн, как правило, значительно ниже скорости, при которой вращающиеся электрические механизмы работают эффективно. При использовании редуктора между антенной и сельсином требуется ввести некоторые усложнения в системе индикации, устраняющие неопределенность, связанную с тем, что одно положение ротора сельсина соответствует нескольким возможным положениям антенны.

Сельсин в качестве усилителя мощности

Сельсин этого типа имеет ротор с круговой обмоткой, коммутатор во входной цепи переменного тока и три кон-

тактных кольца в выходной цепи (рис. 11.5). Это устройство действует как усилитель мощности, причем мощность, необходимая для вращения ротора, определяется полностью



Р и с. 11.5. Сервосельсин

величиной трения. Если ввести еще статорную обмотку, то такое устройство становится автономным и может быть использовано, например, для управления разверткой.

Применение сельсинов в индикаторах кругового обзора

В индикаторе кругового обзора вращение линии развертки должно быть синхронизировано с вращением антенны. Это можно осуществить вращением отклоняющих катушек электронно-лучевой трубки с помощью сельсинов управляемых положением антенны, или путем питания синхронных моторов, приводящих во вращение отклоняющие катушки и антенну от одного источника переменного тока. Систему можно дополнить дифференциальным устройством для установки вручную истинного направления на север в любое положение на экране.

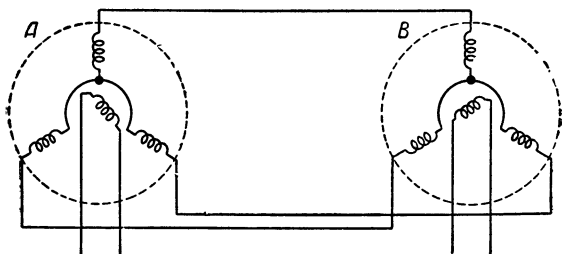
При другом способе вращения отклоняющих катушек на электронно-лучевой трубке можно использовать бесконтактный сельсин, имеющий две статорные обмотки, соединенные с соответствующими катушками, расположенными под прямым углом. Ток развертки проходит через ротор бесконтактного сельсина, который механически связан с ан-

тенной. Вместо сельсина-датчика можно использовать синус-косинусный потенциометр.

Включение в цепь между антенной и электронно-лучевой трубкой дифференциального сельсина, управляемого компасом, обеспечивает в корабельных станциях стабилизацию изображения на экране относительно истинного направления на север.

Мощные приводы с высокой точностью. Следящие системы

Радиолокационные антенны обладают значительными размерами и весом. При этом должно быть обеспечено их перемещение по азимуту и углу места с очень высокой степенью точности. Точность не должна ухудшаться вследствие инерции, влияния ветра и т. п., что вызывает необходимость применения достаточно мощного приводного двигателя с точной регулировкой скорости вращения. Это обусловило применение так называемого «сигнала ошибки». Величина сигнала ошибки, представляющего собой напряжение, угловое перемещение или другую характеристику, приблизительно пропорциональна отклонению действительного положения антенны от требуемого, а его полярность или фаза зависит от знака ошибки.



Р и с. 11.6. Следящая система на сервосельсинах

В следящей системе сигнал ошибки усиливается и используется для управления вращением приводного двигателя.

Способ вырабатывания сигнала ошибки зависит от особенностей радиолокационной станции. Например, если ан-

тенна должна точно следовать за движением штурвала оператора, то с ней может быть связан ротор сельсин-датчика.

Ротор второго сельсина, называемого исполнительным, связывается со штурвалом таким образом, что при правильном положении антенны оба перпендикулярны друг другу, как показано на рис. 11.6. В этом случае напряжение в роторе второго сельсина отсутствует. При неправильном положении антенны роторы не будут расположены под прямым углом и во втором роторе появится напряжение ошибки, величина которой пропорциональна синусу угла ошибки, а фаза зависит от знака ошибки. Сигнал ошибки усиливается и используется для управления основным приводным двигателем, который вращается до тех пор, пока ошибка не станет равной нулю.

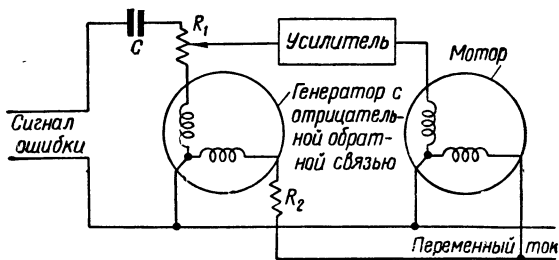
В зависимости от характера устройств сигнал ошибки вырабатывается различными способами. Например, при автоматическом сопровождении цели для его получения электронным способом используются отраженные сигналы.

Иногда вместо исполнительного сельсина применяется сельсин с контактным управлением. Он подобен дифференциальному сельсину, но его ротор снабжен контактным рычагом, расположенным между двумя неподвижными контактами. При согласовании сельсин-датчика и сельсин-приемника рычаг слабыми пружинами удерживается в среднем положении между контактами. Отклонение от согласованного положения вызывает замыкание одного или другого контакта. С контактами соединены реле, управляющие приводным двигателем.

Маломощный привод, использующий двухфазный индукционный мотор

Одна фаза мотора (рис. 11.7) питается непосредственно от источника переменного тока, другая фаза — усиленным выходным напряжением исполнительного сельсина, управляемого сельсин-датчиком, связанным с элементом, за движением которого требуется следовать.

С мотором связана подобная же машина, действующая как индукционный генератор, создающий напряжение, пропорциональное скорости. Это напряжение подается обратно с противоположным знаком на вход исполнительного сельсина, создавая отрицательную обратную связь с целью устранения автоколебаний.



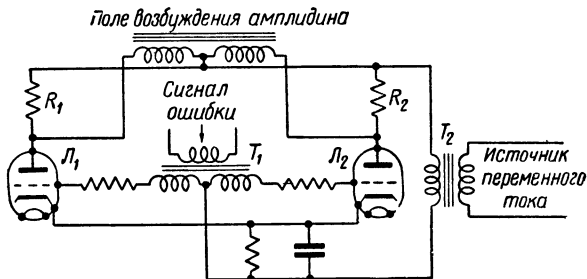
Р и с. 11.7. Маломощный привод с двухфазным индукционным мотором

Нужный сдвиг фаз двух источников питания мотора обеспечивается частично конденсатором и частично усилителем.

Описанная схема применяется в маломощных приводах, например для поворота отклоняющих катушек электронно-лучевой трубки в индикаторах кругового обзора.

Усиление сигнала ошибки

Во многих случаях требуется усиление и детектирование первоначального сигнала ошибки до подачи его в описанные выше устройства. Это может быть выполнено с помощью электронных схем. Наиболее употребительная схема изображена на рис. 11.8. Высокое напряжение на аноды ламп L_1 и L_2 поступает от того же источника переменного тока, от которого питаются сельсины. Сигнал ошибки от



Р и с. 11.8. Усилитель сигнала ошибки

исполнительного сельсина подается на сетки обеих ламп в противофазе. При отсутствии сигнала ошибки анодные токи в лампах одинаковы. При наличии ошибки приложенное к сеткам напряжение вызывает увеличение тока в одной лампе и уменьшение в другой. Токи в сопротивлениях R_1 и R_2 различаются между собой, вследствие чего изменяется величина первичного возбуждения амплидина или другого устройства. В описанной схеме учитывается фаза сигнала ошибки.

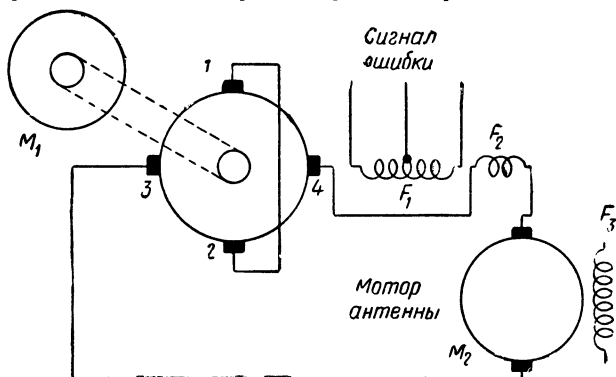
Устройство привода

В маломощных установках возможно использовать усиленный и детектированный сигнал ошибки для возбуждения поля небольшого мотора постоянного тока, в цепь якоря которого поступает ток постоянной величины.

Если усилитель позволяет выделять фазу, то направление вращения мотора будет соответствовать знаку сигнала ошибки. Однако обычно требуется значительное усиление мощности. Типичными примерами наиболее употребительных устройств являются метадин и схема Леонарда.

Метадин и амплидин

Принцип действия метадины показан на рис. 11. 9. Мотор M с постоянной скоростью вращения приводит в движе-



Р и с. 11.9. Метадинный привод

ние генератор постоянного тока, имеющий, кроме обычных двух щеток (1 и 2), две дополнительные щетки (3 и 4). Щетки 1 и 2 замкнуты накоротко. Ток якоря возбуждает очень слабое поле в обмотке F_1 . Реакция якоря создает поперечный поток под прямым углом к первичному полю, который вызывает появление напряжения на щетках 3 и 4. Для того чтобы поток реакции якоря не нейтрализовал действие относительно слабого поля первичного возбуждения в обмотке F_1 , включается компенсирующая обмотка F_2 , по которой течет основной ток нагрузки. Она противодействует реакции якоря, обусловленной этим током. Степень компенсации можно регулировать в зависимости от предъявляемых требований. При полной компенсации устройство называется амплидином.

Метадин представляет собой двухкаскадный электромашинный усилитель. В первом каскаде усиления благодаря первичному полю возбуждения создается поперечный поток, обусловленный током в короткозамкнутой цепи щеток. Во втором каскаде развивается напряжение на других щетках благодаря действию реакции якоря, поле которого в данном случае является основным. Можно получить усиление по мощности порядка 20 000. Фактическая мощность обеспечивается приводным мотором метадина.

Первичное возбуждение создается усиленным сигналом ошибки. Направление его зависит от знака ошибки.

Так как усиление устройства очень велико, то необходимо добиться, чтобы выходное напряжение, обусловленное остаточным намагничиванием при нулевом первичном возбуждении, было незначительным. Это достигается с помощью размагничивающего переменного поля от небольшого альтернатора, установленного на главном валу машины.

Схема Леонарда

В этом устройстве усиление сигнала ошибки достаточно для обеспечения основного поля возбуждения генератора постоянного тока, который приводится в движение мотором с постоянной скоростью вращения. Величина и полярность напряжения генератора зависят от сигнала ошибки. Это переменное напряжение используется для запуска мотора поворота антенны. Последний имеет независимое возбуждение. Устройство подобно однокаскадному усилителю мощностей. Усиление по мощности составляет величину порядка 100. Последовательное соединение двух таких устройств может дать такое же усиление, что и метадин.

Нестабильность в следящих системах

Так как в следящей системе имеются элементы, обладающие инерцией, и в ней развиваются силы, пропорциональные смещению этих элементов от их правильных положений, то в любой момент времени системе свойственно стремление к механическим колебаниям относительно среднего положения.

По аналогии с электрической цепью, содержащей индуктивность и емкость, можно было бы считать, что хорошим средством явится увеличение трения (механический эквивалент электрического сопротивления). Однако произвольное увеличение трения влечет за собой чрезмерную затрату энергии и ухудшение работы системы.

Затраты энергии можно избежать, используя тяжелый маховик, связанный с ведомым элементом фрикционным приводом. При ускорении это создает нужное трение, а в остальное время маховик вращается вместе с ведомым элементом без скольжения.

Этот способ успешно применялся в маломощных приводах для передачи данных, но для тяжелых антенн маховик получается слишком большим.

Другой способ состоит в соединении тахогенератора (небольшого генератора постоянного тока с постоянным магнитом, напряжение на выходе которого пропорционально скорости) с ведомым элементом и подаче его выходного напряжения на управляющий механизм в противофазе с сигналом ошибки. В этом заключается электрический способ создания тормозящей силы, пропорциональной скорости.

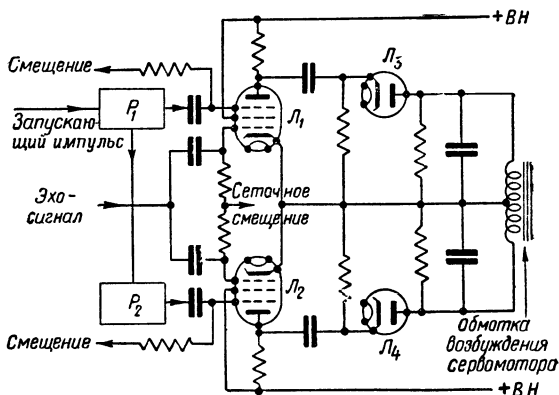
Указанные меры лишь частично решают задачу. Следящая система является источником энергии, и в определенных условиях могут возникнуть автоколебания, несмотря на все меры предосторожности, описанные выше. Достаточно привести простой пример. Пусть в работе следящей системы имеется запаздывание по времени. В этом случае ведомый элемент, достигая правильного положения, обязательно переходит через него. Затем это «проскакивание» корректируется, но за ним следует переход в противоположном направлении, т. е. система претерпевает колебания. Можно применить фазосдвигающие устройства, которые создают опережение по фазе сигнала ошибки на частоте колебаний системы. Это опережение компенсирует запаздывание системы.

Трудности преодоления автоколебаний системы и способы, применяемые для этой цели, не дают возможности сде-

лать следящую систему абсолютно точной. Например, даже при равномерном вращении антенны наблюдается постоянная ошибка по положению. Задача конструктора — свести ее к минимуму.

Автоматическое сопровождение цели

На рис. 11.10 изображены элементы схемы, с помощью которой радиолокационная станция автоматически сопровождает по дальности выбранную цель после ее захвата оператором.

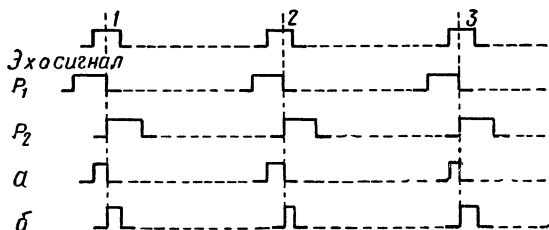


Р и с. 11.10. Схема автоматического сопровождения

Отраженные видеосигналы подаются одновременно на два пентода — Λ_1 и Λ_2 . Две схемы формирования P_1 и P_2 вырабатывают строб-импульсы, сравнимые по длительности с отраженным импульсом. Схема P_1 запускается импульсом от потенциометра дальности, P_2 — задним фронтом импульса, вырабатываемого схемой P_1 . В результате получаются два импульса, временное соотношение между которыми показано на рис. 11.11. Напряжение смещения на лампах Λ_1 и Λ_2 таково, что каждая из них отпирается только при одновременном поступлении строб-импульса и отраженного импульса.

Выходные напряжения ламп \mathcal{L}_1 и \mathcal{L}_2 подаются на диоды \mathcal{L}_3 и \mathcal{L}_4 . Разность этих напряжений представляет собой сигнал ошибки. Он поступает на обмотку возбуждения сервомотора, управляющего установкой потенциометра дальности.

Если оба строб-импульса, положение которых зависит от установки потенциометра дальности, симметричны по отношению к отраженному сигналу, то сигнал ошибки равен



Р и с. 11.11. Стробующие импульсы системы автоматического сопровождения цели

нулю. В противном случае сигнал ошибки действует в направлении изменения установки потенциометра дальности, при которой ошибка становится равной нулю.

На рис. 11.11 представлены три случая, соответствующие нулевой ошибке, опережению и запаздыванию отраженного сигнала.

Бесконтактный сельсин, связанный с движком потенциометра дальности, обеспечивает передачу данных о дальности в нужное место. Так как первый строб-импульс должен начаться до момента поступления отраженного сигнала, то необходимо произвести первоначальную установку на нуль движка потенциометра или сельсина.

Цепи, формирующие запускающие и строб-импульсы, описаны в главе XV.

Для слежения по азимуту и углу места цели применяется антенная система, использующая метод равносигнальной зоны. Отраженные сигналы, соответствующие двум положениям луча, подаются через стробирующие цепи такого же типа, как показано на рис. 11.10.

Следящая система вращает антенну до тех пор, пока выходные напряжения двух половин схемы не будут равны

между собой. Во избежание затруднений, связанных с наличием двух целей, находящихся на одном и том же азимуте и разной дальности, желательно включить стробирующую цепь, управляемую схемой дальности и обеспечивающую поступление в схему автосопровождения только отраженных сигналов от цели, находящейся на определенном расстоянии.

Во избежание потери цели при кратковременном замирании постоянные времени выходных цепей можно выбрать достаточно большими. Однако при этом нужно также исходить из требуемой скорости срабатывания при переменной скорости изменения дальности и азимута. Желательно наличие выключателя, с помощью которого оператор может устранять поступающие сигналы в случае забивания экрана сильными сигналами от ненужных целей или местных предметов. При разомкнутом выключателе схема работает, как при наличии замирания.

