

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю
Зав. каф. СВЧ и КР
_____ С.Н. Шарангович

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЁМНОГО РЕЗОНАТОРА

РУКОВОДСТВО

к лабораторной работе по дисциплинам “ Устройства СВЧ и антенны”,
«Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства»
для студентов специальностей 210302, 210303, 210304,
210403, 210405, 210312, 210313.

Разработчики:
доц. каф. СВЧ и КР
_____ Ж.М. Соколова
доц. каф. СВЧ и КР
_____ Е. В. Падусова

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	3
2 Элементы теории объемных резонаторов	3
2.1 Общие сведения	3
2.2 Структура поля	3
2.3 Основные параметры объёмного резонатора.....	5
2.4 Резонансная частота.....	6
2.5 Добротность объёмного резонатора	7
2.6 Эквивалентные схемы резонатора	8
2.7 Методы измерения добротности.....	9
2.8 Измерение активной проводимости резонатора	11
3 Экспериментальная часть.....	15
3.1 Описание установки и методики измерений.....	15
3.2 Домашнее задание.....	15
3.3 Порядок выполнения работы.....	16
4 Контрольные вопросы	17
5 Содержание отчета.....	18
6 Список литературы.....	18

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данной лабораторной работы является:

- ознакомление с некоторыми вопросами теории объемных резонаторов;
- проведение расчета основных параметров резонатора для различных типов колебаний, возбуждаемых в нем;
- ознакомление с двумя методами измерения основных параметров резонаторов и проведение экспериментальных измерений для цилиндрического резонатора.

2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

2.1. Общие сведения

В радиотехнике сверхвысоких частот в качестве колебательных систем используются замкнутые металлические объемы, называемые объемными резонаторами. Замкнутый объем образуется помещением металлических пластин на торцах отрезка передающей линии (волноводной, коаксиальной, полосковой и др.). В настоящей работе исследуется цилиндрический объемный резонатор, образованный из отрезка цилиндрического волновода.

2.2. Структура поля

Одним из основных отличий объемного резонатора от колебательного контура с сосредоточенными параметрами является его многомодовость. Объясняется это тем, что в резонаторе, как и в волноводе, могут возбуждаться продольные магнитные H_{mnp} и продольные электрические E_{mnp} типы колебаний (моды). Но в отличие от волноводов, кроме вариаций полей по поперечным координатам (φ и r) имеются вариации и по оси z , совпадающей с осью цилиндра (рис. 2.1). Каждый тип колебания характеризуется собственной структурой поля и собственной резонансной частотой f_0 . Под структурой понимают распределение и форму электрических и магнитных линий в резонаторе в фиксированный момент времени. Структуру поля

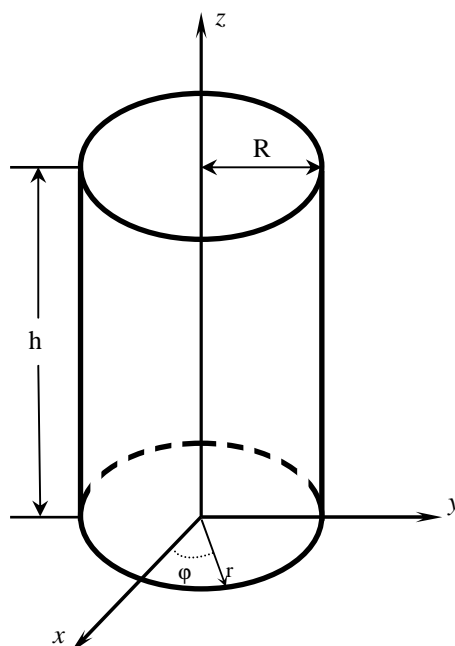


Рис 2.1. Цилиндрический объемный резонатор.

можно построить, пользуясь выражениями для компонент векторов \vec{E} и \vec{H} , полученными путем решений уравнений Максвелла в цилиндрической системе координат для замкнутого цилиндрического волновода.

Выражения, определяющие структуру поля колебаний H_{mnp} и E_{mnp} в цилиндрическом объемном резонаторе, имеют следующий вид:

колебания H_{mnp}

$$\begin{aligned}
 E_r &= \frac{m}{r} A \cdot J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right) \sin m \varphi \cdot \sin \left(\frac{p \pi}{h} z \right) \\
 E_\varphi &= \frac{\mu_{mn}}{R} A J'_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right) \cos m \varphi \cdot \sin \left(\frac{p \pi}{h} z \right) \\
 E_z &= 0 \\
 H_r &= -j \frac{\mu_{mn}}{\omega_0 R} \frac{p \pi}{h} A J'_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right) \cos m \varphi \cdot \cos \left(\frac{p \pi}{h} z \right) \\
 H_\varphi &= j \frac{\pi p m}{h r \omega_0} A J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right) \sin m \varphi \cdot \cos \left(\frac{p \pi}{h} z \right) \\
 H_z &= -j \left(\frac{\mu_{mn}}{R} \right)^2 \frac{1}{\omega_0} A J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right) \cos m \varphi \cdot \sin \left(\frac{p \pi}{h} z \right)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

колебания E_{mnp}

$$\begin{aligned}
 E_r &= -\frac{v_{mn}}{R \omega_0} A J'_m \left(\frac{v_{mn}}{R} r \right) \cos m \varphi \cdot \sin \left(\frac{\pi p}{h} z \right) \\
 E_\varphi &= \frac{m}{r \omega_0} \frac{\pi p}{h} A J_m \left(\frac{v_{mn}}{R} r \right) \sin m \varphi \cdot \sin \left(\frac{\pi p}{h} z \right) \\
 E_z &= \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{v_{mn}}{R} \right)^2 A J_m \left(\frac{v_{mn}}{R} r \right) \cos m \varphi \cdot \cos \left(\frac{\pi p}{h} z \right) \\
 H_r &= -j \frac{h}{r} A J'_m \left(\frac{v_{mn}}{R} r \right) \sin m \varphi \cdot \cos \left(\frac{\pi p}{h} z \right) \\
 H_\varphi &= -j \frac{v_{mn}}{R \omega_0} A J'_m \left(\frac{v_{mn}}{R} r \right) \cos m \varphi \cdot \cos \left(\frac{\pi p}{h} z \right) \\
 H_z &= 0
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ число вариаций поля по координате φ ;

$n = 1, 2, \dots$ число вариаций поля по радиусу r ;

