

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Брызгало С.Л., Лерер А.М., Нойкин Ю.М., Шевченко В.Н.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
к специальному лабораторному практикуму
«Измерения на СВЧ»
(специальность 013800 – радиофизика и электроника)

Часть IV
ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Ростов-на-Дону

2008

Кафедра прикладной электродинамики и компьютерного моделирования

Учебно-методическое пособие разработано

кандидатом физико-математических наук, доцентом Брызгалю С.Л.,
доктором физико-математических наук, профессором Лерером А.М.,
кандидатом физико-математических наук, доцентом Нойкиным Ю.М.,
доктором технических наук, профессором Шевченко В.Н.

Ответственный редактор доктор физико-математических наук, Заргано Г.Ф.

Печатается в соответствии с решением кафедры прикладной электродинамики и компьютерного моделирования физического факультета ЮФУ, протокол № 7 от 13 ноября 2007 г.

Лабораторная работа №4

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Цель работы – изучить цилиндрический резонатор, его резонансные свойства, параметры и характеристики, а также метод определения добротности резонаторов, имеющих один вход с помощью измерительной линии.

Самостоятельная работа:

- а) изучить пособие;
- б) занести в рабочую тетрадь:
 - название и цель лабораторной работы;
 - основные положения, формулы и рисунки, необходимые при ответе на контрольные вопросы.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В диапазоне СВЧ вместо контуров из сосредоточенной индуктивности L и ёмкости C используется полость, замкнутая металлической оболочкой и называемая объёмным резонатором. Резонаторы – это колебательные системы СВЧ диапазона. Современные типы полых резонаторов можно разделить на следующие основные группы:

- резонаторы, сводящиеся к отрезкам коаксиальных или волноводных линий передачи;
- резонаторы квазистационарного типа, имеющие явно выраженные ёмкость и индуктивность;
- резонаторы бегущей волны, которые представляют собой свёрнутую в кольцо линию передачи.

Резонаторы характеризуются:

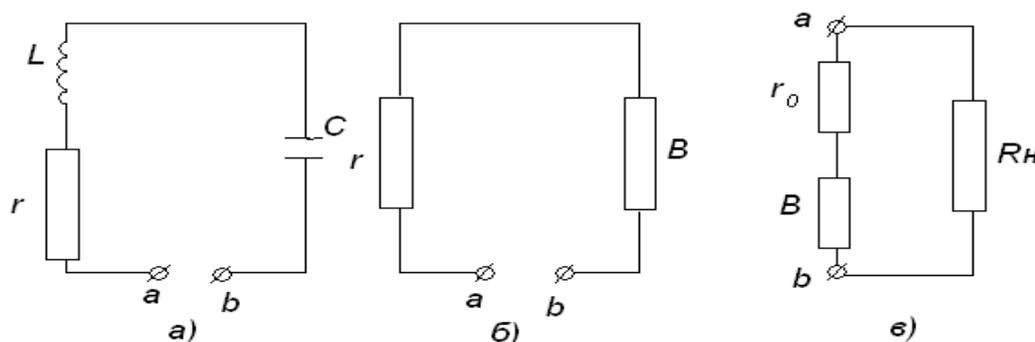
- типом колебаний;

- резонансной частотой;
- добротностью.

Объёмные резонаторы находят широкое применение в генераторах, усилителях, волномерах, фильтрах и т.д. в качестве колебательных систем СВЧ. Внутри замкнутой металлической полости устанавливается электромагнитный процесс, характеризующийся большим накоплением энергии.

2 ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПЕРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРА

Иногда достаточно знать лишь ряд эквивалентных параметров резонатора, не прибегая к детализации полевой картины колебаний в них. Каждый объёмный резонатор для данного типа колебаний приближённо можно представить в виде эквивалентной схемы с индуктивностью L , ёмкостью C и сопротивлением потерь контура $r = 1/\sigma$ [Ом.м] (рисунок 1,а). После перехода от параметров L и C к последовательной реактивности $X = (\omega L - 1/\omega C)$ приходим к эквивалентной схеме (рисунок 1,б).



- а – с индуктивностью L , ёмкостью C и сопротивлением потерь r ;
- б – с последовательной реактивностью; в – с внешней нагрузкой

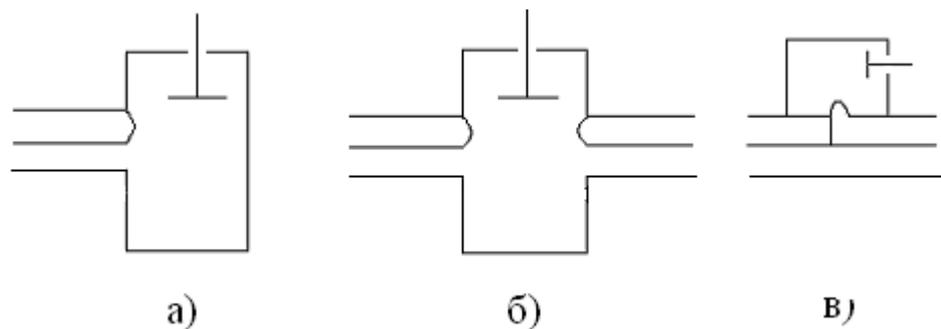
Рисунок 1 – Эквивалентные схемы резонаторов

На этой схеме r – активное сопротивление резонатора между выбранными точками, $B = 1/X$ – реактивная проводимость контура. Вводить эквивалентные параметры при рассмотрении процессов на СВЧ и переходить к анализу с помощью

эквивалентных схем нужно ещё и потому, что на пути микроминиатюризации колебательных систем, в частности резонаторов, конструкторы очень часто возвращаются к подобным контурам с сосредоточенными постоянными. К этой категории можно отнести, например, плоские системы, изготовленные методами печатной технологии, некоторые из микромодульных элементов и др.

3 СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗОНАТОРОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ТРАКТ

При выборе того или иного метода для измерения параметров резонатора решающую роль играют величина добротности и степень связи резонатора с внешней цепью. Например, измерение очень высоких добротностей резонаторов требует предъявления особых требований к измерительной схеме, в частности в отношении стабильности генераторов. Возможный метод измерений зависит также от количества элементов связи резонаторов с внешней цепью. Для резонаторов, имеющих один элемент связи (один вход) (рисунок 2,а), измерение аналогично измерению параметров двухполюсников на измерительной линии. Резонаторы с двумя элементами связи (рисунок 2,б) можно включать в измерительный тракт как проходные элементы, применяя методы исследования четырехполюсников.



а – с одним элементом связи; б – с двумя элементами связи; в – в виде ответвителя энергии

Рисунок 2 – Схемы включения резонаторов в высокочастотный тракт

Наконец, резонатор может подключаться к проходному тракту в виде ответвителя энергии (рисунок 2,в), тем самым, внося неоднородность в

высокочастотный тракт.

Таким образом, для определения добротности резонаторов, подключаемых к измерительной линии в виде оконечных нагрузок, могут быть использованы закономерности частотной зависимости входного полного сопротивления или коэффициента отражения вблизи резонансной частоты. Для резонаторов проходного типа этим целям может служить частотная зависимость их коэффициента передачи. В большинстве случаев предполагается, что элементы связи резонатора с внешней цепью не имеют потерь или эти потери незначительны. Методы измерения добротности, приведенные выше, основаны на этом предположении.

4 ДОБРОТНОСТЬ РЕЗОНАТОРА

Важнейшим параметром любого резонатора, так же как и любого низкочастотного контура, является его добротность. Значение добротности характеризует качества многих основных СВЧ устройств: стабильность генераторов, частотно-избирательные свойства фильтров, чувствительность приёмных устройств и т. д. С определением добротности связаны многие виды измерений и исследований электрических свойств материалов. Поэтому измерение параметров резонаторов, и в первую очередь добротности, является одним из важнейших на СВЧ.

4.1 Определение собственной добротности через параметры эквивалентной схемы

Собственная (ненагруженная) добротность Q_0 учитывает энергию, рассеянную в самом резонаторе на резонансной частоте. По определению

$$Q_0 = 2\pi \frac{\text{энергия, накопленная в резонаторе}}{\text{энергия, рассеиваемая за период}} \text{ — на резонансной частоте} \quad (1)$$

Несмотря на то, что уравнение (1) принято в качестве абсолютного

определения, добротность Q_0 можно выразить через более привычные величины.