ГЛАВА XII

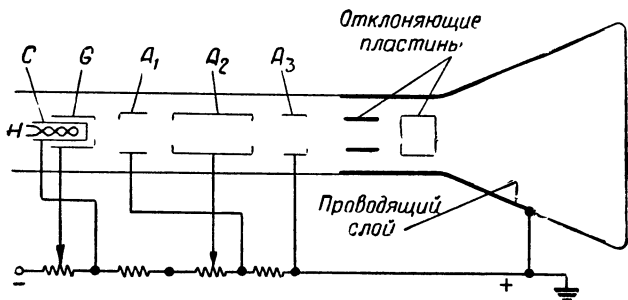
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Электронно-лучевые трубки, обладающие быстродействием и достаточной универсальностью, широко используются в радиолокационной технике для целей индикации.

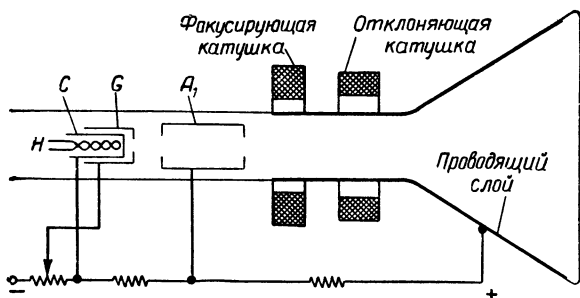
Существует два основных типа трубок — с электростатическим и магнитным отклонением электронного луча. В трубках того и другого типа может быть получена яркостная модуляция луча при изменении потенциала сетки по отношению к катоду. Если сетка имеет достаточно большой отрицательный потенциал, электронный луч исчезает; при уменьшении отрицательного потенциала сетки появляется пятно, яркость которого увеличивается при уменьшении отрицательного напряжения на сетке.

Конструкция электронно-лучевых трубок

На рис. 12.1 схематически изображена конструкция электростатической трубки. Катод с косвенным подогревом и сетка имеют форму цилиндра. В торце сетки имеется



Р и с. 12.1. Электростатическая электронно-лучевая трубка



Р и с. 12.2. Электронно-лучевая трубка с магнитным отклонением

небольшое отверстие, через которое проходит электронный поток. Интенсивность пучка зависит от напряжения на сетке по отношению к катоду. Аноды имеют также цилиндрическую форму.

Электронный луч отклоняется под действием напряжения, приложенного к соответствующей паре отклоняющих пластин. В трубке имеется две пары пластин для горизонтального и вертикального отклонения.

На рис. 12.2 схематически изображена конструкция трубки с магнитным отклонением. Катод и сетка трубки такие же, как в трубке с электростатическим отклонением (рис. 12.1). Отклонение электронного луча достигается с помощью магнитного поля, перпендикулярного к оси трубки.

Фокусировка

Электронный поток, проходящий через отверстие в сетке, должен быть сфокусирован с целью получения пятна на экране возможно меньших размеров.

В электростатических трубках применяется электростатическая фокусировка, в магнитных — магнитная. Однако достаточных оснований для такого разделения не существует: магнитная фокусировка может применяться в электростатических трубках и наоборот, что иногда используется для специальных целей.

При электростатической фокусировке (рис. 12.1) электронный поток, пройдя сетку и получив ускорение за счет действия потенциала первого анода A_1 , попадает в поле вто-

рого анода A_2 , который имеет более низкий (регулируемый) потенциал. Это заставляет пучок концентрироваться так, что, когда он достигает экрана, диаметр его практически становится очень малым. Третий анод A_3 создает дальнейшее ускорение.

В трубке с магнитной фокусировкой (рис. 12.2) с помощью катушки, размещаемой на горловине трубки, создается осевое магнитное поле. Так как электроны, отклоняющиеся от центра луча, имеют радиальную составляющую скорости, это осевое магнитное поле создает круговое движение электронов. Катушка рассчитана таким образом, что создаваемое ею фокусирующее поле направляет электроны под действием продольной составляющей скорости на осевую линию в момент достижения ими экрана.

Яркость

Яркость свечения экрана зависит от потенциала сетки, т. е. от плотности электронного луча, а также от напряжения последнего анода, которое определяет конечную скорость электронов.

Яркость можно увеличить, повысив напряжение последнего анода, но это снижает чувствительность трубки. В некоторых трубках имеется дополнительный электрод с более высоким потенциалом, предназначенный для дальнейшего ускорения движения электронов после прохождения отклоняющих пластин.

Чувствительность

Если к отклоняющим пластинам электростатической трубки приложено напряжение U вольт, то отклонение на экране определится величиной $\frac{adv}{2bV}$, где d — расстояние от середины пластин до экрана, a — длина пластин по оси трубки, b — расстояние между пластинами, V — потенциал последнего анода по отношению к катоду.

Чувствительность трубок обычно составляет от 0,1 до 0,5 мм на вольт.

В трубках с магнитным отклонением чувствительность определяется величиной $adB\sqrt{\frac{e}{m} \cdot \frac{1}{2V}}$, где B — магнитная индукция поперечного отклоняющего поля, a — расстояние,

на которое оно действует вдоль оси, d и V — до экрана и потенциал последнего анода. Если подставить числовые значения для e и m , то формула принимает вид $\frac{adB}{3,37\sqrt{V}}$, где B — в гауссах, V — в вольтах, a и d — в сантиметрах.

Обычно применяются две катушки, расположенные взаимно перпендикулярно для образования горизонтального и вертикального отклоняющих полей.

В индикаторах кругового обзора, где радиальная развертка должна непрерывно вращаться, часто применяется одна катушка, вращающаяся вокруг горловины трубки синхронно с вращением антенны. Иногда применяются две катушки, распределение токов между которыми создает эффект вращения.

Сравнение трубок с электростатической и электромагнитной фокусировкой

Электростатические трубки лучше использовать применяя развертку типа А, так как быстрое изменение напряжения, необходимое для отклонения электронного луча, создать проще, чем соответствующие токи, необходимые для магнитных трубок.

В индикаторах кругового обзора применяется модуляция яркости луча трубки сигналами от целей, принятыми приемником; поэтому скорость развертки на индикаторе, а следовательно, и скорость изменения токов может быть небольшой. Это определяет преимущественное использование магнитных трубок, обладающих лучшей фокусировкой, для индикаторов с таким видом развертки.

Нарушения фокусировки

Если средняя величина напряжения на одной паре отклоняющих пластин электростатической трубки по отношению к потенциалу последнего анода неправильная, то может получиться расфокусировка пятна в одной плоскости без нарушения фокусировки в другой плоскости. Этот недостаток устраняется путем приложения соответствующего регулируемого напряжения между одной парой пластин и последним анодом.

Такая же расфокусировка может получиться и в том случае, если отклоняющее напряжение прикладывается

только к одной пластине пары, а другая имеет постоянный потенциал. По этой причине предпочтение отдается пушпульной схеме, в которой обе пластины получают одинаковое по величине, но противоположное по знаку напряжение.

Центрирование пятна

В электростатических трубках центрирование пятна обеспечивается небольшим напряжением постоянного тока, приложенным к одной или к обоим парам отклоняющих пластин. В магнитных трубках эту роль выполняет пара вспомогательных катушек, расположенных под прямым углом друг к другу, которые питаются постоянным током от отдельных потенциометров.

Используя этот принцип, можно сместить центр развертки изображения, что иногда требуется для специальных целей.

Чрезвычайно важно экранировать трубку от влияния внешних магнитных полей, применяя экран из никелевых сплавов.

Ионное пятно

Так как полный вакуум в трубке получить невозможно, в ней остается некоторое количество ионов. Обладая большей массой, они перемещаются со значительно меньшей скоростью, чем электроны. В электростатической трубке ионы находятся большее время под влиянием отклоняющих пластин, чем электроны, поэтому несмотря на их большую массу и меньшее ускорение, отклонение ионов будет то же, что и электронов.

В магнитной трубке ионы почти совсем не отклоняются, так как величина отклоняющей силы зависит, кроме других факторов, от скорости передвижения частиц. Поэтому все ионы будут ударяться об экран недалеко от центра и через некоторое время создадут выгорание экрана.

Во избежание этого явления в трубках можно сделать наклонную электронную пушку такой формы, чтобы первоначально и электроны и ионы направлялись в точку, находящуюся за пределами экрана. Если затем приложить к трубке дополнительное магнитное поле небольшой силы, то электроны будут отклоняться в нужном направлении, а ионы будут улавливаться, не доходя до экрана.

Экраны

В индикаторах, где след луча повторяется через короткие интервалы (много раз в секунду), как например в индикаторах типа А, вследствие значительной инерции глаза наблюдателя не требуется послесвечения.

Для этих систем подходящим покрытием экранов является виллемит (ортосиликат цинка) или некоторые сульфиды.

В индикаторах, где след луча на экране повторяется только через несколько секунд, как например в индикаторе кругового обзора, для покрытия экрана требуются материалы со значительным послесвечением.

Для этой цели широко применяется покрытие из фтористого соединения магния, дающее оранжевое свечение. В старых системах применялись экраны с двойным покрытием. Первый слой не обладал свойством послесвечения, но он подсвечивал второй слой, ближайший к дну трубки, который изготовлялся из материала, обладающего значительным послесвечением.

Часто внутреннюю поверхность экрана покрывают мелкораспыленным алюминием. Это увеличивает яркость изображения за счет того, что внешний свет отражается, не проходя внутрь трубки и не маскируя, таким образом, сигналы целей. Такое алюминиевое покрытие представляет незначительное препятствие для электронов, летящих к экрану.

Обычно употребляются экраны с диаметром примерно от 50 до 380 мм (от 2 до 15 дюймов).

Напряжения на электродах

В радиолокационных трубках напряжение на последнем аноде по отношению к катоду варьируется от 2 до 15 кВ.

Управляющая сетка в трубке имеет отрицательное напряжение по отношению к катоду. Если напряжение на ней составляет от 50 до 100 в, то сетка полностью заперта; если напряжение меньше, то каждой величине напряжения соответствует определенная степень яркости. Если электростатическая трубка имеет три анода, то, как правило, напряжение первого анода равно 40% от величины напряжения на последнем аноде. Напряжение на втором аноде (фокусирующем) регулируется в пределах 10—20% от величины напряжения на последнем аноде.

Нужные величины напряжения подаются с делителя

напряжений (рис. 12.1 и 12.2). Токи в этих цепях незначительные.

Мощность, необходимая для питания накала, обычно равна 1—2 вт. Величина напряжения 6,3 в.

Трубка с запоминанием изображения

В такой трубке имеются две электронные пушки и металлический экран, покрытый тонкой пленкой изолирующего материала. Электронный луч первой пушки, называемый записывающим лучом сканирует по экрану, перемещаясь в соответствии с законом развертки, и заряжает отдельные точки экрана. Плотность заряда каждой точки пропорциональна интенсивности луча.

Электронный луч второй пушки, называемый «считывающим» лучом, меньшей интенсивности, движется по экрану, следуя тому же закону, что и первый, но обычно с большей скоростью, и разряжает каждую точку на незначительную величину за ход развертки пропорционально величине заряда каждой точки.

Возможность такой работы обеспечивается тем, что величина вторичной эмиссии изолирующего слоя (экрана) под влиянием электронной бомбардировки меньше при больших скоростях движения электронов и больше при малых скоростях. Напряжения двух лучей устанавливаются таким образом, чтобы записывающий луч действовал при напряжении, соответствующем коэффициенту вторичной эмиссии меньше единицы, т. е. создавал усиление электронов на экране. Со считывающим лучом имеет место обратная картина.

Сигналы, полученные после прохождения по экрану считывающего луча, снимаются с задней металлической поверхности, усиливаются и воспроизводятся телевизионным методом.

ГЛАВА XIII

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ИНДИКАЦИИ

Тип индикатора, применяемого в той или иной станции, зависит от ее назначения. Требования к станциям изменяются в зависимости от того, какие величины точности необходимо получить при определении дальности, азимута и угла места выбранной цели и обработке всех видимых целей во всем диапазоне дальностей.

Наиболее часто применяемые типы индикации изображены на рис. 13.1.

Индикатор типа А

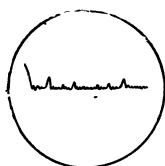
В индикаторе типа А (рис. 13.1, а) обеспечивается индикация дальности на экране электронно-лучевой трубки с электростатическим отклонением. Пятно на экране трубки отклоняется слева направо с постоянной скоростью (регулируемой цепью развертки), а отраженные сигналы изображаются вертикальными выбросами, создаваемыми подачей усиленного сигнала на вертикальные пластины (Y) трубки. Дальность определяется расстоянием вдоль линии развертки, на которой появляется отраженный сигнал.

Так как весь диапазон дальности должен укладываться в диаметр трубки, то при этом методе индикации нельзя получить большой точности.

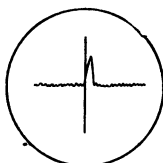
Для повышения точности длина линии развертки может быть значительно увеличена. При этом на экране трубки будет изображена лишь часть ее, включающая отраженный сигнал, как показано на рис. 13.1, б.

Другим методом является ускорение той части развертки, которая включает нужный отраженный сигнал (рис. 13.1, в).

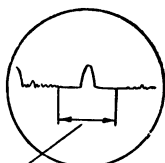
При необходимости выделить цель, за которой нужно



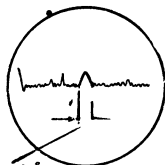
а



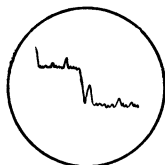
б



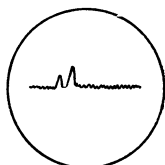
Растянутый
участок развертки
в



Подсветка линии
развертки
г



д



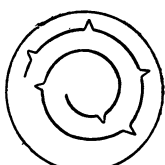
е



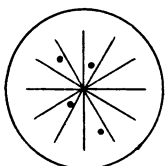
ж



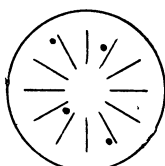
з



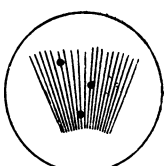
и



Радиально =
круговая
к



Радиально =
круговая
(с открытым
центром)
л



Секторная
м

Р и с. 13.1. Типы разверток

вести наблюдение на индикаторе, можно применить стробимпульс, создающий подсвет линии развертки в небольшой зоне, содержащей отраженный сигнал (рис. 13.1, *г*), или же использовать ступенчатую отметку на линии развертки (рис. 13.1, *д*).

Схемы, обеспечивающие решение этих задач, носят название схем разверток и описаны в главе XIV.

В описанных индикаторах азимут и угол места цели не даются. Их получают от специальных датчиков, отмечающих угловое положение антенны в горизонтальном и вертикальном положениях. При использовании метода равносигнальной зоны на экране индикатора можно получить изображение двух отраженных сигналов, в виде двух меток, слегка сдвинутых относительно друг друга, соответствующих двум положениям луча (рис. 13.1, *е*). Это помогает оператору определить нужный угол доворота антенны, чтобы получить равные сигналы в обоих положениях антенны.

Малое смещение, необходимое в этом случае, может быть получено при подаче незначительного напряжения последовательно с напряжением развертки для одного положения луча. Включение может быть электронным и механическим в зависимости от способа, который используется для качания луча.

Индикатор типа В

В этом типе индикатора дается дальность до цели и азимут (рис. 13.1, *ж*). Горизонтальное отклонение создается напряжением, получаемым от потенциометра, который связан механически с антенной. Развертка в вертикальном направлении обеспечивается генератором линейного напряжения развертки. Цель на экране изображается в виде яркого пятна, вспыхивающего на экране индикатора.

Индикатор типа С

Этот тип индикатора аналогичен индикатору типа В, за исключением того, что вместо дальности здесь отмечается угол места цели (рис. 13.1, *з*). Отклонение по углу места можно получить от потенциометра, связанного с антенной.

Индикаторы типа С используются в радиолокационных станциях самолетов-истребителей для прицеливания при стрельбе по самолету противника.

Индикатор типа J

Индикатор типа J (рис. 13.1, и) аналогичен индикатору типа А, однако прямолинейная развертка первого здесь заменена спиральной. Эта развертка имеет большую протяженность на экране, а следовательно, дает большую точность.

Принятые сигналы изображаются в виде радиально направленных выбросов, которые создаются путем подачи сигналов на специальный электрод трубки, расположенный в центре экрана.

Проградуированная в единицах дальности шкала и вращающаяся в центре экрана стрелка позволяют определить дальность по любому полученному изображению эхосигнала.

Индикатор кругового обзора

В индикаторе кругового обзора (рис. 13.1, к) линия развертки создается пятном, движущимся радиально от центра экрана.

Линия развертки непрерывно вращается синхронно с антенной, а цель изображается мгновенным подсвечиванием на этой линии. Поэтому индикатор кругового обзора дает радиолокационную карту всех объектов, находящихся в пределах данной дальности. Такой индикатор широко применяется в морских радиолокационных станциях, а также во многих типах самолетных станций.

Модификация индикатора круговой развертки показана на рис. 13.1, л. В этом типе индикатора развертка начинается не в центре экрана. В таком индикаторе легче различать объекты, находящиеся в пределах небольшой дальности,— требование, которое предъявляется ко многим морским радиолокационным станциям. Изображение в этом случае несколько искажено, так как центр вместо точки становится окружностью.