$p = 0, 1, 2, \dots$ число вариаций поля по оси z ;

A - постоянная, определяемая подаваемой в резонатор мощностью;

μ_{mn} - n -ый корень производной функции Бесселя $J'_m(\chi r)$ $m^{\text{го}}$ порядка,

v_{mn} - n -ый корень функции Бесселя $J_m(\chi r)$ $m^{\text{го}}$ порядка. Первые значения этих корней приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1
Значение корней функции Бесселя

		V_{mn}			μ_{mn}			
n	m	I	2	3	n	I	2	3
0		2,405	5,520	5,135	0	3,832	7,016	10,174
I		3,832	7,016	10,174	I	1,841	5,335	8,536
2		5,135	8,417	11,620	2	3,052	6,705	9,965

Как следует из уравнений (2.1) и (2.2) каждая компонента поля в резонаторе зависит от трех координат φ, r, z . Поэтому структура поля представляется объемной картиной (рис. 2.2.). Чтобы правильно изобразить ее в пространстве, необходимо учесть, что на рисунках зависимость компоненты от параллельной ей координаты отображается изменением ее длины вдоль этой координаты, (например, $E_z \sim \cos \frac{\pi}{h} z$ на рис. 2.2б отображено изменением длины силовой линии при изменении координаты z и т.д.). Зависимость компоненты от координаты, ортогональной ей, отображается густотой силовых линий (см. ту же компоненту $E_z \sim I_0 \left(\frac{V_{01}}{R} r \right)$, густота силовых линий которой изменяется вдоль радиуса r по закону соответствующей функции Бесселя).

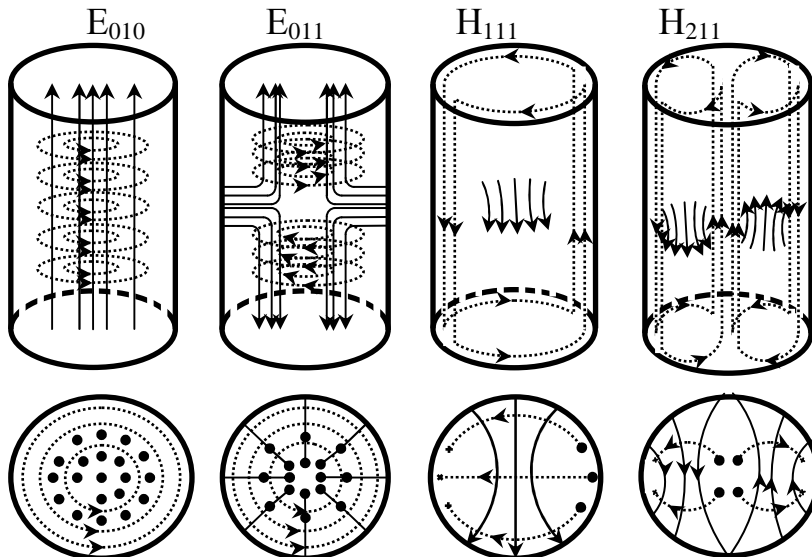
2.3 Основные параметры объёмного резонатора

Основными параметрами объёмного резонатора, представленного эквивалентным колебательным контуром на определённом типе колебаний являются:

резонансная циклическая частота f_0 , или круговая частота $\omega_0 = 2\pi f_0$, или резонансная длина волны $\lambda_0 = c/f_0$. Здесь c - скорость света в вакууме.

активная проводимость резонатора G или активное резонансное сопротивление R , являющиеся мерой активных потерь в резонаторе.

добротность резонатора Q определяет качество контура, выражается через активную G и реактивную B проводимости резонатора.



.....Линии поля Н

_____ Линии поля Е

Рис. 2.2. Структуры полей в цилиндрическом резонаторе для колебаний типа H_{mnp} и E_{mnp} .

2.4. Резонансная частота

Резонансная частота цилиндрического резонатора определяется выражением

$$f_0 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_{кр}}\right)^2 + \left(\frac{p}{2h}\right)^2}, \quad (2.3)$$

где $\lambda_{кр}$ критическая длина волны для разных типов колебаний в резонаторе:

$$\lambda_{кр}^E = \frac{2\pi R}{V_{mn}} \quad \text{и} \quad \lambda_{кр}^H = \frac{2\pi R}{\mu_{mn}};$$

ϵ_r и μ_r - относительные значения электрической и магнитной проницаемостей среды, заполняющей резонатор; в нашем случае для воздуха $\epsilon_r = \mu_r = 1$,

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света в вакууме. Критические длины волн некоторых типов колебаний приведены в таблице 2.2.

При расчёте резонансной частоты f_0 следует помнить, что для колебаний H_{mnp} индекс p может принимать значения $1, 2, 3, \dots$, а для колебаний E_{mnp} возможны значения $p=0, 1, 2, \dots$

Таблица 2.2

Значение $\lambda_{кр}$ круглого волновода

Типы волн	E_{01} E_{21}	E_{11}	H_{01} H_{31}	H_{11}	H_{21}
$\lambda_{кр}$	2,613R 1,223R	1,64R	1,64R 1,496R	3,41R	2,06R

Наглядное представление о спектре резонансных частот объемного цилиндрического резонатора дает диаграмма типов колебаний (рис. 2.3).

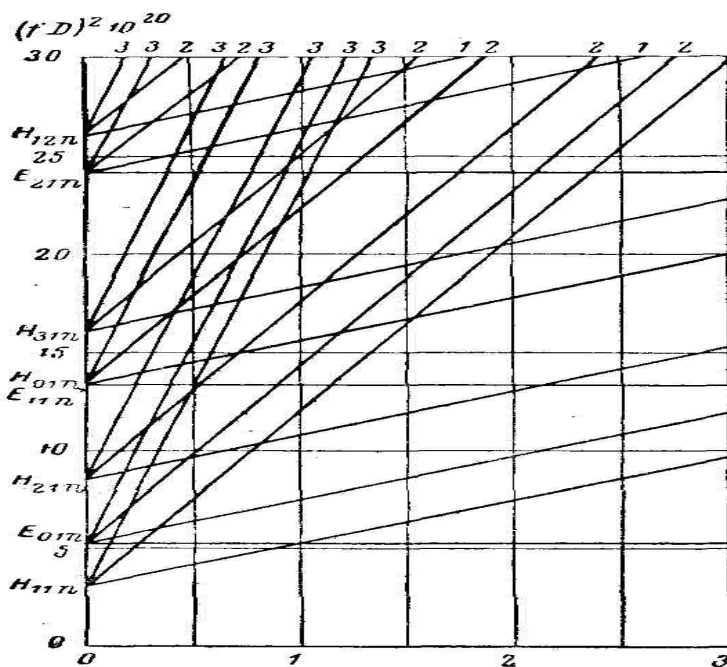


Рис.2.3. График типов колебаний в цилиндрическом резонаторе.