Из электроники известно, что энергия, накопленная в резонансном контуре, выражается в виде

$$W_{\text{нак}} = \frac{1}{2} \bar{C} |V_0|^2, \quad (2)$$

где V_0 – амплитуда напряжения в контуре на резонансной частоте

\bar{C} – нормированная ёмкость.

Мощность, рассеиваемая в резонаторе на резонансной частоте, равна

$$P_{\text{рез}}|_0 = \frac{|V_0|^2}{2\bar{r}}, \quad (3)$$

где \bar{r} – нормированное сопротивление на резонансной частоте;

а энергия, рассеиваемая за период колебаний, составляет

$$W_{\text{за период}} = \frac{\pi |V_0|^2}{r\omega_0}. \quad (4)$$

Следовательно, с учётом уравнения (3)

$$Q_0 = \pi \bar{C} |V_0|^2 \left(\frac{\bar{r}\omega_0}{\pi |V_0|^2} \right) = \bar{C}\bar{r}\omega_0. \quad (5)$$

Запишем различные выражения для Q_0 через параметры контура:

$$Q_0 = \bar{C}\bar{r}\omega_0 = \frac{\bar{r}}{L\omega_0} = \sqrt{\frac{\bar{C}}{\bar{L}}\bar{r}} = C_0 R_0 \omega_0 = \frac{R_0}{L_0 \omega_0} = \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} R_0 = C_{\text{Э}} R_{\text{Э}} \omega_{\text{Э}} = \frac{R_{\text{Э}}}{L_{\text{Э}} \omega_0} = \sqrt{\frac{C_{\text{Э}}}{L_{\text{Э}}}} R_{\text{Э}} \quad (6)$$

Заметим, что эти выражения не зависят от применяемой эквивалентной схемы. Этого следовало ожидать, так как Q_0 не зависит от связи.

Собственную добротность можно также выразить через ω_0 и ширину полосы пропускания $\Delta\omega_0$ [5]:

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_0}, \quad (7)$$

где $\Delta\omega_0 = \omega_2 - \omega_1$, а ω_2, ω_1 – частоты половинной мощности.

Очень часто сопротивление в контуре r складывается из двух частей: собственного сопротивления r_0 и внесённого $r_{вн} = (\sqrt{L/C})^2 / R_n$ за счет подключения к контуру внешней нагрузки R_n (в соответствии с рисунком 1,в.). Соответственно, значение добротности может быть разбито на две части: собственную

$$Q_0 \approx \omega_0 L / r_0 \quad (8)$$

и внешнюю, определяемую свойствами нагрузки,

$$Q_{вн} \approx \omega_0 L / r_{вн} . \quad (9)$$

В этом случае добротность в уравнении $Q \approx \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{r} \frac{\partial X}{\partial \omega}$ можно назвать нагруженной добротностью Q_n и связь её с собственной (8) и внешней (9) найдём сложением пропорциональных сопротивлениям r_0 и $r_{вн}$ обратных величин

$$1/Q_n \approx (r_0 + r_{вн}) / \omega_0 L = 1/Q_0 + 1/Q_{вн} . \quad (10)$$

Итак, собственная добротность определяется потерями в самом резонаторе, а нагруженная добротность зависит ещё и от потерь во внешних цепях, подключённых к резонатору через элементы связи. При слабой связи резонаторов с внешними цепями значение нагруженной добротности близко к собственной добротности резонатора.

4.2 Внешняя добротность

Внешняя добротность $Q_{вн}$ обычно определяется следующим образом:

$$Q_{вн} = 2\pi \frac{\text{энергия, накопленная в резонаторе}}{\text{энергия, рассеиваемая во внешней цепи за период}} - \text{на резонансной частоте} \quad (11)$$

Понятие внешней добротности является искусственным и не имеет непосредственного отношения к практике. Из общего определения может быть сделан неправильный вывод, что при критической связи $Q_{вн}$ является бесконечно большой величиной, так как энергия во внешней цепи не рассеивается.

Определение (7) должно быть видоизменено следующим образом: «энергия, рассеиваемая во внешней цепи за период, при выключённом внешнем генераторе».

Эквивалентная схема, удобная для изучения внешней добротности, показана на рисунке 3, где нормированное активное сопротивление равно 1 независимо от внутренних потерь резонатора.

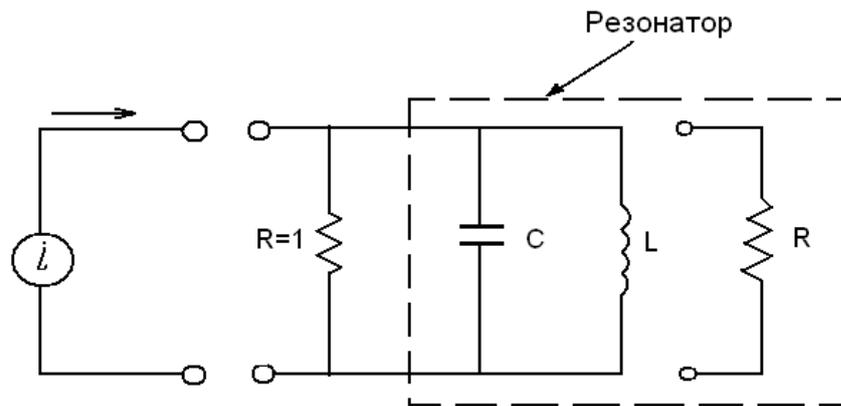


Рисунок 3 – Эквивалентная схема для определения внешней добротности

Аналогично уравнению (6) получим выражение для внешней добротности в виде

$$Q_{вн} = \bar{C}\omega_0 = \frac{1}{L\omega_0} = \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (12)$$

Можно также выразить внешнюю добротность через ω_0 и ширину полосы пропускания $\Delta\omega_{вн}$

$$Q_{вн} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{вн}}, \quad (13)$$

где $\Delta\omega_{вн} = \omega_{2вн} - \omega_{1вн}$, а $\omega_{2вн}$, $\omega_{1вн}$ – частоты половинной мощности.

Для заданной конфигурации резонатора при изменении внутренних потерь меняется только величина Q_0 , а величина $Q_{вн}$ остаётся неизменной. Напротив, изменение связи оказывает влияние только на величину $Q_{вн}$, при этом величина Q_0 не меняется. В этом смысле внешняя добротность $Q_{вн}$ является мерой связи: чем больше $Q_{вн}$, тем меньше связь.

4.3 Нагруженная добротность

Нагруженная добротность Q_n обычно определяется следующим образом:

$$Q_n = 2\pi \frac{\text{энергия, накопленная в резонаторе}}{\text{энергия, рассеиваемая в резонаторе}} \text{ — на резонансной частоте} \quad (14)$$

и во внешней цепи за период

Учитывая, что понятие энергии, рассеиваемой во внешней цепи, является искусственным (за исключением случая, когда внешний источник мощности выключается), определение нагруженной добротности также до некоторой степени искусственно.

Физический смысл, заложенный в это определение, заключается, во-первых, в том, что величина Q_n определяет постоянную времени всей системы, и, во-вторых, в том, что соответствующая данному значению Q_n полоса пропускания системы просто определяется по частотам половинной мощности резонатора (в качестве источника колебаний здесь подразумевается источник постоянной мощности, наиболее часто встречающийся в технике СВЧ).

Эквивалентная схема, удобна для рассмотрения нагруженной добротности Q_n , показана на рисунке 4.

