



Т. Ф. Новоузенков

ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1958

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Г. Ф. НОВОЖЕНОВ

ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1958

Г. Ф. Новоженев.
ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Брошюра «Объемные резонаторы» входит в выпускаемую Военным Издательством библиотеку «Радиолокационная техника». Библиотека рассчитана на офицеров, связанных с эксплуатацией радиотехнических средств. Она может быть использована широким кругом читателей, желающих подробно ознакомиться с работой отдельных узлов и элементов радиолокационных станций.

Перечень брошюр, входящих в библиотеку «Радиолокационная техника», помещен на 3-й странице обложки.

В брошюре «Объемные резонаторы» в популярной форме описаны принцип действия, конструкции и применение объемных резонаторов.

ВВЕДЕНИЕ

Объемные резонаторы широко применяются в радиотехнике, поэтому без знания принципа их действия невозможно понять, как работают многие основные узлы современной радиолокационной или радиорелейной станции.

В настоящей брошюре сделана попытка популярно изложить принцип действия объемных резонаторов, описать наиболее характерные их конструкции и указать области применения.

Брошюра рассчитана на читателя, имеющего некоторую подготовку по радиотехнике.

Вследствие небольшого объема брошюры отдельные вопросы рассмотрены весьма сжато. Это сделано в расчете на то, что читатель более подробно ознакомится с ними в специальных книгах по радиотехнике сверхвысоких частот.

РЕЗОНАНСНЫЕ СИСТЕМЫ

Явление резонанса часто называют основой радиотехники. Резонансные системы применяют для выделения из множества электромагнитных сигналов колебаний нужной частоты, для их усиления, для подавления остальных, ненужных колебаний или сигналов, для генерирования колебаний и т. д.

Конструкция резонансной системы зависит не только от ее назначения, но также и от диапазона частот, в котором она должна использоваться.

Наиболее простой радиотехнической резонансной системой является колебательный контур с сосредоточенными постоянными, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора. Область его применения простирается от самых длинных радиоволн, длиной в несколько тысяч метров, до волн порядка единиц метров. Название «контур с сосредоточенными постоянными» объясняется тем, что элементы этой системы — индуктивность и емкость — сосредоточены в каких-то точках цепи, ибо по сравнению с длиной волны электромагнитных колебаний, генерируемых или принимаемых при помощи этого контура, катушка и конденсатор имеют ничтожно малые размеры.

Чтобы увеличить частоту или уменьшить длину волны контура с сосредоточенными постоянными, необходимо уменьшать емкость C и индуктивность L колебательного контура. Для уменьшения емкости и индуктивности не обязательно изменять размеры деталей. Можно, например, намотать катушку на том же каркасе, но с меньшим числом витков и с большим шагом, или уменьшить число пластин в конденсаторе, не изменяя их размеров. Однако таким способом емкость и индуктивность можно уменьшать лишь до известного предела.

Дело в том, что проводник, по которому проходит переменный ток, излучает энергию, которая безвозвратно уходит

в окружающее пространство. Детали и соединительные проводники колебательного контура также излучают энергию, но на длинных волнах это излучение незначительно. Чтобы проводник хорошо излучал, его размеры должны быть порядка четверти длины волны и более.

С увеличением частоты, т. е. с уменьшением длины волны, при неизменных размерах деталей в конце концов наступит такой момент, когда размеры деталей и соединительных проводов станут соизмеримы с длиной волны. Контур начнет сильно излучать, в результате чего потери в нем сильно возрастут и резонансные свойства контура ухудшатся.

С излучением можно бороться, уменьшая геометрические размеры деталей. Но при этом придется уменьшать и диаметр провода, что вызовет рост потерь и опять-таки ухудшит резонансные свойства контура. Кроме того, уменьшение размеров деталей ограничивает максимальную мощность, которую может развить контур, так как возникает опасность пробоя изоляции.

Указанные недостатки устраняются в резонансных системах с распределенными постоянными. К таким резонансным системам относятся прежде всего объемные резонаторы, обладающие многими преимуществами по сравнению с обычными колебательными контурами.

Заметим, что в коротковолновой части дециметрового диапазона волн, а тем более на сантиметровых волнах, практически вообще невозможно создать колебательный контур с сосредоточенными постоянными, обладающий более или менее приемлемыми резонансными свойствами. В более длинноволновых диапазонах объемные резонаторы не применяются потому, что их размеры окажутся слишком большими.

Таким образом, объемные резонаторы используются в качестве резонансных систем в диапазоне дециметровых волн и короче (вплоть до миллиметровых).

Советские ученые внесли большой вклад в разработку теории объемных резонаторов¹, вопросов их применения и рационального конструирования.

¹ В научно-технической литературе можно встретить различные термины: эндовибратор, полый резонатор, объемный резонатор, резонансный объем. Наиболее общим следует считать термин «объемный резонатор», так как резонатор может быть и не полым, а заполненным диэлектриком. Кроме того, возможны резонансные явления в куске диэлектрика, не ограниченном металлическими стенками и, следовательно, не представляющем собой полости в общепринятом смысле.

Несмотря на конструктивные различия, на разницу в характере использования электромагнитного поля, в работе обычного колебательного контура и объемного резонатора имеется много общего. Оба они представляют собой колебательные, резонансные системы, обладают частотной селективностью, т. е. отзываются только на колебания определенной частоты или, точнее говоря, некоторой области частот, в том и в другом возможны свободные электромагнитные колебания. В пределах этих общих для обеих систем свойств колебательный контур и объемный резонатор имеют одинаковые эквивалентные параметры, такие, например, как собственная частота колебаний, добротность, эквивалентное сопротивление и некоторые другие.

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ОТРЕЗКОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Линии передачи

Подробные сведения о линиях передачи читатель может найти в брошюрах И. П. Маркова «Линии передачи» и Б. А. Фогельсона «Волноводы», входящих в библиотеку «Радиолокационная техника». Здесь мы лишь вкратце напомним основные свойства линий передачи, чтобы легче было объяснить работу объемных резонаторов.

Наиболее распространенными видами линий передачи являются двухпроводные линии и волноводы.

Двухпроводные линии бывают симметричные и несимметричные (коаксиальные).

Двухпроводные симметричные линии образуются двумя параллельно идущими цилиндрическими (рис. 1, а) или ленточными (рис. 1, б) проводниками. Эти проводники могут быть заключены в проводящий экран (рис. 1, в).

Коаксиальные линии (рис. 2) представляют собой два цилиндрических проводника, вставленных один в другой. Волноводные линии передачи, или волноводы, — металлические трубы прямоугольного (рис. 3) или круглого (рис. 4) сечения.

Кроме конструктивных признаков, линии передачи различаются также по типам электромагнитных волн, которые могут передаваться вдоль линий. При этом оказывается, что так называемая фазовая длина волны¹ в линии зависит от формы и размеров линии, а также от типа возбуждаемых в

¹ Фазовой длиной волны называется расстояние, взятое вдоль направления распространения волны, между двумя ближайшими точками электромагнитного поля, находящимися в одинаковой фазе.

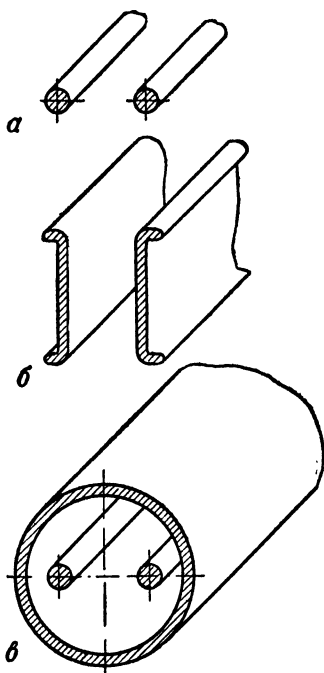


Рис. 1. Двухпроводные линии:

a — симметричная цилиндрическая;
б — симметричная ленточная; *в* —
 экранированная симметричная

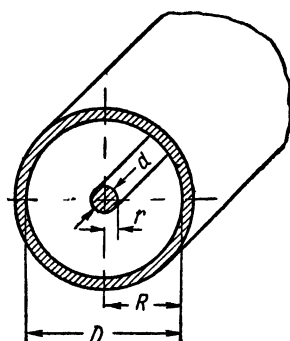


Рис. 2. Коаксиальная двухпроводная линия

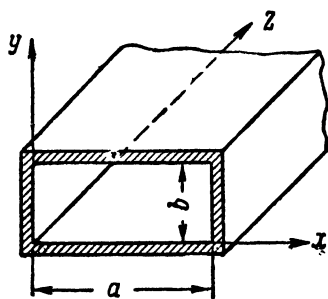


Рис. 3. Прямоугольный волновод

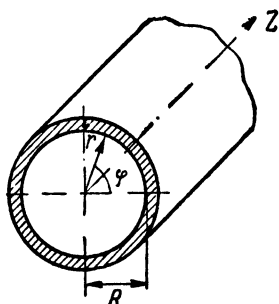


Рис. 4. Круглый волновод

ней колебаний и в ряде случаев заметно отличается от длины волны в свободном пространстве.

Существует три основных типа волн (колебаний), которые обозначаются следующим образом:

- поперечные электромагнитные — ТЕМ или НЕ;
- поперечные электрические (магнитные) — ТЕ или Н;
- поперечные магнитные (электрические) — ТМ или Е.

Последние два типа волн делятся еще на ряд типов более высоких порядков. Волны более высоких порядков обозначаются цифровыми индексами у буквенных обозначений.

Волны типа ТЕМ (НЕ) могут существовать как в симметричных, так и в коаксиальных двухпроводных линиях. Для примера на рис. 5 показано распределение

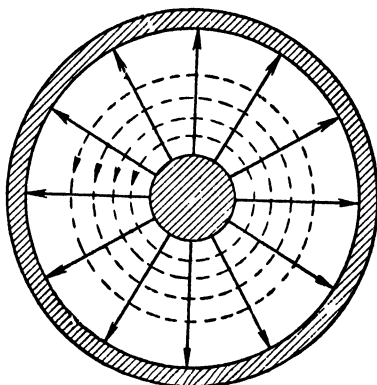


Рис. 5. Распределение линий поля при колебаниях типа ТЕМ в поперечном сечении коаксиальной линии

линий поля в коаксиальной линии передачи. Электрические силовые линии¹ имеют вид прямых, идущих от внутреннего проводника к внешнему. Магнитные силовые линии здесь представляют плоские замкнутые кольца.

Для колебаний типа ТЕМ фазовая длина волны в линии Λ равна длине волны в свободном пространстве λ :

$$\Lambda = \lambda. \quad (1)$$

Энергия в волноводе может передаваться только при помощи волн ТЕ (Н) или ТМ (Е). На рис. 6 изображено мгновенное распределение линий электрического и магнитного полей в поперечном сечении прямоугольного волновода при колебаниях типа TE_{10} (H_{10}). Электрические силовые линии представляют собой прямые, соединяющие широкие стенки волновода. Магнитные силовые линии направлены поперек волновода. Вблизи узких стенок волновода магнитные линии изгибаются и идут перпендикулярно плоскости

¹ На всех рисунках в данной брошюре электрические силовые линии изображены сплошными линиями, а магнитные — пунктирными.

чертежа, на некотором расстоянии снова изгибаются в поперечном направлении и замыкаются. Все магнитное поле похоже на стопку плоских колец.

Цифровые индексы, стоящие у обозначения типа волны, дополнительно характеризуют структуру поля. Первая цифра показывает, сколько максимумов поля можно насчи-

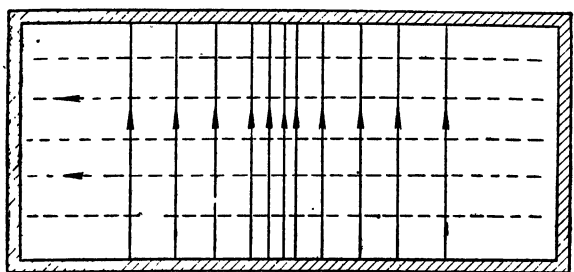


Рис. 6. Распределение линий поля в поперечном сечении прямоугольного волновода при колебаниях типа $TE_{10}(H_{10})$

тать, идя вдоль оси x , т. е. в нашем случае вдоль широкой стенки волновода (см. рис. 3). Вторая цифра относится к направлению вдоль оси y , т. е. вдоль узкой стенки волновода. Таким образом, индекс 10 (это обозначение читается

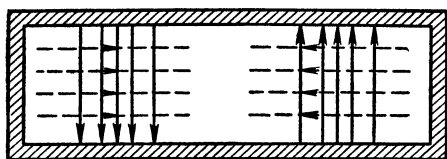


Рис. 7. Распределение линий поля в поперечном сечении прямоугольного волновода при колебаниях типа $TE_{20}(H_{20})$

так: «один, ноль») означает, что вдоль оси x имеется один максимум, а вдоль оси y — ноль максимумов, т. е. напряженность электрического поля вообще не будет меняться при перемещении вдоль оси y .

На рис. 7 изображено мгновенное распределение линий электрического и магнитного полей в поперечном сечении прямоугольного волновода при колебаниях типа $TE_{20}(H_{20})$. Здесь вдоль оси x имеется два максимума поля, а вдоль оси y максимумов нет.

На рис. 8 показано мгновенное распределение линий электрического и магнитного полей в поперечном сечении

круглого волновода при колебаниях типа TE_{01} (H_{01}). В обозначении TE_{01} первый индекс показывает число максимумов поля при обходе вдоль полуокружности, второй — число максимумов вдоль радиуса.

В круглом волноводе при колебаниях типа TE_{01} электрические силовые линии расположены в одной плоскости и

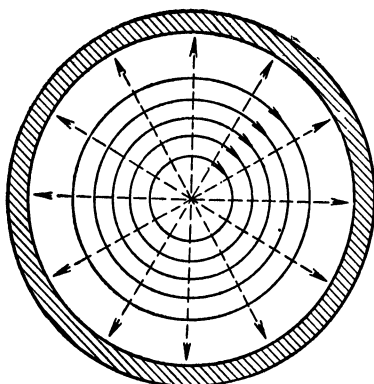


Рис. 8. Распределение линий поля в поперечном сечении круглого волновода при колебаниях типа $TE_{01}(H_{01})$

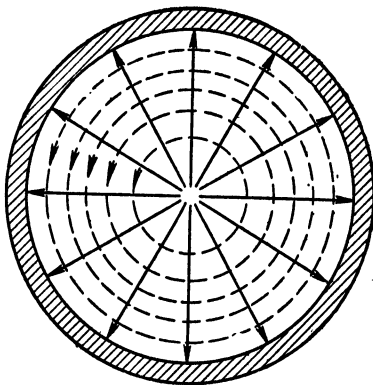


Рис. 9. Распределение линий поля в поперечном сечении круглого волновода при колебаниях типа $TM_{01}(E_{01})$ в круглом волноводе

имеют форму замкнутых колец, а магнитные силовые линии имеют форму плоских замкнутых колец и расположены в продольном сечении волновода.

В волноводах может распространяться также волна типа $TM(E)$, для которой магнитные силовые линии имеют только поперечную составляющую, а электрическое поле имеет продольную составляющую (рис. 9).

Вдоль волновода могут распространяться только колебания достаточно высокой частоты или с достаточно короткой длиной волны¹. Существует так называемая критическая длина волны $\lambda_{кр}$. Если длина волны λ больше $\lambda_{кр}$, то колебания вдоль волновода распространяться не будут. Критическая длина волны зависит от поперечных размеров волно-

¹ Имеется в виду длина волны в свободном пространстве.

вода и от типа колебаний. Для прямоугольного волновода при колебаниях типа TE и TM она выражается формулой

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}, \quad (2)$$

где m и n — индексы типа колебаний;

a и b — малый и большой размеры сторон поперечного сечения волновода (см. рис. 3).

Для волновода круглого сечения зависимость критической длины волны имеет более сложный вид, поэтому ниже приводятся вычисленные значения критических длин волн для различных типов колебаний в круглом волноводе.