Колебания резонатора с наименьшими резонансными частотами называются основными. Для цилиндрического резонатора основными типами колебаний считаются колебания H_{111} и E_{010} . Может случиться, что одному значению резонансной частоты f_0 соответствует несколько различных типов колебаний. Такие колебания называются вырожденными. В цилиндрических резонаторах все колебания с индексом $m \neq 0$ имеют двукратное вырождение, проявляющее-

ся в том, что для каждого значения f_0 существуют две взаимно перпендикулярные структуры полей.

ся в повороте плоскости поляризации по координате φ на 90° , т.е. структуры этих типов колебаний одинаковы, но по углу φ повернуты друг относительно друга на 90° .

2.5. Добротность объёмного резонатора

Добротность объёмного резонатора для определённого типа колебаний определяют отношением [1]

$Q = 2\pi \frac{W}{W_n}$, где W – запасённая при резонансе внутри полости электромагнитная энергия; W_n – мощность полных потерь за время одного периода T .

Различным типам колебаний резонатора соответствуют различные структуры поля, различные значения W и W_n и, следовательно, различные добротности Q . Резонатор характеризуется тремя видами добротностей:

Q_0 -собственной добротностью, $Q_{вн}$ - внешней добротностью, Q_H - нагруженной добротностью.

$$Q_0 = 2\pi \frac{W}{W_{\text{расс.рез.}}}, \quad (2.4)$$

собственная добротность Q_0 определяется отношением запасённой в нём энергии W к мощности потерь $W_{\text{расс.рез.}}$, если резонатор не имеет элементов связи.

$$Q_{\text{вн}} = 2\pi \frac{W}{W_{\text{расс.нагр.}}}, \quad (2.5)$$

внешняя добротность $Q_{\text{вн}}$ учитывает мощность, расходуемую в цепях, нагружающих резонатор. Если резонатор имеет несколько элементов связи, то $W_{\text{расснагр.}}$ будет равна сумме мощностей, рассеянных в этих цепях.

$$Q_H = 2\pi \frac{W}{W_{\text{расс.рез.}} + W_{\text{расс.нагр.}}}, \quad (2.6)$$

Q_H – нагруженная добротность, учитывающая все виды потерь в резонаторе и нагрузках.

Собственная добротность резонатора рассчитывается по формулам [2], которые для типов колебаний H_{mnp} и E_{mnp} имеют вид:

$$Q_{0H_{mnp}} = \frac{\lambda_0}{2\pi\delta} \frac{\left[1 - \left(\frac{m}{\mu_{mn}}\right)^2\right] \left[\mu_{mn}^2 + \left(\frac{\pi p}{2}\right)^2 \left(\frac{2R}{h}\right)^2\right]^{3/2}}{\left[\mu_{mn}^2 + \left(\frac{\pi p}{2}\right)^2 \left(\frac{2R}{h}\right)^2 + \left(1 - \frac{2R}{h}\right) \left(\frac{\pi p}{2}\right)^2 \left(\frac{2R}{h}\right)^2 \left(\frac{m}{\mu_{mn}}\right)^2\right]}, \quad (2.7)$$

$$Q_{0E_{mnp}} = \frac{\lambda_0}{2\pi\delta} \left[\nu_{mn}^2 + \left(\frac{\pi p}{2}\right)^2 \left(\frac{2R}{h}\right)^2 \right]^{1/2} \left(1 + \frac{2R}{h}\right)^{-1}, \quad (2.8)$$

где $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ -резонансная длина волны резонатора для данного типа колеба-

ния; $\delta = 0,064 f_0^{-\frac{1}{2}}$ - глубина проникновения энергии в стенки резонатора.

Графическая зависимость $\frac{Q_0 \delta}{\lambda_0}$ от $\frac{2R}{h}$ различных типов колебаний представлена на рис. 2.4, с помощью которых можно также определить величину собственной добротности.

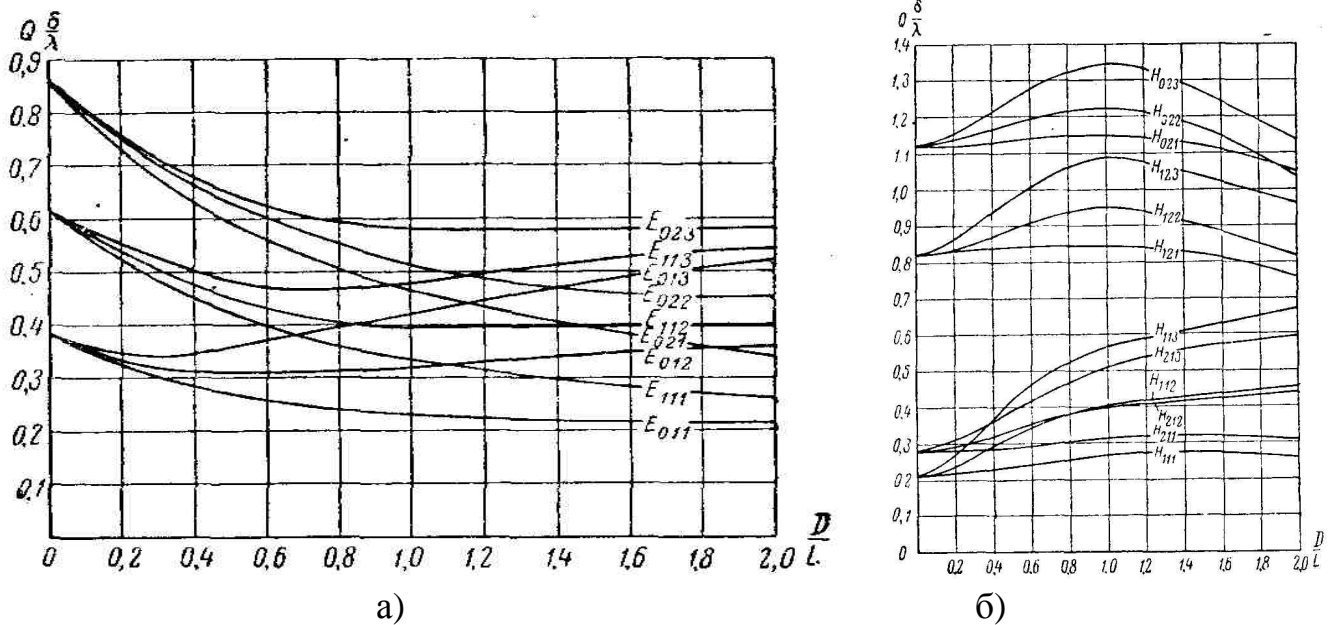


Рис.2.4. Зависимости добротностей резонатора от его размеров для разных типов колебаний.