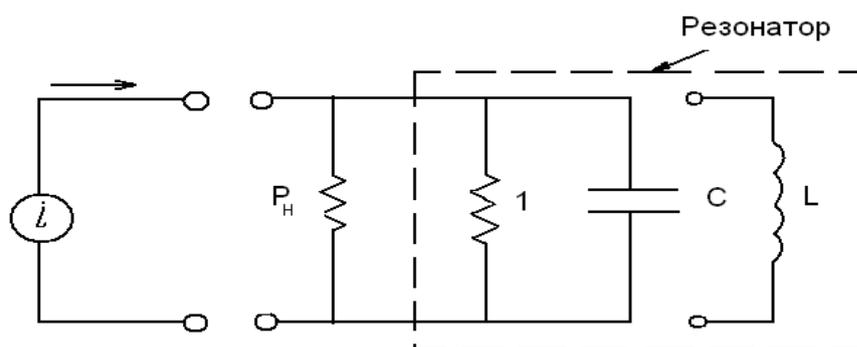


Рисунок 4 – Эквивалентная схема для определения нагруженной добротности

Нагруженную добротность можно выразить через параметры эквивалентной схемы аналогично уравнению (6), если \bar{r} заменить параллельным соединением \bar{r}

и 1:

$$Q_H = \bar{C} \frac{\bar{r}}{r+1} \omega_0 = \frac{\bar{r}}{(r+1)L\omega_0} = \sqrt{\frac{\bar{C}}{L}} \frac{\bar{r}}{r+1}. \quad (15)$$

Кроме того, величина Q_H может быть определена через ω_0 и ширину пропускания $\Delta\omega_H$

$$Q_H = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_H}, \quad (16)$$

где $\Delta\omega_H = \omega_{2H} - \omega_{1H}$, а ω_{HH}, ω_{1H} — частоты половинной мощности.

4.4 Соотношение между добротностями

Из выражений

$$Q_0 = \sqrt{\frac{\bar{C}}{L}} \bar{r}, \quad Q_{вн} = \sqrt{\frac{\bar{C}}{L}}, \quad Q_H = \sqrt{\frac{\bar{C}}{L}} \frac{\bar{r}}{r+1}$$

следует, что

$$\frac{Q_0}{Q_{вн}} = \bar{r} \text{ и } \frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{вн}}. \quad (17)$$

5 РЕЗОНАНСНАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ

В цилиндрическом резонаторе продольный размер l , кратный целому числу p полуволн в волноводе, из которого образован резонатор, отвечает условию:

$$l = p \frac{\Lambda}{2}, \quad p=1,2,3,\dots \quad (18)$$

Цилиндрический резонатор такой длины может быть создан из исходного круглого волновода, возбуждаемого на волне λ_0 , связанной с длиной волны Λ в исходном волноводе соотношением

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_{кр}^2}}}, \quad (19)$$

где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны круглого волновода.

Длина волны λ_0 , связанная теперь с расстоянием между жёстко закрепленными стенками является характерной для резонатора и может быть названа *резонансной длиной волны*

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{(1/\lambda_{кр})^2 + (p/2l)^2}}. \quad (20)$$

Выражение (20) справедливо для полого волновода любого поперечного сечения.

6 ВОЛНЫ ТИПА ТМ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ

Критическая длина волны для волн типа E_{ni} или TM_{ni} в круглом волноводе равна:

$$(\lambda_{кр})_{E_{ni}} = \frac{2\pi R}{\nu_{ni}}, \quad (21)$$

где R – радиус круглого волновода;

ν_{ni} – корни функции Бесселя.

Индекс n в уравнении (21) может принимать не только целочисленные, но и нулевые значения. Однако дробные значения n не имеют физического смысла, поскольку в этом случае не может быть обеспечена однозначность поля при обходе по азимуту на 2π .

Целочисленные значения корней ν_{ni} можно получить из таблиц бесселевых функций. В некоторых простейших случаях имеем:

$$\text{волна типа } E_{01}: \nu_{01} \approx 2,405; \lambda_{кр} \approx 2,62R. \quad (22)$$

$$\text{волна типа } E_{11}: \nu_{11} \approx 3,832; \lambda_{кр} \approx 1,64R. \quad (23)$$

Если теперь в (20) подставить значение $\lambda_{кр}$ для круглого волновода, то получим окончательное выражение резонансной длины волны в цилиндрическом

резонаторе в зависимости от вида Е-волны собственного колебания.

6 РЕЗОНАНС НИЗШЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВИДА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

Для резонансов Е-волн в цилиндрическом резонаторе . получаем с помощью (21):

$$(\lambda_0)_E = \frac{1}{\sqrt{\frac{p^2}{4l^2} + \left(\frac{v_{ni}}{2\pi R}\right)^2}}, \quad (24)$$

где R – внутренний радиус цилиндра;

l – высота цилиндра.

Числа n , i и p определяют соответственно вариацию поля по азимуту, радиусу и высоте резонатора. Через v_{ni} , как и прежде, обозначен i -й корень бесселевой функции первого рода n -го порядка.

Резонансы волн типа Н в цилиндрическом резонаторе определяются соотношением

$$(\lambda_0)_H = \frac{1}{\sqrt{\frac{p^2}{4l^2} + \left(\frac{\mu_{ni}}{2\pi R}\right)^2}}. \quad (25)$$

Через μ_{ni} в последнем уравнении обозначен i -й корень производной функции Бесселя первого n -го порядка.

Таким образом, в цилиндрическом резонаторе могут существовать виды колебаний E_{nip} и H_{nip} . Рассмотрение низших видов колебаний легко произвести, используя сведения о простейших типах волн в круглом волноводе.

Волне типа E_{0i} в круглом волноводе соответствуют виды колебаний в цилиндрическом резонаторе, которые следует обозначить E_{0lp} . Резонансная длина волны этих видов определяется согласно (24) и (22) выражением

$$(\lambda_0)_{E_{01p}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{p^2}{4l^2} + \frac{1}{(2,62R)^2}}} \quad (26)$$

Низшему виду колебаний должно соответствовать минимальное возможное значение p . Нетрудно видеть, что низший электрический вид колебаний в цилиндрическом резонаторе определяется условием $p = 0$. Резонансная длина волны для вида E_{010} оказывается равной:

$$(\lambda_0)_{E_{010}} \approx 2,62R, \quad (27)$$

т.е. совпадает с критической длиной волны типа E_{01} и не зависит от длины резонатора l

С физической точки зрения существование вида колебаний E_{010} вытекает из того факта, что при $\lambda = (\lambda_{кр})_{E_{01}}$, электрическое поле везде параллельно оси волновода. Следовательно, закорачивающие пластины на концах резонатора перпендикулярны к электрическим силовым линиям и не препятствуют существованию поля независимо от длины резонатора.

Структура поля в цилиндрическом резонаторе при виде колебаний E_{010} может быть получена из структуры волны типа E_{01} в круглом волноводе, если предположить $\lambda = \lambda_{кр}$. Тогда поперечные составляющие электрического поля исчезают, как показано на рисунке 5,а. Токи в стенках резонатора изображены на рисунке 5,б.

Детальный анализ показывает, что такой вид колебаний является лишь одним из бесчисленного множества видов, которые могут в общем случае существовать в цилиндрическом полом резонаторе.