В индикаторах кругового обзора антенны обычно непрерывно вращаются со скоростью от 6 до 30 об/мин.

Дальность в таких индикаторах определяется с помощью калибровочных окружностей, создаваемых яркими метками дальности на линии развертки при вращении ее. Для более точных измерений используются окружности переменной дальности, радиусы которых точно проградуированы по потенциометру. Радиус окружности изменяют до тех пор, пока окружность не пересечет цель,

дальность до которой необходимо измерить. Показания дальности в этом случае определяются по шкале потенциометра, градуированной в единицах дальности.

Изменяя скорость радиальной развертки, можно получать различные дальности на индикаторе, т. е. менять масштаб развертки.

В морских установках обеспечивается автоматическая стабилизация изображения с помощью корабельного гироскопа (см. гл. XI).

Точность индикатора кругового обзора

Азимут определяется с точностью $1-2^\circ$, когда отраженный сигнал появляется на периферии экрана. Измерения производятся с помощью стрелки, вращающейся относительно центра экрана, и шкалы в градусах.

Точность измерения дальности составляет от 2 до 5% максимальной величины используемой шкалы дальности. Возможность раздельного наблюдения двух близких объектов зависит от дальности, длительности импульса и других условий. На малых дальностях возможно раздельное наблюдение объектов, находящихся на расстоянии от 25 до 100 м друг от друга.

Модификация индикатора кругового обзора предназначенного для специальных целей

Если на экране требуется наблюдать объекты, лежащие только в определенных границах дальности и азимута, начальная точка линии развертки может быть смещена с помощью приложения постоянного отклоняющего поля. В этом случае начало развертки как бы перемещается в точку, лежащую за пределами экрана. Поэтому выбранная зона (площадь) может рассматриваться в большом масштабе. В результате может быть получена секторная развертка (рис. 13.1, м). Предельный случай такой развертки получается в индикаторе типа В.

Крупномасштабные индикаторы кругового обзора

Подобные индикаторы, необходимые для одновременного наблюдения несколькими операторами, не могут быть получены простой оптической проекцией, так как яркость трубки с обычным послесвечением не может быть доста-

точно увеличена без повышения начальной яркости (называемой «вспышкой возбуждения») до недопустимой величины. Чтобы избежать этого, применяют трубки без послесвечения. Такую трубку можно достаточно подсветить для проекции на экран, покрытый слоем вещества с нужной величиной послесвечения, например цинко-кадмиевым сульфидом.

Сказанное не относится к трубке, называемой скиатроном, экран которой покрыт хлористым калием и в которой изображение получается в виде темного следа, достаточно различного для его дальнейшей проекции.

Использование этого способа ограничено чрезвычайно большим временем, необходимым для получения полного изображения на экране.

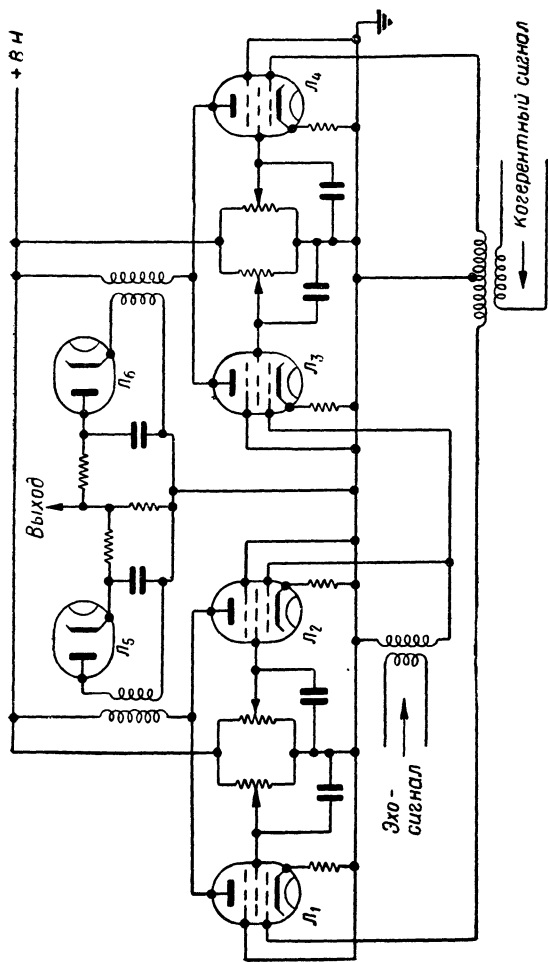
Другим решением является применение трубки с накоплением заряда (см. главу XII), но при этом требуется применение дополнительных устройств.

Индикация подвижных целей

Если эхосигналы, создаваемые одним передающим импульсом, вычтуть из эхосигналов, создаваемых другим, то в результате останутся только сигналы, отраженные от объектов, движущихся в течение времени, соответствующего интервалу между импульсами; неизменяемые отраженные сигналы от неподвижных объектов исчезнут. Этим способом получают изображение подвижных объектов, например самолетов на индикаторах радиально-круговой развертки, сигналы от которых при другом способе индикации были бы замаскированы сильными местными помехами, отраженными от близлежащих неподвижных объектов.

Практически проблема осложняется тем, что нельзя обеспечить постоянство интервалов между импульсами передатчика с точностью, необходимой для сравнения отраженных импульсов. Можно преодолеть это затруднение, сравнивая фазу отраженного сигнала с фазой соответствующего ему излучаемого импульса, а в дальнейшем сравнивая эту разность фаз с соответствующей величиной разности фаз следующего излучаемого импульса.

Так как передатчик не работает в интервалах между импульсами, в течение которых возвращается отраженный сигнал, то применяется способ включения передатчиком высокостабильного генератора (когерентного генератора).



Р и с. 13.2. Принципиальная схема индикации подвижных целей

Этим обеспечивается наличие колебаний с заведомо правильной фазой, с величиной которой можно сравнивать фазу отраженных сигналов.

Когерентный генератор состоит из лампы (пентода) и колебательного контура. Первоначально лампа заперта по антидинатронной сетке. Импульс передатчика ударно возбуждает колебания в контуре, возникающий ток отпирает пентод, вследствие чего в цепи продолжают колебания с той же фазой, что и первоначальное колебание ударного возбуждения.

Когерентный генератор работает на промежуточной частоте, и сравнение фаз производится на этой частоте, так как на ней легче поддерживать стабильность, чем на частоте сигнала.

Фазы когерентного генератора и отраженного сигнала сравниваются с помощью фазочувствительного детектора, принципиальная схема которого изображена на рис. 13.2. Сигналы когерентного генератора подаются на два диода (через пентод) в противофазе, в то время как отраженные сигналы подаются с одинаковой фазой.

Диоды включены противоположно, и поэтому при отсутствии сигнала выходное напряжение равно нулю.

При наличии отраженного сигнала на выходе появляется результирующее напряжение, величина которого зависит только от разности фаз когерентного и отраженного сигналов. Перед тем как эти сигналы подаются в схему, они ограничиваются до определенной величины так, что их первоначальные величины не влияют на результат.

Выходное напряжение поступает на усилитель сравнения двумя путями: прямо или через линию задержки с временем задержки, точно равным интервалу между передающими импульсами. Знак сигнала, проходящего по одному из этих путей, меняется на обратный, перед тем как сигнал подается на усилитель сравнения, и поэтому окончательная величина на выходе пропорциональна разности двух отраженных сигналов.

Равенство между временем задержки линии и интервалами между импульсами передатчика поддерживается автоматически тем, что каждый импульс передатчика, задерживаемый линией задержки, используется для запуска следующего импульса. Таким образом, ртутная линия задержки точно регулирует частоту повторения импульсов.

Г Л А В А XIV

СХЕМЫ РАЗВЕРТОК

В зависимости от типа индикатора схемы разверток должны создавать напряжение или ток соответствующей формы для подачи на электростатическую или магнитную электронно-лучевую трубку. Схемы разверток определяются постоянной времени цепи, содержащей сопротивление и емкость или индуктивность.

Для большинства индикаторов необходимо, чтобы напряжение или ток нарастали равномерно от нуля до максимальной величины. В особых случаях требуется другой закон изменения тока или напряжения.

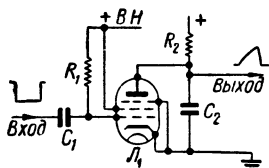
Начало хода развертки должно быть синхронизировано с моментом запуска передатчика при помощи импульса запуска.

Возвращение в исходное состояние схемы развертки должно осуществляться сразу же после окончания линии развертки. Схемы запуска и прекращения действия цепей развертки описаны в главе V.

Простейшая схема развертки для индикатора типа А

В схеме, изображенной на рис. 14.1, лампа L_1 нормально проводит ток, так как ее сетка соединена с плюсом источника высокого напряжения через сопротивление R_1 . Конденсатор C_2 поэтому разряжен.

При подаче на вход схемы через конденсатор C_1 отрицательного запускающего импульса значительной амплитуды, лампа L_1 запирается и конденсатор C_2 начинает заряжаться через сопротивление R_2 . Напряжение на конденсаторе C_2 растет по экспоненте, но на выходе можно получить линейно изменяющееся напряжение, если исполь-



Р и с. 14.1. Простейшая схема развертки для индикатора типа А

зывать для получения развертки сравнительно малую часть кривой напряжения заряда. Недостатком этой схемы является необходимость применения очень высокого напряжения для заряда конденсатора, так как в противном случае выходное напряжение оказалось бы слишком низким. В усовершенствованных схемах разверток, например в схеме

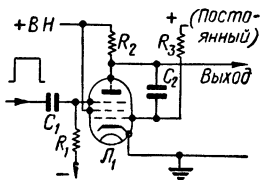
Миллера и схеме с катодным выходом, этот недостаток отсутствует.

Схема развертки с анодно-сеточной емкостью (схема развертки Миллера)

Эта схема, широко применяемая для получения линейной развертки, изображена на рис. 14.2. Лампа Λ_1 первоначально заперта отрицательным смещением на ее антидинатронной сетке. Таким образом, анод лампы имеет положительный потенциал источника высокого напряжения.

При подаче на антидинатронную сетку лампы через конденсатор C_1 запускающего напряжения положительной полярности лампа отпирается и ее анодное напряжение сильно понижается из-за падения напряжения на сопротивлении R_2 . Это падение напряжения передается на управляющую сетку через конденсатор C_2 , который стремится противодействовать падению анодного напряжения, но полностью его не нейтрализует. Когда эти обе причины компенсируют друг друга, наступает состояние временного равновесия. Этот момент является началом развертки.

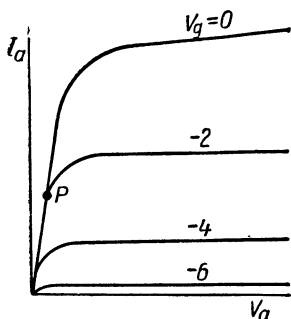
Конденсатор C_2 начинает заряжаться через сопротивление R_3 . Напряжение на аноде падает, так как напряжение на управляющей сетке увеличивается. Если X — эффективное усиление каскада, то при увеличении напряжения на управляющей сетке на один вольт напряжение на аноде



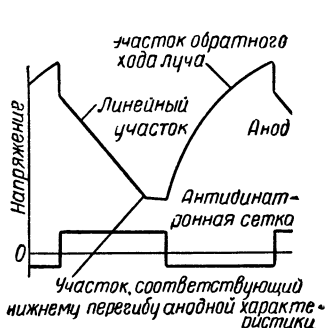
Р и с. 14.2. Схема развертки Миллера

падает на X ; общее напряжение на конденсаторе C_2 изменяется на $X + 1$.

Сравнение этой схемы со схемой, представленной на рис. 14.1, показывает, что фактически емкость конденсатора увеличилась в $X + 1$ раз, а напряжение на выходе — в X раз. Это эквивалентно использованию части зарядной кривой конденсатора, при которой сохраняется линейная зависимость напряжения, но без имевшего место в преж-



Р и с. 14.3. Пентодные характеристики



Р и с. 14.4. Форма напряжений в генераторе развертки Миллера

ней схеме недостатка — малой величины выходного напряжения.

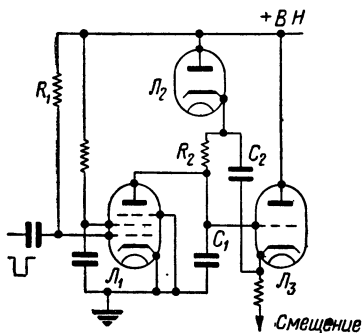
Процесс продолжается до точки P на кривой (рис. 14.3), соответствующей нижнему сгибу анодной характеристики лампы, после которой дальнейший рост напряжения на сетке почти не влияет на анодное напряжение. Этим ограничивается рабочая часть развертки.

С прекращением запускающего импульса схема возвращается в первоначальное состояние готовности для формирования следующего хода линии развертки. Форма кривой напряжения показана на рис. 14.4.

При получении достаточного напряжения развертки до начала работы лампы на нижнем сгибе анодной характеристики, запускающее напряжение на входе схемы может быть прекращено.

Схема с катодным выходом

Эта схема показана на рис. 14.5. В состоянии покоя сетка лампы \mathcal{L}_1 получает положительный потенциал через большое сопротивление R_1 и лампа находится в режиме, соответствующем нижнему сгибу анодной характеристики. При этом потенциал анода почти равен потенциалу земли. Практически конденсатор C_1 разряжен.



Р и с. 14.5. Схема с катодным выходом

Для обеспечения начала развертки лампа \mathcal{L}_1 запирается отрицательным запускающим импульсом, подаваемым на управляющую сетку. Конденсатор C_1 начинает заряжаться через сопротивление R_2 . Повышение напряжения на конденсаторе C_1 передается с помощью катодного повторителя на лампе \mathcal{L}_3 через конденсатор C_2 на верхний конец сопротивления R_2 . Вследствие этого диод \mathcal{L}_2 запирается.

Если емкость конденсатора C_2 была бы бесконечно большой, а лампа \mathcal{L}_3 являлась бы идеальным катодным повторителем, то повышение напряжения на верхнем конце сопротивления R_2 было бы точно таким же, как и на нижнем конце, т. е. зарядный ток конденсатора C_1 , протекающий через сопротивление R_2 , был бы постоянным. В результате развертка была бы строго линейной. Практически

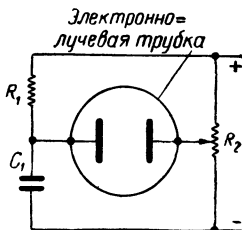
такие идеальные условия отсутствуют, тем не менее схема дает хорошие результаты.

По окончании отрицательного запускающего импульса схема возвращается в первоначальное состояние.

Схема развертки с использованием потенциометра

На рис. 14.6 приведена принципиальная схема устройства, которое может быть использовано для случая точного измерения дальности.

Хронирующая цепь состоит из сопротивления R_1 и конденсатора C_1 , которые могут быть включены любым способом (на рисунке не показано), например так, как изображено на рис. 14.1. Верхний конец конденсатора C_1 присоединен к одной из пластин X электронно-лучевой трубки, другая пластина при этом соединена с ползунком потенциометра R_2 . Величина напряжения на конденсаторе C_1 значительно больше величины, необходимой для полного отклонения пятна на весь экран. Изменяя положение ползунка, можно компенсировать напряжение на конденсаторе C_1 так, чтобы передний фронт выбранного отраженного сигнала устанавливался в центре экрана, обозначенного перекрестием, как это показано на рис. 13.1, б. Показания дальности снимаются с точно градуированной шкалы, связанной с ползунком потенциометра R_2 . Так как этот способ является «нулевым», то нет необходимости в обеспечении линейности напряжения развертки, но калибровка потенциометра должна точно соответствовать закону изменения напряжения развертки.

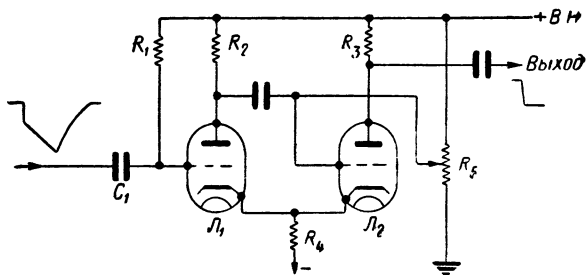


Р и с. 14.6. Схема развертки с симметрирующим потенциометром

Развертка с растянутым участком

Когда необходимо более детально показать какую-то часть развертки, эта часть может быть растянута с помощью схемы, изображенной на рис. 14.7.

В состоянии покоя через лампу L_1 проходит весь ток, так как сетка лампы соединена с плюсом источника высо-



Р и с. 14.7. Схема развертки с растянутым участком

кого напряжения, а сопротивление R_4 достаточно высокое. Поэтому лампа $Л_2$ заперта.

Если напряжение линейной развертки отрицательной полярности подать на управляющую сетку лампы $Л_1$, то в определенный момент времени, зависящий от установленной величины сопротивления R_5 , лампа $Л_2$ начинает проводить ток. Величина этого тока вскоре становится полной, а лампа $Л_1$ запирается.