Тип колебаний	TE ₀₁ (H ₀₁)	TE ₀₂ (H ₀₂)	TE ₁₁ (H ₁₁)	TE ₁₂ (H ₁₂)	TM ₀₁ (E ₀₁)	TM ₁₁ (E ₁₁)
$\lambda_{кр}$	1,64R	0,9R	3,41R	1,18R	2,62R	1,64R

Буквой R обозначен внутренний радиус сечения волновода (см. рис. 4).

Фазовая длина волны в волноводе зависит от критической длины волны. Эта зависимость для волноводов, заполненных воздухом, выражается следующей формулой:

$$\Delta = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (3)$$

На основании формулы (3) построен график (рис. 10), которым можно пользоваться при вычислении размеров резонаторов.

Резонансные свойства отрезков линий передачи

Отрезки линий передачи всех типов при определенных условиях могут обладать резонансными свойствами. Этих условий два.

Во-первых, длина отрезка линии L должна равняться целому числу четвертей фазовой длины волны:

$$L = p \frac{\Lambda}{4}, \quad (4)$$

где p — любое целое число.

Во-вторых, на концах отрезка должно быть резкое изменение волнового сопротивления линии, что получается при коротком замыкании или при обрыве. Отрезок линии, замкнутый на сопротивление, равное волновому, резонансными свойствами обладать не будет.

При одновременном выполнении двух указанных условий отрезок линии передачи будет проявлять резонансные свойства совершенно так же, как и колебательный контур с сосредоточенными постоянными. Отрезок линии может работать как последовательный и как параллельный контур в зависимости от того, чему равно число p в формуле (4), а также от того, замкнут или разомкнут отрезок на конце.

Так, например, в замкнутом на конце четвертьволновом отрезке двухпроводной линии с колебаниями типа ТЕМ

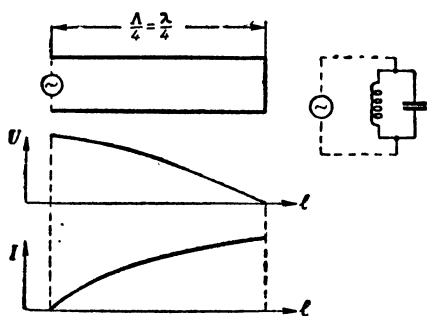


Рис. 11. Замкнутый на конце четвертьволновый отрезок двухпроводной линии

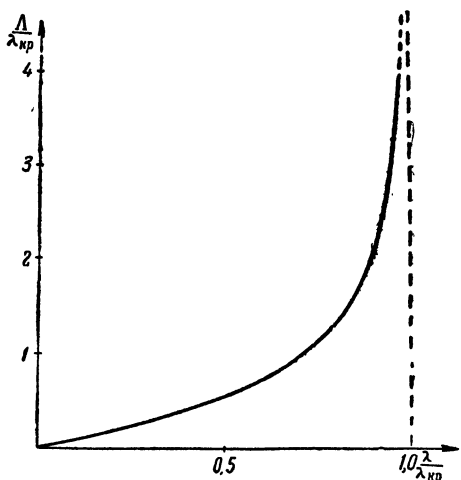


Рис. 10. График зависимости фазовой длины волны от длины волны в свободном пространстве и от критической длины волны

в месте короткого замыкания образуется пучность тока и узел напряжения, а в начале линии — узел тока и пучность напряжения (рис. 11). Входное сопротивление отрезка для идеального случая равно бесконечности, а в случае линии с потерями оно имеет максимальную величину и активный харак-

тер, падая по величине и приобретая реактивный характер при изменении частоты.

Таким образом, замкнутый на конце четвертьволновый отрезок двухпроводной линии обладает свойством параллельного колебательного контура.

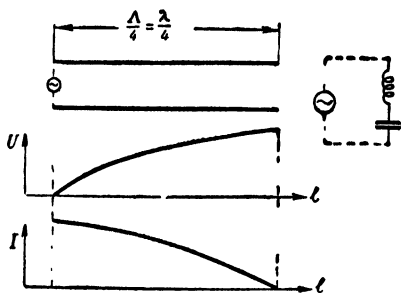


Рис. 12. Разомкнутый четвертьволновый отрезок двухпроводной линии

Разомкнутый четвертьволновый отрезок двухпроводной линии (рис. 12) имеет уже другое распределение стоячих волн. Его входное сопротивление для случая идеальной линии равно нулю, а для случая линии с потерями — минимуму.

Следовательно, разомкнутый на конце четвертьволновый отрезок двухпроводной линии обладает свойствами последовательного колебательного контура.

В качестве резонансной системы разомкнутые четвертьволновые отрезки линий, как правило, не используются. Обычно они широко применяются в различных вспомогательных узлах резонаторов, где их низкое входное сопротивление позволяет замыкать отдельные участки цепи.

Для выяснения свойств отрезка линии длиной, равной целому числу четвертей длины волны [$p = 2, 3$ и т. д. в формуле (4)], его следует разбить на четвертьволновые участки. Участок линии вправо от точек aa (рис. 13) — замкнутый четвертьволновый отрезок и, следовательно, его входное сопротивление равно бесконечности.

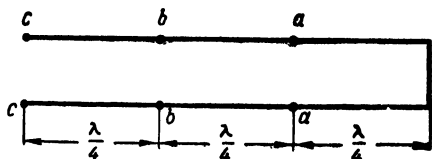


Рис. 13. Изображение отрезка линии в виде соединения нескольких четвертьволновых участков

Таким образом, участок линии ba представляет собой разомкнутый четвертьволновый отрезок. Следовательно, его входное сопротивление в точках bb равно нулю, т. е. четвертьволновый участок cb замкнут накоротко, а значит, весь отрезок длиной $3/4\lambda$ работает как один короткозамкнутый четвертьволновый. Заметим, что хотя при резонансе входное сопротивление отрезка в $3/4\lambda$ будет такое же, как и отрезка

в $1/4\lambda$, характер их сопротивления при расстройке будет различным: у более длинного отрезка изменение входного сопротивления на единицу изменения частоты больше.

Работа отрезков двухпроводных линий с колебаниями типа ТЕМ в основном сходна с работой волноводов с колебаниями типа ТЕ и ТМ, за одним существенным исключением. Двухпроводная линия может быть выполнена таким образом (например, в коаксиальном варианте), что она не будет излучать, поэтому ее потери будут определяться только сравнительно небольшими потерями в металле проводников. Такой отрезок линии обладает хорошими резонансными свойствами. Всякий же волновод сильно излучает с открытого конца, а значит, четвертьволновый отрезок волновода, замкнутый с одного конца, имеет большие потери и, следовательно, малую добротность. Поэтому при изготовлении резонаторов из отрезков волновода их замыкают с обоих концов металлическими крышками, а длину почти всегда берут равной целому числу половин фазовой длины волны.

Чтобы достичь резонанса, нужно изменить или длину отрезка линии, или частоту генератора, возбуждающего этот отрезок. Если увеличивать частоту генератора при неизменной длине отрезка, то резонанс получится при

$$L = \frac{\Lambda_1}{4},$$

$$L = 2 \frac{\Lambda_2}{4},$$

$$L = k \frac{\Lambda_k}{4}.$$

Таким образом, отрезок линии резонирует не только на одной частоте, но и на других, ей кратных. Следует отметить, что величина Λ зависит в ряде случаев от типа колебаний, что еще больше увеличивает число возможных резонансных частот (так называемая многоволновость резонатора). Многоволновость — характерная особенность резонатора с распределенными постоянными. Это отличает его от контура с сосредоточенными постоянными, который имеет только одну резонансную частоту.

ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Основные формы объемных резонаторов и типы полей в них

Не всякую резонансную систему с распределенными постоянными называют объемным резонатором.

Так, например, полуволновый вибратор телевизионной или радиолокационной антенны обладает резонансными свойствами и представляет собой систему с распределенными постоянными, но объемным резонатором его не называют. Не принято называть объемным резонатором также резонансную систему, выполненную в виде отрезка двухпроводной симметричной линии. Отрезок двухпроводной коаксиальной линии уже называют объемным резонатором.

Объемный резонатор — это резонансная система с распределенными постоянными, в которой возможны свободные электромагнитные колебания при полном отсутствии излучения в окружающее пространство.

Объемный резонатор всегда замкнут по отношению к внешнему пространству и связан с ним лишь через специальные элементы связи. Это сводит к минимуму потери на излучение, которые в полуволновом вибраторе относительно велики и составляют главную часть потерь.

Резонаторы могут быть выполнены не только в виде отрезков линий передачи, но и в виде сферы, эллипсоида вращения и т. п. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся формы объемных резонаторов.

Прямоугольный резонатор (рис. 14) представляет собой отрезок прямоугольного волновода, замкнутого с обеих сторон металлическими стенками. В прямоугольных резонаторах часто применяют колебания типа Н₁₀. При этом

вдоль размера L укладывается целое число половин фазовой длины волны Λ :

$$L = n \frac{\Lambda}{2}. \quad (5)$$

Тип используемых в прямоугольном резонаторе колебаний обозначают так: H_{10n} , где n , как правило, выбирают равным 1.

На рис. 15 изображено распределение полей в прямоугольном резонаторе при колебаниях типа H_{101} . На рис. 15, а показано распределение силовых линий электрического поля в двух взаимно-перпендикулярных сечениях резонатора.

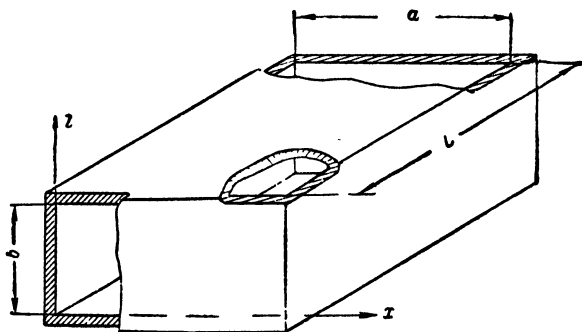


Рис. 14. Прямоугольный резонатор

Длина стрелок в некотором масштабе выражает абсолютную величину напряженности поля. На рис. 15, б изображено распределение и форма магнитных силовых линий.

Цилиндрический резонатор (рис. 16) выполняется в виде замкнутого с двух сторон отрезка круглого волновода. Наиболее часто в круглых цилиндрических резонаторах используются колебания типов E_{01} и H_{01} . При колебаниях типа H_{01} размер $L = n \frac{\Lambda}{2}$; при колебаниях типа E_{01} размер L не связан с длиной волны и может быть выбран различным. Колебания типа E_{01} иногда называют радиальными, а резонатор с колебаниями такого типа — радиальным.

На рис. 17 показан постепенный переход короткозамкнутого отрезка двухпроводной линии в полностью замкнутый резонатор.

Расстояние между проводниками двухпроводной линии не влияет на фазовую длину волны. Это справедливо и при

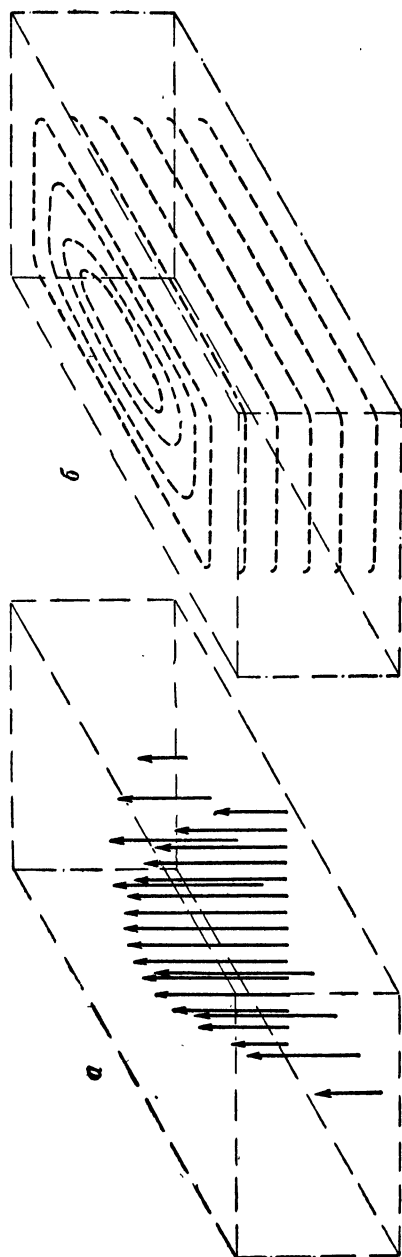


Рис. 15. Распределение полей в прямоугольном резонаторе при колебаниях типа H_{101} :
 а — распределение силовых линий электрического поля; б — распределение и форма магнитных силовых линий

увеличении ширины проводов линии (при переходе ее в радиальную). Поэтому при радиальных колебаниях размер L резонатора не влияет на его резонансную частоту.

На рис. 18, *а* изображено распределение силовых линий электрического, а на рис. 18, *б* магнитного поля при колебаниях типа E_{010} . Электрические линии идут прямо от одного основания к другому. Максимальная напряженность электрического поля — на оси цилиндра. Магнитные силовые линии представляют собой замкнутые концентрические кольца, охватывающие ось цилиндра.

Если в таком же резонаторе возбудить колебания типа H_{011} , то поле будет совершенно другого характера (рис. 19). При колебаниях типа H_{011} линии электрического поля представляют собой замкнутые окружности. На рис. 19, *а* показано распределение силовых линий электрического поля. Радиус колец, изображающих силовые линии электрического поля, пропорционален напряженности электрического поля. Силовые линии магнитного поля образуют систему тороидальных, вложенных одна в другую поверхностей. На рис. 19, *б* приведен как бы разрез магнитного поля.

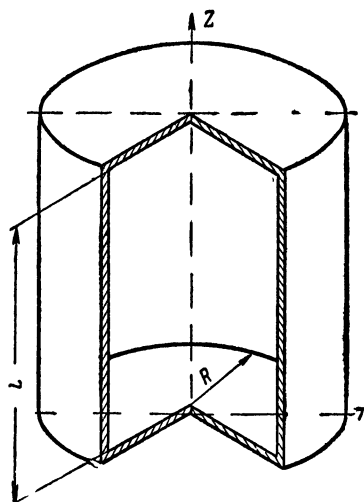


Рис. 16. Цилиндрический резонатор

Коаксиальный резонатор (рис. 20) представляет собой замкнутый с двух сторон или с одной стороны отрезок коаксиальной линии. Распределение поля в полуволновом замкнутом с двух сторон коаксиальном резонаторе показано на рис. 21.

Расстояние от конца центрального стержня до крышки в коаксиальном резонаторе, замкнутом с одной стороны, особой роли не играет, если оно больше некоторого предела, о котором будет сказано ниже.