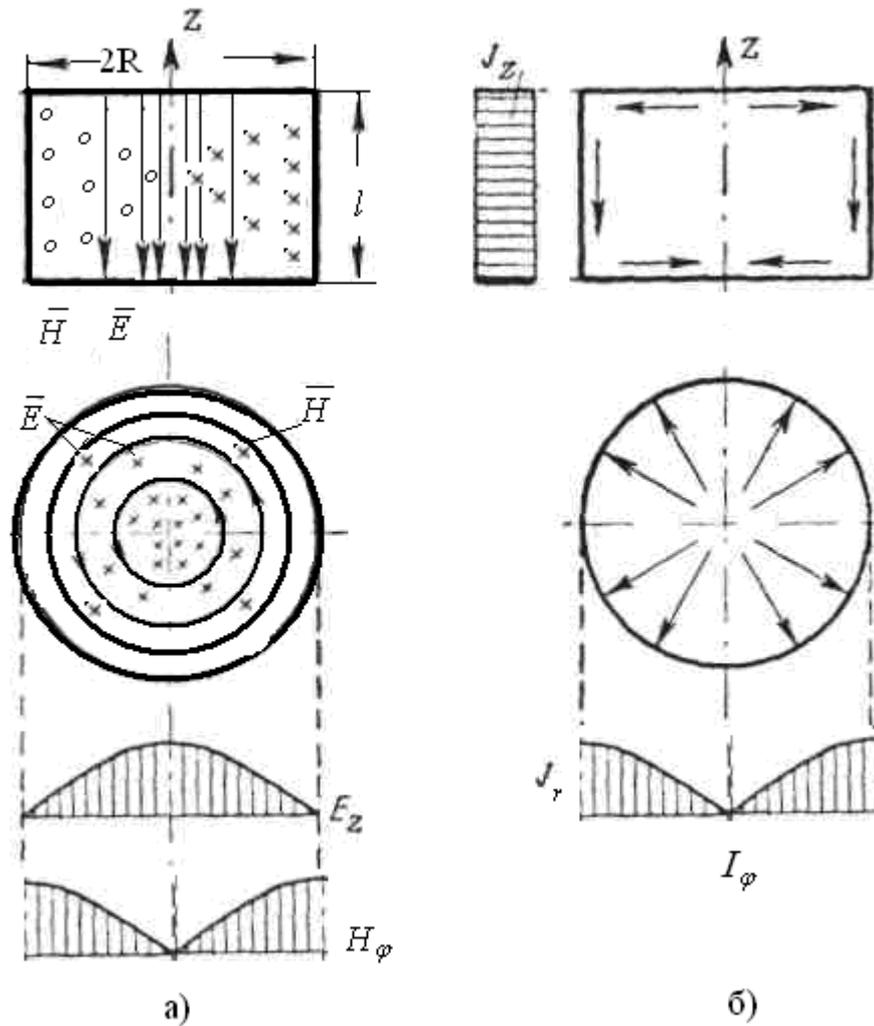


Рисунок 5– Структура и эюры поля (а) и токи в стенках цилиндрического резонатора (б) при виде колебаний E_{010}

Ближайшим электрическим видом колебаний является вид E_{011} . Соответствующая структура поля показана на рисунке 6.

Резонансная длина волны вида E_{011} определяется по уравнению (26) при $p=1$; она всегда меньше резонансной длины волны E_{010} . Однако при большой длине l вид колебаний E_{011} может оказаться близко расположенным по отношению к виду E_{010} . Это нежелательно, если в некотором диапазоне волн требуется иметь только один резонанс.

Низший вид колебаний E_{010} можно рассматривать не только с точки зрения закороченного круглого волновода, работающего в режиме $\lambda = \lambda_{кр}$. Часто

встречается трактовка цилиндрического резонатора с точки зрения закороченной по окружности радиальной линии. В связи с этим цилиндрический резонатор, возбуждённый на виде колебаний E_{010} часто называют также резонатором *типа радиальной линии*.

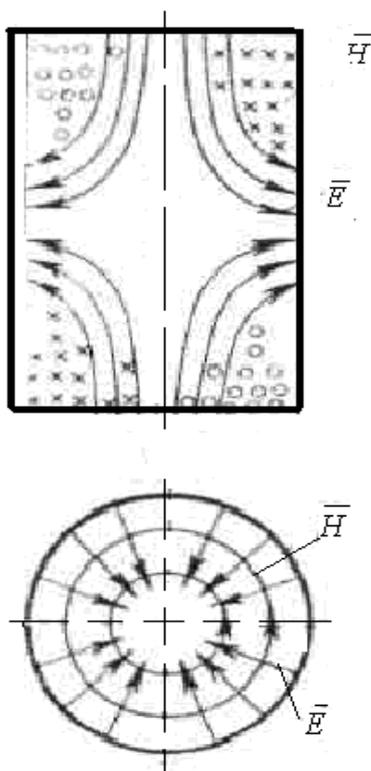


Рисунок 6 – Структура поля в цилиндрическом резонаторе при виде колебаний E_{011}

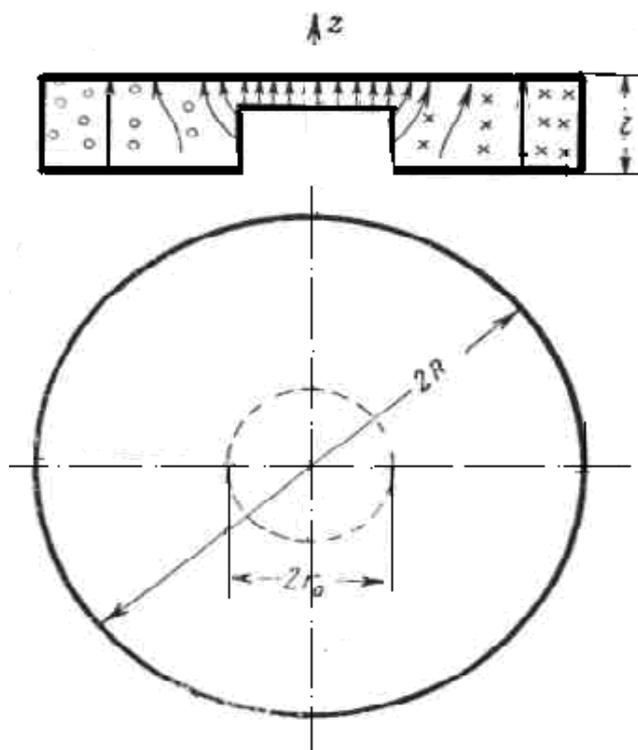


Рисунок 7 – Цилиндрический резонатор с укорачивающей ёмкостью, возбуждённый на виде колебаний E_{010}

При наличии выступа в центре цилиндрического резонатора, изображенного на рисунке 7, последний можно трактовать как *укороченный цилиндрический резонатор* или *укороченный резонатор типа радиальной линии*. Укорачивающее действие емкости проявляется в том, что радиус резонатора, необходимый для резонанса на заданной частоте, уменьшается по сравнению с радиусом резонатора без выступа.

Форма резонатора, показанного на рисунке 7, имеет некоторое сходство с

резонатором типа коаксиальной линии, нагруженной на ёмкость В обоих случаях резонаторы имеют цилиндрическую конструкцию и содержат ёмкостный зазор. Вместе с тем налицо и существенная разница. Резонатор типа коаксиальной линии, нагруженной на ёмкость, характеризуется наличием явно выраженного участка, где электрическое поле имеет радиальное направление, типичное для волны Т. Размеры этого резонатора должны удовлетворять примерным условиям