2.6. Эквивалентные схемы резонатора

Способы возбуждения резонаторов и выводы из них энергии аналогичны соответствующим способам для волноводов. В качестве элемента связи резонатора с входной или выходной цепью чаще всего используется петля, плоскость которой должна быть перпендикулярна линиям магнитного поля рабочего типа колебаний (рис. 2.5).

В практических радиотехнических системах СВЧ диапазона часто используют проходную схему включения резонатора (схема четырёхполюсника), при которой через элемент связи на входе резонатор возбуждается, а через элемент



Рис. 2.5. Петлевой возбудитель.

связи на выходе из резонатора выводится энергия. Резонатор, возбуждаемый на конкретном типе колебаний, можно представить эквивалентным параллельным колебательным контуром (рис.2.6б). На этой эквивалентной схеме Y_{01} и Y_{02} – волновые проводимости входной и выходной линий, G – собственная активная проводи-

мость резонатора в плоскости максимального напряжения -АА. Эквивалентная схема (рис. 2.6б) легко может быть сведена к схеме двухполюсника (рис.2.6в) путём трансформации проводимости Y_{02} к сечению АА резонатора, которая может быть выполнена по соотношению

$$Y'_{02} = G \frac{Q_0}{Q_{\text{вн. вых.}}} \quad (2.9)$$

Трансформированная активная проводимость Y'_{02} параллельна собственной активной проводимости резонатора G и полученный контур можно характеризовать новой величиной “собственной добротности” Q'_0 , которая связана с Q_0 следующим образом

$$Q'_0 = Q_0 \frac{G}{G + Y'_{02}} \quad (2.10)$$

По существу, это добротность резонатора, в котором кроме собственных потерь учтены потери в выходном элементе связи.

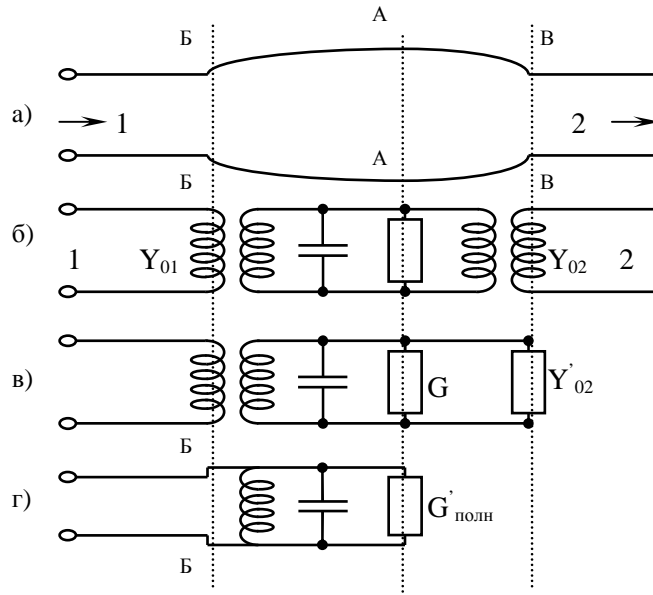


Рис.2.6.Эквивалентная схема нагруженного резонатора.

Добротность Q'_0 может быть измерена, но для пояснения метода измерения следует провести вторую трансформацию параметров резонатора к сечению ББ, по уравнению

$$G'_{\text{полн.}} = Y_{01} \frac{Q_{\text{вн. вх.}}}{Q'_0} = Y_{01} \left(1 + \frac{Q_{\text{вх.}}}{Q_0} \right). \quad (2.11)$$

Полученный параллельный колебательный контур (рис.2.6г) является нагрузкой входной линии. При настройке резонатора в резонанс, его реактивная проводимость равна нулю и на конце входной линии будет находиться активная проводимость $G'_{\text{полн.}}$. Она может быть определена с помощью измерительной линии, включённой на входе резонатора.

2.7. Методы измерения добротности

Все существующие способы измерения добротности резонатора можно отнести к методам либо четырёхполюсника, либо двухполюсника.

2.7.1. Методом четырёхполюсника по резонансной кривой измеряется полоса пропускания объёмного резонатора возбуждённого на определённом типе колебаний (рис.2.7). Для этого на выходе резонатора включается индикаторное устройство, на входе - генератор, перестраиваемый в диапазоне частот.

Нагруженная добротность определяется

$$Q_n = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (2.12)$$

где $\Delta f = f_2 - f_1$ - полоса частот резонатора на уровне $0,5 I_{\max}$.

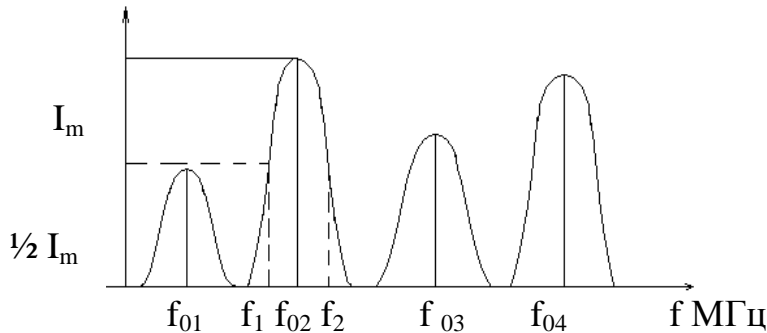


Рис. 2.7. Резонансные кривые различных типов колебаний в резонаторе.