Тороидальный резонатор (рис. 22) имеет вид свернутой в замкнутое кольцо трубы прямоугольного или круглого (иногда более сложного) сечения. В центральной

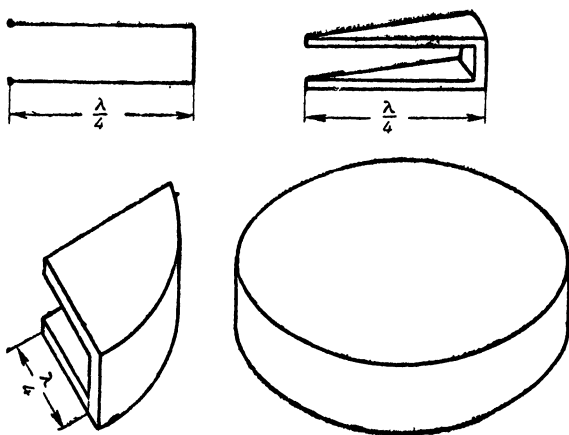


Рис. 17. Образование радиального резонатора

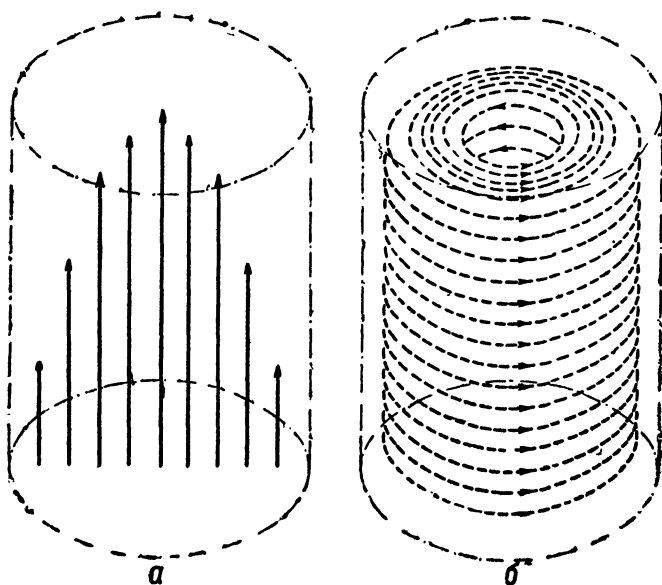


Рис. 18. Распределение полей в круглом цилиндрическом резонаторе при колебаниях типа E_{010} :

a — распределение силовых линий электрического поля; *б* — распределение силовых линий магнитного поля

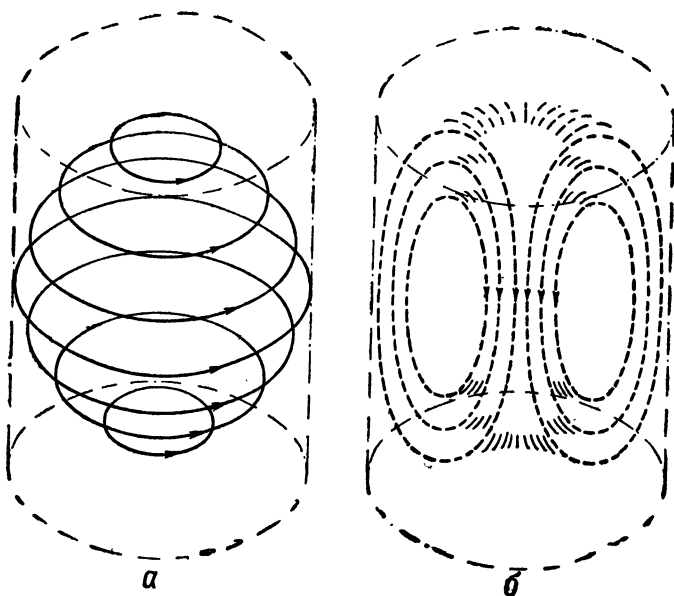


Рис. 19. Распределение полей в круглом цилиндрическом резонаторе при колебаниях типа H_{011} :
 а — распределение силовых линий электрического поля; б — распределение силовых линий магнитного поля

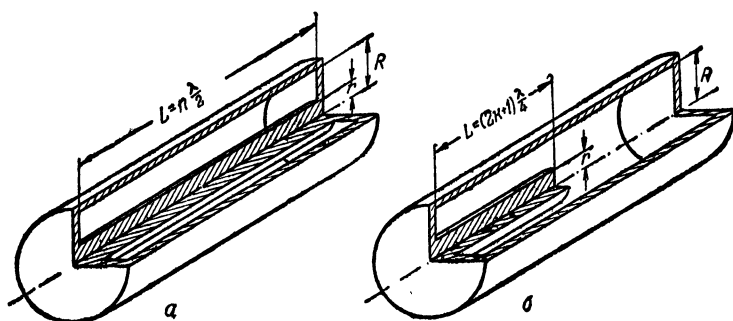


Рис. 20. Коаксиальные резонаторы:
 а — замкнутый с двух сторон; б — замкнутый с одной стороны

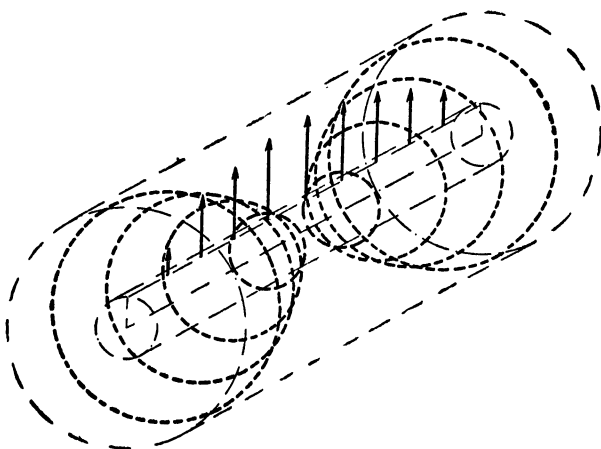


Рис. 21. Распределение полей в коаксиальном резонаторе

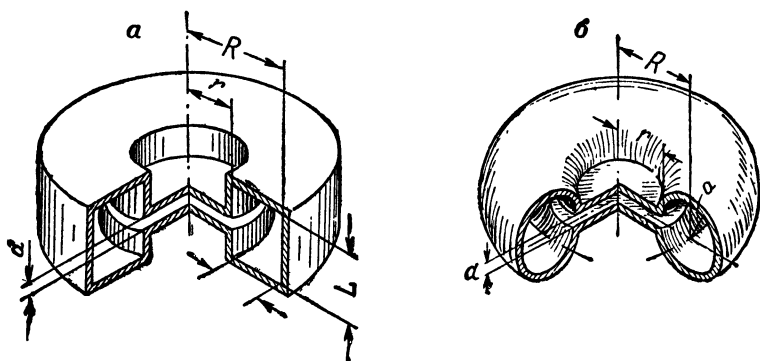


Рис. 22. Торондальные резонаторы:
а — прямоугольного сечения; б — круглого сечения

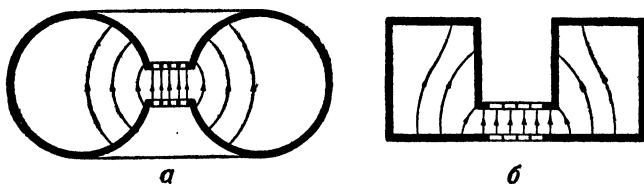


Рис. 23. Распределение силовых линий электрического поля в торондальных резонаторах круглого (а) и прямоугольного (б) сечений

части резонатора имеется зазор. Центральные диски могут быть не сплошными, а изготовленными из металлической сетки.

Ввиду довольно сложной формы резонатора изобразить распределение полей в нем в косоугольной проекции затруднительно, поэтому на рис. 23 приведено только распределение силовых линий электрического поля в осевом сечении.

Полукоаксиальный резонатор (рис. 24) по внешнему виду напоминает замкнутый с одной стороны отрезок коаксиальной линии, однако характер распределения поля у него совсем другой. В полукоаксиальном резонаторе составляющая электрического поля вдоль оси имеет значительную величину (рис. 25).

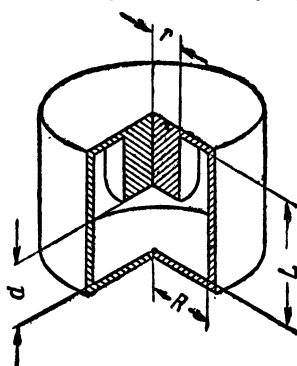


Рис. 24. Полукоаксиальный резонатор

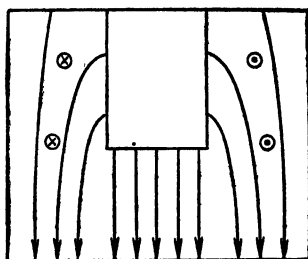


Рис. 25. Распределение полей в полукоаксиальном резонаторе

Полукоаксиальный резонатор можно получить из цилиндрического резонатора с колебаниями типа E_{010} , вставив металлический стержень в его центральную часть. При этом происходит некоторая деформация поля, но общий характер его в значительной степени сохраняется. В этом резонаторе расстояние d от конца стержня до дна резонатора играет существенную роль и влияет на частоту резонатора: чем меньше d , тем ниже частота резонатора.

В заключение раздела заметим, что для создания объемного резонатора наличие вокруг диэлектрика металлических стенок не всегда обязательно. Можно возбуждать колебания в диэлектрике, окруженном другим диэлектриком, например в куске полистирола, окруженном воздухом. Важно только, чтобы диэлектрические свойства двух диэлектриков доста-

точно резко различались и на границе раздела могло происходить полное внутреннее отражение электромагнитных волн. Несмотря на принципиальную возможность создания такого типа резонаторов, они широко не применяются, так как известные в настоящее время диэлектрики обладают большими потерями, чем воздух, а это не позволяет сконструировать резонатор с высокой добротностью. Кроме того, резонатор с диэлектрическим заполнением трудно перестраивать.

Эквивалентные параметры объемных резонаторов

Несмотря на многоволновость объемных резонаторов и конструктивное отличие их от контуров с сосредоточенными постоянными, можно указать ряд эквивалентных параметров, которые характеризуют как колебательный контур, так и объемный резонатор. Эти параметры эквивалентны только с точки зрения использования резонансных свойств системы, физические же процессы, происходящие в отрезке линии и в контуре, различны.

Например, в системе с сосредоточенными постоянными собственный период колебаний определяется временем перехода энергии из одного элемента в другой. Это время в длинноволновых диапазонах практически зависит не от геометрических размеров элементов контура¹, а от величин сосредоточенных емкости и индуктивности.

В системе же с распределенными постоянными наибольший период (наинизшая частота) собственных колебаний в основном зависит от геометрических размеров резонатора.

Резонансная частота — один из важнейших эквивалентных параметров. Для объемных резонаторов в большинстве случаев она принимается равной наинизшей частоте возможных в резонаторе колебаний. Как правило, в радиолокационной аппаратуре используется наиболее низкая из возможных резонансных частот, потому что при этом можно получить наивысшую добротность. Однако в круглом волноводе существует тип колебаний, при котором можно увеличить добротность, удлинив резонатор.

Следующий важный эквивалентный параметр — добротность. В объемном резонаторе, так же как и в колебательном контуре, добротность представляет собой

¹ При условии, что длина волны значительно превышает размеры элементов контура.

меру потерь за период колебаний запасенной в резонаторе энергии W_0 и определяется следующим соотношением:

$$Q = 2\pi \frac{W_0}{W_{\text{пот}}}. \quad (6)$$

К числу распространенных эквивалентных параметров относятся также характеристическое и резонансное сопротивления.

Следует помнить, что вследствие многоволновости резонатора пользоваться эквивалентными параметрами без особых оговорок можно лишь в сравнительно узкой области частот вокруг резонансной частоты.

Преимущество объемных резонаторов — возможность получить большие значения добротности и резонансного сопротивления на очень высоких частотах. Эти значения во много раз превышают величины добротности и эквивалентного сопротивления лучших контуров с сосредоточенными постоянными, даже полученные на более низких частотах.

В конце этого раздела приведена сводная таблица расчетных формул для эквивалентных параметров резонаторов различных типов.

Собственная резонансная длина волны резонатора

Резонансная длина волны (или резонансная частота) резонатора, как указывалось выше, зависит от его размеров. Зная характер этой зависимости, можно определить размеры резонатора, при которых он будет обладать заданной собственной резонансной длиной волны. Если же, наоборот, известны размеры резонатора, то можно определить его собственную резонансную длину волны.

Если резонатор представляет собой отрезок линии передачи, то для того чтобы определить его собственную длину волны, нужно задаться типом колебаний в резонаторе и вычислить фазовую длину волны для этого типа. Для коаксиальной линии фазовая длина волны определяется без затруднений, так как она равна длине волны в воздухе. Для линий волноводного типа необходимо пользоваться формулами, приведенными в предыдущем разделе, задаваясь при расчете поперечными размерами волновода.

Вычислив фазовую длину волны Λ , следует установить, будет ли резонатор замкнут с одной или с двух сторон, и задаться числом четвертей длин волн p [см. формулу (4)], которое должно укладываться по длине резонатора. Если

резонатор замкнут с двух сторон, то число p должно быть четным, если с одной стороны — нечетным.

Длина резонатора L будет в p раз больше четверти фазовой длины волны, а именно:

$$L = p \frac{\Lambda}{4}.$$

Если размеры резонатора известны, то следует вычислить фазовую длину волны Λ и затем определить, сколько раз величина $\frac{\Lambda}{4}$ уложится по длине резонатора. Если в результате не получится целого числа, нужно повторить расчет для другого типа колебаний. Зная фазовую длину волны Λ , можно определить резонансную длину волны в воздухе λ по формуле

$$\lambda = \frac{\Lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (7)$$

Мы уже говорили, что всякая резонансная система с определенными постоянными обладает многими резонансными частотами. Поэтому необходимо или совсем уничтожить паразитные резонансные частоты, или удалить их на значительное расстояние от основного полезного резонанса.

Чтобы в резонаторе не возникали нежелательные типы волн, его поперечные размеры не должны быть больше определенных величин. Продольные размеры должны быть такими, чтобы в резонаторе возникали колебания нужного типа в чистом виде.

Для коаксиальных резонаторов с колебаниями типа ТЕМ эти условия запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} R &< \frac{\lambda}{4}, \\ L &> R - r; \end{aligned}$$

для цилиндрического резонатора с колебаниями типа E_{010} (ТМ₀₁₀):

$$\begin{aligned} R &= 0,383 \lambda, \\ L &< 2,1 R. \end{aligned}$$

Резонансную длину волны λ цилиндрического резонатора с колебаниями типа H_{010} можно определить из следующих соотношений:

$$L = n \frac{\Lambda}{2},$$

$$\lambda_{\text{кр}} = 1,64 R.$$

Окончательная формула для резонансной длины волны будет

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{\frac{n^2}{4} + 0,37 \frac{L^2}{R^2}}}.$$

Для подсчета резонансной длины волны тороидальных резонаторов прямоугольного сечения пользуются формулой

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{Lr^2}{2d} \ln \frac{R}{r}},$$

которая дает ориентировочные результаты; размеры тороидальных резонаторов уточняются экспериментальным путем (на готовых резонаторах).

Добротность объемных резонаторов

Переменный ток в отличие от постоянного, проходя по металлическому проводнику, неравномерно распределяется по его сечению. Наибольшая плотность тока получается на внешней поверхности проводника. Это явление называется поверхностным эффектом.

В объемных резонаторах под внешней поверхностью подразумевают не наружную, а внутреннюю поверхность, охватывающую поле внутри резонатора.

Чем выше частота, тем на меньшую глубину проникает ток внутрь проводника. Глубиной проникновения тока (δ) считают расстояние внутрь проводника от его поверхности, на котором плотность тока составляет 0,367 от плотности тока на поверхности. На глубине больше δ ток быстро уменьшается. Энергия, теряющаяся в объеме проводника с глубиной δ , составляет 90% всей энергии потерь в нем.

Глубина проникновения тока может быть рассчитана по формуле

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \lambda}{30 \mu}}, \quad (8)$$

где δ — глубина проникновения тока в см;

ρ — удельное сопротивление в ом/см;

λ — длина волны в см;

μ — магнитная проницаемость.

На основании формулы (8) составлена табл. 1 глубин проникновения тока для различных металлов и длин волн.

Таблица 1

Удельные проводимости и глубины проникновения тока для различных металлов и длин волн при температуре 20° С

Металл	Удельная проводимость γ $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$	Глубина проникновения δ , см			
		$\lambda = 1 \text{ см}$	$\lambda = 10 \text{ см}$	$\lambda = 1 \text{ м}$	$\lambda = 6000 \text{ км}$ ($f = 50 \text{ гц}$)
Серебро	$6,12 \cdot 10^5$	$3,66 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$3,66 \cdot 10^{-4}$	0,9
Медь	$5,8 \cdot 10^5$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$3,78 \cdot 10^{-4}$	0,93
Золото	$4,1 \cdot 10^5$	$4,53 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$4,53 \cdot 10^{-4}$	1,02
Латунь	$1,56 \cdot 10^5$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$	1,73
Свинец	$4,54 \cdot 10^4$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$4,40 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	3,12

Из табл. 1 видно, что глубина проникновения тока тем меньше, чем выше частота или короче длина волны. На глубину проникновения влияет также материал, из которого сделан проводник. Следует обратить внимание на то, что в диапазоне сверхвысоких частот глубина проникновения тока очень небольшая.