$$l > (R - r_0); \quad R < \frac{\lambda}{4}. \quad (28)$$

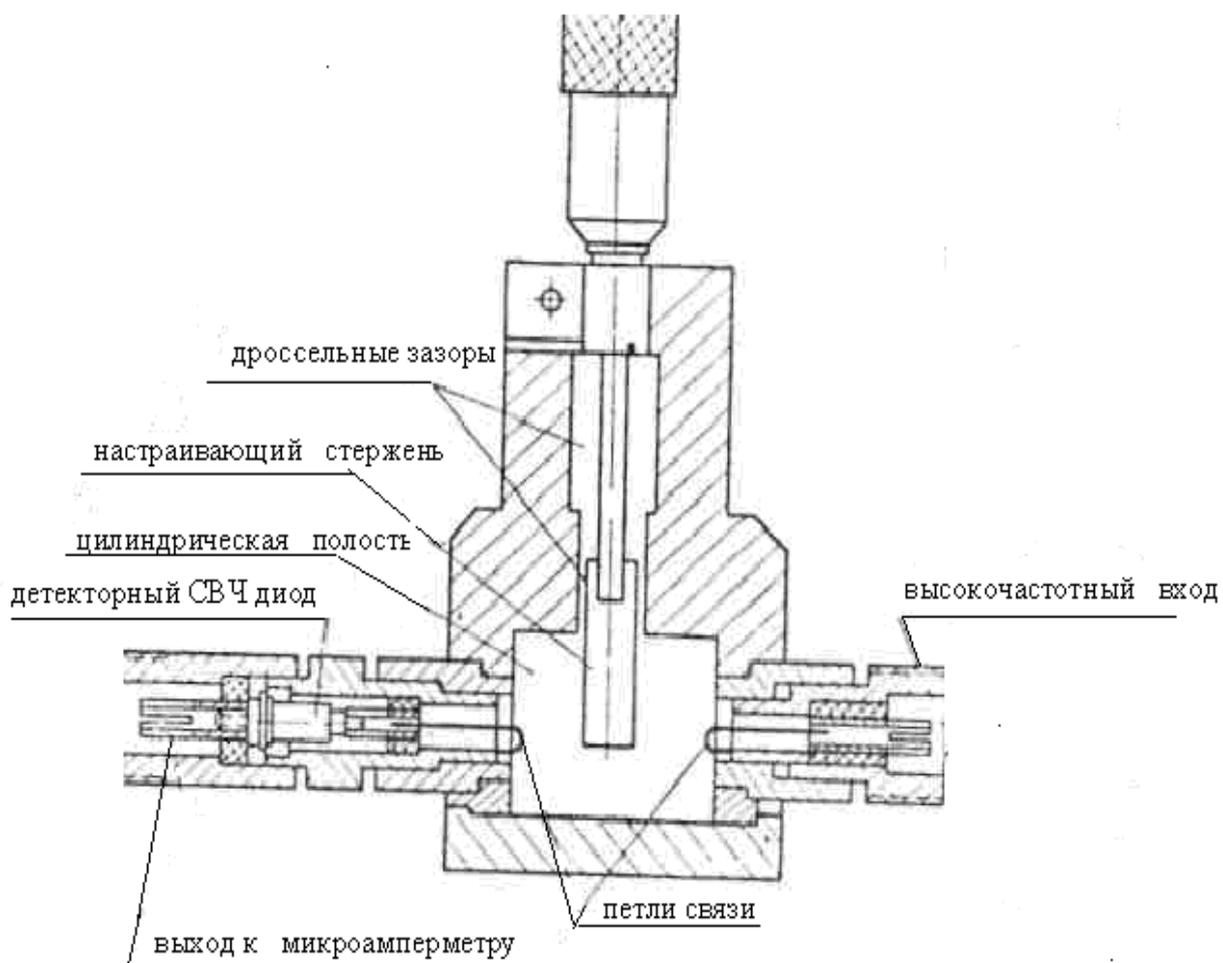


Рисунок 8 – Устройство проходного резонансного волномера с цилиндрическим полым резонатором, перестраиваемым с помощью укорачивающей емкости

Напротив, в цилиндрическом резонаторе с укорачивающей ёмкостью электрическое поле направлено главным образом вдоль оси z . Размеры резонатора характеризуются качественно соотношениями

$$l < (R - r_0); \quad R \sim \frac{\lambda}{4}. \quad (29)$$

Перестройка резонансной длины волны цилиндрического резонатора при виде E_{010} с укорачивающей ёмкостью легко осуществляется путём изменения длины выступа, входящего внутрь резонатора. Такая ёмкостная перестройка используется в резонансных волномерах. Пример устройства проходного волномера с описанным резонатором показан на рисунке 8.

Нагруженная добротность волномера доходит примерно до 5000. Подобные волномеры находят применение как на сравнительно длинных волнах (до 20–50 см), так и на волнах сантиметрового диапазона вплоть до волн длиной 2–3 см.

7 КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ РЕЗОНАТОРА

Введём понятие о так называемом коэффициенте полезного действия резонатора. Определим его как отношение мощности переданной в нагрузку (т.е. мощности полезных потерь) ко всей мощности, рассеянной в нагрузке и резонаторе

$$\eta_{рез} = \frac{P_{нагр}}{P_{ном}} \quad (30)$$

Как видно, $\eta_{рез}$ характеризует степень отдачи мощности из резонатора в нагрузку и поэтому является важной характеристикой колебательных систем.

Найдём значения мощностей в числителе и знаменателе (10) соответственно

$$P_{нагр} = \frac{W_{нагр}}{T} \quad \text{с учетом} \quad \frac{1}{Q_{вн}} \quad \frac{W_{зан}}{Q_{вн}}$$

$$(P_{ном})_н = \frac{(W_{ном})_н}{T} = \frac{2\pi}{T} \frac{W_{зан}}{Q_{вн}}, \quad P_{ном} = \frac{(W_{ном})_Г}{T} = \frac{2\pi}{T} \frac{W_{зан}}{Q_н}.$$

Эти значения после подстановки в (10) с последующей подстановкой $1/Q_{вн}$ из (3) дают выражения:

$$\eta_{\text{рез}} = r_n / (r_0 + r_n) \quad (31)$$

Подставляя в формулу (20) нагруженную и вносимую добротности из (3) и $Q_{\text{вн}} \approx \omega_0 L / r_{\text{вн}}$, получим выражение КПД резонатора через сопротивления:

$$\eta_{\text{рез}} = r_n / (r_0 + r_n). \quad (32)$$

Видно, что при собственных потерях резонатора, стремящихся к нулю, КПД резонатора стремится к единице и вся энергия контура рассеивается на нагрузке. При уменьшении или отсутствии сопротивления нагрузки ($r_n \rightarrow 0$) КПД резонатора уменьшается или обращается в нуль.

Если теперь в (20) подставить $\lambda_{\text{кр}}$ для круглого волновода, то получим окончательное выражение резонансной длины волны в цилиндрическом резонаторе в зависимости от вида Е-волны собственного колебания.

8 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ Q

Значения Q объёмного резонатора могут быть определены экспериментально различными способами, подразделяющимися на группы:

1. Метод передачи.
2. Метод измерения полного сопротивления.
3. Метод измерения затухания переходного процесса или метод измерения декремента затухания.
4. Динамические методы.

В первом из этих методов резонатор с входными и выходными зажимами используется как передающее устройство. Определяется зависимость выходного сигнала от частоты, получаемая в виде обычной резонансной кривой, по ширине полосы пропускания которой может быть вычислено значение Q. Несмотря на простоту этого метода, он требует вследствие ряда практических трудностей большого внимания к различным деталям, так как только в этом случае могут быть

получены точные результаты.

Второй метод основывается на экспериментальном определении зависимости входного полного сопротивления резонатора от частоты. Графические изображения зависимости от частоты полного сопротивления резонатора, отнесённого к положениям узла и пучности при расстройке, будут представлять собой соответственно окружность и прямую линию. Эти данные могут быть легко использованы для вычисления значений Q_0 , $Q_{нагр.}$ и $Q_{внеш.}$. Так как окружность может быть определена по трём точкам, то необходимо сделать только три независимых измерения полного сопротивления, чтобы получить все сведения о характеристиках резонатора и его устройства связи. Для повышения точности обычно используются дополнительные данные, позволяющие оценить систематическую и случайную ошибки.

Данные измерения полного сопротивления могут быть использованы несколькими способами. Можно воспользоваться сведениями о коэффициенте стоячей волны напряжения (КСВН) без соответствующих данных о фазе. Кривая зависимости КСВН от частоты содержит всю необходимую информацию. Использование этих данных аналогично использованию универсальной резонансной кривой колебательного контура на низких радиочастотах. И наоборот, можно воспользоваться только данными о фазе, не имея сведений о КСВН. Детальное рассмотрение этих способов показывает, что иногда можно выбрать тот из них, который удобнее в зависимости от условий эксперимента. Однако иногда правильный выбор способа определения характеристик резонатора приводит к большей точности. Рассмотрим, например, на рисунке 9 кривые входного полного сопротивления, нанесённые на круговую диаграмму, для трёх степеней связи.