2.7.2. Метод двухполюсника позволяет кроме нагруженной добротности резонатора Q_n измерить “собственную” Q'_0 , учитывающую потери в выходной цепи, и внешнюю $Q_{вн.вх.}$. Основан он на использовании измерительной линии, включенной на входе резонатора. С помощью линии измеряется активная и реактивная проводимости резонатора $G'_{полн.}$ и B (рис.2.6г). Напомним, что собственная добротность Q_0 изолированного колебательного контура рассчитывается по формуле

$$Q_0 = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{G_0} \left(\frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (2.13)$$

Эта формула получается из выражений $Q_0 = \frac{\omega C}{G_0}$ и $B = \omega C \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC} \right)$. Преобразовав последнее соотношение, с учётом $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$, получим в узкой полосе рабочих частот

$$\left(\frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} = 2C$$

и, следовательно, формулу (2.13). По аналогии, может быть определена упомянутая выше “собственная добротность”

$$Q'_0 = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{G'_H} \left(\frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (2.13б)$$

Если проводимости входной и выходной линий равны, $Y_{01}=Y_{02}$, то нагруженная добротность тоже может быть выражена через параметры G'_H и $\left(\frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0}$ следующим образом

$$Q_n = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{(G'_H + 1)} \left(\frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0}, \quad (2.14)$$

– а вносимая добротность или внешняя в виде соотношения

$$Q_{\text{вн.вх}} = \frac{\omega_0}{2} \left(\frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} \quad \text{или}$$

$$Q_{\text{вн.вх.}} = 2Q_0 Q_H / Q_0 - Q_H = G'_H Q'_0 \quad (2.15)$$

По известным Q_H и $Q_{\text{вн.вх.}}$ можно определить Q_0 , используя уравнение

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_H} - \frac{2}{Q_{\text{вн.вх.}}} \quad (2.15a)$$

Формула (2.14) записана для случая согласования выходных линий резонатора с подключёнными к ним нагрузками. Если в реальной установке это условие не выполняется, то результаты измерений Q_H проведённые по схеме четырёхполюсника и двухполюсника могут не совпадать. В этом случае истинной нагруженной добротностью следует считать Q_H , измеренную методом четырёхполюсника. В формулах (2.13÷2.15) использованы нормированные значения проводимостей $G_H = \frac{G_H}{Y_{01}}$ и

$B = \frac{B}{Y_{01}}$ (Y_{01} -волновая проводимость линии на входе резонатора).

При расчётах добротностей в формулах (2.13 ÷ 2.15) можно использовать частоту f вместо частоты ω . Как активная проводимость G'_H , так и скорость изменения реактивной проводимости $\left(\frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0}$ могут быть измерены методом измерительной линии с помощью круговой диаграммы полных проводимостей.

2.8. Измерение активной проводимости резонатора

Как известно, диаграмма полных проводимостей представляет семейство взаимно ортогональных окружностей $G = \text{const}$ и $B = \text{const}$, ограниченных окружностью единичного радиуса $|p| = 1$ ($|p|$ -модуль коэффициента отражения). В центре окружности $|p| = 0$. Активная проводимость резонатора в полосе частот, примыкающей к f_0 , практически неизменна. Поэтому входная проводимость резонатора при изменении частоты в этой полосе будет лежать на окружности $G = \text{const}$ (в нашем случае это будет $G_H = \frac{G_H}{Y_{01}}$). Активная проводимость резонатора зависит от степени

связи его с входной передающей линией и может быть:

- либо $G_H > 1$ при слабой связи, и тогда $G_H = K_{\text{сво}}$;
- либо $G_H < 1$ при сильной связи, но тогда $G_H = 1/K_{\text{сво}}$;
- либо $G_H = 1$ при оптимальной связи.

Для измерения активной проводимости с помощью измерительной линии, включенной на входе резонатора, нужно снять зависимость коэффициента стоячей волны ($K_{\text{св}}$) от частоты в пределах полосы пропускания резонатора, возбужденного на определенном типе колебаний. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны, очевидно, будет иметь вид, представленный на рис. 2.8.

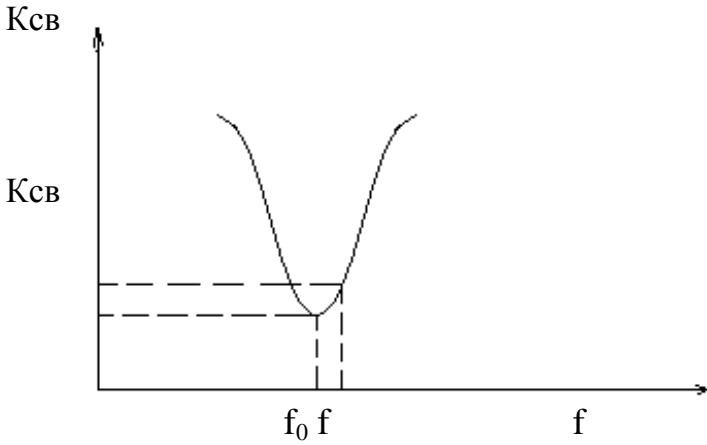


Рис. 2.8. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты.

Из рисунка следует, что при резонансе, когда реактивная проводимость отсутствует, $K_{св0}$ будет минимален, и, как уже упоминалось, равен $K_{св0} = G_H$ в случае слабой связи. При сильной связи величина $K_{св0} = \frac{1}{G_H}$. При оптимальной связи $K_{св0} = 1$.

В первом случае окружность G_H проходит ниже центра круговой диаграммы полных сопротивлений (рис.2.9а), во втором - она охватывает центр диаграммы (рис.2.9а) и в третьем - проходит точно через её центр (рис.2.9а).

Следовательно, одному значению $K_{св0} \neq 1$ соответствуют две возможные степени связи резонатора с нагрузкой. Поэтому, зная $K_{св0}$, ещё нельзя однозначно определить величину $G'_{полн.}$. Для её определения нужно установить степень связи резонатора с передающей линией. О степени связи можно судить только по характеру изменения фазы коэффициента отражения в зависимости от частоты в полосе резонансных частот резонатора (зависимость $l_{мин}/\lambda = \varphi(f)$).

Модуль коэффициента отражения связан с коэффициентом стоячей волны следующим выражением $|p| = \frac{K_{св} - 1}{K_{св} + 1}$, то окружности равного $K_{св}$ являются окружностями равного $|p|$.