Поскольку в объемном резонаторе потери на излучение сведены к минимуму, а потери в такой диэлектрике, как воздух, также весьма малы, то основную часть собственных потерь составляют тепловые потери в металле, из которого изготовлены стенки резонатора. Но так как колебательный ток распределяется по большой внутренней поверхности объемного резонатора, то плотность тока получается небольшой и, следовательно, тепловые потери невелики.

Добротность объемного резонатора часто приближенно оценивают как отношение объема, в котором энергия запасается, к объему, в котором она расходуется. Объем, в котором запасена энергия в резонаторе, — это его внутренний объем, объем диэлектрика, охваченного металлическими поверхностями. Объем, где происходят потери, — это объем металла, по которому проходит нагревающий его ток. Этот последний объем практически равен объему поверхностного слоя. Численно он равен произведению внутренней поверхности резонатора S на глубину поверхностного слоя δ . Таким образом, добротность резонатора можно приближенно подсчитать по формуле

$$Q = \frac{\delta S}{V}. \quad (9)$$

Формулы для более точного расчета добротности разных типов резонаторов приведены в табл. 2. Добротность зависит от размеров резонатора, его формы и типов колебаний в нем. В зависимости от частоты и типа колебаний объемный резонатор может иметь добротность порядка нескольких тысяч, десятков тысяч и даже сотен тысяч.

Все сказанное выше о добротности объемного резонатора относится к ненагруженному резонатору, т. е. к резонатору, не связанному с внешними цепями. Добротность нагруженного резонатора падает, так как элементы связи, вводимые в резонатор извне, вносят дополнительные потери. Соответственно уменьшению добротности изменяются и другие параметры резонатора — увеличивается полоса пропускания, уменьшается время нарастания и спада колебаний.

Чтобы оценить влияние связи или нагрузки на добротность резонатора, можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\frac{1}{Q_{\pi}} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{\text{вн}}},$$

где Q_{π} — фактическая добротность нагруженного резонатора;

Q_0 — добротность ненагруженного резонатора, или собственная добротность;

$Q_{\text{вн}}$ — добротность, которую имел бы данный резонатор, если бы у него были только потери, вносимые за счет нагрузки, а собственных потерь не было.

Формулы для расчета эквивалентных параметров объемных резонаторов

В табл. 2 обозначения размеров резонаторов в формулах соответствуют принятым на рис. 14, 16, 20 и 22. Линейные единицы измерений могут применяться любые; чтобы получить правильный результат, нужно брать линейные величины в одинаковых единицах. Например, чтобы получить длину волны в сантиметрах, размеры резонатора нужно также брать в сантиметрах.

Буквой δ обозначена глубина проникновения тока в см, буквой γ — удельная проводимость материала резонатора в $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$. Значения δ и γ можно взять из табл. 1.

Формулы для расчета эквивалентных параметров объемных резонаторов

Тип резонатора	Тип колебаний	Резонансная длина волны в воздухе, λ_0	Собственная добротность ненагруженного резонатора, Q_0
Прямоугольный (рис. 14)	H_{10n} (TE_{10n})	$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{n^2}{L^2}}}$	$Q_0 = \frac{\pi \delta \gamma}{\frac{\lambda}{b} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] + \frac{4}{n} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{1/2}}$
Цилиндрический, замкнутый с двух сторон (рис. 16)	E_{010} (TM_{010})	$\lambda_0 = 2,62R$	$Q_0 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{2,405}{2\pi \left(1 + \frac{R}{L} \right)}$
То же	H_{01n} (TE_{01n})	$\lambda_0 = \frac{2L}{\sqrt{\frac{1}{n^2} + 1,48 \left(\frac{L}{R} \right)^2}}$	$Q_0 = \frac{\pi \delta \gamma}{0,37 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 + \frac{4}{n} \left[1 - 0,37 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^2 \right]^{1/2}}$
Коаксиальный, замкнутый с двух сторон (рис. 20, а)	ТЕМ	$\lambda_0 = \frac{2L}{n}$	$Q_0 = \frac{2\pi \delta \gamma}{\left[\frac{\lambda}{\ln \frac{r}{r}} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{R^2} \right) + 8n \right]}$
Коаксиальный, замкнутый с одной стороны (рис. 20, б)	ТЕМ	$\lambda_0 = \frac{4L}{2n+1}$	—
Тороидальный, прямоуглоного сечения (рис. 22, а)	—	$\lambda_0 = 2\pi \sqrt{\frac{Lr^2}{2d} \ln \frac{R}{r}}$	—

КОНСТРУКЦИИ ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Конструктивные особенности объемных резонаторов

Применение объемных резонаторов дает возможность получить резонансные системы с высокой добротностью и большим эквивалентным сопротивлением вплоть до диапазона миллиметровых волн. Кроме хороших электрических параметров, объемные резонаторы обладают рядом конструктивных достоинств:

- не нуждаются в экранировке;
- как правило, не содержат внутри себя изоляционных материалов, создающих на сверхвысоких частотах заметные потери;
- внешняя поверхность объемных резонаторов находится под нулевым потенциалом высокой частоты, поэтому их можно крепить в блоках, не заботясь о какой-либо изоляции;
- объемные резонаторы механически прочны и в ряде случаев их можно использовать как несущие элементы конструкции.

Наиболее распространены в настоящее время коаксиальные, цилиндрические и тороидальные резонаторы, т. е. резонаторы, имеющие форму тел вращения. Это объясняется тем, что в ряде конструкций с электровакуумными приборами, в которые резонаторы входят в качестве одного из элементов, такая форма наиболее удобна.

Кроме того, токарные и сверловочные работы, необходимые при изготовлении резонаторов, имеющих форму тел вращения, могут быть выполнены с малыми допусками на более распространенном станочном оборудовании, чем работы, необходимые при изготовлении резонаторов прямоугольной или более сложной формы.

При производстве объемных резонаторов и волноводов требуется соблюдать весьма высокую точность, малые допуски. Так, например, при изготовлении больших контрольных резонаторов трехсантиметрового диапазона допуск на непараллельность оснований при внутреннем диаметре цилиндра в 75 мм составляет 0,025 мм. Такая точность не может быть достигнута на обычных токарных станках. Поэтому в конструкции предусматривают возможность юстировки положения одного из оснований при первоначальной отладке резонатора в лаборатории. Эта юстировка производится до получения наибольшей добротности.

Неточность изготовления может привести к тому, что правильно рассчитанный и сконструированный резонатор или вообще не будет работать, или же даст плохие результаты.

Настройка объемных резонаторов

Наиболее распространенными являются объемные резонаторы, собственную частоту которых можно изменять в более или менее широких пределах.

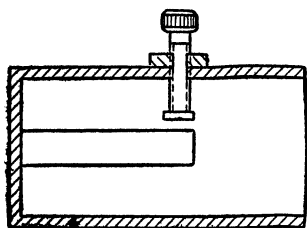


Рис. 26. Коаксиальный резонатор с элементом подстройки

Существуют два основных типа постановки технической задачи по настройке объемного резонатора:

— обеспечить возможность изменения собственной частоты резонатора в пределах порядка $\pm 5\%$ или $\pm 10\%$ от некоторой средней, или основной, частоты резонатора; органы, позволяющие производить такое изменение частоты, называют органами подстройки;

— обеспечить изменение собственной частоты резонатора в значительных пределах так, чтобы отношение двух крайних частот рабочего диапазона $\frac{f_{\text{макс}}}{f_{\text{мин}}}$ равнялось двум или даже трем и более.

Рассмотрим сначала, как решается первая задача.

В коаксиальных резонаторах подстройку в небольших пределах чаще всего осуществляют введением в точки пучности электрического поля небольшой переменной емкости (рис. 26).

В некоторых случаях, когда нужно лишь немного скорректировать собственную частоту (в пределах 2—3%), достаточно просверлить в стенке резонатора отверстие и нарезать его под обычный винт.

Общая закономерность в работе таких емкостных подстроечных элементов состоит в том, что при увеличении емкости, т. е. при ввинчивании винта, собственная частота резонатора уменьшается.

В тороидальных резонаторах более или менее значительных размеров для подстройки также широко применяются

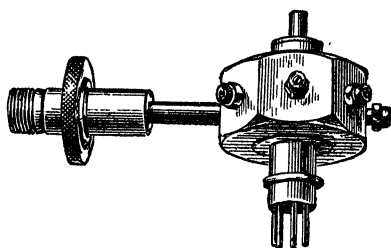


Рис. 27. Внешний вид тороидального резонатора клистрона с винтами для подстройки

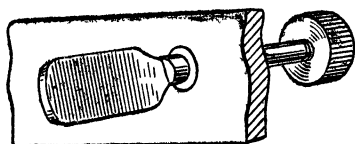


Рис. 28. Лопатка для подстройки тороидального резонатора

винты или пробки. Их устанавливают иногда по несколько штук (рис. 27).

Заметим, что при ввертывании винта в тороидальный резонатор его собственная частота увеличивается, а не уменьшается, как в коаксиальном резонаторе.

Кроме пробок, в тороидальных резонаторах для подстройки применяют вращающиеся лопатки (рис. 28). В зависимости от угла, под которым установлена плоскость лопатки, изменяется число магнитных линий, которые ее пронизывают. Чем больше магнитных линий проходит через лопатку, тем больший размагничивающий поток она создает и тем выше собственная частота резонатора. Лопатку поворачивают только в пределах 90° . При повороте сверх 90° картина изменения частоты повторяется.

Если резонатор находится в вакууме или его размеры малы и применение вращающихся элементов подстройки неудобно, то одну из стенок тороидального резонатора выполняют в виде гибкой гофрированной мембраны (конструкция так называемого сильфонного типа). Нажимая на мембрану, при помощи механической системы можно изме-

иять размеры тороида и зазор в его центральной части, а тем самым изменять его собственную частоту.

Возможна подстройка резонатора путем перемещения в его полости штырей или колец из диэлектрика.

Рассмотренные методы подстройки применяются обычно только в аппаратуре радиолокационных или радиоретрансляционных станций.

Для подстройки в широком диапазоне частот (например, в измерительной аппаратуре) описанные выше подстроечные

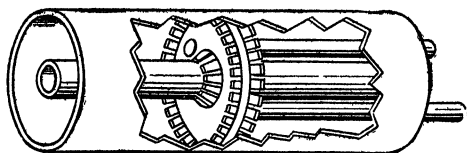


Рис. 29. Коаксиальный резонатор с короткозамыкающим поршнем

элементы непригодны, так как они не позволяют существенно изменять размеры рабочей части резонатора.

Изменять объем рабочей части резонатора в широких

пределах можно при помощи подвижного короткозамыкающего поршня (рис. 29). Однако такая конструкция хотя и работает, но дает не очень хорошие результаты. Это происходит потому, что по самому принципу работы коаксиального резонатора у короткозамкнутого конца его образуется пучность тока, а следовательно, наибольший ток проходит через несовершенный, скользящий контакт между поршнем и стенками резонатора. В результате происходят большие потери и добротность резонатора по сравнению с расчетной снижается. Большим недостатком такой конструкции является также и то, что непостоянство контактов влияет на собственную частоту резонатора.

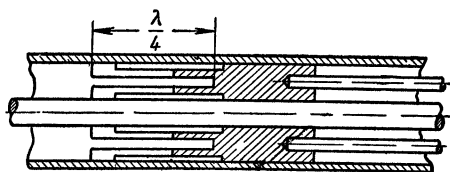


Рис. 30. Четвертьволновый контактный поршень

Чтобы устранить отмеченные недостатки, короткозамыкающий поршень делают не в виде тарелки или диска с лепестками, а в виде стакана длиной в четверть волны (рис. 30). Такой стакан можно выточить из одного куска металла или пропаять дно. В месте соприкосновения концов стакана со стенками резонатора расположен узел тока, так что плохой контакт не имеет значения. При больших пере-

мещения поршня узел тока смещается, но ток в месте контакта все же значительно меньше, чем в пучности, и система будет работать хорошо.

Зная, что входное сопротивление разомкнутой линии длиной $\frac{\lambda}{4}$ равно нулю, можно построить бесконтактный поршень (рис. 31). Однако при перемещении его в значительных пределах качество работы резонатора изменяется,

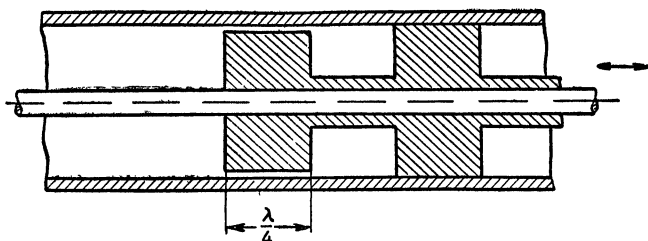


Рис. 31. Четвертьволновый коаксиальный бесконтактный поршень

так как только на одной частоте диапазона длина поршня соответствует четверти длины волны. На других частотах (когда длина поршня меньше или больше $\frac{\lambda}{4}$) входное сопротивление разомкнутого четвертьволнового отрезка линии, образуемого поршнем и стенками резонатора, уже не равно нулю, и поршень не создает хорошего замыкания.

В поисках конструкции бесконтактного поршня, обеспечивающего хорошее замыкание в широком диапазоне, были разработаны сложные Ш- и S-образные бесконтактные поршни (рис. 32 и 33).

В измерительной аппаратуре (например, в волномерах) часто применяются разомкнутые коаксиальные резонаторы. Они настраиваются изменением длины центрального проводника. Здесь также используются как контактные, так и бесконтактные конструкции (рис. 34).

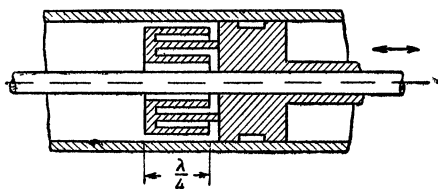


Рис. 32. Ш-образный бесконтактный поршень

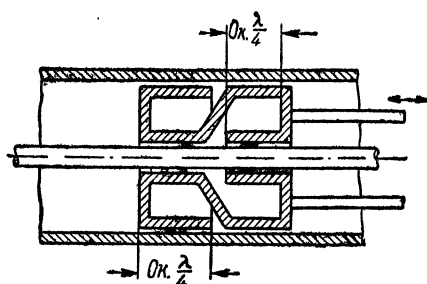


Рис. 33. S-образный бесконтактный поршень

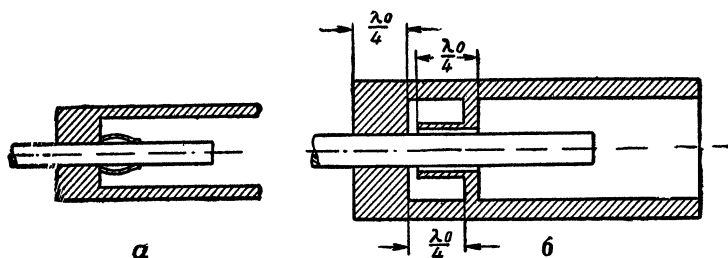


Рис. 34. Коаксиальный резонатор с центральным проводником переменной длины:

а — с контактным замыканием; б — с бесконтактным замыканием

В довольно больших пределах можно перестраивать цилиндрические и прямоугольные резонаторы. В таких резонаторах обычно применяют бесконтактные замыкатели (рис. 35).