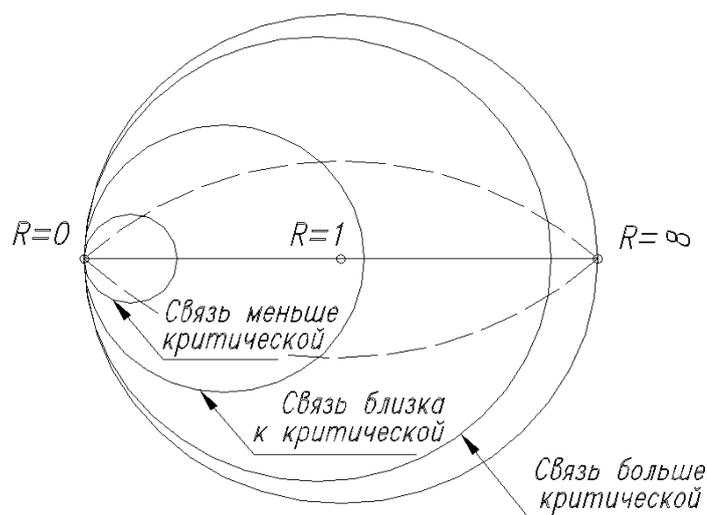


Рисунок 9—Входное полное сопротивление объёмного резонатора, пересчитанное в положение узла при расстройке и нанесённое на круговую диаграмму для трёх степеней свободы

При связи резонатора с передающей линией, близкой к критической, окружность пересекает действительную ось вблизи точки (1,0). В этом случае сведения, получаемые из данных о КСВН и фазе, равноценны. Все же большая часть получается, если полное сопротивление при каждом значении частоты измеряется как комплексная величина. При слабой связи ($\beta \ll 1$) геометрическое место точек входного полного сопротивления представляет собой весьма небольшую окружность, точки которой охватывают лишь незначительный интервал изменения фазового угла. Поэтому данные о фазе не могут дать высокой точности. В то же время КСВН, соответствующий точкам этой окружности, сильно меняется при изменении частоты. Определение интервала частот между точками, соответствующими “половинной мощности”, даёт в этом случае достаточно точные результаты.

Если связь значительно больше критической ($\beta \gg 1$), окружность приближается к границе круговой диаграммы; при этом КСВН велик и существенно не меняется, в то время как фазовый угол изменяется быстро и даёт необходимую информацию.

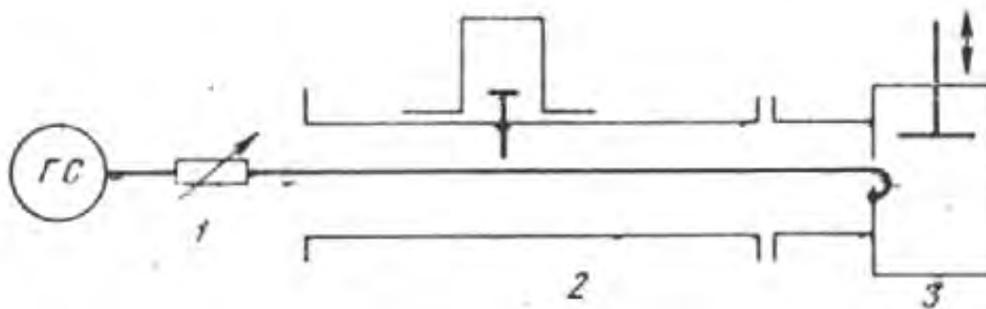
Третий метод – метод измерения декремента затухания, применим, в частности, для резонаторов с высоким Q . Он основывается на использовании явления затухания собственных колебаний в резонаторе.

Четвертая группа методов основывается на динамическом наблюдении характеристик резонатора. Такая методика очень удобна, так как при этом снижаются требования к стабильности частоты сигнала, и значения Q могут быть получены более быстро, иногда непосредственно путём отсчёта по прибору.

В данной работе используется второй метод – рассмотрим его подробнее.

9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТЕЙ РЕЗОНАТОРОВ, ИМЕЮЩИХ ОДИН ВХОД, МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Чтобы определить добротность резонатора, включённого как оконечная нагрузка (рисунок 5), с помощью измерительной линии необходимо найти зависимость полного сопротивления или коэффициента стоячей волны напряжения ρ от частоты и величину коэффициента связи k_c резонатора с внешним трактом.



1 — аттенюатор; 2 — измерительная линия; 3 — резонатор

Рисунок 11 — Схема измерения добротности резонатора, включённого в качестве оконечной нагрузки

Коэффициент связи k_c представляет собой отношение вносимого активного сопротивления внешней цепи к активному сопротивлению резонатора. Если коэффициент связи $k_c=1$, то связь называют критической. В большинстве случаев достаточно только измерения КСВН, что упрощает процесс измерения и даёт для средних и высоких значений добротности приемлемую точность.

Измерять также и фазу на входе исследуемого устройства необходимо с целью увеличения точности измерения при низких значениях нагруженной добротности, т. е. при связи, близкой к критической ($k_c \approx 1$).

Процесс измерения начинается с нахождения и фиксирования, положения минимума напряжения в измерительной линии при полной расстройке резонатора. При этом, если нет потерь в цепях связи, линия окажется нагруженной на чисто реактивное сопротивление. Если резонатор не перестраиваемый, то его расстройки от резонансной частоты добиваются перестройкой частоты генератора. Для резонаторов, имеющих средние (сотни и тысячи) и высокие (десятки тысяч и более) значения добротности, потребуется небольшое изменение частоты генератора для отстройки от резонанса, так что положение минимума изменится незначительно и мало повлияет на точность измерения. Если же необходима более высокая точность или добротность измеряемого резонатора ожидается невысокой, то следует измерить частотную зависимость положения минимума в области резонансной частоты резонатора и затем при дальнейших операциях относить измерения к тому положению минимума, которое соответствует данной частоте.

Установив зонд в положение минимума при расстройке, необходимо определить значение коэффициента связи k_c . Для этого, не меняя положения зонда на линии, резонатор настраивают в резонанс, чему должен соответствовать максимум или минимум напряжения стоячей волны на зонде, так как при резонансе сопротивление резонатора становится чисто активным.

Несовпадение положения минимума или максимума напряжения стоячей

волны при настройке резонатора в резонанс с положением минимума при расстройке указывает на допущенные ошибки и требует тщательной последовательной проверки всех операций. Во избежание неправильной настройки необходимо обеспечить активный характер импеданса в сторону генератора. Развязывающие аттенюаторы с поглощением на 10 – 15дБ и КСВН $K \approx 1,1-1,2$ практически полностью обеспечивают это требование. Если в положении узла при расстройке окажется минимум напряжения стоячей волны при резонансе, то связь будет меньше критической ($k_c < 1$), если окажется максимум напряжения, то связь – больше критической ($k_c > 1$).

Зная характер связи и измеряя КСВН при резонансе ρ_0 , можно найти коэффициент связи:

$k_c = 1/\rho_0$ — при связи меньше критической;

$k_c = \rho_0$ — при связи больше критической.

Для определения добротности резонатора Q_0 остаётся найти величину КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности на резонансной кривой. На этих частотах (f_1, f_2), отстоящих от резонансной частоты f_0 эквивалентного резонатора, значение активной составляющей импеданса резонатора равно значению реактивной составляющей ($R=|X|$). Так как в рассматриваемой методике фазовые углы не измеряются, необходимо пользоваться зависимостью КСВН от k_c в точках половинной мощности. Значения КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности, можно определить с помощью следующих выражений:

$$\rho_{0(1/2)} = \frac{2 + k_c + \sqrt{4 + k_c^4}}{2k_c} \quad (32)$$

для добротности резонатора в ненагруженном состоянии Q_0 на частотах f_1 и f_2 ;

$$\rho_{н(1/2)} = \frac{1 + k_c + k_c^2 + (1 + k)\sqrt{1 + k_c^2}}{k_c} \quad (33)$$

для добротности резонатора в нагруженном состоянии Q_n на частотах f_3 и f_4 ;

И, наконец, величины добротности находятся по значениям частот, при которых будут измеряться эти значения КСВН. Практически добротность находят, измеряя зависимость КСВН от частоты вблизи резонансной частоты f_0 . В результате добротность резонатора в ненагруженном состоянии определяется выражением:

$$Q_0 = f_0 / (f_2 - f_1), \quad (34)$$

где f_2 и f_1 – частоты соответственно выше и ниже резонансной, на которых измеряются значения КСВН $\rho_{0(1/2)}$ и $\rho_{н(1/2)}$.