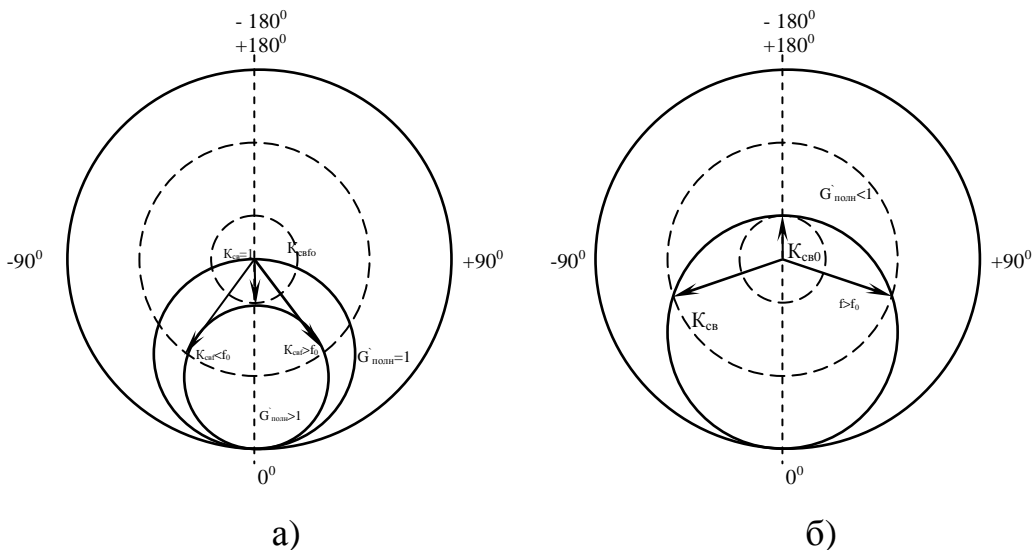


Рис.2.9. Местоположение линий активной проводимости резонатора на круговой диаграмме: а) -при слабой связи, б) -при сильной связи.

Из рисунка 2.9а, следует, что при слабой связи фаза коэффициента отражения при изменении частоты от $f < f_0$ к f_0 сначала уменьшается, проходит через нуль, а затем начинает возрастать, принимая нулевое значение при резонансе. При дальнейшем увеличении частоты фаза возрастает и вновь возвращается к нулю, пройдя через максимум. При этом фазовая кривая будет иметь вид рис. 2.10.

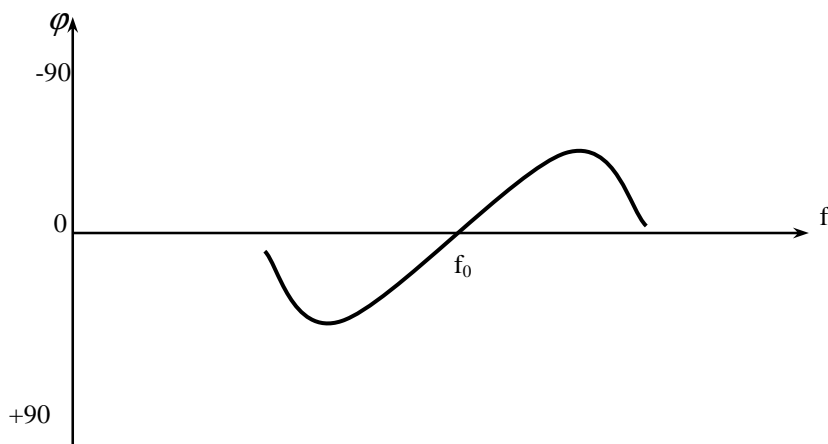


Рис. 2.10. Зависимость фазы коэффициента стоячей волны от частоты при слабой связи.

Минимум стоячей волны в измерительной линии в этом случае будет совершать реверсивное движение: при изменении частоты от $f < f_0$ к f_0 минимум перемещается (при слабой связи) к генератору, потом возвращается в прежнее положение. При дальнейшем увеличении частоты ($f > f_0$) минимум перемещается сначала к резонатору, а затем снова возвращается в прежнее положение (рис.2.11). При этом максимальное смещение минимума не превышает $\frac{\lambda}{4}$.

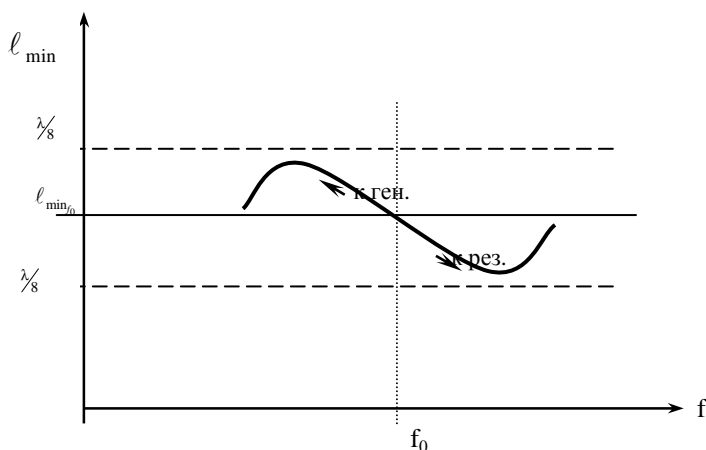


Рис 2.11. Смещение минимума стоячей волны при слабой связи.

При сильной связи (рис.2.9б) фаза коэффициента отражения уменьшается от 0 до -360° , проходя через -180° при резонансе и фазовая кривая имеет вид (рис.2.12).

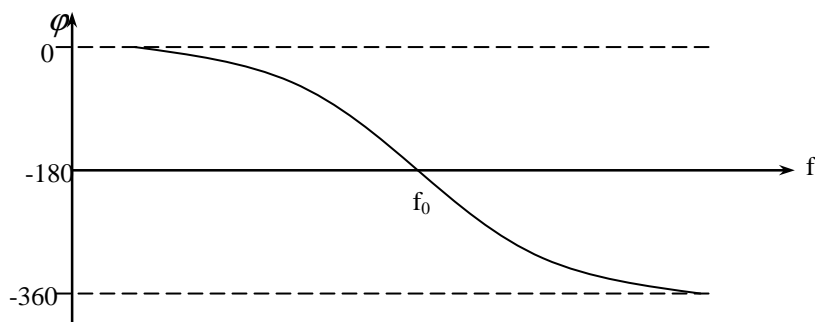


Рис.2.12. Зависимость фазы коэффициента отражения от частоты для сильной связи резонатора с нагрузкой.