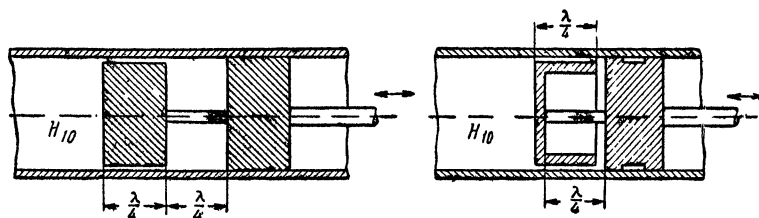


Рис. 35. Два типа бесконтактных замыкателей для резонаторов волнового типа

Тороидальные резонаторы в широкодиапазонных устройствах, как правило, не применяются, так как они имеют небольшой диапазон перестройки.

Виды связи с объемными резонаторами

Органы связи служат для ввода электромагнитной энергии в резонатор от источников ее и для вывода ее из резонатора к каким-либо потребителям.

Различают следующие основные виды связи с объемными резонаторами:

- электрическая емкостная (штырьком или зондом);
- магнитная (витком);
- дифракционная (через отверстие);
- электронная.

Основной принцип устройства связи состоит в том, что поле элемента связи должно иметь составляющую, пространственно совпадающую с аналогичной составляющей

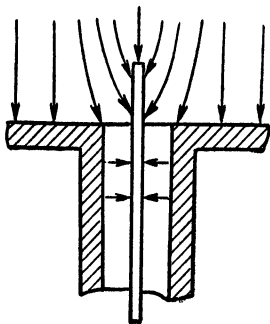


Рис. 36. Электрическая связь с резонатором

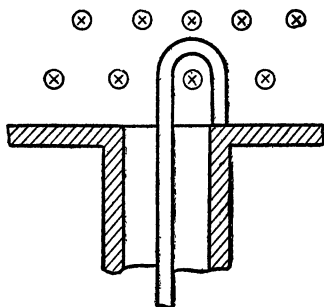


Рис. 37. Магнитная связь с резонатором

поля, возбуждаемого этим элементом, или поля, из которого надо отвести энергию.

Устройство органов связи с объемными резонаторами очень простое. Электрическая связь (аналогична емкостной связи в обычном колебательном контуре) осуществляется через штырек, вводимый через отверстие в стенке резонатора (рис. 36). Этот штырек вводится так, чтобы его ось совпала с направлением электрических силовых линий в данной точке резонатора.

Чаще всего штырек помещают в точке, соответствующей пучности электрического поля. Величину связи регулируют, вводя штырек в резонатор (связь увеличивается) или выводя его из резонатора (связь уменьшается).

Магнитная связь создается при помощи витка, введенного в резонатор так, чтобы его плоскость была перпендикулярна к линиям магнитного поля (рис. 37). Виток связи,

как правило, стараются поместить в точке, соответствующей пучности магнитного поля в резонаторе. Величину связи регулируют большим или меньшим введением витка в резонатор, а также поворотом плоскости витка при постоянной глубине его погружения. Осуществить магнитную связь в чистом виде довольно трудно, так как электрические линии также замыкаются на виток и связь зачастую носит комбинированный магнитно-электрический характер.

Связь при помощи штырька и витка применяется почти во всех видах резонаторов в тех случаях, когда энергия подводится или отводится коаксиальными кабелями, а также для связи рядом расположенных резонаторов.

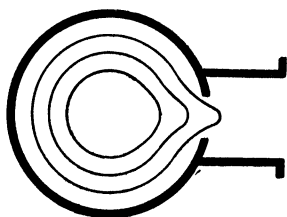


Рис. 38. Дифракционная связь с резонатором

Если соединительной линией служит волновод, то обычно используется дифракционная связь (рис. 38). Осуществить ее оказывается возможным вследствие способности силовых линий огибать препятствия (явление дифракции).

При наличии в металлической стенке отверстия некоторая часть силовых линий выпучивается и выходит за пределы резонатора. Если к этому отверстию приставить снаружи волновод так, чтобы направление выпучившейся части силовых линий совпадало с полем нужного типа колебаний в волноводе, то последний возбуждается, станет связанным с резонатором.

Система будет работать и в обратном направлении, т. е. от волновода может возбуждаться резонатор. Величина связи зависит от размеров отверстия и его формы. Как правило, размер отверстия подбирается опытным путем. Регулируется связь поворотом резонатора относительно волновода (или наоборот) в плоскости сечения последнего.

На рис. 39 показаны различные виды дифракционной связи объемного резонатора с волноводом.

Электронная связь образуется при пролете электронов через резонатор. Для наилучшей связи желательно, чтобы электроны пролетали через область, где сосредоточена наибольшая часть электрического поля, а время пролета электронов и расстояние, которое им приходится проходить в резонаторе, были как можно меньше. Этим условиям хорошо

удовлетворяет тороидальная конструкция резонатора с центральными дисками в виде металлических сеток, через которые пролетает пучок электронов.

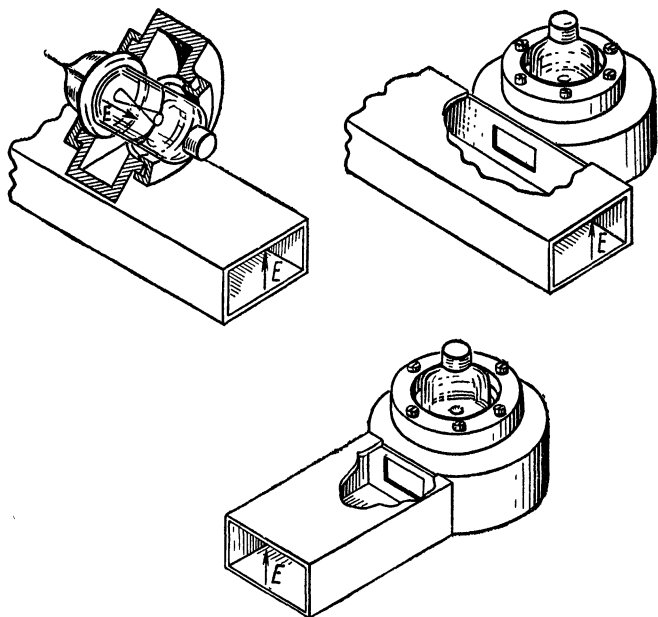


Рис. 39. Различные виды дифракционной связи объемного резонатора с волноводом

Подавление нежелательных резонансов

Как мы выяснили выше, все резонансные системы с определенными постоянными обладают бесконечным числом резонансных частот (многоволновость). Это обстоятельство является в ряде случаев весьма вредным. Например, если такой резонатор присоединить к генератору, то он при определенных условиях может возбудиться не на нужной нам частоте, а в некоторых случаях — сразу на двух или нескольких частотах. Если в качестве контура волномера используется объемный резонатор, то из-за многоволновости у нас нет уверенности в том, какова же истинная частота исследуемого нами генератора.

Резонансы на частотах, отличных от основной, наинижней, называют обычно ложными или паразитными, и ста-

раются от них избавиться. Для этого орган связи резонатора с внешней системой помещают в такой точке, которая соответствует пучности для основного и узлу для подавляемого типов колебаний.

Поясним это на примере с коаксиальным резонатором. На рис. 40 кривая 1 изображает распределение тока в резонаторе для основного типа колебаний, кривая 2 — для следующего, высшего типа. Если поместить виток связи в

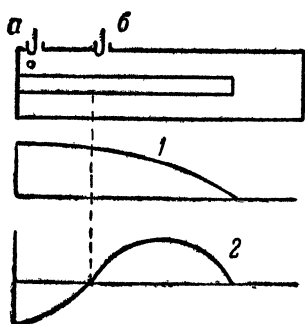


Рис. 40. Подавление нежелательного типа колебаний перемещением элемента связи

точке *a*, то и для основных и для высших типов колебаний он окажется в зоне пучности тока, т. е. связь будет максимальной для обоих типов колебаний. Если же виток поместить в точку *б*, то связь для колебаний основного типа уменьшится незначительно, а для колебаний высшего типа вообще будет отсутствовать. Это — простейший прием подавления нежелательного типа колебаний.

Влияние внешних условий на работу резонатора

В большинстве случаев полость объемного резонатора заполнена воздухом и сообщается с внешней атмосферой. Поэтому изменения физических свойств воздуха в окружающей атмосфере влияют и на свойства воздуха внутри полости объемного резонатора. Даже если внутри резонатора создан вакуум, то наружные стенки резонатора все равно соприкасаются с окружающей атмосферой и воспринимают изменения ее температуры.

Изменения свойств окружающей среды существенно влияют на работу резонатора.

Под влиянием изменения свойств воздуха изменяется величина его диэлектрической проницаемости ϵ . Чем больше влажность воздуха, тем больше ϵ , и наоборот. С повышением температуры ϵ падает.

Изменения свойств воздуха могут вызвать изменения собственной частоты резонатора на несколько сотых процента. Для учета этих изменений при точных измерениях пользуются номограммой, изображенной на рис. 41. При помощи этой номограммы, зная температуру воздуха и его

Влажность, можно определить, в какую сторону и насколько процентов изменится частота собственных колебаний резонатора, первоначально градуированного при температуре 25°С и относительной влажности 60%. Для этого необходимо провести прямую, соединяющую точки на шкалах относительной влажности и температуры, соответствующие

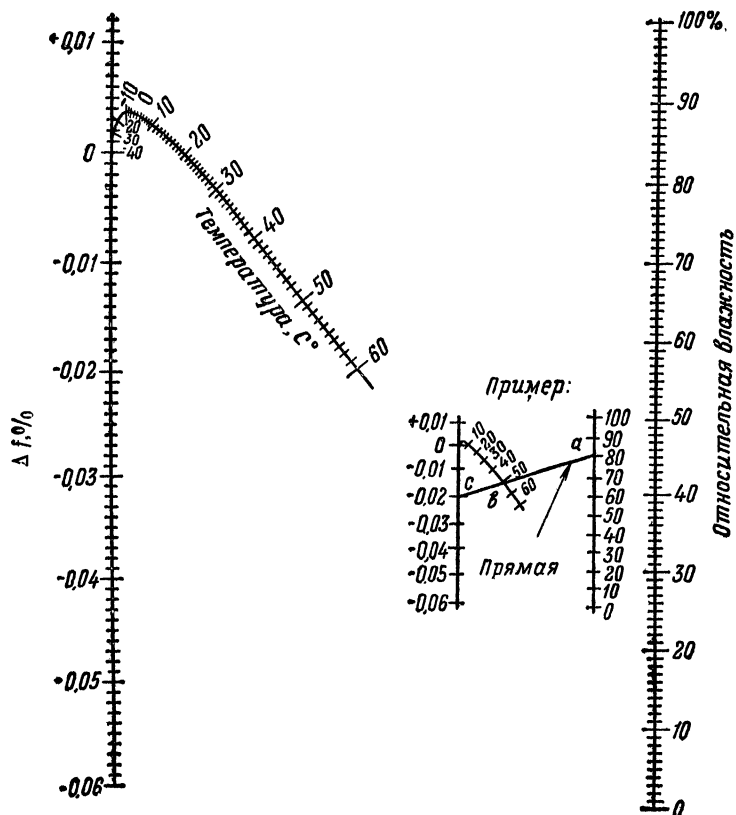


Рис. 41. Номограмма для учета влияния температуры и влажности на резонансную частоту объемного резонатора

условиям измерений, и продолжить эту прямую влево до пересечения со шкалой изменения частоты ($\Delta f, \%$). Точка пересечения укажет величину относительного изменения частоты.

Резонатор изготавливается, как правило, из металла. Известно, что большинство металлов при нагревании расши-

ряется, а при охлаждении сжимается. Поэтому при изменении температуры изменяются размеры резонатора и, следовательно, частота его собственных колебаний. При неправильном выборе материалов и конструкции изменения температуры могут вызывать довольно значительные изменения собственной частоты. Так, например, для медного резонатора изменение резонансной длины волны от зимы к лету составляет около 0,03%.

С влиянием температурных изменений борются путем изготовления резонаторов и их деталей из металлов с малым коэффициентом температурного расширения (например, из инвара). Но инвар дорог, механическая обработка его и нанесение на него хорошо проводящих покрытий затруднительны. Поэтому детали массового применения изготавливают обычно из сплавов, например латуни, используя при этом методы так называемой термокомпенсации.

Сущность метода термокомпенсации состоит в том, что в конструкцию резонатора вводятся два элемента, увеличение размеров одного из которых приводит к уменьшению частоты, а увеличение размеров другого, наоборот, — к увеличению частоты. Размеры и материал для изготовления этих элементов подбираются так, чтобы, например, при увеличении температуры на 10% удлинение первого элемента вызвало уменьшение частоты, равное увеличению частоты, вызванному удлинением второго элемента. При этом изменения температуры не будут в более или менее значительных пределах влиять на собственную частоту резонатора.

Следует, однако, помнить, что применение термокомпенсации не устраняет влияния изменения диэлектрических свойств воздуха и это влияние необходимо всегда учитывать.

Кроме влияния температуры на геометрические размеры резонатора и, следовательно, на его собственную частоту, следует учитывать еще и влияние температуры на удельное сопротивление металла, покрывающего рабочие поверхности резонатора. Поскольку это сопротивление изменяется, будет меняться и добротность резонатора. Чтобы температура не влияла на добротность резонатора, его рабочую поверхность покрывают металлом или сплавом с нулевым температурным коэффициентом сопротивления. В этих случаях иногда идут на заведомое ухудшение добротности, применяя для покрытия реостатные сплавы, например манганин.

Внутренние поверхности резонаторов чаще всего покрывают тонким слоем серебра, которое обладает наивысшей

электропроводностью и при обычных температурах не окисляется на воздухе. Однако и серебряная поверхность, длительное время находящаяся на открытом воздухе, особенно при наличии в атмосфере следов серы, покрывается плохо проводящей пленкой, что приводит к заметному уменьшению добротности резонатора.

В некоторых случаях основное требование к объемному резонатору — неизменность его свойств (например, добротности) в течение длительного промежутка времени. При этом рабочую поверхность резонатора покрывают каким-либо неокисляющимся металлом, например золотом. В последнее время для этой цели стали наносить на серебряную поверхность тончайшую пленку родия толщиной 0,1 микрона.

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Объемные резонаторы в генераторах сверхвысоких частот

При генерировании колебаний сверхвысоких частот (с.в.ч.) объемные резонаторы играют чрезвычайно важную роль. Объемный резонатор является не только частью схемы генератора, но и составным элементом его конструкции.

По конструктивному признаку все генераторы с.в.ч. можно разбить на две группы: с внешним резонатором и с внутренним резонатором.

Как и на более длинных волнах, в состав генератора с.в.ч. входит электровакуумный прибор и резонансная система. Если резонансная система имеет небольшие размеры, ее также помещают в вакуум. Такую конструкцию называют генератором с внутренним резонатором.

Когда размеры резонансной системы значительно больше размеров тех частей, которые должны находиться в вакууме, в вакуум помещают только основную, служащую для создания и направления электронного потока часть резонатора. Сам же резонатор находится вне вакуума; он делается обычно разборным, и в него вставляется вакуумная часть генератора. Такие генераторы называются генераторами с внешним резонатором. Одно из соображений, диктующих применение наружного резонатора, — необходимость перестройки в широком диапазоне, осуществить которую в вакууме трудно.

Резонаторы триодных генераторов

Триодные генераторы применяются в диапазоне с.в.ч. вплоть до частоты 10 000 Мгц.

Наиболее широко распространена конструкция триода с

плоскими дисковыми электродами и выводами от этих электродов в виде колец. В такой конструкции лампы обычно применяют коаксиальный тип резонатора.

Триоды, как правило, используются только с внешними резонаторами, чаще всего в схемах с общей сеткой. В схеме любого триодного генератора с.в.ч. имеются два контура: катодно-сеточный и анодно-сеточный. Обычно эти два контура выполняют в виде единого сборного узла, в который вставляется лампа.