Это приводит к созданию быстро изменяющегося напряжения на аноде лампы $Л_2$ (перепаду напряжений), которое можно использовать для запуска растянутой развертки.

Напряжение с выхода этой схемы подводится к одной отклоняющей пластине электронно-лучевой трубки, а напряжение нормальной развертки — к другой пластине.

Положение точки, в которой начинается ускорение развертки, регулируется переменным сопротивлением R_5 , а длительность действия ее — диодом или другим устройством, ограничивающим рост напряжения, подводимого к схеме развертки с растянутым участком.

Целесообразно подавать напряжение на лампу $Л_1$ через буферный каскад катодного повторителя во избежание искажений основной развертки из-за эффекта нагрузки лампы $Л_1$.

Спиральная развертка для индикатора типа J

Спиральная развертка создается вращающимся полем, образующимся синусоидальными колебаниями переменной (уменьшающейся) амплитуды. В этой схеме используется

фазорасщепление выходного напряжения генератора затухающих колебаний (о методах получения вращающегося поля см. раздел «Гониометры», глава XV).

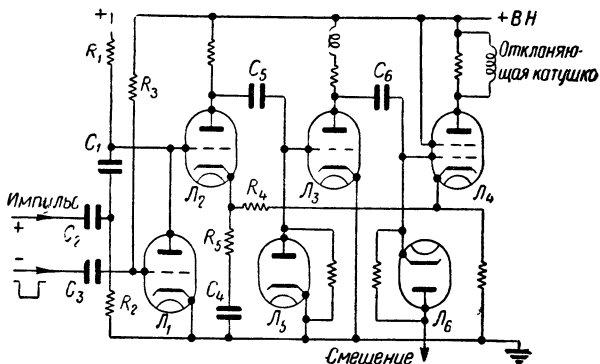
Схемы разверток для магнитных трубок

Так как отклоняющая катушка обладает индуктивностью и емкостью, то для получения линейно изменяющегося тока необходимо подать на катушку напряжение, состоящее из начальной ступени и линейного участка.

Можно разработать схемы, которые будут непосредственно генерировать колебания подобной формы, но практически целесообразнее использовать схемы, создающие приближенную форму, и использовать в соответствующей цепи отрицательную обратную связь для получения необходимой окончательной формы тока.

Схема развертки для индикатора кругового обзора с магнитной трубкой

В схеме, изображенной на рис. 14.8, основная цепь развертки состоит из сопротивления R_1 и конденсатора C_1 . В состоянии покоя конденсатор C_1 разряжен, так как ток проходит через лампу Λ_1 , а сетка этой лампы соединена



Р и с. 14.8. Схема развертки для индикатора кругового обзора на магнитной трубке

с плюсом источника высокого напряжения через сопротивление R_3 большой величины.

В момент излучения импульса передатчика на сетку лампы L_1 подается прямоугольный импульс отрицательной полярности и лампа запирается. Вследствие этого конденсатор C_1 начинает заряжаться, и растущее на нем напряжение, усиленное лампами L_2 и L_3 , подводится к мощному тетроду L_4 , в анодной цепи которого включена отклоняющая катушка.

Постоянная времени, определяемая R_1C_1 , во много раз больше длительности развертки, и поэтому напряжение на конденсаторе C_1 возрастает почти линейно.

Глубокая обратная связь через сопротивление R_4 ограничивает усиление и обеспечивает условия, при которых напряжение на катоде лампы L_4 , пропорциональное току отклоняющей катушки, почти равно напряжению на сетке лампы L_2 . Поэтому ток в катушке растет в основном линейно, пропорционально увеличению напряжения на конденсаторе C_1 .

По окончании запускающего импульса вследствие действия управляющей схемы (обычно используется мультивибратор) схема развертки приводится в свое первоначальное состояние; лампа L_1 вновь начинает проводить ток и разряжает конденсатор C_1 . Диоды L_5 и L_6 ограничивают усиление в обратном направлении, предотвращая слишком быстрое запираение лампы L_4 и ограничивая бросок высокого напряжения на катушке индуктивности.

Небольшой положительный импульс, подаваемый через конденсатор C_2 , в начале хода развертки создает слабый начальный выброс, который компенсирует собственную емкость катушки. Этому способствует также цепь R_5C_4 (с малой постоянной времени), закорачивающая цепь обратной связи на короткий промежуток времени в начале хода развертки.

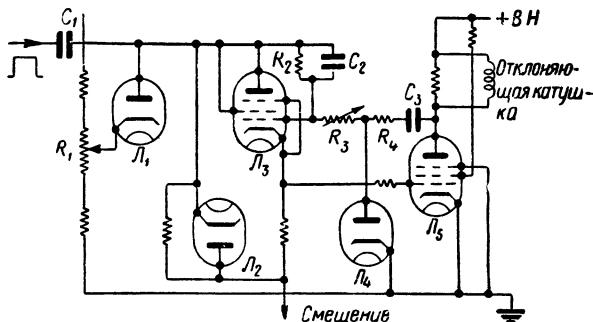
Несмотря на то что лампа L_4 первоначально заперта, она быстро начинает проводить ток в начале хода развертки, так как обратная связь отсутствует до прохождения тока через эту лампу.

Второй вариант развертки для индикатора кругового обзора

В схеме, изображенной на рис. 14.9, в состоянии покоя все электроды лампы L_3 и сетка лампы L_5 имеют соответствующие потенциалы ниже потенциала земли, ко-

которые поддерживаются отрицательным смещением. Лампа Λ_5 заперта (следует заметить, что высокое напряжение на лампы не подается, за исключением анода лампы Λ_5 и катода лампы Λ_1).

При подаче положительного запускающего импульса на вход схемы через конденсатор C_1 напряжения на сетке и аноде лампы Λ_3 растут до величины, определяемой значением сопротивления R_1 .



Р и с. 14.9. Схема развертки для индикатора кругового обзора (2-й вариант)

На выходе катодного повторителя напряжение также растет, а вместе с ним растет и напряжение на сетке лампы Λ_5 , которая начинает проводить ток.

Линейность в основном обеспечивается цепью обратной связи $R_2R_3R_4C_3$, постоянная времени которой делается примерно равной постоянной времени отклоняющей катушки.

Предположим, что на аноде лампы Λ_5 напряжение имеет точную и правильную форму; равенство постоянных времени означает, что ток в цепи $R_2R_3R_4$ будет постоянным (если не учитывать незначительного влияния конденсатора C_2).

Отсюда следует, что напряжение на сетке лампы Λ_3 также будет постоянным. В действительности напряжение на сетке этой лампы должно слегка расти в течение времени развертки, но так как усиление лампы Λ_5 большое, то отклонение формы выходного напряжения от теоретической должно быть очень незначительным для обеспе-

чения необходимого роста напряжения на сетке лампы L_3 . Любое малое отклонение изменит ток в цепи сопротивлений $R_2R_3R_4$, что в свою очередь приведет к изменению падения напряжения на сопротивлении R_2 и исправлению ошибки. Конденсатор C_2 , включенный параллельно сопротивлению R_2 , имеет небольшую емкость и предназначен для пропускания слабого первоначального импульса, чем компенсируется паразитная емкость.

Практически величина сопротивления R_3 устанавливается путем подбора. Скорость повышения напряжения и, следовательно, масштаб развертки зависит от величины сопротивления R_1 .

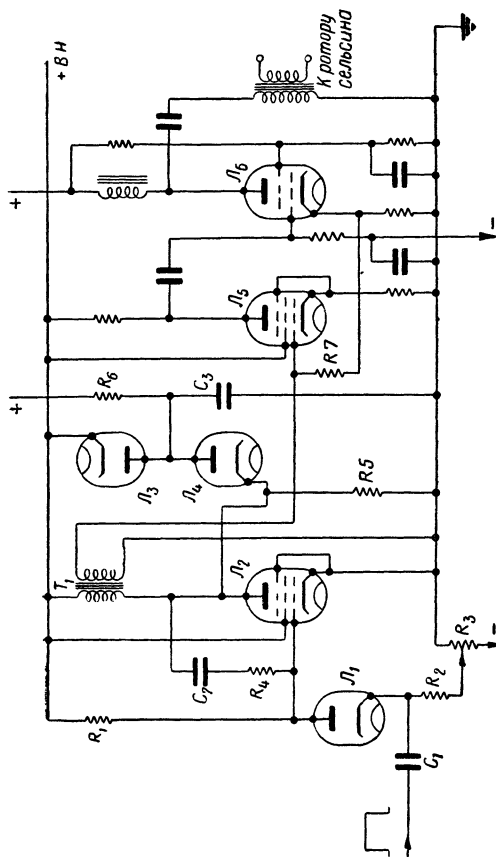
Когда управляющий мультивибратор возвращается в свое первоначальное состояние, а входное запускаящее напряжение отсутствует, выходная лампа L_5 вновь запирается. Диод L_2 предотвращает возможность перегрузки и фиксирует величины напряжений, необходимых для следующего хода развертки. Диод препятствует возникновению большого выброса из-за прекращения тока в отклоняющей катушке. Остальное время диод не проводит ток, так как потенциал точки соединения сопротивлений R_3 и R_4 всегда ниже потенциала земли во время развертки.

Симметричная форма напряжения

Если в схеме развертки используется сельсин, являющийся трансформатором, с добавлением обычного трансформатора или без него, то во избежание вращения отклоняющей катушки индикатора кругового обзора необходимо, чтобы форма напряжения была симметричной относительно нулевой линии. Это объясняется тем, что трансформатор не пропускает постоянной составляющей тока. Положительная и отрицательная части полупериода могут быть неодинаковой формы, но они должны иметь одинаковую площадь.

На рис. 14.10 изображена схема, которая обеспечивает создание напряжения симметричной формы. В состоянии покоя лампа L_1 проводит ток, и относительные величины сопротивлений R_1 и R_2 , а также установленная величина сопротивления сетки таковы, что лампа L_2 запирается по управляющей сетке.

Развертка начинается при подаче запускаящего импульса положительной полярности на лампу L_1 через кон-



Р и с. 14.10. Схема разветки с симметричной формой напряжения

денсатор C_1 . Лампа L_1 перестает проводить ток, а на сетке лампы L_2 меняется потенциал. Так как сетка подключена через сопротивление R_1 к плюсу источника высокого напряжения, то напряжение немедленно повышается. За указанными каскадами следует схема Миллера, используемая для создания обычной развертки.

В конце развертки, когда лампа L_2 вновь запирается, возникают колебания контура, образуемого индуктивностью первичной обмотки трансформатора T_1 и связанной с нею емкостью (включая паразитную емкость). Первая полуволна этих колебаний создает напряжение на аноде лампы L_2 выше положительного потенциала источника высокого напряжения. В течение этого полупериода лампа L_4 не пропускает ток, так как в течение хода развертки в схеме Миллера напряжения на катоде (и аноде) следуют за величиной анодного напряжения лампы L_2 . К моменту начала отрицательной полуволны происходит достаточный заряд конденсатора C_3 через сопротивление R_6 (подключенное к цепи, напряжение в которой выше чем у источника высокого напряжения), обеспечивающий отпирания ламп L_3 и L_4 . Вследствие этого колебания быстро затухают, а напряжение на аноде лампы L_2 остается равным напряжению источника высокого напряжения.

Так как первоначальное и конечное напряжения на трансформаторе T_1 равны нулю (если не учитывать падения напряжения на сопротивлении обмотки), а среднее напряжение на индуктивности в периодической схеме также равно нулю, то форма напряжения в трансформаторе получается симметричной.

Выходное напряжение подается на оконечные каскады L_5 и L_6 . Глубокая отрицательная обратная связь через сопротивление R_7 способствует тому, что форма тока на выходе почти точно следует входному напряжению. Поэтому кривая тока на выходе также симметрична, начинаясь и оканчиваясь, как и требуется, на нулевом уровне.

При подключении катода лампы L_3 к напряжению, величина которого несколько отличается от напряжения основного источника высокого напряжения, можно обеспечить некоторую компенсацию влияния гистерезиса в сердечнике отклоняющей катушки и других причин.

Уменьшение влияния паразитной емкости катушки, обмоток сельсина и т. п. может быть частично обеспечено подачей небольшого отрицательного напряжения на сетку

лампы L_5 в начале развертки через конденсатор малой емкости (не показанный на рисунке).

При другом способе получения симметричного напряжения с применением трансформатора используется кривая обычной пилообразной формы. За время, в течение которого пилообразное напряжение проходит через трансформатор, нулевая линия автоматически смещается, исключая этим постоянную составляющую.

Это означает, что развертка начнется не в центре экрана, а в какой-то точке на краю экрана. Поэтому развертка не должна быть видима до тех пор, пока пятно не дойдет до центра экрана. До этого же момента должен быть задержан импульс передатчика. Таким образом, необходимо, чтобы передатчик запускался пусковым импульсом схемы развертки с соответствующей задержкой или же необходимо осуществлять управление передатчиком и схемой развертки с помощью специальной синхронизирующей схемы.

Схемы разверток с растянутым изображением в центре экрана

Растяжение изображения в центре экрана обеспечивается подачей на отклоняющую катушку постоянного тока небольшой величины от источника высокого напряжения. Этот способ нельзя применять в схемах, содержащих трансформаторы. В этом случае применяется наложение напряжения прямоугольной формы на основное напряжение развертки. Длительность соответствующего полупериода должна быть достаточно большой для перекрытия обоих концов рабочей части развертки.

Специальные типы разверток

В некоторых случаях требуются особые виды разверток, например в самолетном индикаторе кругового обзора. На больших высотах разница между наклонной дальностью, измеряемой радиолокационной станцией, и горизонтальной дальностью достаточно велика. Это является причиной искажений изображения на индикаторе кругового обзора.

Форма кривой напряжения, теоретически необходимая для неискаженного изображения, может быть приближенно получена путем наложения на линейную развертку

одной или нескольких экспоненциальных разверток с соответствующими постоянными времени.

В зависимости от высоты должна изменяться и форма напряжения дополнительной развертки, а начало наложения должно отставать по времени на величину, соответствующую прохождению сигнала от самолета до земли и обратно по вертикали. Это требуется для того, чтобы начало развертки соответствовало нулю горизонтальной дальности.

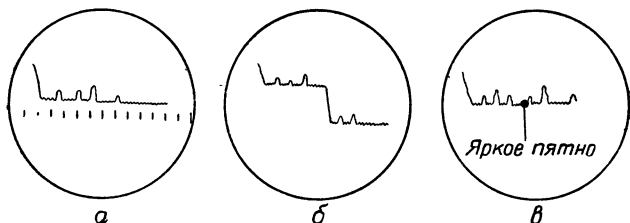
Для автоматической регулировки, связанной с различными высотами, разработаны сложные схемы. Точную компенсацию ошибок обеспечить невозможно, однако можно получить достаточно близкое приближение к точному изображению местности.

Более простым, но менее точным способом является использование линейной развертки, имеющей несколько измененную скорость нарастания и задержку начала ее примерно на половину расчетной величины задержки.

ГЛАВА XV

СХЕМЫ КАЛИБРОВКИ И СТРОБИРОВАНИЯ

Малая протяженность развертки на экране электронно-лучевой трубки не позволяет достаточно точно измерить дальность до цели. Для точного измерения может быть использован «нулевой метод», описанный в главе XIV. Другим способом является ускорение определенной части



Р и с. 15.1. Маркеры или стробы:

а — калибровочные метки; *б* — ступенчатый строб; *в* — яркое пятно

развертки, описанный также в главе XIV, и формирование одного или нескольких маркеров, указывающих известные дальности. Дальность до выбранной цели в этом случае определяется относительно положения этих маркеров на линии развертки.

В качестве маркеров могут применяться калибровочные метки, расположенные с определенными интервалами, как это показано на рис. 15.1, *а*. Может применяться одиночный маркер или строб-импульс («строб»). Последний может иметь вид ступеньки на линии развертки (рис. 15.1, *б*) или яркостного пятна (рис. 15.1, *в*). Ступенчатый строб-

импульс легче наблюдать, но его нельзя использовать в индикаторе кругового обзора. Для измерения дальности строб-импульс нужно перемещать до совпадения с передним фронтом рассматриваемого отраженного сигнала. Дальность определяется по калиброванной шкале, ползунок которой связан с потенциометром, управляющим положением строб-импульса на развертке.

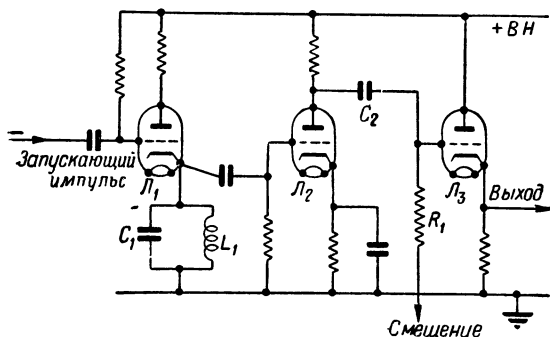
В индикаторе кругового обзора яркое пятно маркера образует круг, центр которого совпадает с центром экрана, а радиус пропорционален дальности.