Добротность можно выразить через величины относительной расстройки частоты на величины δf_2 и δf_1 от резонансной, т. е.

$$Q_0 = \frac{1}{\delta f_2 - \delta f_1},$$

$$\delta f_{1(2)} = \frac{f_{1(2)} - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f}. \quad (35)$$

Аналогично добротность нагруженного резонатора определяется выражением:

$$Q_n = \frac{f_0}{f_4 - f_3} = \frac{1}{\delta f_4 - \delta f_3}. \quad (36)$$

Для ряда характерных значений коэффициента связи k_c можно привести зависимости отношений КСВН в точках половинной мощности к значению КСВН при резонансе. При $k_c \ll 1$ (слабая связь; эквивалентная добротность близка к собственной добротности резонатора)

$$\left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0}\right)_0 = 2; \quad \left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0}\right)_H = 2. \quad (37)$$

При $k_c \gg 1$ (сильная связь)

$$\left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0}\right)_0 = 1; \quad \left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0}\right)_H = 2. \quad (29)$$

Отсюда видно, что при $k_c \gg 1$ КСВН в точках половинной мощности, как для Q_0 , так и для Q_H , равен удвоенному минимальному значению КСВН, соответствующему резонансной частоте. Следовательно, в этом случае по измерениям величин КСВН легко определить оба значения добротности. При $k_c \gg 1$ также легко находить значения нагруженной добротности, в то время как значение собственной добротности определить непосредственно невозможно, поскольку значение КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности, относительно резонансного КСВН изменяться не будет. В этом случае для вычисления собственной добротности резонатора нужно знать величину коэффициента связи k_c . Тогда:

$$Q_0 = Q_H(1 + k_c). \quad (39)$$

Зная величину коэффициента связи, можно также найти значение внешней добротности элементов связи. Из выражения (26) следует:

$$1/Q_H = 1/Q_0 + 1/Q_B, \quad (40)$$

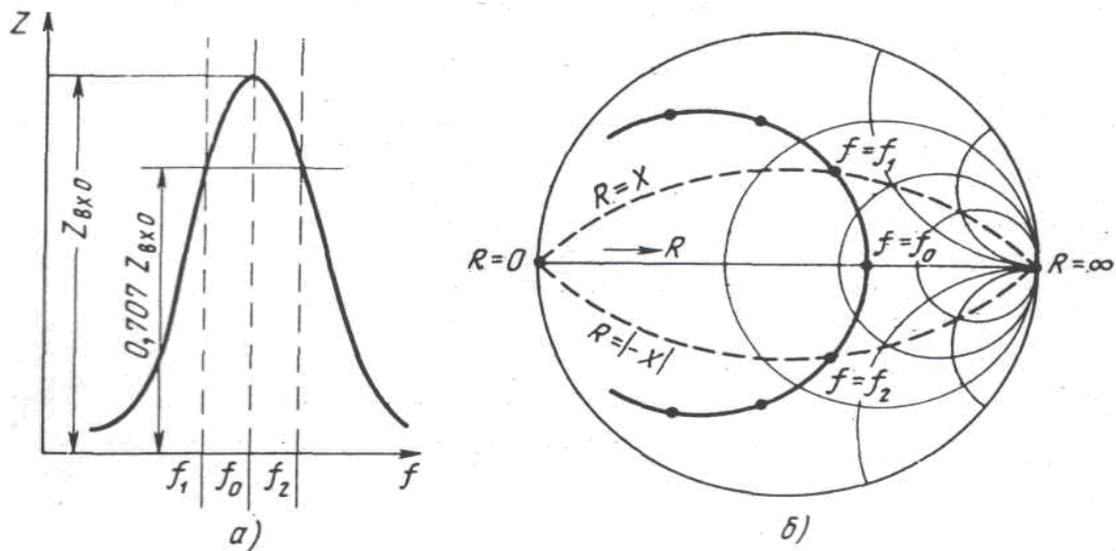
где $Q_B = Q_0/k_c$.

10 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРОВ С ОДНИМ ВХОДОМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Схема измерения та же, что и на рисунке 10. Первый этап методики измерения, как и в §9, состоит в нахождении опорной плоскости на линии, т. е. в

определении положения минимума напряжения стоячей волны при расстроенном резонаторе.

На следующем этапе находят зависимость входного полного сопротивления резонатора Z от частоты. Для этого, последовательно меняя частоту вблизи резонансной (f_0), измеряют значения полных сопротивлений на каждой частоте, и по этим данным строят кривую зависимости полного сопротивления от частоты (рисунок 11).



а – резонансная кривая; б – кривая, нанесённая на круговую диаграмму

Рисунок 11 – Кривые зависимости входного полного сопротивления резонатора от частоты

Максимум полного сопротивления Z соответствует резонансной частоте f_0 резонансного контура, подключённого к линии. Добротность определится соотношением:

$$Q_0 = f_0 / (f_2 - f_1), \quad (41)$$

где f_2 и f_1 – частоты соответственно выше и ниже резонансной, при которых величина измеряемого полного сопротивления составляет 0,707 от величины импеданса при резонансе.

Вместо построения кривой, изображённой на рисунке 7,а, значения полных

сопротивлений, зависящие от частоты, можно наносить непосредственно на круговую диаграмму полных сопротивлений. Во многих случаях это оказывается более предпочтительным, так как даёт более полную информацию о свойствах измеряемого резонатора как оконечного СВЧ устройства.

На круговой диаграмме, приведённой на рисунке 7,б, нанесена кривая изменения полного сопротивления резонатора при перестройке частоты. Точка, в которой кривая пересекает действительную ось (ось активных сопротивлений), соответствует резонансной частоте f_0 , при которой импеданс резонатора является чисто активным. Частоты f_1 и f_2 , соответствующие точкам половинной мощности, как уже указывалось в §3, будут определяться по точкам кривой полных сопротивлений, в которых активная составляющая полного сопротивления равна реактивной. Геометрическое место точек, соответствующих этому равенству $R = X$ и $R = -X$ представляет собой дуги окружностей, проходящих через крайние точки действительной оси круговой диаграммы (точки $R = 0$ и $R = \infty$). Центры этих окружностей лежат на окружности единичного коэффициента отражения (мнимой оси диаграммы) в точках $X / Z_0 = \pm 1$ (здесь Z_0 – волновое сопротивление тракта линии).

Таким образом, определив частоты f_1 и f_2 и подставив их в формулу (37), можно вычислить значение добротности ненагруженного резонатора.

При любых значениях коэффициента связи k_c пересечение кривой изменения входного полного сопротивления от частоты с окружностями $R = |\pm X|$ будет давать значения частот f_1 и f_2 для вычисления величины добротности ненагруженного резонатора.

Рассмотрим три характерные кривые изменения входного полного сопротивления при изменении частоты для трёх различных степеней связи резонатора с линией: связь значительно меньше критической ($k_c < 1$), близка к критической ($k_c \approx 1$), и больше критической ($k_c > 1$) (рисунок 12).

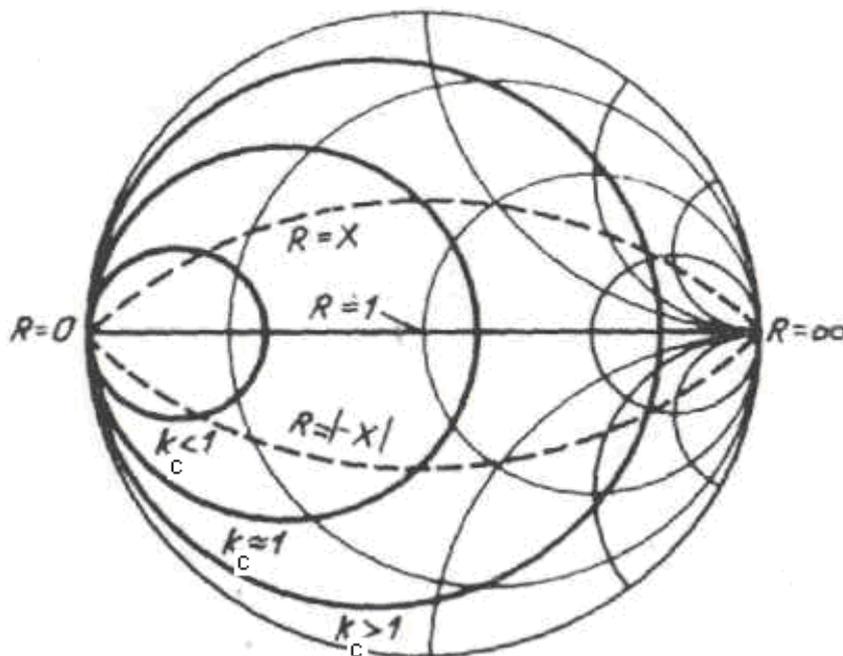


Рисунок 12 – Кривые изменения входного полного сопротивления резонатора при различных степенях связи

С помощью этих кривых можно показать, в каких случаях необходимо измерять комплексное значение входного сопротивления (КСВН и фазу) резонатора, а в каких случаях достаточно измерить только значения КСВН.