Наиболее распространены три основных варианта конструкции резонаторной системы триодного генератора, схематически изображенные на рис. 42. Они отличаются один от другого взаимным расположением анодного и катодного резонаторов. На рис. 42, *а* показаны два резонатора, соприкасающиеся своими торцами. Общая длина всей системы равна сумме длин обоих резонаторов. На рис. 42, *б* анодный резонатор перевернут в сторону катодного, а катодный резонатор как бы вставлен в анодный. При этом общая длина системы резонатора лишь незначительно превышает длину одного резонатора. Ввиду компактности такая конструкция резонаторов имеет большее распространение, хотя по устройству она сложнее конструкции, показанной на рис. 42, *а*. В некоторых случаях поворачивают катодный резонатор, оставляя анодный резонатор внутри (рис. 42, *в*).

Как видно даже из этих схематических упрощенных изображений, конструкция резонаторов для триодных генераторов довольно сложна. Основной причиной усложнения является необходимость подводить к электродам лампы постоянные напряжения таким образом, чтобы подводка не

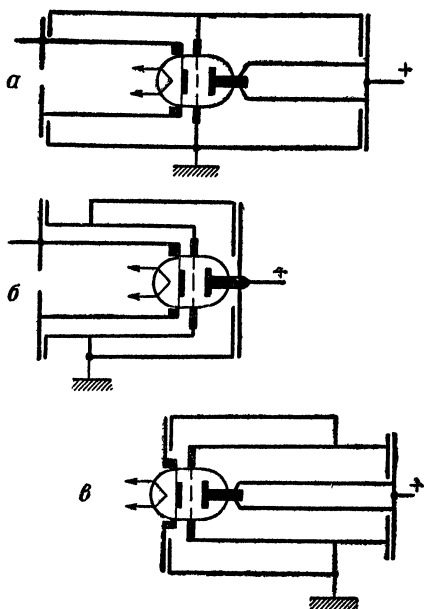


Рис. 42. Варианты конструкций коаксиальных резонаторных систем триодного генератора

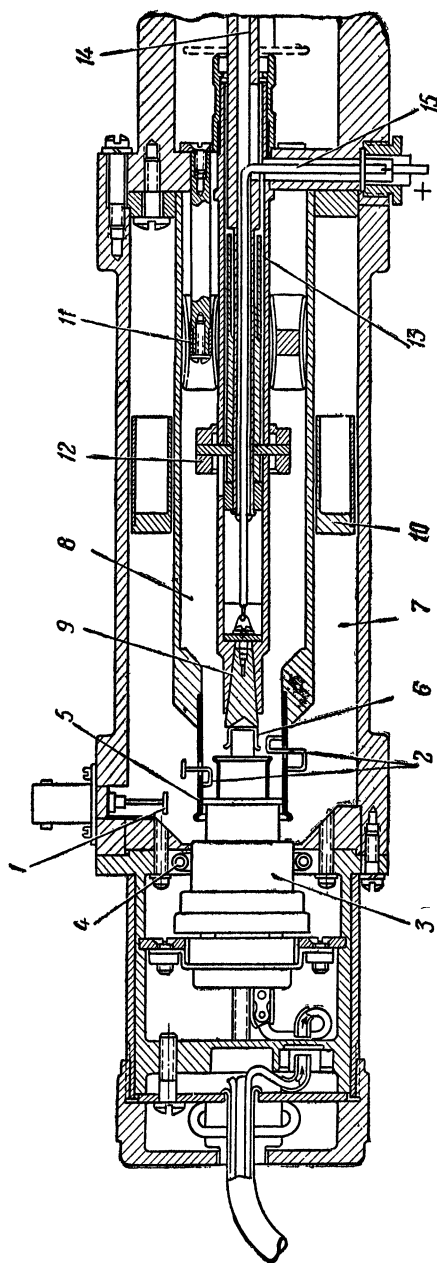


Рис. 43. Разрез коаксиальной резонаторной системы триодного генератора на маячковом триоде на частоту 3000 Мгц:

1 — штырь связи для вывода энергии; 2 — штырь и петли обратной связи; 3 — маячковый триод; 4 — контактная пружина катода; 5 — сеточная контактная группа; 6 — анодный контакт; 7 — катодно-сеточный резонатор; 8 — анодно-сеточный резонатор; 9 — анодно-сеточный блокировочный конденсатор (слюдяная прокладка); 10 — катодный бесконтактный поршень настройки; 11 — анодно-сеточный поршень настройки; 12 — кольцевая муфта для плавной настройки анодно-сеточного резонатора; 13 — четвертьволновый изолятор; 14 — тяга настройки анодно-сеточного контура; 15 — ввод анодного напряжения

нарушала работы высокочастотной части. Для более полного представления о конструкции на рис. 43 показан разрез коаксиальной резонаторной системы триодного генератора на маячковом триоде на частоту 3000 Мгц. Эта резонатор-

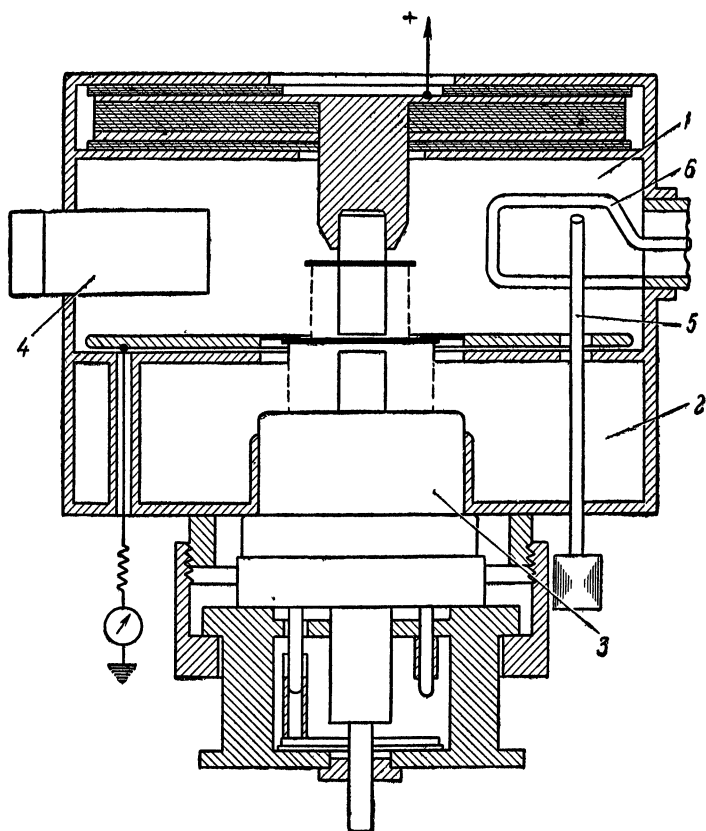


Рис. 44. Разрез тороидальной резонаторной системы для маячкового триода:

1 — анодно-сеточный резонатор, 2 — катодно-сеточный резонатор; 3 — маячковый триод; 4 — ввертывающаяся пробка для настройки; 5 — штырь обратной связи; 6 — петля связи для вывода энергии

ная система принадлежит к типу резонаторных систем с обращенным катодным резонатором (см. рис. 42, в).

В некоторых случаях в триодных генераторах применяют резонаторы тороидального типа (рис. 44).

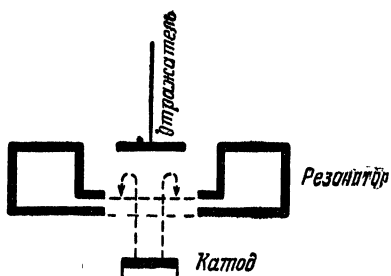


Рис. 45. Схема конструкции отражательного клистрона

В настоящее время наиболее распространены однорезонаторные, или отражательные, клистроны. Схема конструкции отражательного клистрона приведена на рис. 45. Не вдаваясь в подробности работы клистрона, отметим, что электроны, проходя через среднюю часть тороидального резонатора, возбуждают в нем колебания, которые в свою очередь модулируют по плотности поток электронов, создавая электронные сгустки. Эти сгустки отражаются отражателем и вновь пролетают через сетки резонатора, отдавая ему свою энергию.

В клистроне применяется тороидальный резонатор потому, что его электрическое поле сконцентрировано вблизи оси: это позволяет удобно осуществить взаимодействие с электронным пучком.

Однако тороидальная форма резонатора является не единственной, используемой в клистронных генераторах. Существуют отражательные клистроны и с внешними и с внутренними резонаторами. Клистроны с внутренними резонаторами применяются для волн длиной 4—5 см и короче. На более длинных волнах исполь-

Резонаторы клистронных генераторов

Клистрон — это генератор с.в.ч., в котором используется модуляция электронного пучка по скорости.

Конструкция клистрона представляет наиболее яркий пример использования электронной связи с резонатором.

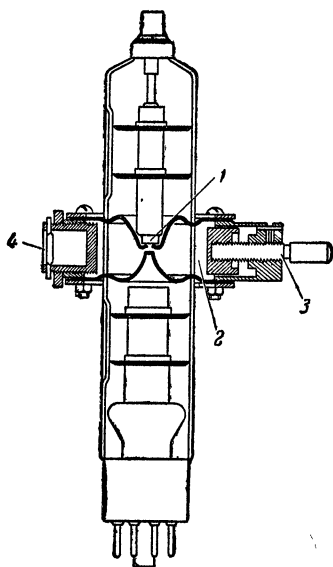


Рис. 46. Схематический разрез клистронного генератора с внешним тороидальным резонатором:

1 — отражатель; 2 — тороидальный резонатор; 3 — поршень плавной настройки; 4 — ввертывающаяся пробка

зуются, как правило, клистроны с внешними разборными резонаторами (рис. 46). Внутренняя часть тороидального резонатора заключена в вакуумном стеклянном баллоне с двумя плоскими контактными кольцами. Эти кольца соприкасаются с внешней частью резонатора, которая представляет собой металлический тороид, состоящий из нескольких разъемных частей, стягиваемых винтами.

На рис. 47 изображен клистронный генератор на волну 10 см в разобранном виде. Клистрон встав-

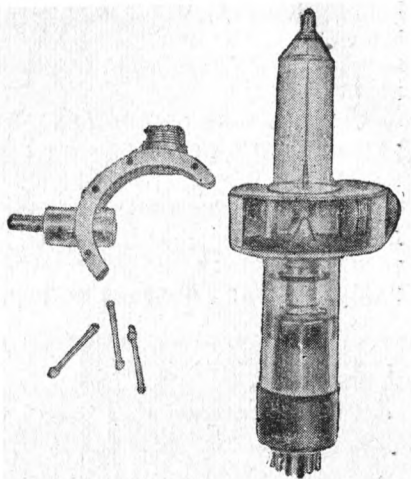


Рис. 47. Внешний вид клистронного генератора с разобраным резонатором

лен в одну половину внешнего резонатора, вторая половина резонатора показана отдельно слева. В левой части резонатора имеется вывод для связи с внешними цепями и металлическая пробка для настройки резонатора. Сверху и снизу

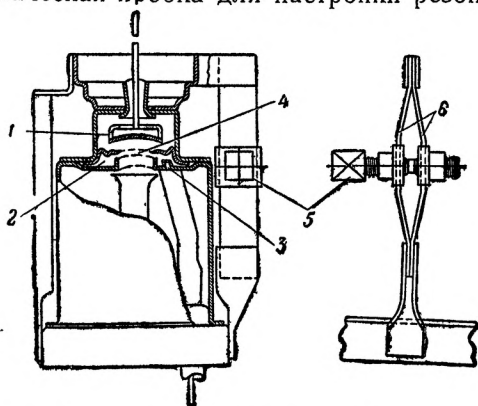


Рис. 48. Конструкция резонаторной системы и механизма настройки клистрона на волну 3 см:

1 — отражатель; 2 — тороидальный резонатор; 3 — петля связи для вывода энергии; 4 — зазор резонатора; 5 — винт настройки; 6 — тяга

обе половинки резонатора покрываются плоскими металлическими дисками и стягиваются винтами с гайками, образуя вместе с клистроном единый тороидальный резонатор.

На рис. 48 изображена (в увеличенном виде) конструкция резонаторной системы и механизма настройки клистрона на волну 3 см. Резонатор в этом клистроне полностью заключен в

вакуум-и имеет очень небольшие размеры. Поэтому, чтобы вызвать существенное изменение частоты, генерируемой клистроном, достаточно незначительно деформировать резонатор.

Деформация резонатора осуществляется следующим образом. Тяги 6 представляют собой две приваренные к верхней и нижней частям баллона металлические полосы, в средней части которых вклепаны две гайки: одна с правой, другая с левой резьбой. При вращении винта 5 настройки тяги расходятся или сходятся, соответственно увеличивая или уменьшая давление на верхнюю гибкую крышку металлического баллона. Перемещение крышки вызывает изменение объема резонатора.

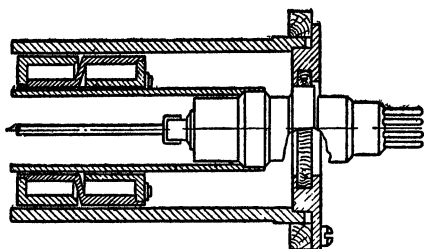


Рис. 49. Разрез коаксиального резонатора клистронного генератора

Применять такую конструкцию не всегда удобно, так как для подстройки клистрона нужно открывать блок, в котором он установлен. Этот недостаток устранен в клистропах с термической (тепловой)

подстройкой, в которых механическое усилие, необходимое для изменения размеров резонаторов, создается за счет деформаций, вызванных нагреванием. Весь механизм настройки находится внутри баллона клистрона, в вакууме. Деформация резонатора осуществляется путем изменения величины электрического тока, проходящего через нагреваемый элемент. Нагреваясь, этот элемент удлиняется и дает возможность изменять усилие, приложенное к резонатору, деформируя последний.

Кроме тороидальных резонаторов, в широкодиапазонных клистронных генераторах с внешним резонатором применяются коаксиальные резонаторы (рис. 49). В показанном на рис. 49 клистроне выводы сделаны в виде широких массивных колец разных диаметров. Это необходимо для удобства вставления клистрона в кольцевые пружинные группы.

Перестройка генератора осуществляется перемещением замыкающего бесконтактного S-образного поршня.

В некоторых типах измерительных генераторов и гетеродинов панорамных приемников необходимо периодически перестраивать генератор с частотой 15—25 раз в секунду.

Для этого поршню придают при помощи кривошипного или эксцентрикового механизма, приводимого в действие небольшим электродвигателем, возвратно-поступательное движение.

Резонаторы магнетронов

Один из основных элементов магнетрона — система объемных резонаторов, которые формируют замкнутый кольцевой электронный поток и отбирают от него энергию.

Внешний вид многорезонаторного магнетрона и блока объемных резонаторов изображен на рис. 50. В сплошном медном блоке по окружности высверлено восемь цилиндрических отверстий. Это и есть объемные резонаторы. В цент-

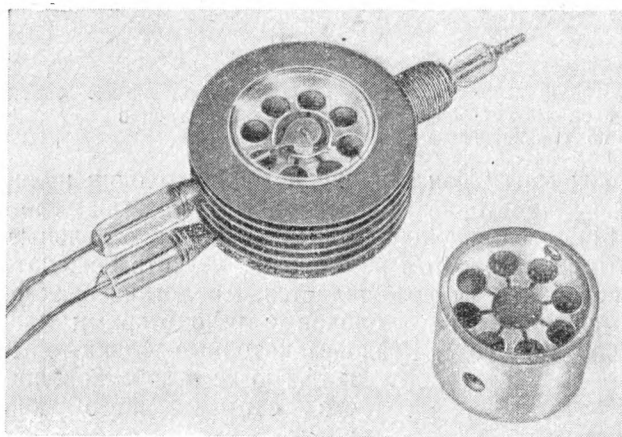


Рис. 50. Внешний вид многорезонаторного магнетрона со снятой крышкой (справа блок объемных резонаторов)

ральной части резонаторного блока магнетрона помещен катод, создающий электронный поток. Связь потока электронов с резонаторами осуществляется через продольные пазы в стенках резонаторов. В этих пазах в основном сосредоточено электрическое поле резонатора.