Разновидностью метода использования калибровочных импульсов является способ, при котором целая группа импульсов одновременно перемещается вдоль линии развертки с известной скоростью, которую можно регулировать. Каждый калибровочный импульс в отдельности может соответствовать избранному отраженному сигналу.

Схемы формирования калибровочных импульсов

Для создания калибровочных импульсов используется генератор точной частоты, преобразователь прямоугольных импульсов и дифференцирующая цепь. Первоначальные колебания могут быть получены в схеме кварцевого генератора или в схеме с ударным возбуждением (с «звонящим контуром»). Последняя изображена на рис. 15.2.

В состоянии покоя лампы Λ_1 и Λ_2 отперты, а лампа Λ_3



Р и с. 15.2. Схема с ударным возбуждением для формирования калибровочных импульсов

заперта отрицательным смещением на сетке. Когда в передатчике возникает генерация, отрицательная полуволна напряжения прямоугольной формы от мультивибратора, управляемого передатчиком, подается на сетку лампы L_1 , которая запирается. В звнящем контуре L_1C_1 при этом возникают колебания на собственной частоте. Напряжение колебаний, усиливаемое в случае необходимости, подается на сетку лампы L_2 и перегружает ее так, что в анодной цепи лампы колебания будут иметь прямоугольную форму, причем первая полуволна колебаний имеет положительную полярность. Это напряжение дифференцируется цепью C_2R_1 и на сетке лампы L_3 , а следовательно, и на катоде создается положительный импульс, соответствующий каждому периоду колебаний в звнящем контуре.

Первый импульс почти совпадает с моментом запираания лампы L_1 . Импульсы отрицательной полярности, соответствующие следующему полупериоду, не оказывают влияния, так как лампа нормально заперта.

После окончания отрицательного входного импульса цепь возвращается в исходное состояние.

Точность подобных схем зависит от точности поддержания колебаний собственной частоты звнящего контура. Для периодической проверки настройки звнящего контура или в качестве первоначального источника колебаний большой стабильности может быть использован кварц.

Схема ударного возбуждения с блокинг-генератором

В состоянии покоя лампы L_1 , L_2 , L_3 отперты, а лампы L_4 , L_5 заперты отрицательным смещением на сетках (схема рис. 15.3). В начале развертки запускающий отрицательный импульс запирает лампу L_1 и обеспечивает начало колебаний в контуре L_1C_1 . Первая полуволна этих колебаний отрицательная; она запирает лампу L_3 и отпирает лампу L_4 . Лампы L_3 , L_4 образуют мультивибратор с катодной связью. Трансформатор T_1 и лампа L_5 образуют блокинг-генератор, который создает остrokонечные импульсы тока в лампе L_5 . Это обеспечивает получение каллибровочных импульсов, которые снимаются с сопротивления R_2 в цепи катода лампы L_5 . Постоянная времени цепи, состоящей из конденсатора C_2 и сопротивления R_1 , очень мала, и мультивибратор почти мгновенно возвращается в свое первоначальное состояние. Этим предотвращается возможность создания следующего импульса блокинг-генера-

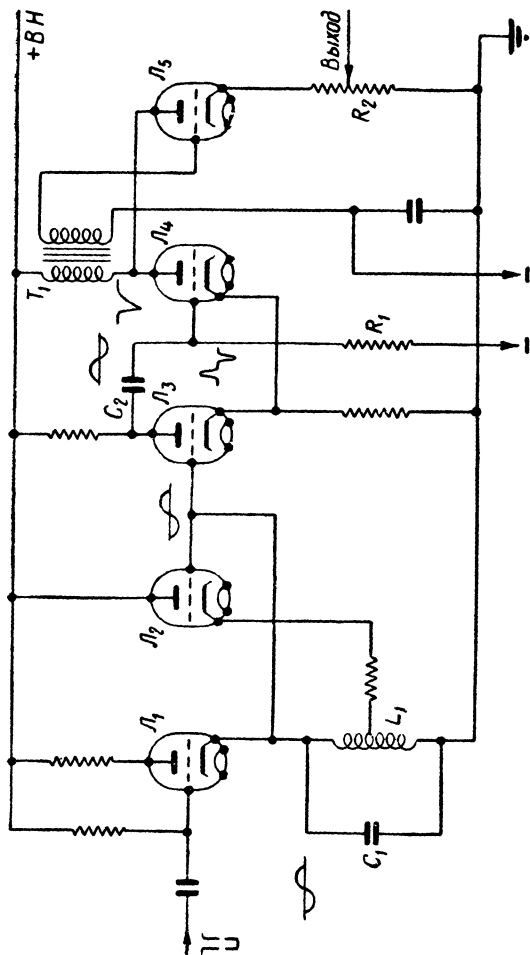


Рис. 15.3. Схема ударного возбуждения с блокинг-генератором для формирования канцеровочных импульсов

тором до прихода нового колебания со звенящего контура, соответствующего следующему запускающему импульсу. Второй положительный полупериод колебаний звенящего контура не оказывает влияния, так как лампа L_3 уже проводит ток. Функцией лампы L_2 является обеспечение регенерации с целью избежания слишком быстрого затухания колебаний в контуре L_1C_1 в течение времени развертки.

Второй вариант схемы ударного возбуждения

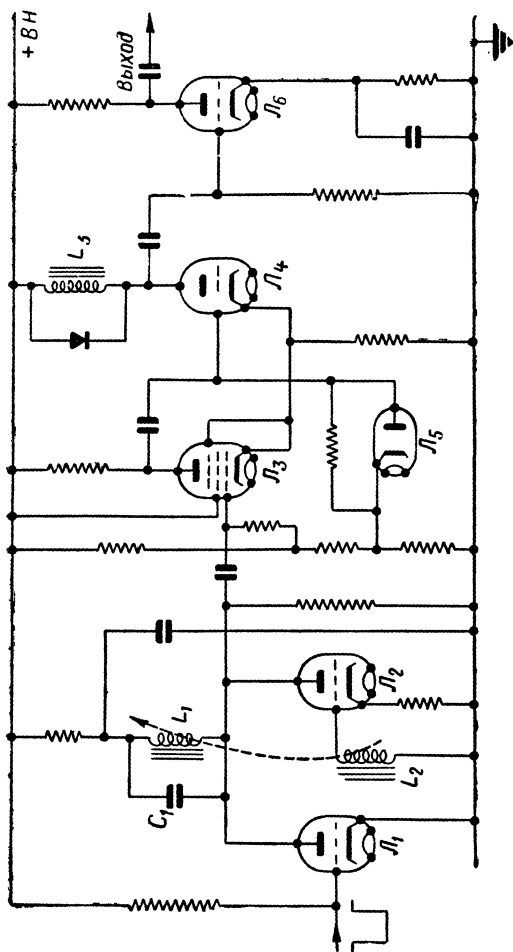
В состоянии покоя лампы L_1 , L_2 , L_3 , L_6 схемы, показанной на рис. 15.4, отперты, а лампа L_4 заперта. Лампы L_3 и L_4 сбразуют мультивибратор с катодной связью. L_1C_1 — звенящий контур. Регенерация обеспечивается цепью $L_2 - L_2$. Низкое сопротивление лампы L_1 в состоянии проводимости препятствует возникновению колебаний в контуре. Отрицательный запускающий импульс запирает лампу L_1 в начале развертки. В колебательном контуре L_1C_1 возникают колебания, и первая положительная полуволна напряжения подается на сетку лампы L_3 . Вскоре после начала второго отрицательного полупериода мультивибратор переходит в другое состояние, и лампа L_4 начинает проводить ток. Наличие кристаллического детектора в цепи анодной нагрузки мультивибратора (параллельно L_3) предотвращает появление какой-либо заметной величины напряжения на сетке выходной лампы L_6 . В начале третьего полупериода, т. е. через один период после начала развертки, мультивибратор возвращается в свое первоначальное состояние, а лампа L_4 запирается. Прекращение тока через индуктивность L_3 создает отрицательный калибровочный импульс в аноде лампы L_6 .

Кристаллический детектор предотвращает возможность появления импульса противоположной полярности из-за возникновения колебаний в контуре, образуемом индуктивностью L_3 и паразитной емкостью.

Процесс повторяется для каждого периода колебаний звенящего контура. Дiod L_5 ограничивает до соответствующей величины проводимость лампы L_4 .

Использование гониометра для перемещения калибровочных импульсов вдоль линии развертки

Гониометр состоит из двух пар неподвижных катушек, расположенных под прямым углом друг к другу, и одной



Р и с. 15.4. Схема для формирования калибровочных импульсов (3-й вариант)

подвижной, которую можно вращать внутри неподвижных, как это показано на рис. 15.5.

Переменное напряжение, получаемое от генератора со звонящим контуром или от другого генератора, используется для создания калибровочных импульсов, подается на две пары катушек, как показано на рисунке. В каждую цепь включается сопротивление, а в одну из них емкость C .

Пусть L — индуктивность каждой пары катушек. Если сопротивление R и емкость C

подобраны так, что справедливы равенства $L/C = 2R^2$ и $2\omega^2 LC = 1$, где $\omega = 2\pi f$, а R — величина одного добавочного сопротивления плюс сопротивление одной пары катушек, то в двух парах неподвижных катушек создается вращающееся поле с постоянной амплитудой. Величина напряжения, наводимого в подвижной катушке, не зависит от ее углового положения, а фаза прямо пропорциональна угловому смещению по отношению к произвольному нулевому положению. Поэтому гониометр дает возможность получить для калибратора источник переменного тока с непрерывно изменяющейся фазой. Подавая усиленное выходное напряжение подвижной катушки на любую из описанных выше схем калибровки, можно перемещать калибровочные импульсы вдоль линии развертки при вращении катушки. Если поворот катушки связать со шкалой, то можно оценивать дальность по расстоянию между калибровочными импульсами, совпавшими с передним фронтом зондирующего импульса и соответственно принятого отраженного импульса, находящегося на линии развертки справа по отношению к первому.

Обычно передний фронт зондирующего импульса не виден на линии развертки. Это затруднение можно преодолеть, если обеспечить включение развертки на несколько микросекунд раньше появления зондирующего импульса. Можно произвести калибровку нуля, используя сигнал, отраженный от объекта, расстояние до которого точно известно.

Если используется развертка с растянутой частью или стробирующий импульс, или то и другое вместе, то можно

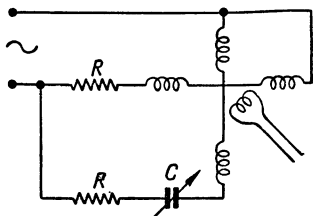


Рис. 15.5. Гониометр (используется для перемещения калибровочных импульсов вдоль развертки)

соединить управляющие потенциометры с осью гониометра. Это обеспечивает появление калибровочных меток в нужных точках линии развертки.

Кварцевый калибратор

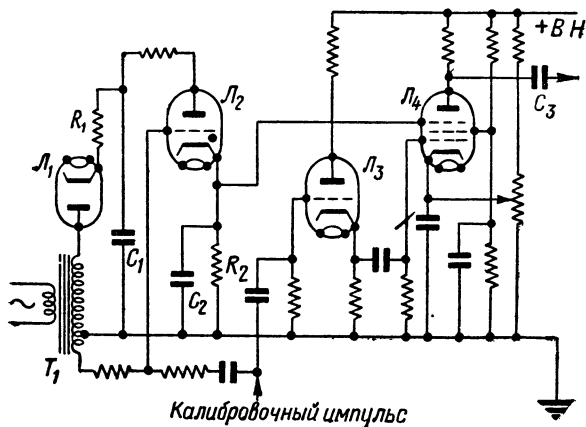
Если требуется повышенная точность определения дальности, то вместо схемы со звенящим контуром применяется генератор с кварцевой стабилизацией частоты.

Так как первый калибровочный импульс должен совпадать с началом линии развертки, то необходимо, чтобы каждый импульс стабилизировался кварцем, т. е. генерирование должно начинаться одновременно с началом линии развертки и заканчиваться в конце развертки. При другом способе начало развертки и генерирования излучаемого импульса должно совпадать с калибровочным импульсом.

В принципе возможно применение импульсных схем кварцевых генераторов, однако практическое создание их представляет определенные трудности. Поэтому обычно используется второй способ.

При управлении частотой повторения импульсов с помощью источника переменного тока возможно применить схему, изображенную на рис. 15.6.

Лампа Λ_2 в данной схеме является тиратроном, лампа



Р и с. 15.6. Схема кварцевого калибратора

L_4 — пентодом, нормально запертым как по управляющей, так и по антидинатронной сеткам. В течение полупериода, когда верхний конец обмотки трансформатора T_1 имеет положительный потенциал, конденсатор C_1 заряжается через лампу L_1 и сопротивление R_1 . Лампа L_2 заперта, так как напряжение на ее сетке отрицательно благодаря соединению с нижним концом обмотки трансформатора, промежуточная точка которой заземлена. Калибровочные импульсы, поступающие из цепи с кварцевым генератором, подаются через лампу L_3 на управляющую сетку L_4 , но не влияют на нее, так как лампа заперта отрицательным напряжением по антидинатронной сетке.

Перед окончанием полупериода, когда напряжение на сетке тиратрона приближается к нулевому значению, а далее становится положительным, тиратрон зажигается и ток, протекающий через сопротивление R_2 , повышает потенциал антидинатронной сетки лампы L_4 , через которую проходит ток, когда на ее управляющую сетку поступают импульсы.

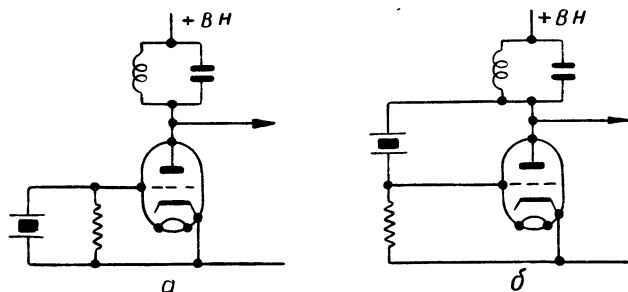
Поэтому на выходе (на конденсаторе C_3) создаются отрицательные калибровочные импульсы. Первый импульс используется для запуска модулятора и схем развертки. Это обеспечивает необходимый синхронизм в работе. Конденсатор C_1 очень быстро разряжается, и на выходе появляется только несколько импульсов в течение каждого периода работы схемы.

Для устранения возможной неустойчивости работы схемы в случае зажигания тиратрона L_2 не в момент появления импульса целесообразно подать импульсы на сетку тиратрона. Это обеспечивает зажигание тиратрона импульсом, когда напряжение на сетке почти достигает величины, при которой зажигание произойдет в любом случае. Величина постоянной времени цепи R_2C_2 такова, что напряжение на антидинатронной сетке L_4 не возрастает достаточно быстро для обеспечения прохождения импульса, зажигающего тиратрон L_2 через лампу L_4 . Следующим импульсом запускается модулятор и схема развертки. Для устранения взаимодействия двух цепей применяется катодный повторитель L_3 , работающий как буферный разделительный каскад.

Схемы кварцевых генераторов

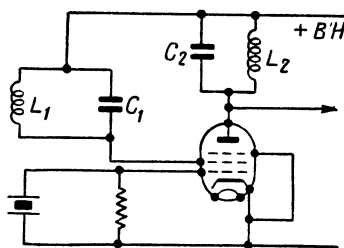
Для регенерации и поддержания колебаний необходимо, чтобы анодная цепь была настроена на частоту несколько выше собственной частоты колебаний кварца (рис. 15.7, а) или несколько ниже этой частоты (рис. 15.7, б).

Выходное напряжение содержит гармонические составляющие, и если требуется получить чисто синусоидальное напряжение, как например для фазосдвигающей цепи гонио-



Р и с. 15.7. Схемы кварцевых генераторов:
а — с кварцем в сеточной цепи; б — с кварцем в анодной цепи

метра, то выходное напряжение должно быть пропущено через один или два усилительных каскада, точно настроенных на частоту кварца. Можно в этом случае использовать схему,



Р и с. 15.8. Схема кварцевого генератора
с настроенным контуром для фильтрации
гармоник

изображенную на рис. 15.8, где контуры L_1C_1 и L_2C_2 настроены один несколько выше, другой несколько ниже частоты кварца. В этой схеме экранирующая сетка пентода работает в качестве анода генераторной части схемы.

Схемы генераторов строб-импульсов

Одна из схем генератора строб-импульсов изображена на рис. 14.7. Более сложные схемы приведены на рис. 15.9 и 15.10.

На рис. 15.9 лампы L_1 и L_2 первоначально заперты. При подаче положительного прямоугольного импульса на сетку лампы L_1 включается схема развертки Миллера, состоящая из R_1 , R_2 , C_1 , L_2 . Напряжение на аноде лампы L_2 падает до величины, определяемой значением сопротивления R_3 . В этот момент лампа L_4 начинает проводить ток, и падение напряжения на сопротивлении в аноде понижает потенциал сетки лампы L_5 , создавая повышение напряжения на ее аноде. При этом включается блокинг-генератор T_1L_7 , который создает остrokонечные положительные импульсы в катодной цепи лампы L_7 . Эти импульсы подаются на электронно-лучевую трубку, на экране которой они изображаются в виде ярких пятен на линии развертки.