Минимум стоячей волны при этом будет всё время смещаться к генератору (рис 2.13). Максимальное смещение минимума не будет превышать $\frac{\lambda}{2}$.

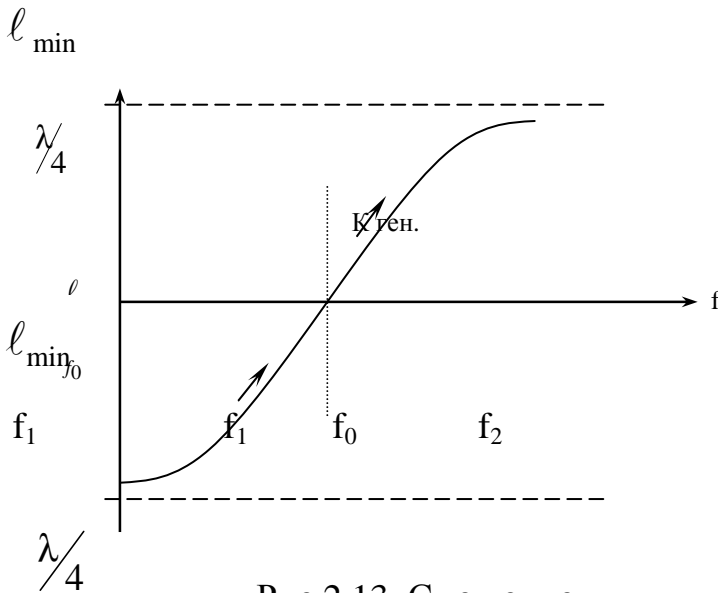


Рис.2.13. Смещение минимума стоячей волны от частоты при сильной связи.

Таким образом, по характеру фазовой характеристики (изменению положения минимума стоячей волны при изменении частоты) можно судить о степени связи резонатора с передающей линией. Для фазовых характеристик типа (рис.2.11) следует положить $G'_H = K_{св0}$; для сильной связи (рис. 2.13) - $G'_H = \frac{1}{K_{св0}}$.

Величина $\left(\frac{dB}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_0}$ также определяется по круговой диаграмме полных сопротивлений.

При измерении **параметров резонатора методом двухполюсника** рекомендуется следующий порядок экспериментальных исследований и построений:

— для выбранного типа колебаний необходимо снять зависимости $K_{св}(f)$ и $l_{мин}(f)$ в пределах резонансной кривой резонатора и построить соответствующие зависимости;

— определить минимальное значение $K_{св0}$, соответствующее резонансу, и резонансную частоту f_0 ;

— пользуясь построенным графиком $l_{мин}(f)$, определить по нему степень связи резонатора, а затем, найти активную проводимость G'_H ;

— найти величину $\left(\frac{dB}{df}\right)_{f=f_0}$.

Для чего, по графику $K_{св}(f)$, для выбранной частоты $f = f_0 + \delta f$, определить $K_{св f}$. Величину δf следует задать произвольно, например, $\delta f = \frac{\Delta f}{3}$, где Δf ширина резонансной кривой на уровне $0,5 I_{max}$. Далее, на диаграмме проводимостей выделите

окружность, найденной проводимости G'_H , и окружность $K_{св. f}$. Найдите точку пересечения этих двух окружностей. Затем, проведите окружность реактивной проводимости $B_f = \text{const}$ через эту точку пересечения. Определите ее величину B_f . Положите $B_f = \Delta B = B_f - B_{f_0}$, так как при резонансе реактивная проводимость отсутствует $B_{f_0} = 0$. Отношение $\frac{\Delta B}{\Delta f} = \left(\frac{dB}{df} \right)_{f=f_0}$ с тем большей точностью, чем меньше отличается частота f от f_0 , т.е. чем меньше Δf . Процесс нахождения B_f показан на рисунке 2.14.

Величина ΔB может быть также рассчитана по формуле

$$\Delta B = \sqrt{\frac{|p|^2 (1 + G'_{полн.})^2 - (1 - G'_{полн.})^2}{1 - |p|^2}}, \quad (2.16)$$

здесь $|p|$ - модуль коэффициента отражения при частоте $f \neq f_0$

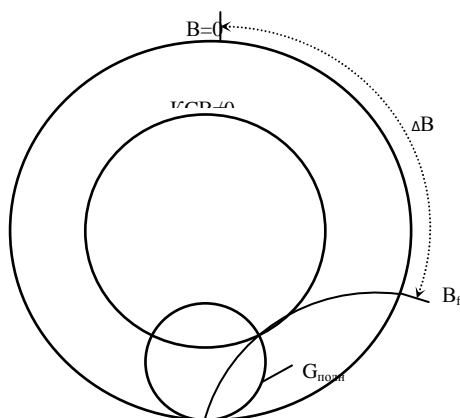


Рис.2.14. Определение приращения $\frac{\Delta B}{\Delta f}$ по круговой диаграмме.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Описание установки и методики эксперимента

На рис.3.1 приведена схема экспериментальной установки. ВЧ колебания с частотами, лежащими в пределах 1900-3700 МГц, с генератора (1), Г4-9, поступают через ослабитель (в генераторе) на измерительную линию Р1-17 (2), на возбуждающую петлю исследуемого резонатора (3). Сигнал с выходной петли резонатора поступает на коаксиальную детекторную головку (4), в центральную жилу которой вставлен полупроводниковый детектор. Индикаторами (5),(6) являются микроамперметры. Для исследования предложен резонатор цилиндрического типа с двумя петлями связи, расположенными ближе к его основанию. Петли могут поворачиваться на 90^0 , что необходимо для возбуждения резонатора на различных типах колебаний. Верхняя крышка резонатора может сниматься, если есть необходимость проверки ориентации петель связи.

3.2. Домашнее задание

3.2.1. Рассчитать резонансные частоты для типов колебаний, которые могут возбуждаться в резонаторе диаметром 100мм, высотой 130 мм в диапазоне 1900-3700 МГц, используя формулу (2.3) или рис. 2.3.

Этот пункт всегда выполняется перед экспериментальными измерениями.

3.2.2. Изобразить структуру электромагнитного поля всех возбуждаемых колебаний в цилиндрическом резонаторе, рассчитанных в п.3.2.1.

3.2.3. Изобразить положение петель возбуждения колебаний Е - типа и Н – типа в исследуемом резонаторе.