Весь анодный блок магнетрона, состоящий из нескольких одинаковых резонаторов, работает как одно целое на частоте, близкой к собственной частоте одного резонатора. Ввиду особенностей конструкции резонаторного блока и условий его работы в многорезонаторном магнетроне с одинаковыми резонаторами могут возникать колебания на различных частотах. Это приводит к нестабильной работе

магнетрона, так как возможны перескоки частоты магнетрона с одной на другую и резкие изменения величины отдаваемой мощности. Например, при импульсной работе отдельные импульсы, следующие один за другим, могут генерироваться на столь различных частотах, что они выйдут из пределов настройки приемника.

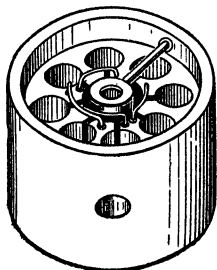


Рис. 51. Резонаторный блок магнетрона со связками

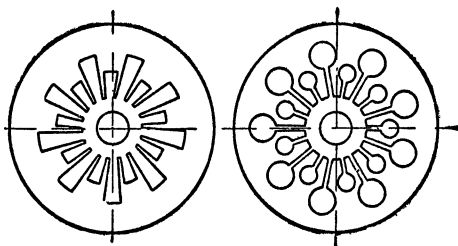


Рис. 52. Разнорезонаторные блоки магнетронов

Чтобы магнетрон генерировал только одну нужную частоту, в резонаторный блок вводят так называемые связки (рис. 51), соединяющие особым образом отдельные точки резонаторов. При этом резонансная частота нежелательного типа колебаний не возбуждается. Аналогичный эффект достигается применением блоков с резонаторами различных размеров (рис. 52). Разнорезонаторные блоки обычно ис-

пользуются в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн.

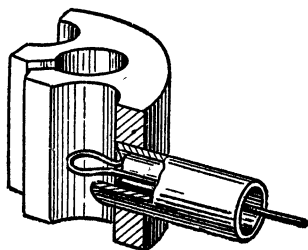


Рис. 53. Связь с резонатором магнетрона при помощи витка

Все резонаторы блока магнетрона сильно связаны между собой, поэтому для связи со всей системой достаточно иметь связь только с одним из резонаторов. Для вывода энергии из резонатора магнетрона используют коаксиальные выводы с витком связи или дифракционную связь в виде окна, связывающего резонатор с волноводом (рис. 53 и 54). Основ-

ная конструктивная особенность связи с магнетроном состоит в том, что и коаксиальный вывод и окно связи должны быть выполнены вакуумплотными, т. е. должны надежно обеспечивать сохранение вакуума внутри магнетрона.

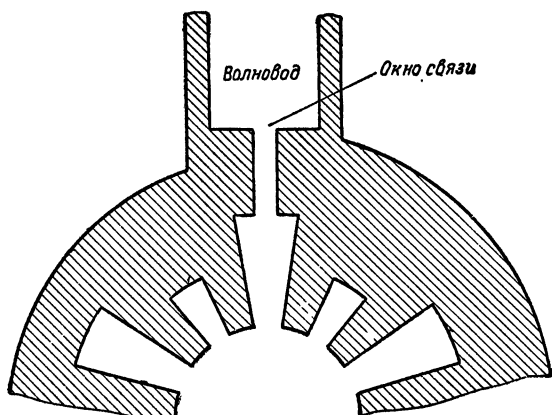


Рис. 54. Дифракционная связь с резонатором магнетрона

Магнетроны в основном изготавливаются на фиксированные рабочие частоты, но есть конструкции, позволяющие менять частоту колебаний магнетрона. Перестраиваются магнетроны путем одновременного введения во все резонаторы металлических пробок, расположенных на общем металлическом кольце (рис. 55).

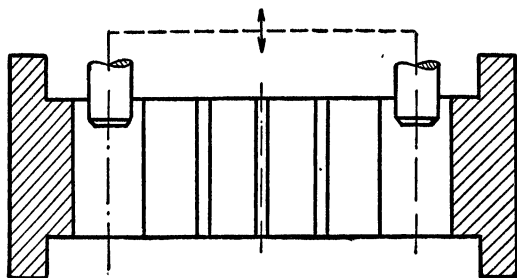


Рис. 55. Перестраиваемые резонаторы магнетрона

Объемные резонаторы во входных цепях приемников

В приемных устройствах объемные резонаторы, кроме гетеродинов, применяются также во входных цепях. В радиолокационных приемниках, работающих на одну антенну с передатчиком, входной контур (преселектор) выполняет одновременно еще и функцию переключателя прием — передача.

Переключатель прием — передача (рис. 56) представляет собой тороидальный объемный резонатор 1. Централь-

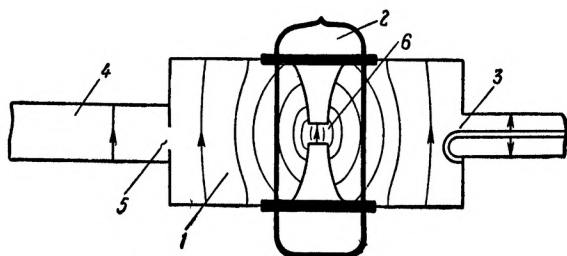


Рис. 56. Схематическое изображение конструкции переключателя прием — передача:

1 — тороидальный резонатор; 2 — разрядник; 3 — виток связи со смесителем; 4 — волноводное соединение с антенной; 5 — окно связи; 6 — промежуток разрядника

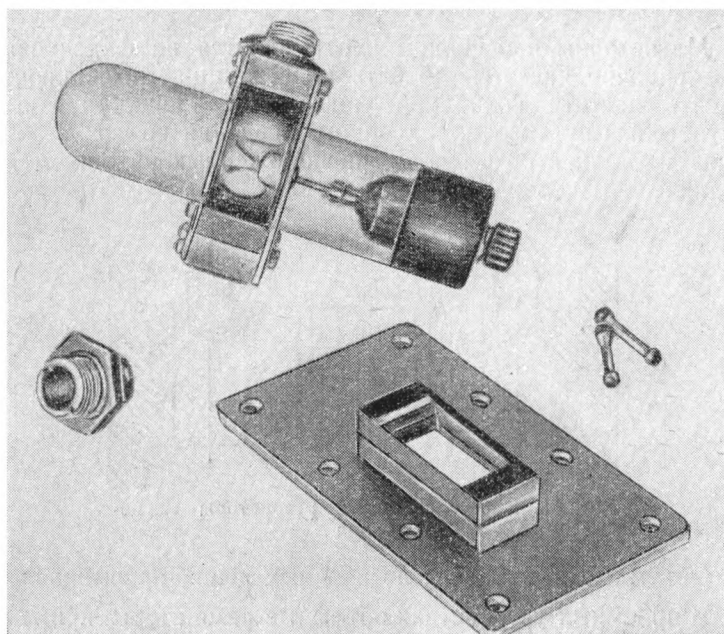


Рис. 57. Внешний вид разобранного переключателя прием — передача со вставленным разрядником

ная часть этого резонатора заключена в стеклянный баллон, заполненный разреженным инертным газом (разрядник 2). Сигнал от антенны подводится через окно связи 3. Резонатор может быть подстроен на частоту принимаемого сигнала при помощи пробки (на чертеже не показана). Виток связи 4 служит для связи тороидального резонатора 1 со смесителем.

Когда передатчик радиолокационной станции начинает излучать импульс, часть излучаемой энергии попадает в резонатор. Газ в баллоне ионизируется, становится проводящим и замыкает промежуток 6 разрядника 2. Собственная частота резонатора при этом заметно изменится, резонатор расстроится и к смесителю пройдет лишь незначительная часть мощности сигнала передатчика, которая не сможет повредить кристаллический детектор.

Когда генерация импульса передатчиком прекращается, прекращается и ионизация газа в баллоне. Резонатор вновь становится настроенным на частоту передатчика, и приемник сможет принимать отраженный импульс. На рис. 57 изображен в разобранном виде переключатель прием — передача радиолокационной станции десятисантиметрового диапазона.

На рис. 58 представлен входной контур широкодиапазонного приемника. Входной контур состоит из двух четверть-

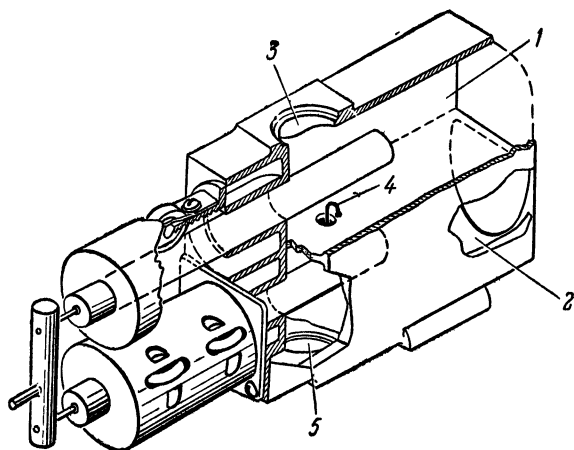


Рис. 58. Входной контур широкодиапазонного приемника:

1, 2 — резонаторы; 3 — отверстие для ввода элемента связи от антенны; 4 — виток связи между резонаторами, 5 — отверстие для элемента связи со смесителем

волновых коаксиальных резонаторов 1 и 2, связанных между собой витками связи 4. Система двух резонаторов образует полосовой фильтр со значительно более крутыми, чем у одиночного резонатора, скатами резонансной кривой. Это дает возможность существенно уменьшить помехи по зеркальному каналу. Обращает на себя внимание более развитая система настройки, позволяющая перекрывать значительный диапазон.

Волномеры

Объемные резонаторы широко применяются в волномерах сантиметрового диапазона.

В зависимости от диапазона и характера использования в волномерах применяются различные типы резонаторов. Чтобы добиться наивысшей разрешающей способности и, следовательно, точности отсчета, следовало бы применять цилиндрические резонаторы с колебаниями типа H_{01n} , при которых может быть получена наивысшая добротность. Но ввиду того, что в таких резонаторах имеется большое число ложных резонансов, и притом не кратных, при изготовлении волномеров чаще отдают предпочтение различным видам коаксиальных резонаторов с колебаниями типа ТЕМ. Нашли применение также резонаторы полукоаксиального, или гибридного, типа с колебаниями типа E_{010} .

Прежде чем рассматривать конструкцию волномеров, следует сказать несколько слов об особенностях их подключения к измеряемому объекту.

В диапазоне с.в.ч. колебательные контуры и фидеры передатчика и волномера полностью экранированы и утечка энергии в окружающее пространство очень небольшая. Обнаружить ее можно или при помощи весьма чувствительных приборов, или индикаторами обычной чувствительности при очень большой мощности станции. Поэтому в некоторых случаях волномер является составной частью конструкции (например, выходного фидера передатчика). Иногда для подключения волномера делают специальные выводы.

Обычно индикаторное устройство волномера используют не только для индикации момента настройки волномера на частоту генератора, но и для индикации наличия колебаний вообще. Волномер включается при этом по схеме, изображенной на рис. 59. Если волномер расстроен, то его поглощение невелико и при наличии генерации прибор дает отклонение. При настройке резонатора в резонанс с часто-

той генерируемых колебаний поглощение энергии волномером будет максимальным и показания прибора уменьшатся. Момент резонанса отмечается по минимальным показаниям прибора.

В схеме, показанной на рис. 60, моменту резонанса соответствует максимальное отклонение прибора индикатора,

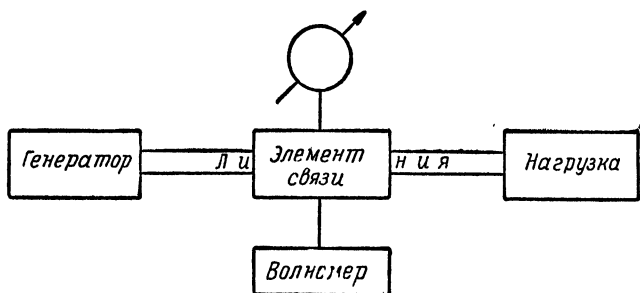


Рис. 59. Схема включения волномера для отсчета частоты по минимальному отклонению индикатора

а при расстройке резонатора показания прибора равны нулю.

Рассмотрим теперь некоторые конструкции волномеров.

На рис. 61 изображен разрез волномера десятисантиметрового диапазона. В этом волномере используется коак-

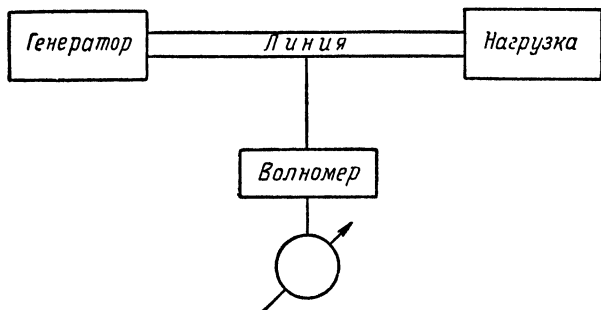


Рис. 60. Схема включения волномера для отсчета частоты по максимальному отклонению индикатора

сиальный резонатор с колебаниями типа ТЕМ. Собственно резонатор имеет длину в четверть волны и замкнут с одной стороны. Центральный проводник скользит в пружинной разрезной втулке так, что контакт вынесен из пучности тока, чем достигается более высокая добротность резонатора.

Конструкция волномера с колебаниями типа E_{010} приведена на рис. 62. Этот волномер рассчитан на работу в трехсантиметровом диапазоне. Он настраивается при помощи штыря, однако конфигурация поля и зависимость частоты

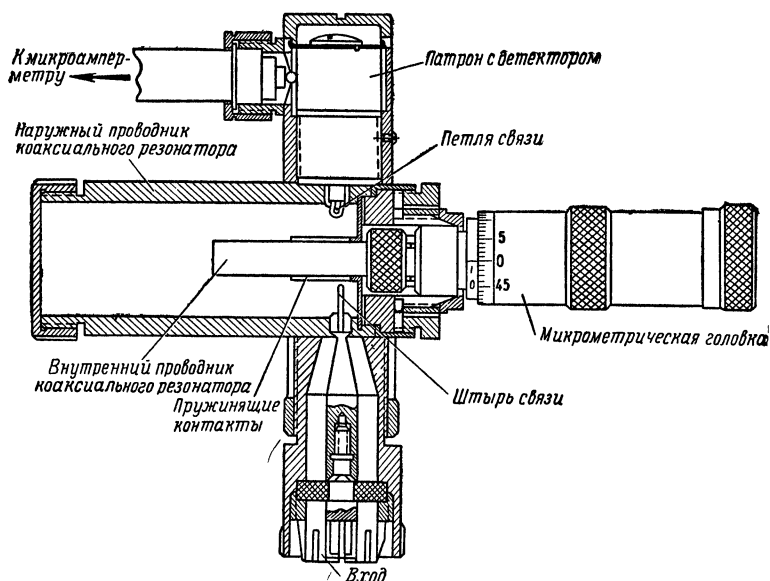


Рис. 61. Разрез волномера десятисантиметрового диапазона

от положения настраивающего стержня будут не такими, как в коаксиальном волномере.

Волномер с колебаниями типа E_{010} имеет своеобразную конструкцию бесконтактного замыкания поршня (рис. 63). Поршень и трубка, в которой он ходит, образуют разомкнутую коаксиальную четвертьволновую линию, входное сопротивление которой в точках aa равно нулю. Кольцевой паз представляет собой замкнутую четвертьволновую линию; его назначение — обеспечить механическое крепление, не создавая для разомкнутой линии нежелательной электрической нагрузки.