Если требуются строб-импульсы в виде «ступеньки», то используется выходное напряжение лампы L_5 , запускающее мультивибратор, который создает напряжение прямоугольной формы. Это напряжение может быть подано в цепь отклоняющих пластин трубки.

Сопротивление R_3 калибруется в единицах дальности; сопротивление R_4 обеспечивает регулировку нуля. Дальность развертки пропорциональна разности напряжений между ползунками сопротивлений R_3 и R_4 .

Лампа L_1 и L_4 (рис. 15.10) первоначально заперты. Лампы L_3 и L_4 образуют мультивибратор с катодной связью.

Так же как в предыдущем случае, схема развертки Миллера запускается положительным входным напряжением. Скорость падения напряжения на аноде L_1 определяется сопротивлением R_3 . Вслед за этим падением напряжения падает также напряжение на катоде лампы L_3 и одновременно на лампе L_4 до тех пор, пока последняя не начнет проводить ток. Это происходит в момент, определяемый величиной сопротивления R_5 , за счет которого включается мультивибратор, вырабатывающий положительное и отрицательное напряжения прямоугольной формы на анодах ламп L_3 и L_4 соответственно. И то и другое напряжение может быть использовано для получения ступенчатых строб-импульсов. В рассматриваемой схеме отрицательное напряжение отпирает лампу L_5 , создавая положительное напряжение на индуктивности L_1 , которая вместе с паразитной

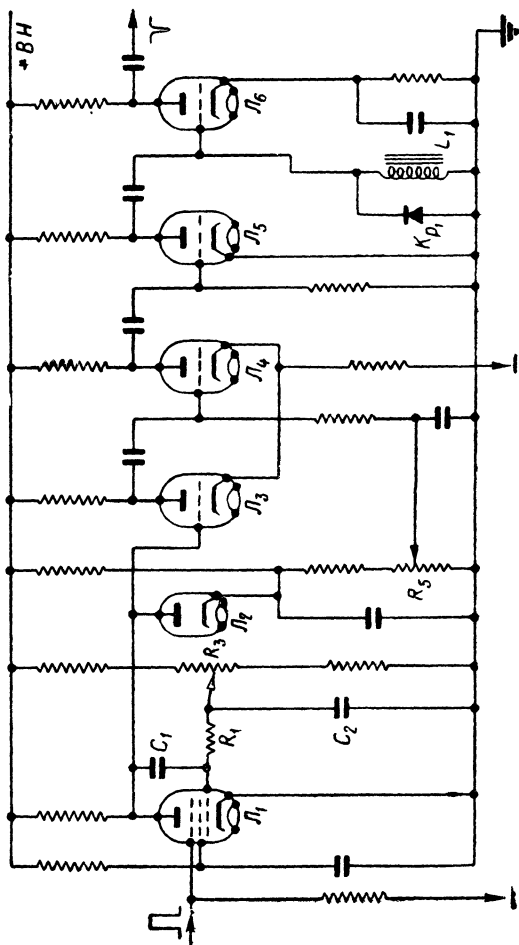
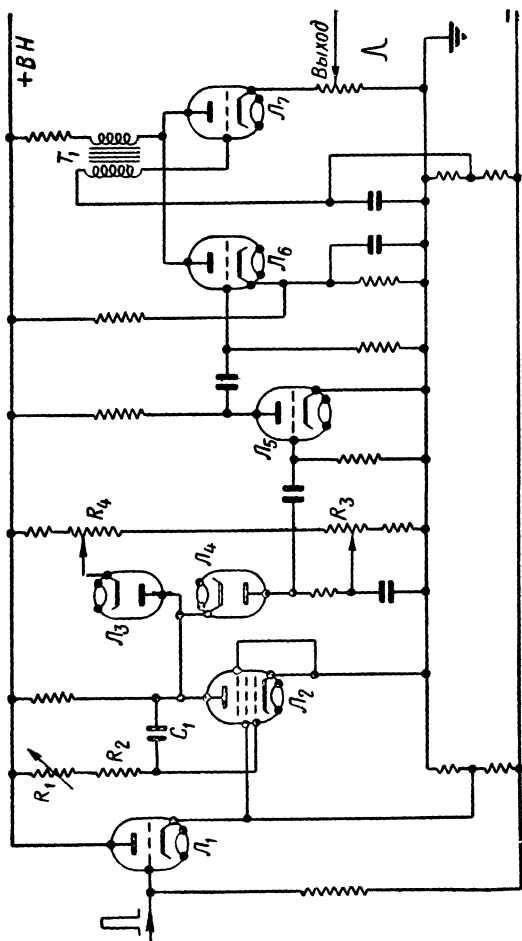


Рис. 15.9. Схема генератора строб-импульсов



Р и с. 15.10. Схема генератора строб-импульсов (2-й вариант)

емкостью образует колебательный контур, возбуждающийся на высокой частоте. Однако только первый полупериод этих колебаний не затухает, следующий подавляется кристаллом Kp_1 . Поэтому на выходе схемы создаются импульсы отрицательной полярности.

Если одна и та же схема используется для получения растянутой части развертки и для создания строб-импульсов, то формирование строб-импульсов должно несколько отставать по времени от создания растянутой развертки. Это необходимо для того, чтобы строб-импульс появился на уже растянутой части развертки, что можно осуществить введением соответствующей задержки в цепь питания той части схемы, которая непосредственно создает строб-импульс.

Фантастрон

Схема, изображенная на рис. 15.11 и называемая фантастроном, может быть использована для создания коротких прямоугольных импульсов заданной длительности.

Задний фронт этого импульса может использоваться для запуска другой схемы, через известный промежуток времени после первоначального включения схемы.

В состоянии покоя напряжения на аноде и управляющей сетке пентода Π_1 ограничены до определенной величины

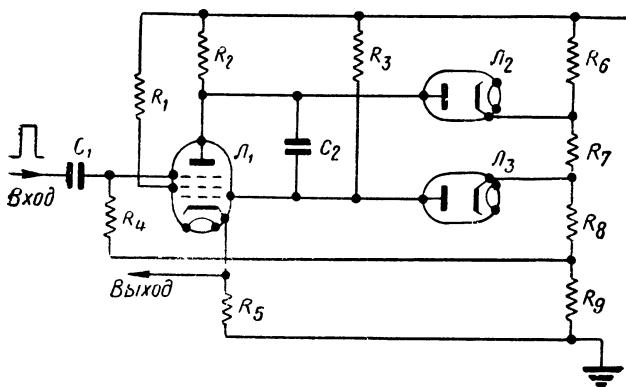


Рис. 15.11. Схема фантастроны

диодами L_2 и L_3 . Ток экранирующей сетки создает падение напряжения на сопротивлении R_5 , достаточное для повышения напряжения на катоде на величину, большую, чем напряжение на антидинатронной сетке. В результате этого анодный ток в лампе L_1 прекращается.

При подаче положительного запускающего импульса на антидинатронную сетку появляется анодный ток. Это создает резкое падение анодного напряжения на сопротивлении R_2 , сопровождающееся соответствующим падением потенциала на управляющей сетке, связанной с анодной цепью емкостью C_2 . Ток катода падает незначительно, и потенциал катода не становится ниже потенциала антидинатронной сетки; поэтому ток продолжает течь, несмотря на то, что запускающий импульс может к этому времени прекратиться.

Лампа L_1 , конденсатор C_2 и сопротивление R_3 образуют схему развертки Миллера. С началом развертки напряжение на сетке, а следовательно, на катоде повышается,

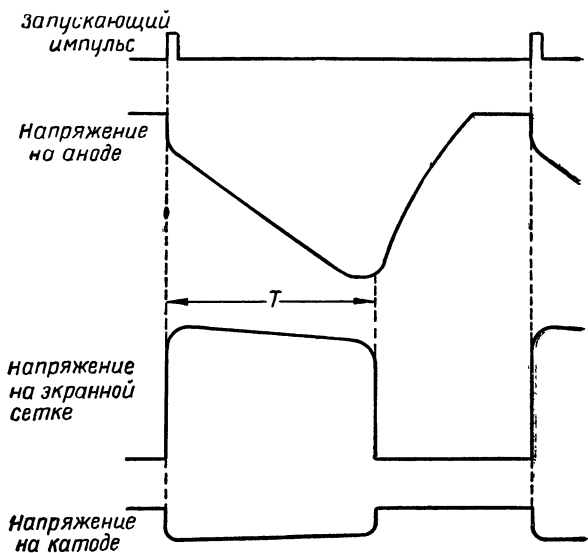


Рис. 15.12. Эпюры напряжений фантастрона

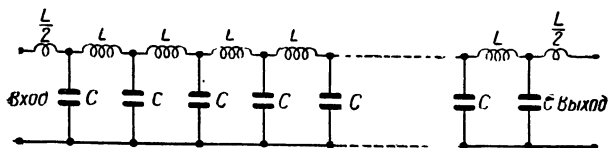
следуя линейному закону. Когда лампа L_1 работает в режиме нижнего сгиба характеристики, скорость возрастания напряжения становится больше, и вскоре наступает момент, когда напряжение антидинатронной сетки вновь прекращает анодный ток. В результате этого растет напряжение на аноде, которое через конденсатор C_2 подается на сетку.

Вследствие регенеративного действия происходит очень быстрый рост анодного напряжения до того момента, пока анодный ток вновь не прекратится. С этого момента вследствие разряда конденсатора C_2 через сопротивление R_2 напряжение на аноде экспоненциально возвращается к своей первоначальной величине.

Эпюры напряжений на электродах представлены на рис 15 12. Запускающий импульс может сниматься с экранирующей сетки или катода лампы L_1 и снова формироваться через промежуток времени T после подачи первоначального запускающего импульса.

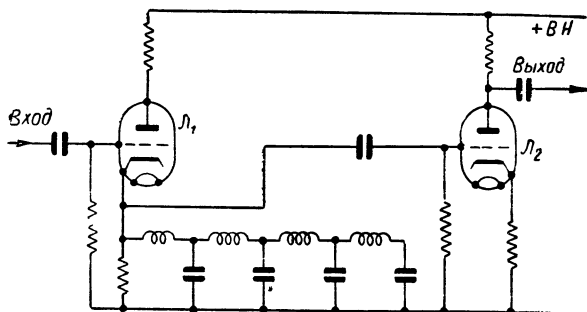
Использование искусственных линий для задержки и калибровки

Искусственная линия, изображенная на рис. 15.13, дает задержку между входным и выходным напряжением, равную величине $n\sqrt{LC}$, где n — число звеньев в линии.



Р и с. 15.13. Искусственная линия

При включении искусственной линии (рис. 15.14) так, что ее выходной конец разомкнут, и при наличии достаточного рассогласования между линией и сопротивлением в цепи катода короткий остроконечный импульс, подаваемый на сетку лампы L_1 , будет отражаться к входному концу линии, а дойдя до него, вновь отражаться в обратном направлении. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока энергия не будет рассеяна. Таким образом, на выходе лампы L_2



Р и с. 15.14. Схема с искусственной линией для получения калибровочных импульсов

появится серия импульсов, разделенных между собой интервалом $2\pi \sqrt{LC}$.

Описанное устройство аналогично схеме с ударным возбуждением.

Селекторные схемы

Если схема должна пропускать сигнал только в определенные моменты времени, то можно создать селектор, пропускающий сигнал через пентод, запертый соответствующим отрицательным смещением по антидинаatronной сетке и отпирающийся только в момент поступления положительного запускающего прямоугольного импульса. Такие схемы необходимы для переключения луча в системе, работающей по методу равносигнальной зоны, для системы автоматического слежения за целью, в цепях автоматической регулировки усиления выбранного отраженного сигнала и во многих других случаях. Необходимое напряжение прямоугольной формы может быть создано одним из типов мультивибраторов или фантастронным генератором.

Если требуется два селекторных импульса (например, при автоматическом слежении за целью), причем второй импульс должен начинаться по окончании первого, то задний фронт первого импульса может быть использован для запуска второго.

Ультразвуковая задерживающая ячейка в схемах определения дальности

Для измерения дальности можно использовать вертикальную наполненную водой или другой подходящей жидкостью трубку с пластинкой кварца на дне и подвижным поршнем в верхней части трубки. Часть энергии импульса передатчика подается на кварцевую пластинку, преобразуется в ультразвуковой импульс, который распространяется в трубке в направлении поршня отражается от него, возвращается вновь на дно трубки, принимается кварцевой пластинкой и опять преобразуется в электрический импульс.

Время, в течение которого совершается этот процесс, зависит от скорости распространения звука в жидкости и расстояния, которое должна пройти звуковая волна. Расстояние в свою очередь зависит от положения поршня.

Поршень можно передвигать до тех пор, пока задержанный импульс передатчика не совпадет по времени с рассматриваемым отраженным сигналом. Зная длину пути импульса в трубке и скорость звука, можно подсчитать дальность до цели. Так как скорость распространения радиоволн, грубо говоря, в 200 000 раз больше скорости распространения звука в воде, то трубка длиной в один метр пригодна для определения дальности порядка 200 км.

Для определения момента совпадения двух импульсов можно использовать экран электронно-лучевой трубки.

ГЛАВА XVI

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

В качестве основного источника питания стационарных радиолокационных станций обычно используется электрическая городская сеть переменного тока с частотой 50 гц.

На кораблях и самолетах часто применяются источники постоянного тока. Для обеспечения питания переменным током различных мощных блоков станций необходимо применять преобразователи. Обычно преобразователи дают частоту, пригодную для управления частотой повторения импульсов, например от 500 до 2000 гц. Часто такой преобразователь используется даже тогда, когда первичным источником питания является генератор переменного тока.

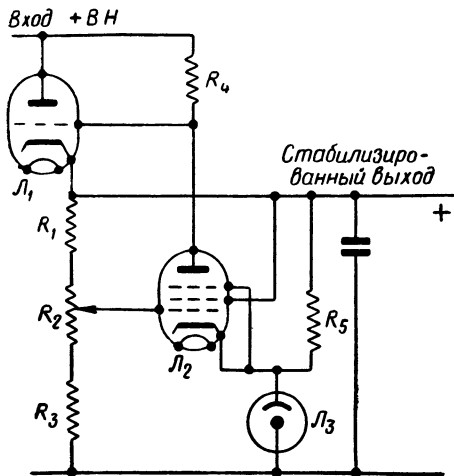
Источники высокого напряжения

В радиотехнических устройствах обычно используются стандартные блоки питания на лампах или металлических выпрямителях.

Для получения регулируемого постоянного напряжения необходимо применять стабилизирующую схему. Схемы эти очень разнообразны и зависят от требований, предъявляемых в каждом отдельном случае.

Наиболее простым методом стабилизации является использование неоновых стабилизаторов или нескольких стабилизаторов в цепи высокого напряжения. Однако для более точной регулировки должны применяться более сложные схемы. Одна из подобных схем изображена на рис. 16.1. В этой схеме через лампу большой мощности L_1 проходит полная величина тока высокого напряжения (можно включить две или несколько ламп параллельно). Падение напряжения на лампе L_1 в основном зависит от потенциала на

сетке, которая соединена с анодом пентода \mathcal{L}_2 . Напряжение на катоде лампы \mathcal{L}_2 поддерживается постоянным с помощью неоновового стабилизатора \mathcal{L}_3 . Напряжение на сетку лампы \mathcal{L}_2 подается с отвода сопротивления R_2 ; его величина пропорциональна выходному напряжению.



Р и с. 16.1. Схема стабилизатора напряжения

Предположим, что по какой-то причине повысилось выходное напряжение. Напряжение на сетке возросло также на какую-то часть этого изменения (примерно наполовину). Анодный ток в лампе \mathcal{L}_2 возрастает, и так как R_4 — высокоомное сопротивление (20 000 — 100 000 ом), то напряжение на сетке лампы \mathcal{L}_1 упадет на значительно бóльшую величину. Следствием этого явится значительный рост падения напряжения на лампе \mathcal{L}_1 . Этот процесс будет противодействовать повышению выходного напряжения.

Такая регулировка очень точна, так как незначительное изменение напряжения на сетке лампы \mathcal{L}_2 создает сильное изменение падения напряжения на лампе \mathcal{L}_1 .

Установка нужной величины выходного напряжения осуществляется ползунком сопротивления R_2 . Существует много разновидностей схем этого типа.

Схемы защиты

Для предохранения от серьезных повреждений, связанных со случайными ошибками в работе схемы, желательно иметь в установках какие-либо защитные цепи. Например, газовый разрядник, соединенный с магнетроном, предотвращает опасность чрезмерного увеличения напряжения в случае отказа магнетрона. Термовыключатель, соединенный последовательно с предохранительным разрядником, может обеспечить снятие напряжения с реле или переключателя, если отказ магнетрона повторяется.

Схемы временной задержки предотвращают подачу высокого напряжения на магнетрон и другие лампы, если нить накала достаточно не разогрелась.

В некоторых станциях анодное напряжение и смещение на сетки подается от разных блоков питания.

В этом случае желательно обеспечить условия, при которых анодное напряжение не может быть подано до тех пор, пока потенциал на сетке не достигнет нужной величины. Это достигается с помощью соответствующих релейных схем.