3.2.4. Рассчитать собственные добротности резонатора для E_{mnp} или H_{mnp} (формулы 2.7, 2.8, или рис.2.4) типов колебаний (по заданию преподавателя), измеряемых в дальнейшем экспериментально.

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Генератор Г4-9 включить и настроить в режиме непрерывных колебаний на одну из расчетных частот.

3.3.2. Плавно перестраивая генератор в диапазоне 1900-3700МГц, зафиксировать ток детектора резонатора при резонансе и частоты резонансов, по частотной шкале генератора, для рассчитанных типов колебаний (вначале для Н-типов, затем для Е-типов, или наоборот) меняя ориентацию петель связи. Сравнить резонансные частоты, полученные экспериментально с частотами, рассчитанными, п. 3.2.1. Не совпадение частот объясняется тем, что теоретические формулы не учитывают влияния элементов связи на резонансную частоту и технологию изготовления резонатора, экспериментальные частоты также определяются с некоторой погрешностью и т.д. Тем не менее, экспериментальные и теоретические данные достаточно близки для опознания возбуждаемых типов колебаний. Сравнить величины токов при резонансах и сделать выводы о степени связи генератора и резонатора.

3.3.3. Снять и построить зависимости резонансных кривых, т.е. показания тока детектора резонатора от частоты для двух-трех типов возбуждаемых колебаний $J_{дет}(f_i)$ (по согласованию с преподавателем). Во время снятия резонансных кривых, частоту измерять волномером генератора.

3.3.4. По резонансным кривым определить нагруженную добротность резонатора на этих типах колебаний (формула 2.12).

3.3.5. Методом двухполюсника (метод измерительной линии) измерить основные параметры резонатора (f_0 , G_0 , Q'_0 , Q_H , $Q_{вн.вх.}$, Q_0), возбуждаемого на типах колебаний, исследованных в п.3.3.4. Для этого:

-настроить измерительную линию;

-снять зависимости $K_{св}$ и l_{min} от частоты в пределах резонансных характеристик для обоих типов колебаний;

-построить зависимости $K_{св}$ и Δl_{min} от частоты в пределах резонансной кривой, где $\Delta l_{min} = l_{f min} - l_{min}$, $l_{f min}$ —положение минимума в линии при любой частоте в пределах резонансной кривой; l_{min} —положение минимума в линии на частоте, соответствующей началу резонансной кривой;

-определить степень связи резонатора с передающей линией, пользуясь рисунками 2.11 и 2.13;

-по известному значению $K_{св f_0}$, определить $G'_{полн.}$

-Пользуясь изложенной в разделе 2.9 методикой, определить величину скорости изменения реактивной проводимости при резонансе $\left(\frac{dB}{df}\right)_{f=f_0}$,

-рассчитать Q'_0 , Q_H , $Q_{вн. вх}$ по формулам (2.13), (2.14), (2.15) для обоих типов колебаний, а также Q_0 по измеренным Q_H и $Q_{вн. вх}$, (2.15а).

3.3.6. Результаты работы, полученные при выполнении экспериментальных измерений, внесите в таблицу

Таблица

Результаты измерения параметров резонатора методом 2-х полюсника

Тип колебаний	показания волномера, α , дел.	$f_{г}$, МГц	Показания индикатора на изм. линии (5)		$I_{дет.}$	l_{min} , мм	Фаза отражения $2\pi \frac{\Delta l_{min}}{\lambda_0}$	К _{св} = $\sqrt{\frac{\alpha_{max}}{\alpha_{min}}}$
			α_{max}	α_{min}				

Здесь Δl_{min} -смещение минимума стоячей волны в линии при любой частоте генератора относительно начальной частоты f для заданного типа колебания.

3.3.7. Результаты расчетов параметров резонатора по экспериментальным кривым п.3.5 можно представлять в пределах соответствующих рисунков.

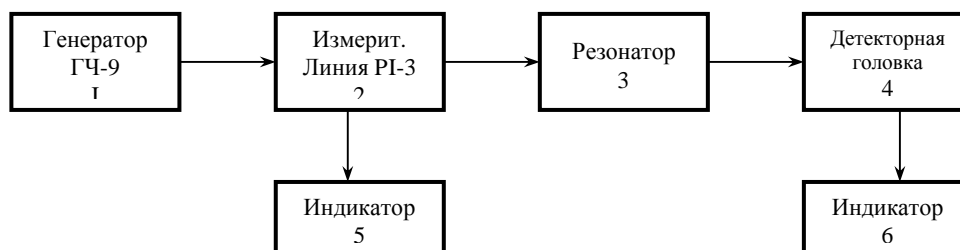


Рис.3.1. Структурная схема экспериментальной установки

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Какие типы колебаний могут возбуждаться в цилиндрическом резонаторе, предложенном для испытания?

4.2. При каком типе колебания резонансная частота не зависит от длины резонатора?

4.3. Какими видами добротности характеризуется резонатор, включенный по схеме четырёхполюсника и чему равны теоретические значения собственной добротности типов колебаний, возбуждаемых в резонаторе?

4.4. Как изменится частота резонатора, если его заполнить диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого больше диэлектрической проницаемости воздуха?

4.5. Какие типы колебаний являются вырожденными? Как можно снять вырождение?

4.6. Как следует ориентировать петлевой возбудитель при возбуждении определенного типа колебаний?

4.7. Какие методы измерения добротности Вам известны? В чём их принципиальные различия?

4.8. Как определить резонансную проводимость резонатора?

4.9. Будет ли одинаковым резонансное сопротивление резонатора на различных типах колебаний?

4.10. Если возбуждающие петли расположить при $z=h/2$, то как это скажется на возбуждаемых типах колебаний?

4.11. Коэффициент стоячей волны в тракте перед резонатором на разных типах колебаний, но на резонансных частотах этих колебаний, различен. Что характеризует эта ситуация в резонаторе?

4.12. Как можно перестраивать частоту резонатора, работающего на колебании типа E_{010} ?

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

5.1. Цель работы и схему установки.

5.2. Результаты работы и рисунки, выполненные по разделу «Домашнее задание».

5.3. Результаты экспериментов, сведённые в таблицы и представленные в виде графиков.

5.4. Результаты расчёта добротностей.

5.5. Выводы по результатам сравнения экспериментальных и теоретических данных.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов/ Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радиотехника, 2006. – 375с.

2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. –432с.