Рассмотренные типы волномеров обязательно нужно предварительно градуировать и при измерениях пользоваться графиком градуировки, так как они не имеют строго линейной зависимости длины волны от хода настраивающего поршня.

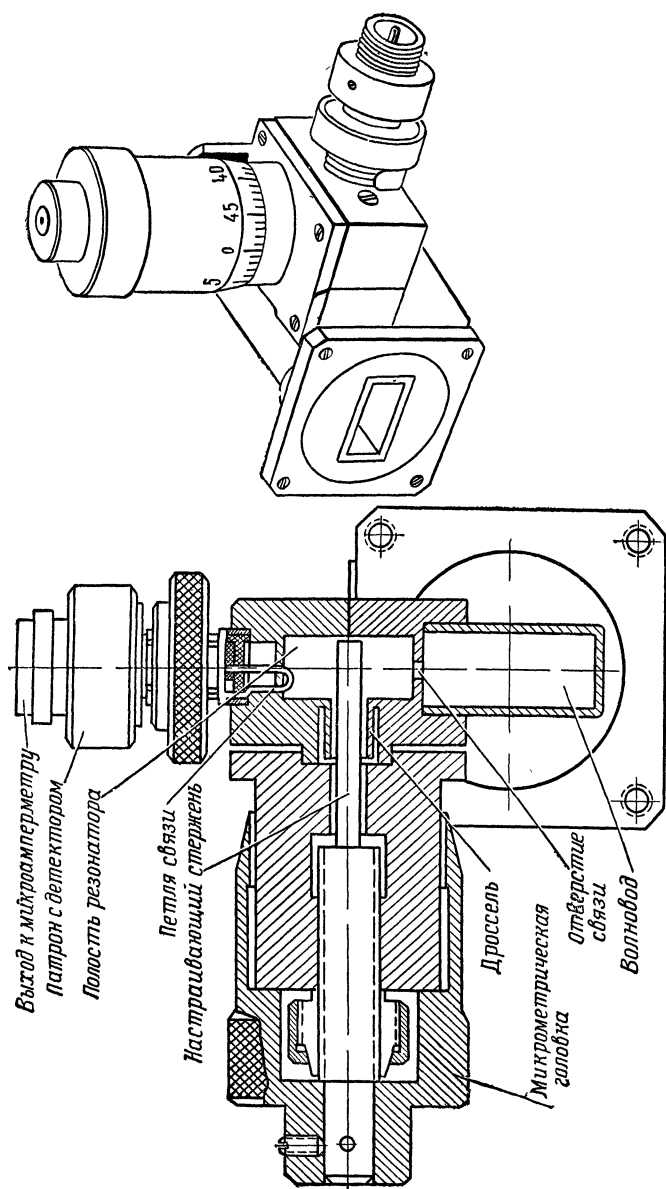


Рис. 62. Разрез и внешний вид волномера трехантиметрового диапазона

Этого недостатка нет у волномера с коаксиальным резонатором переменной длины, замкнутым с двух сторон. Зависимость между длиной такого резонатора и длиной волны имеет строго линейный характер.

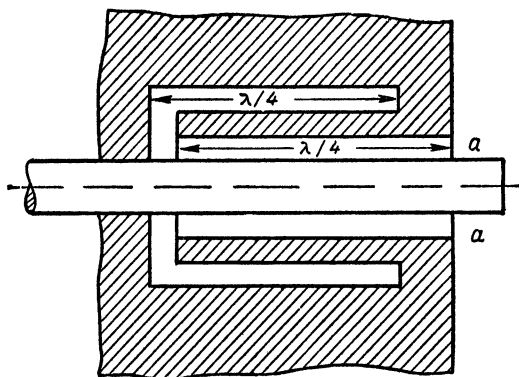


Рис. 63. Конструкция бесконтактного замыкания поршня

Контрольные резонаторы

Контрольные резонаторы — это объемные резонаторы, применяемые для проверки работы радиолокационной станции в целом.

Известно, что если возбудить в резонансной системе колебания и затем выключить их источник, то колебания не пропадут мгновенно, а будут затухать постепенно. Чем выше добротность резонатора, тем дольше будут существовать в нем колебания. На этом основано применение контрольных резонаторов в радиолокации.

Обычно резонатор, настроенный на частоту передатчика, слабо связывается с антенной радиолокационной станции (например, при помощи небольшой вспомогательной антенны, расположенной перед основной антенной станции). Импульс передатчика возбуждает колебания в резонаторе, которые продолжаются после прекращения импульса. Вспомогательная антенна излучает эти колебания, и они принимаются приемником.

Если существует какой-то минимально различимый приемником уровень сигнала, то время, за которое сигнал спадет до этого уровня, зависит от начальной величины сигнала, определяемой выходной мощностью передатчика,

а также от минимально различимого уровня сигнала, определяемого уровнем собственных шумов приемника. По времени спадаения сигнала можно судить о его величине и о чувствительности приемника, т. е. об исправности всей станции в целом.

На рис. 64 изображен примерный график импульса на выходе приемника при работе с контрольным резонатором. Ввиду перегиба амплитудной характеристики приемника верхняя часть импульса в большинстве случаев будет расширена (на рисунке это показано пунктиром).

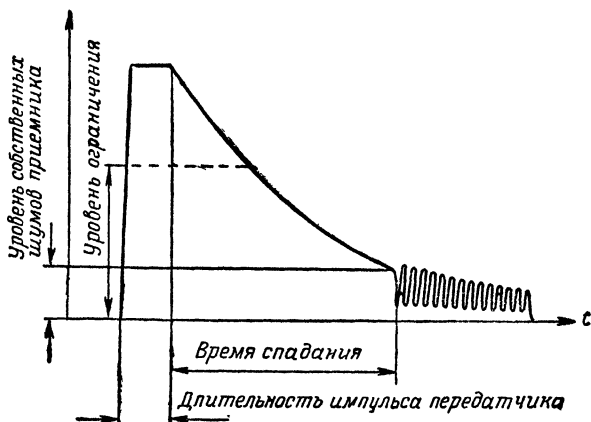


Рис. 64. График импульса на выходе приемника при работе с контрольным резонатором

Чтобы получить большое время спадаения, резонатор должен обладать высокой добротностью. Наивысшую добротность можно получить, как уже указывалось, применяя колебания типа H_{01n} в цилиндрическом резонаторе. Поэтому резонаторы такого типа и получили наибольшее распространение в качестве контрольных.

На рис. 65 изображен цилиндрический контрольный резонатор радиолокационной станции трехсантиметрового диапазона. Такой резонатор обладает чрезвычайно высокой ненагруженной добротностью (порядка ста тысяч и более).

Для проверки радиолокационных станций, работающих на более длинных волнах, резонаторы с колебаниями H_{01n} слишком громоздки. Поэтому там применяются тороидальные контрольные резонаторы.

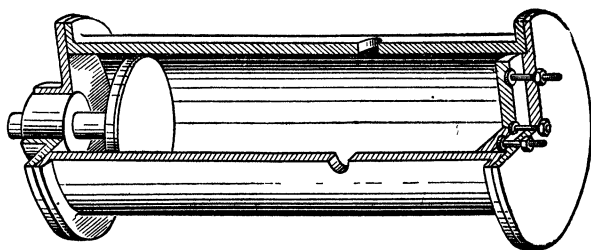


Рис. 65. Цилиндрический контрольный резонатор радиолокационной станции трехсантиметрового диапазона

Анализаторы спектра

Узкая полоса пропускания объемного резонатора означает, что он обладает высокой разрешающей способностью. Это свойство дает в ряде случаев возможность использовать объемный резонатор в качестве так называемого анализатора спектра.

Известно, что при амплитудной модуляции передатчика синусоидальным колебанием сигнал можно представить в виде несущей волны и двух боковых. Каждая новая синусоидальная составляющая добавляет новую пару боковых частот в состав модулированной волны. Совокупность распределения частот и амплитуд отдельных составляющих модулированного колебания называется его спектром. Чем больше модулирующих частот и чем теснее они расположены, тем теснее будут расположены точки на графике и тем острее должна быть резонансная кривая анализатора.

Добротности и соответственно полосы пропускания объемных резонаторов имеют такую величину, что позволяют получить нужную для анализа спектра разрешающую способность, не прибегая к сложной аппаратуре. Так, например, описанные в предыдущем параграфе контрольные резонаторы имеют разрешающую способность порядка 100 кГц.

Спектральную кривую снимают обычно по точкам: настройку резонатора изменяют небольшими скачками и записывают показания прибора индикатора в каждой точке. Такой метод получения спектральных характеристик отнимает довольно много времени, поэтому процесс снятия спектральной кривой стремятся автоматизировать,

На рис. 66 изображена блок-схема автоматического анализатора спектра с использованием объемного резонатора. Объемный резонатор при помощи механической тяги периодически перестраивается (в сравнительно небольших пределах) соответственно ожидаемой ширине спектра. Си-

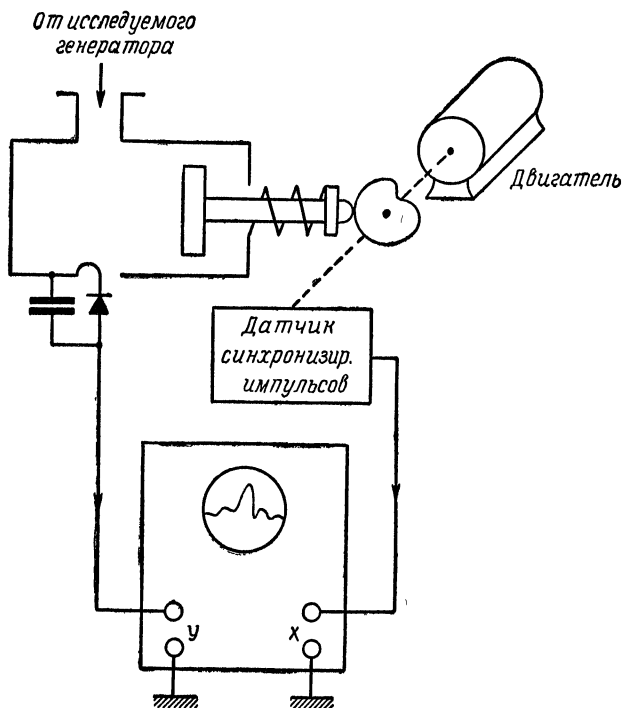


Рис. 66. Блок-схема автоматического анализатора спектра

стема, качающая поршень настройки, вырабатывает синхронизирующий импульс, который запускает развертку осциллоскопа. К вертикально отклоняющим пластинам осциллоскопа с выхода индикаторной системы резонатора подводится усиленное напряжение.

Если горизонтальное перемещение электронного луча и изменение частоты резонатора будут синхронны, то получившаяся на экране кривая изобразит спектральную характеристику исследуемого сигнала.

Важно отметить, что эта кривая непрерывно отражает все изменения спектральной характеристики, которые могут быть при регулировке генератора.

Применение объемных резонаторов для стабилизации частоты

Одним из основных факторов, наиболее сильно влияющих на частоту генерируемых колебаний, является собственная частота резонансной системы. Существенное влияние на частоту колебаний оказывает также электрический режим электронного устройства, сопряженного с резонансной системой. Если резонатор слабо связан с электронной системой, влияние неустойчивости режима питания на стабильность частоты значительно меньше. Частоту генерируемых колебаний и их стабильность в этом случае определяют параметры резонансной системы. Стабильность будет тем выше, чем жестче, стабильнее конструкция резонатора. Влияние неустойчивости режима будет тем меньше, чем меньше полоса пропускания резонатора, т. е. чем выше его добротность.

Для работы генератора необходимо, чтобы в цепи обратной связи удовлетворялись определенные фазовые и амплитудные соотношения. Эти соотношения будут удовлетворяться только в пределах полосы пропускания резонатора или около нее. При значительном уходе частоты за пределы полосы пропускания амплитуда возможных колебаний в резонаторе и, следовательно, амплитуда напряжения обратной связи окажутся малыми, и генерация не возникнет.

Вследствие жесткой конструкции объемных резонаторов и их высокой добротности удается получить на сверхвысоких частотах стабильность частоты триодных генераторов порядка 10^{-4} .

Однако не все генераторы обладают такой стабильностью. Резонансные системы магнетронов и клистронов обладают не очень высокой добротностью, но очень сильной связью резонатора с электронным потоком. Поэтому стабильность частоты их незначительна и обычно они используются в сочетании с различными системами автоподстройки.

Одна из мер повышения стабильности генерируемой частоты — подключение внешнего объемного резонатора с большой добротностью к генератору, собственный резонансный контур которого обладает малой добротностью и не

обеспечивает надлежащей стабильности. Это подключение можно осуществить, связав, например, резонатор с большой добротностью с рабочим резонатором. При этом первый резонатор вносит во второй большое реактивное сопротивление, в результате чего повышается добротность всей системы. Иногда в цепь обратной связи включают узкополосный резонатор. Существуют и другие способы стабилизации частоты на сверхвысоких частотах при помощи объемных резонаторов.

Применение объемных резонаторов в науке и технике

За последние годы в связи с широким внедрением радиометодов в народное хозяйство объемные резонаторы стали применяться во многих областях науки и техники.

Объемные резонаторы, например, используются как датчики механических перемещений в системах телеуправления и контроля, являются одним из основных узлов устройств для измерения свойств воздуха, применяются в ускорителях элементарных частиц и т. д.

При помощи объемных резонаторов проведен ряд точных исследований по определению истинной величины скорости света в пустоте, а также по исследованию явления сверхпроводимости различных металлов. Момент наступления сверхпроводимости отмечался по резкому изменению добротности резонатора, которая определялась по ширине полосы его пропускания. При переходе материала стенок резонатора в сверхпроводящее состояние резко повышалась добротность резонатора. Так, например, для небольшого оловянного резонатора, охлажденного до состояния сверхпроводимости, была получена на волне 10 см величина добротности порядка шести миллионов.

Надо полагать, что в ходе дальнейшего развития науки и техники область применения объемных резонаторов может еще более расшириться.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Резонансные системы	4
Резонансные свойства отрезков линий передачи	7
Линии передачи	—
Резонансные свойства отрезков линий передачи	12
Объемные резонаторы	16
Основные формы объемных резонаторов и типы полей в них	—
Эквивалентные параметры объемных резонаторов	24
Собственная резонансная длина волны резонатора	25
Добротность объемных резонаторов	27
Формулы для расчета эквивалентных параметров объемных резонаторов	29
Конструкции объемных резонаторов	31
Конструктивные особенности объемных резонаторов	—
Настройка объемных резонаторов	32
Виды связи с объемными резонаторами	37
Подавление нежелательных резонансов	39
Влияние внешних условий на работу резонатора	40
Применение объемных резонаторов	44
Объемные резонаторы в генераторах сверхвысоких частот	—
Резонаторы триодных генераторов	—
Резонаторы клистронных генераторов	48
Резонаторы магнетронов	51
Объемные резонаторы во входных цепях приемников	53
Волномеры	56
Контрольные резонаторы	60
Анализаторы спектра	62
Применение объемных резонаторов для стабилизации частоты	64
Применение объемных резонаторов в науке и технике	65

Герман Федорович Новоженев
ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ
Редактор инженер-подполковник Врублевский А. В.
Технический редактор Бабочкин А. Т.
Корректор Новицкая Г. Н.

Сдано в набор 10.8.57.
Подписано к печати 12.2.58.
Формат бумаги $84 \times 108^{1/32} 2^{1/8}$ печ. л. = 3,435 усл. печ. л.
3,2 уч.-изд. л.
Г-41193.

Военное Издательство
Министерства обороны Союза ССР
Москва, Тверской бульвар, 18.
Изд. № 5/8036. Зак. № 639.

1-я типография имени С. К. Тимошенко
Управления Военного Издательства
Министерства обороны Союза ССР
Москва, К-6, проезд Скворцова-Степанова, 3.

Цена 1 р. 15 к.

Цена 1 р. 15 к.