ГЛАВА XVII

ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Кроме первоначальной настройки аппаратуры радиолокационных станций, а также устранения известных дефектов, важную роль в эксплуатации аппаратуры играют периодические измерения.

Практика показывает, что оператор может не заметить ухудшения параметров станции при изменении их на 10 дБ или даже более.

Измерения в полевых условиях обычно ограничены. Тем не менее они могут дать полезные данные об общем состоянии оборудования.

Необходимо полностью использовать приборы для измерения токов и напряжений в различных точках схем.

При наличии контрольного осциллографа необходимо проверить форму сигналов.

Проверка общей работоспособности с помощью эхорезонатора (эхобокса)

Эхобокс, связанный с антенным фидером, поглощает часть энергии при излучении импульса передатчика. В результате этого в эхобоксе возникают колебания, которые после прекращения импульса затухают. Время, в течение которого амплитуда колебаний становится малой (например, равной уровню шумов), характеризует общую работоспособность станции, ее общую эффективность. Определение времени затухания колебаний определяется по экрану электронно-лучевой трубки.

Связь эхобокса с фидером может быть осуществлена с помощью небольшого отверстия. Прекращение колебаний в

эхобокс осуществляется или расстройкой его или введением поглощающего ослабителя (аттенюатора) в волновод, соединяющий эхобокс с основным волноводным трактом.

Другим вариантом является эхобокс с собственным параболическим отражателем и вибратором, которые помещаются на расстоянии нескольких метров от передающей антенны станции. Вибратор принимает часть излучаемой энергии, а после прекращения импульса передатчика излучается эхорезонатором. Такое устройство целесообразно применять в станциях с индикатором кругового обзора.

Для получения нужной точности измерений эхобокс настраивают каждый раз перед его использованием, так как благодаря высокой добротности даже незначительное отклонение частоты от резонансной создает большую ошибку.

В тех случаях, когда не требуется повышенная точность, эхобокс снабжается вращающейся или вибрирующей пластинкой или диском, размещенным внутри объемного резонатора эхобокса. Такое устройство обеспечивает качание частоты в небольшом диапазоне относительно резонансной.

Так как в этом случае проходит диапазон частот, в котором работает станция, влияние несоответствия частоты эхобокса и частоты станции усредняется. Однако результаты при этом получаются хуже, чем при точной настройке.

Приборы для измерения напряженности поля

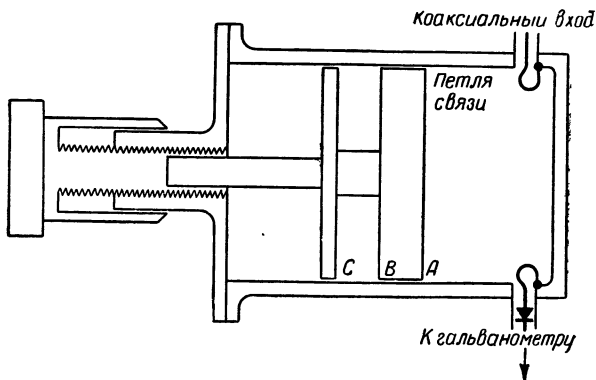
Вибратор, помещенный на расстоянии нескольких длин волн от антенны, соединенный с термопарой и измерительным прибором, может быть использован для измерения напряженности поля. С помощью такого устройства могут быть сняты характеристики антенн и оценена работа передатчика. При тщательном выполнении этот метод дает большую точность измерений, но его практическое применение сопряжено с рядом трудностей, так как необходимо всегда помещать диполь точно в одно и то же место и обеспечить постоянство ошибок, вызываемых отражениями от близлежащих объектов.

Волномеры

Волномеры для метрового диапазона в основном аналогичны волномерам, применяемым в радиосвязи. Для сантиметрового диапазона обычно используются объемные резонаторы (эхобоксы) с кварцем и индикатором для определе-

ния резонансной частоты. В стационарных волномерах связь с волноводом осуществляется с помощью небольшого отверстия. Однако чаще применяется коаксиальная линия, имеющая зонд или петлю связи, конец которой может быть присоединен к любой точке фидерной системы.

Общий вид устройства показан на рис. 17.1. Передвижной настроечный плунжер имеет микрометрический винт, дающий непосредственный отсчет длины волны или отсчет



Р и с. 17.1. Волномер с объемным резонатором

с помощью калибровочных кривых. Для обеспечения надежности обычно применяется метод конструирования, исключающий механический контакт между плунжером и внутренней поверхностью объемного резонатора.

Этот метод основан на принципе четвертьволновой линии. Оба отрезка AB и BC ведут себя, как четвертьволновые коаксиальные линии, при этом полное сопротивление AB равно Z_1 , а полное сопротивление BC — Z_2 . Предположим, что сопротивление между диском и стенкой резонатора в точке C равно Z . Тогда сопротивление в точке B будет равно Z_2^2/Z , а сопротивление в точке A равно $\frac{Z_1^2}{Z_2^2} Z$.

Ввиду различия диаметров частей AB и BC сопротивление Z_2 значительно больше сопротивления Z_1 , и поэтому сопротивление в точке A очень мало по сравнению с сопро-

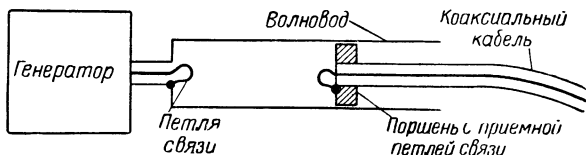
тивлением Z (в точке C), которое само по себе достаточно мало. Следовательно, в точке A получается практически сопротивление, равное нулю (короткое замыкание), при отсутствии механического контакта. Строго говоря, это будет только на одной частоте. Однако практически это достаточно справедливо и в диапазоне частот, в котором работает волномер, т. е. 10—15% от средней частоты.

Тщательно изготовленный и проградуированный волномер такого типа обладает точностью порядка 0,1%.

Сигнал-генераторы и измерительные генераторы

Сигнал-генератор состоит из собственно генератора с изменяемой частотой, устройства для регулирования выходной мощности и калиброванного аттенюатора, обеспечивающего подачу на вход испытуемого приемника точно установленной величины мощности.

Величина мощности, подаваемой на вход приемника через аттенюатор, может быть очень малой, порядка 10^{-15} вт. Поэтому индикатор мощности устанавливают на входе аттенюатора, а величину мощности, подаваемой на приемник,



Р и с. 17.2. Поршневой аттенюатор сигнал-генератора

рассчитывают, исходя из затухания точно откалиброванного аттенюатора.

Для измерений в сантиметровом диапазоне обычно используется поршневой аттенюатор (рис. 17.2). Аттенюатор представляет собой отрезок круглого волновода, работающего на частоте ниже критической. В аттенюаторе имеется подвижный поршень с петлями связи.

На частотах ниже критической волновод вносит большое затухание на единицу длины. Величина этого затухания может быть подсчитана, если известны размеры волновода. Вносимое затухание пропорциональное действующей длине волновода, регулируется перемещением поршня. При длине аттенюатора в несколько сантиметров можно получить затухание порядка 100 дб. Если необходимо точно знать ра-

бочую частоту, то для этой цели используют встроенный в генератор, или самостоятельный волномер.

Выход сигнал-генератора соединяется с приемником при помощи специального коаксиального кабеля с известным затуханием, например 10 дБ. Такой кабель имеет внутреннюю жилу, выполненную из проволоки с большим сопротивлением. Это развязывает приемник от сигнал-генератора в том смысле, что выход приемника оказывается не зависящим от полного сопротивления нагрузки. Выход приемника определяется только сопротивлением кабеля, которое может быть подобрано эквивалентным полному сопротивлению антенны.

Обычно применяется амплитудная модуляция с прямоугольным законом изменения напряжения, при этом длительность модулирующих импульсов делается равной временному интервалу между ними.

Такая модуляция обеспечивает создание импульсов, сходных с теми, которые практически используются в радиолокационной станции. Оказывается, что нецелесообразно получать в сигнал-генераторе импульсы со скважностью, соответствующей скважности передатчика станции, так как средняя мощность в этом случае слишком мала и результаты измерений будут неудовлетворительными из-за влияния шума приемника, соизмеримого в этом случае с уровнем сигнала.

Для испытаний на промежуточной частоте обычно используется сигнал-генератор, применяемый в устройствах связи, так как промежуточная частота радиолокационных станций обычно лежит в пределах 20—100 Мгц.

Для повседневной проверки, когда не требуется особой точности, можно применять широко известный прибор, называемый измерительным генератором. Такой генератор является по существу упрощенным сигнал-генератором.

Генератор задержанных импульсов

Генератор задержанных импульсов снабжается собственной небольшой антенной, с помощью которой излучаются импульсы. Излучение импульсов происходит с некоторой задержкой после приема импульсов передатчика. Такой генератор, помещенный вблизи радиолокационной станции, фактически выполняет роль искусственного эхо.

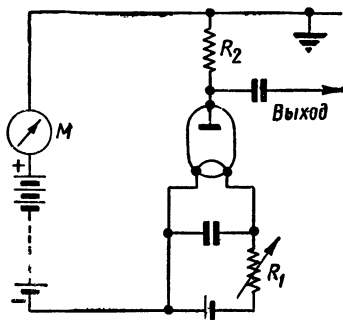
Следует упомянуть о специальном применении генератора для проверки времени восстановления разрядников антенных переключателей. Возрастание реакции приемника по мере увеличения промежутка времени между импульсом

передатчика и задержанным импульсом является мерой времени восстановления разрядника.

Интенсивность сигнала, излучаемого антенной прибора, не зависит от времени задержки.

Генератор шума

На рис. 17.3 изображена схема генератора шума. В схеме используется диод, эмиссия которого ограничивается темпе-



Р и с. 17.3. Схема диодного шумового генератора

ратурой катода, а не влиянием пространственного заряда. В результате хаотического характера эмиссии электронов создается напряжение шума, эффективная величина которого составляет (в диапазоне частот f_1 и f_2 гц) $3,2 \cdot 10^{-19} \cdot R^2 \cdot (f_2 - f_1) \cdot I$, где I — среднее значение анодного тока (постоянного тока).

На частотах выше 500 Мгц влияние времени пролета электронов приводит к неточностям в расчете по вышеприведенной формуле. Поэтому при использовании прибора для измерений на высоких частотах необходима его калибровка. Шумовой генератор используется при испытаниях приемников.

Измерение чувствительности приемника

Чувствительность приемника можно определить, подавая на вход приемника известной величины сигнал от сигнал-генератора или источника шума и измеряя выходную мощность с помощью термопары или другого устройства.

Для того чтобы условия измерения были близки к действительным условиям работы, желательно не отключать антенну от приемника, а измерительный сигнал от генератора подать в приемник при слабой связи их аналогично связи фидера и зонда. Однако если при измерениях используется источник шума, то мощность его обычно недостаточна для подачи сигнала к приемнику при слабой связи.

В этом случае антенна должна быть отключена и заменена источником шума с определенной величиной полного сопротивления. Величина этого сопротивления должна быть равна сопротивлению излучения антенны. Если величина сопротивления излучения неизвестна, то необходимо согласовать выход прибора с сопротивлением фидера, величина которого всегда известна.

Фактором, ограничивающим чувствительность приемника, является эквивалентная мощность шума. Ее можно определить как мощность сигнала, который, будучи подан на вход, создает мощность на выходе, равную той мощности, которую создает один шум. Измерение чувствительности производят с помощью сигнал-генератора, подключаемого к входу приемника. Усиление приемника регулируют до тех пор, пока выходное напряжение, созданное шумом (сигнал-генератор при этом выключен) не будет равно величине, достаточной для измерения термопарой. После этого необходимо включить сигнал-генератор и установить такое затухание в аттенюаторе, чтобы мощность на выходе приемника удвоилась. Если выход сигнал-генератора согласован с фидером или входом приемника, то мощность, отдаваемая генератором, будет равна мощности шума.

Регулировка промежуточной частоты и полосы пропускания

Регулировку каскадов промежуточной частоты производят при отключенной системе автоматической подстройки. Операция сводится к измерению выходного напряжения на различных частотах в заданной полосе частот.

Так как после каждой регулировки контуров приходится снимать ряд показаний, этот процесс представляет определенные трудности, если не применять специальных сигнал-генераторов. Примером такого генератора является прибор с разверткой по частоте. В этом приборе частота непрерывно меняется в нужных пределах с помощью мотора или другим путем. Выход приемника соединяется с Y-пластинами электронно-лучевой трубки осциллографа, а на X-

пластины подается напряжение постоянного тока, пропорциональное в каждый момент времени частоте.

Таким образом, частотная характеристика изображается на экране трубки и оператор может непосредственно наблюдать эффект любой регулировки, которую он производит.

Напряжение, подаваемое на X-пластины, может быть получено с помощью схемы, подобной частному дискриминатору, используемому, например, в системе автоматической подстройки частоты. Такое же напряжение может быть получено от потенциометрического устройства, которое управляет частотой генератора. При этом не требуется точной линейной зависимости между напряжением и отклонением частоты.

Настройка клистрона и разрядника

Предположим, что приемник точно настроен по промежуточной частоте и получена нужная полоса пропускания. Тогда необходимо отключить автоматическую подстройку и поставить потенциометр ручного управления частотой, которым регулируют напряжение на отражателем электроде клистрона, в среднее положение.

Настроенные винты клистрона и разрядника заворачиваются до отказа, и передатчик включается. Ток кристалла устанавливают изменением связи с волноводом или коаксиальным фидером так, чтобы величина его не превышала максимально допустимой.

Затем настроенные винты клистрона вывертываются до тех пор, пока какой-либо подходящий для измерения сигнал (просачивающийся сигнал передатчика или сильный отраженный сигнал) не достигнет максимальной величины, что фиксируется изображением на экране. Обычно ток кристалла становится максимальным в тот же момент. Однако это не обязательно. Возможно, что для получения сильного сигнала придется несколько подстроить разрядник защиты приемника.

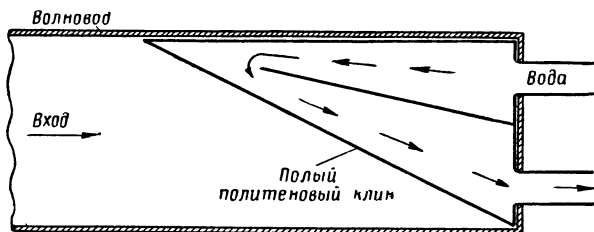
Когда и клистрон и разрядник настроены, нужно подобрать такую малую величину связи кристалла, при которой будет обеспечиваться наилучшее соотношение сигнал/шум для данной величины эхосигнала.

Если подобная регулировка произведена тщательно, то ежедневная регулировка может быть сведена к получению максимального тока кристалла. При смене клистрона, магнетрона или разрядника необходимо производить полный цикл настройки, как было описано выше.

Аппаратура, не имеющая автоматической подстройки частоты, обычно содержит встроенный индикатор настройки. Таким индикатором может быть ламповый вольтметр, соединенный с первым каскадом усилителя промежуточной частоты.

Проверка передатчика

Как указано выше, относительная величина выходной мощности передатчика может быть проверена эхобоксом. Для измерения абсолютной величины мощности требуются более точные приборы.



Р и с. 17.4. Измеритель мощности в водяной нагрузке

Один из методов измерения основан на поглощении мощности водяной нагрузкой.

На рис. 17.4 изображена конструкция измерителя мощности, в которой полый полиэтиленовый клин помещается в конце волновода. Величина мощности определяется по скорости потока и увеличению температуры воды.

Измерение полного сопротивления и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН)

Измерение величины полного сопротивления в сантиметровом диапазоне волн представляет определенные трудности. На практике сопротивление определяется расчетным путем по данным, получаемым при наблюдении стоячих волн.

КСВ коаксиального фидера может быть измерен с помощью отрезка щелевой линии с зондом, расположенным на патроне, перемещающемся вдоль линии на расстоянии по

крайней мере половины длины волны. Такой отрезок щелевой линии с зондом вводится в разрыв коаксиального фидера. Напряжение, снимаемое зондом, измеряется любым способом, например с помощью кристалла или микроамперметра. Наблюдаемые изменения этого напряжения вдоль линии фиксируются. Схематически такое устройство изображено на рис. 17.5. Аналогичный прибор может быть использован для измерений в волноводе.

Для удобства измерений проводник в щелевой линии берется обычно большего диаметра, чем в коаксиальном фидере, но отношение диаметров должно быть таким, чтобы полное сопротивление их было одинаковым. Переход от одного диаметра к другому имеет коническую форму с целью получения минимальных отражений.

Зная величину КСВ и положение максимумов и миниму-



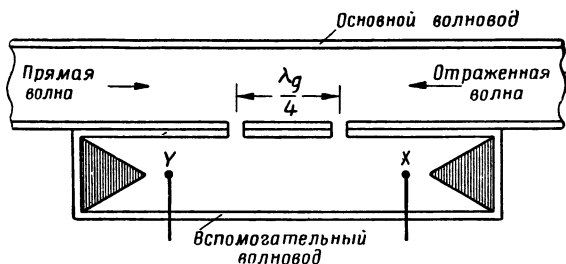
Р и с. 17.5. Щелевая линия для измерения КСВ

мов напряжения, можно подсчитать величину и фазу полного сопротивления коаксиального фидера с помощью формулы, данной в главе VIII.