При связи резонатора с линией, близкой к критической ($k_c \approx 1$), кривая изменения полного сопротивления пересекает действительную ось вблизи центра круговой диаграммы. В этом случае ошибки в определении КСВН и фазы будут равноценны.

При слабой связи ($k_c \ll 1$) кривая изменения входного полного сопротивления от частоты представляет собой небольшую окружность, точки которой охватывают лишь незначительный интервал изменений фазовых углов, или реактивных составляющих. Следовательно, в этом случае лучше определять зависимости КСВН, так как фазовые измерения будут давать большие погрешности.

В случае сильной связи ($k_c \gg 1$) значительно превышающей критическую, окружность кривой изменения входного полного сопротивления приближается к

окружности единичного коэффициента отражения, т. е. к граничной окружности круговой диаграммы. В этом случае КСВН имеет большие значения, которые при перестройке будут меняться незначительно, в то время как фазовый угол будет изменяться существенно при самых малых перестройках. Следовательно, для определения добротности в этом случае необходимо измерять зависимость входного полного сопротивления резонатора от частоты.

11 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка состоит из генератора Г4-81, измерительной линии Р1-18, ферритового вентиля Э8-16 и изучаемого резонатора, проградуированного по частоте (рисунок 13).

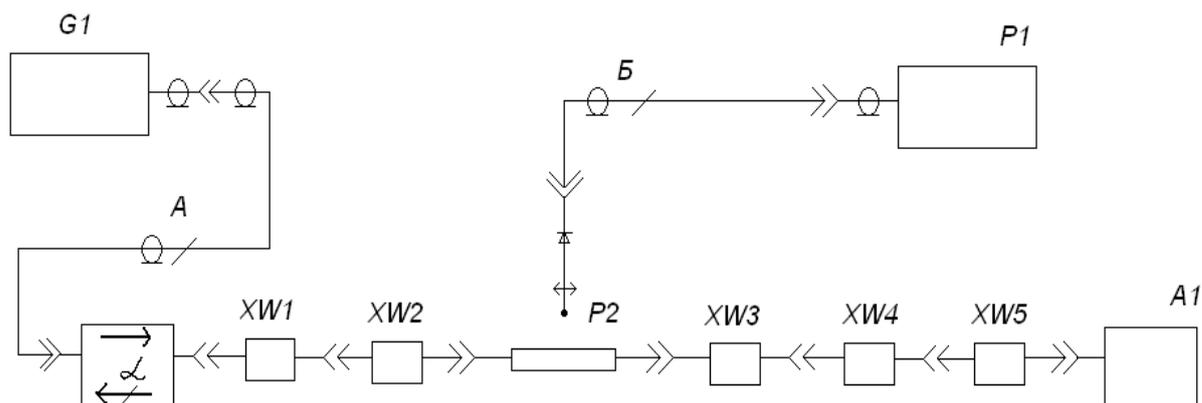


Рисунок 13 – Структурная схема лабораторной установки

На этом рисунке обозначены:

- A1— изучаемый цилиндрический резонатор;
- G1—генератор высокочастотный Г4-81;
- P1—измеритель отношений напряжений В8-7;
- P2—коаксиальная измерительная линия Р1-18;
- W1—вентиль ферритовый коаксиальный Э8-16;
- W2, W3—коаксиальные уголкового переходы;

XW2—коаксиальный переход Э2-115/3 типа «штырь-штырь»;

XW3—коаксиальный переход типа «гнездо-гнездо»;

XW4—коаксиальный переход типа «штырь-штырь»;

А—кабель высокочастотный из комплекта Г4-81;

Б—кабель низкочастотный из комплекта Р1-18.

Сигнал от генератора G1 поступает через ферритовый вентиль W1, обеспечивающий необходимую развязку между СВЧ трактом и генератором, в измерительную линию P3. Измерительная линия используется для измерения КСВН, характеризующего степень согласования детекторной секции А1 с основным трактом. Поскольку сигнал, поступающий с зонда измерительной линии, мал, используется селективный измерительный усилитель P1. Измерения КСВН проводятся в режиме амплитудной модуляции генератора СВЧ. При работе с измерительной линией усилитель должен быть настроен на частоту модуляции СВЧ-сигнала.

12 УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

ВНИМАНИЕ!

При подготовке рабочего места необходимо выполнить правила, изложенные в «Инструкции по технике безопасности для студентов в учебной лаборатории», предварительно изучив её. Изучить раздел «Указание мер безопасности» в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации» (ТО и ИЭ) к каждому прибору, входящему в установку, и руководствоваться ими при работе.

13 ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЯМ

1. Ознакомиться по «Техническому описанию и инструкции по эксплуатации» с устройством используемых приборов и принципом их работы.

2. Включить генератор и после его прогрева установить частоту 4900 МГц. Генератор должен работать в режиме внутренней модуляции, т.е. кнопка  должна быть в нажатом положении.

14 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. При расстроенном резонаторе определить положение опорной плоскости (узла при расстройке). Эту операцию во избежание ошибок проделать несколько раз, пользуясь методом «вилки».

2. Настроив резонатор в резонансе, измерить при помощи измерительной линии КСВН при резонансе и определить характер связи и величину коэффициента связи k_c .

3. Для нескольких значений частоты по обе стороны от резонанса в пределах полосы пропускания определить КСВН и смещение минимума напряжения в линии относительно опорной плоскости (во избежание влияния люфта перестройку резонатора по частоте проводить в одном направлении).

4. Измерить зависимость КСВН от частоты.

15 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Построить зависимость КСВН от частоты : $\rho = F(f)$.

2. Определить значения КСВН по частоте, соответствующей точкам половинной мощности $\rho_{0(1/2)}$.

3. Рассчитать Q_0, Q_H, Q_{BH} по формулам:

$$Q_0 = \frac{1}{\delta f_2 - \delta f_1}; \quad Q_H = \frac{1}{\delta f_4 - \delta f_3}; \quad Q_{BH} = \frac{Q_0}{1 + \rho_{0(1/2)}}.$$

16 УКАЗАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет должен содержать:

- все пункты задания;
- структурную схему лабораторной установки;
- результаты работы, представленные в виде графиков, таблиц и расчетов;
- выводы по работе и оценку полученных результатов (письменно).

17 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое резонатор? На какие группы можно разделить современные типы полых резонаторов?
2. Чем характеризуются резонаторы?
3. Какой резонатор называется объёмным и где он применяется?
4. Для чего вводят эквивалентные параметры при рассмотрении процессов на СВЧ?
5. Нарисуйте схемы включения резонаторов в высокочастотный тракт.
6. Собственная и нагруженная добротности. В чём их различия?
7. Как определить добротность резонатора, включённого как оконечная нагрузка, с помощью измерительной линии?
8. С помощью, каких выражений можно определить значения КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности?
9. Назвать три характерные кривые изменения входного полного сопротивления при изменении частоты для трёх различных степеней связи резонатора с линией? Что можно показать с помощью этих кривых?
10. Как определить коэффициент полезного действия резонатора?

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольман, В.И. Техническая электроника [Текст]/ В.И. Вольман, Ю.В. Пименов. – М.: Связь, 1971. – 487 с.
2. Семёнов, Н.А. Техническая электродинамика. [Текст]/ Н.А. Семёнов. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
3. Конструирование экранов и СВЧ устройств. [Текст]; под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1990. – 234 с.
4. Лебедев, И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот [Текст]: в 2-х т. учеб. для студентов вузов по спец. «Электронные приборы»/ И.В. Лебедев; под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1970. – Т.1. – 440с.
5. Альтман, Дж.Л. Устройства сверхвысоких частот [Текст]/ Дж.Л. Альтман. – М.: Мир, 1988. – 487 с.