Хотя КСВ может быть измерен достаточно точно, возникают затруднения в измерении фазы, так как трудно измерить достаточно точно длину фидера от щелевой линии до места рассогласования. Практически это не всегда важно, так как обычно стремятся уменьшить КСВ до единицы и тогда вопрос о фазе теряет смысл.

Коэффициент отражения может быть измерен непосредственно, для чего используется короткий отрезок вспомогательного волновода, соединенного с основным волноводом при помощи направленного ответвителя.

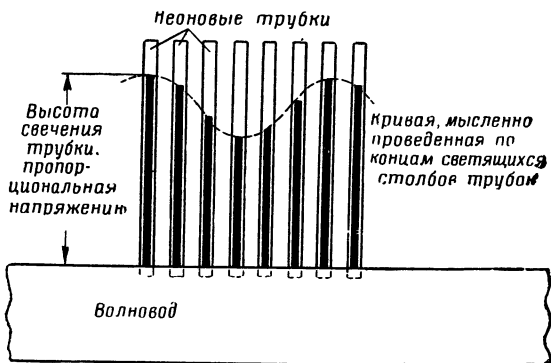
Мощности прямой и отраженной волн могут быть измерены независимо. На рис. 17.6 X и Y могут быть любыми устройствами для измерения мощности — кристаллами с индикаторными приборами или термопарами.



Р и с. 17.6. Направленный ответвитель для измерения мощности прямой и отраженной волн

Неоновый индикатор стоячей волны

Неоновый индикатор (рис. 17.7) в передающем фидере или волноводе дает возможность визуального наблюдения



Р и с. 17.7. Индикатор стоячей волны

изменения напряжения вдоль фидера. Такой индикатор состоит из нескольких неоновых трубок, расположенных друг от друга на расстоянии половины длины волны. Высота свечения столба трубки является мерой напряжения в данной точке.

Спектр частот магнетрона

Для качественной работы необходимо, чтобы магнетрон генерировал постоянно на одной частоте, что определяется путем измерения его спектра (см. главу IV). Для этой цели может быть использован откалиброванный эхобокс, частота которого изменяется в нужной полосе, кристаллический детектор и индикаторный прибор.

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Имеются четыре основные системы электрических единиц: а) CGS (электромагнитная), б) CGS (электростатическая), в) практическая система и г) MKS (рационализированная, метрическая).

а) CGS — электромагнитная система. В качестве исходных единиц в системе приняты сантиметр, грамм и секунда и единица магнитной массы (единичный магнитный полюс). Единицей магнитной массы, или единичным полюсом, называется такая масса (или полюс), которая действует на равную ей массу (или полюс), расположенную на расстоянии одного сантиметра, с силой равной одной дине.

В прошлом эта система использовалась почти универсально для всех научных целей, а в настоящее время она уступила место системе MKS.

б) CGS — электростатическая система. Эта система построена так же, как электромагнитная система CGS, но вместо единицы магнитной массы (единичного полюса) взят единичный заряд. Эта система использовалась в прошлом при рассмотрении явлений электростатического характера и не применялась обычно для инженерных целей.

в) Практическая система. Эта широкоизвестная система в качестве исходных единиц использует вольт, ампер, ом, ватт и т. д. Все эти единицы связаны с соответствующими единицами системы CGS (E, M) коэффициентами, являющимися степенями числа 10. Эта система появилась потому, что некоторые единицы системы CGS были неудобны для практического использования.

г) Система MKS. Пятьдесят лет тому назад Джорджи показал, что если метр, килограмм и секунду взять в качестве основных единиц длины, массы и времени, то можно построить систему аналогичную системе CGS. Однако эта система более удобна, так как широко известные величины напряжения, тока, сопротивления, мощности и т. д. входят в нее из практической системы единиц.

Исходной электрической единицей в этой системе является не единичный магнитный полюс, а ампер. Ампер есть ток, протекающий по двум параллельным проводам, расположенным на расстоянии одного метра, который вызывает силу взаимодействия (в вакууме) между проводами, равную $2 \cdot 10^{-7}$ MKS единиц на метр длины. Предполагается, что провода прямые, бесконечно длинные и имеют ничтожно малое сечение.

За единицу силы в системе MKS принят ньютон. Один ньютон является силой, придающей массе в один килограмм ускорение в один метр в секунду в квадрате. Он равен 10^5 дин (приблизительно 102 г). Хотя наиболее известные единицы системы MKS те же, что и в практической системе, однако необходимо изменить некоторые основные определения.

Магнитная проницаемость (μ) свободного пространства равна $4\pi \cdot 10^{-7}$. Диэлектрическая проницаемость, или диэлектрическая постоянная (ϵ), свободного пространства равна $\frac{10^7}{4\pi \cdot c^2}$.

Второе равенство следует из первого, так как $\mu\epsilon c^2 = 1$, где c — скорость света.

Точное значение скорости света c составляет $2 \cdot 9979_2 \cdot 10^8$ метров в секунду, но для большинства практических задач она может приниматься равной $3 \cdot 10^8$ метров в секунду.

В системе CGS (электромагнитной) магнитная проницаемость (μ) берется равной единице, в системе CGS (электростатической) единице равна диэлектрическая постоянная (ϵ).

Единица электродвижущей силы в электростатической системе единиц равна $c/10^6 \text{ в}$ (около 300 в).

Для удобства расчетов часто принимают магнитную проницаемость и диэлектрическую постоянную воздуха равными единице. Такие значения магнитной проницаемости и диэлектрической постоянной называются относительными.

Плотность магнитного потока в практической системе и системе CGS выражается различно.

Плотность магнитного потока (индукция) в 10 000 линий на квадратный сантиметр в старой системе равна единице плотности магнитного потока на квадратный метр в системе MKS.

Примеры:

1. Электродвижущая сила в один вольт физически одно и то же, что 10^8 единиц CGS.

Соотношение между единицами в системах
MKS и CGS (электромагнитная)

Показатель	Система MKS		Система CGS (электромагнитная)	
	название единицы	коэф- фи- циент	название единицы	коэф- фи- циент
Длина	метр	1	сантиметр	100
Масса	килограмм	1	грамм	1000
Сила (механическая)	ньютон	1	дина	10 ⁵
Энергия, работа	джоуль	1	эрг	10 ⁷
Мощность	ватт	1	—	10 ⁷
Потенциал (электро- движущая сила)	вольт	1	—	10 ⁸
Сила тока	ампер	1	—	10 ⁻¹
Количество электри- чества (заряд)	кулон	1	—	10 ⁻¹
Сопротивление	ом	1	—	10 ⁹
Индуктивность	генри	1	—	10 ⁹
Емкость	фарада	1	—	10 ⁻⁹
Напряженность маг- нитного поля (<i>H</i>)	ампер/метр (или ампер- витки/метр)	1	эрстед	$\frac{4\pi}{10^3}$
Магнитный поток (Φ)	вебер	1	максвелл	10 ⁸
Плотность магнит- ного потока (индук- ция) (<i>B</i>)	вебер/квadrat- ный метр	1	гаусс	10 ⁴

2. Плотность магнитного потока в один вебер на квадратный метр равна 10⁴ гаусс (линий на квадратный сантиметр).

Единицы измерения мощности

Абсолютная величина мощности измеряется в ваттах, которые могут быть выражены в киловаттах, мегаваттах, милливаттах и микроваттах.

Относительная мощность есть отношение выходной мощности к входной применительно к усилителю, фидерной системе и т. д. Эта мощность измеряется в децибелах (дБ). Отношение двух мощностей P_1 и P_2 , выраженное в децибелах, представляет собой $10 \lg_{10} (P_2/P_1)$ децибел. Это отношение может быть положительным или отрицательным в зависимости от того, больше или меньше P_2 , чем P_1 .

Децибел, будучи логарифмической единицей, позволяет найти общее усиление или потери системы путем сложения усиления или потерь (измеренных в децибелах) отдельных частей системы. Абсолютная мощность иногда выражается в децибелах. В каждом таком случае, выражая мощность в децибелах, говорят относительно какого уровня мощности имеется столько-то децибел выше или ниже.

Например, 5 дБмвт означает 5 дБ выше уровня одного милливатта.

Если отношения токов или напряжений выражаются в децибелах, то для этого используют формулы:

$$20 \lg_{10} (V_2/V_1)$$

или

$$20 \lg_{10} (I_2/I_1).$$

Эти выражения справедливы только в том случае, если полное сопротивление в рассматриваемых точках одинаково.

Другой единицей, часто используемой в расчетах линий передач, является непер.

Непер определяется как

$$\lg_e (I_2/I_1) = 2,3026 \lg_{10} (I_2/I_1) = 1,1513 \lg_{10} (P_2/P_1),$$

один непер равен 8,686 децибел,

один децибел равен 0,1151 непер.

Частота и длина волны

(Частота) \times (длина волны) = (скорости). Если частота измерена в герцах, а длина волны в метрах, скорость будет в метрах в секунду.

Скорость распространения электромагнитных волн равна скорости распространения света.

В воздухе скорость распространения электромагнитных волн меньше, чем в свободном пространстве (вакууме), на $\frac{1}{3000}$ часть, т. е. на 0,03%.

Диапазоны частот

Для удобства частоты электромагнитных волн делят на следующие диапазоны:

Большинство современных радиолокационных станций работает в диапазоне ультравысоких и сверхвысоких частот. Небольшое количество старых радиолокационных

Таблица 2

Наименование диапазона	Частота	Длина волны
Особо низкие частоты . . .	До 30 <i>кГц</i>	10 000 <i>м</i> и длиннее
Низкие частоты	30—300 <i>кГц</i>	10 000—1 000 <i>м</i>
Средние частоты	300—3 000 <i>кГц</i>	1 000—100 <i>м</i>
Высокие частоты	3—30 <i>МГц</i>	100—10 <i>м</i>
Особо высокие частоты . . .	30—300 <i>МГц</i>	10—1 <i>м</i>
Ультравысокие частоты . . .	300—3 000 <i>МГц</i>	100—10 <i>см</i>
Сверхвысокие частоты . . .	3 000—30 000 <i>МГц</i>	10—1 <i>см</i>
Предельно высокие частоты	30 000—300 000 <i>МГц</i>	10—1 <i>мм</i>

станций работает в диапазоне особо высоких частот. Промежуточная частота приемников радиолокационных станций лежит обычно в диапазонах высоких частот и особо высоких частот.

Некоторые диапазоны частот имеют специальное обозначение:

L — диапазон 390—1650 *МГц* (приблизительно 77—18 *см*);

S — диапазон 1650—5200 *МГц* (приблизительно 18—5,8 *см*);

X — диапазон 5200—11 900 *МГц* (приблизительно 5,8—2,5 *см*).

Математические величины

Основание неперовых (натуральных) или гиперболических логарифмов равно $e = 2,71828\dots$

Для преобразования натуральных логарифмов в десятичные первые должны быть умножены на 0,4343. Для обратного преобразования десятичные логарифмы должны быть умножены на 2,3026...

$$e^x = \text{anti } \lg_{10}(0,4343x), \quad e^{-x} = \frac{1}{\text{anti } \lg_{10}(0,4343x)}$$

(эти равенства необходимы при отсутствии таблиц степеней)

$$1 \text{ радиан} = 180/\pi \text{ градусов} = 57^\circ 17' 45''.$$

Для малых углов

$\sin \theta = \theta$ (радиан) с точностью до 1% для углов не более 14°.

$\cos \theta = 1$ с точностью до 1% для углов не более 8°.

Тригонометрические функции

$$\sin(a \pm b) = \sin a \cos b \pm \cos a \sin b;$$

$$\cos(a \pm b) = \cos a \cos b \pm \sin a \sin b;$$

$$\operatorname{tg}(a \pm b) = \frac{\operatorname{tg} a \pm \operatorname{tg} b}{1 \pm \operatorname{tg} a \operatorname{tg} b};$$

$$\cos^2 a + \sin^2 a = 1; \quad \sin(\pi/2 \pm a) = \cos a;$$

$$\cos(\pi/2 \pm a) = \pm \sin a.$$

Гиперболические функции

$$\sinh a = \frac{e^a - e^{-a}}{2}; \quad \cosh a = \frac{e^a + e^{-a}}{2};$$

$$\operatorname{th} a = \frac{\sinh a}{\cosh a}; \quad \cosh^2 a - \sinh^2 a = 1.$$

Комплексные функции

$$\sinh(a \pm jb) = \sinh a \cos b \pm j \cosh a \sin b;$$

$$\cosh(a \pm jb) = \cosh a \cos b \pm j \sinh a \sin b;$$

$$e^{ja} = \cos a + j \sin a,$$

$$\text{откуда } e^{jna} = (\cos a + j \sin a)^n = \cos na + j \sin na$$

(формула Муавра)

Конденсатор с параллельными пластинами

Конденсатор, состоящий из двух параллельных пластин площадью A квадратных метров, отстоящих друг от друга на B метров, обладает емкостью (пренебрегая краевым эффектом)

$$\frac{A}{B} \cdot \epsilon \text{ фарад, или } \frac{A}{B} \cdot \epsilon \cdot 10^6 \text{ микрофарад,}$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость (диэлектрическая постоянная) диэлектрика.

Для свободного пространства

$$\epsilon = 10^7/(4\pi c^2) = 8,84 \cdot 10^{-12}.$$

Концентрическая или коаксиальная линия

a — внутренний диаметр наружного проводника;

b — радиус внутреннего проводника.

Емкость на единицу длины (1 м) = $\frac{2\pi\epsilon}{\lg_e(a/b)}$ фарад.

Для воздушного диэлектрика достаточно точно емкость конденсатора может быть подсчитана по формуле

$$\frac{2,41 \cdot 10^{-5}}{\lg_{10}(a/b)} \text{ микрофарад.}$$

Индуктивность на единицу длины = $\frac{\mu}{2\pi} \cdot \lg_e(a/b)$ генри.

Для воздуха это равенство имеет вид:

$$4,605 \cdot 10^{-7} \lg_{10}(a/b).$$

Волновое сопротивление

$$\frac{1}{2\pi} \cdot (\mu/\epsilon) \cdot \frac{1}{2} \cdot \lg_e(a/b) = 2 \cdot 10^{-7} c \lg_e(a/b) \text{ ом.}$$

Для воздуха волновое сопротивление равно

$$138 \lg_{10}(a/b) \text{ ом.}$$

Т а б л и ц а 3

Некоторые изоляционные материалы, используемые
в радиолокационных станциях

Материал	Относительная диэлектрическая постоянная (для воздуха $\epsilon=1$)	Угол потерь ($\lg \delta$)
Бакелит	4—7	0,01—0,1
Полистирол	2,5—2,6	0,0002—0,0004
Эбонит	2,8	0,006
Стекло	5—10	—
Слюда	2,5—7	0,01—0,07
Микалекс	8,5	0,002
Политен	2	0,05
Тугоплавковое борное стекло „Пирекс“	4,5	0,00017
„Туфнол“	5	0,03

Эти величины относятся в основном к частотам около одного мегагерца и носят приближенный характер. Для отдельных образцов цифры могут значительно отличаться.

Т а б л и ц а 4

Таблица перевода децибел

Децибелы	Отношение мощностей	Отношение напряжений	Децибелы	Отношение мощностей	Отношение напряжений
0	1	1	15	31,62	5,623
1	1,259	1,122	16	39,81	6,310
2	1,585	1,259	17	50,12	7,079
3	1,995	1,413	18	63,1	7,943
4	2,512	1,585	19	79,43	8,913
5	3,162	1,778	20	100	10
6	3,981	1,995	30	1 000	31,62
7	5,012	2,239	40	10 000	100
8	6,310	2,512	50	10 ⁵	316,2
9	7,943	2,818	60	10 ⁶	10 ³
10	10,0	3,162	70	10 ⁷	3,16 · 10 ³
11	12,59	3,548	80	10 ⁸	10 ⁴
12	15,85	3,981	90	10 ⁹	3,16 · 10 ⁴
13	19,95	4,467	100	10 ¹⁰	10 ⁵
14	25,12	5,012			

**Р. Б о у л д и н г — Краткий справочник по основам
радиолокационной техники**

Редактор инженер-капитан *Прохоров В. Ф.*

Технический редактор *Соколова Г. Ф.*

Корректор *Якушина Т. Г.*

Сдано в набор 14.03.58

Подписано к печати 5.8.58

Формат бумаги $70 \times 92^{1/32}$ — $7^{1/2}$ печ. л. = 8,77 усл. печ. л. 10,399 уч.-изд. л.

Г — 42062

Военное издательство Министерства обороны Союза ССР
Москва, К-9, Тверской бульвар, 18

Изд. № 12/240

Зак. 2197

2-я типография имени К. Е. Ворошилова
Военного издательства Министерства обороны Союза ССР
Ленинград — Центр-1, Дворцовая пл., 10

Цена 6 р. 20 к.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

6р. 20к.