

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 ПАРАМЕТРОВ ОБЪЁМНОГО РЕЗОНАТОРА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ**

### **РУКОВОДСТВО**

к лабораторной работе по дисциплинам «Электродинамика  
и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»  
для бакалавров направлений подготовки

210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,

210400.62 «Радиотехника», и специалистов направления подготовки

210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Разработчики:

доц. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ Ж.М. Соколова

проф. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ А.Е. Мандель

доц. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ А.В. Фатеев

Зав.лаб. ЭДиРРВ

\_\_\_\_\_ А.Н. Никифоров

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы.....	3
2. Элементы теории объёмных резонаторов .....	3
2.1. Общие сведения .....	3
2.2. Основные особенности и параметры объёмных резонаторов .....	3
2.2.1. Структура поля прямоугольного резонатора.....	4
2.2.2. Резонансная частота.....	7
2.2.3. Активная проводимость резонатора.....	8
2.2.4. Добротности объёмного резонатора.....	8
2.3. Возбуждение резонатора и его эквивалентные схемы.....	9
2.4. Методы измерения добротностей .....	11
2.5. Измерение параметров резонатора на заданном типе колебаний.....	13
3. Экспериментальная часть.....	14
3.1 Описание экспериментальной установки и методики измерений.....	14
3.2 Работа на приборе ВАЦ.....	15
3.3. Домашнее задание.....	18
3.4 Порядок выполнения работы.....	18
4. Контрольные вопросы .....	20
5. Содержание отчета.....	21
6. Список литературы.....	21

## **1. Цель работы**

Целью данной лабораторной работы является:

- ознакомление с вопросами теории объемных резонаторов;
- проведение расчетов некоторых параметров объемного резонатора прямоугольного сечения для различных типов колебаний, возбуждаемых в нем;
- ознакомление с методами измерения основных параметров объемных резонаторов;
- измерение основных параметров объемного резонатора прямоугольного сечения в десятисантиметровом диапазоне волн.

## **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 и др.). В настоящей работе исследуется объемный резонатор прямоугольного сечения, образованный из отрезка прямоугольного волновода (рис. 1).

### **2.2. Основные особенности и параметры объёмного резонатора**

Структура поля любого резонатора – это особенность пространственного расположения векторов электрического и магнитного полей на каждом виде колебаний, это, своего рода фотография электромагнитных полей для заданного типа колебаний. Поменяется тип колебаний, изменится структура (картина) полей.

Структуру полей можно построить, пользуясь выражениями для компонент векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , полученными путем решений уравнений Максвелла в прямоугольной системе координат для замкнутого призматического резонатора. Зная выражения для компонент векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , можно определить параметры резонатора.

Основными параметрами объёмных резонаторов являются:

**резонансная 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 резонансная проводимость резонатора  $G$**  или активное резонансное сопротивление  $R$ , являющееся мерой активных потерь в резонаторе.

**собственная добротность резонатора  $Q$** , определяющая качество контура и зависящая от активной  $G$  и реактивной  $B$  проводимостей резонатора.

### 2.2.1. Структура поля прямоугольного резонатора

Под структурой электромагнитного поля понимают распределение и форму электрических и магнитных линий в резонаторе в фиксированный момент времени.

Собственные колебания полых резонаторов (рис. 1.а) будем классифицировать, используя поля  $E_{mn}$  и  $H_{mn}$  волн волноводов. Поскольку вдоль оси  $z$  резонатор в отличие от волновода ограничен металлическими пластинами, то каждому из типов волн волновода  $E_{mn}$  или  $H_{mn}$  будет соответствовать бесконечный ряд колебаний, различающихся числами  $p$ . Поэтому будем говорить о типах собственных колебаний  $E_{mnp}$  или  $H_{mnp}$ .

Запишем выражения компонент соответствующих полей в резонаторе:

**$E_{mnp}$ -колебания:**

$$\begin{aligned}
\dot{E}_{mx}^{mnp} &= \bar{z}_0 E_0^{mnp} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{L} \\
\dot{E}_{my}^{mnp} &= -\bar{x}_0 \frac{E_0^{mnp}}{\gamma_{\perp mn}^2} \frac{p\pi}{L} \left[ \frac{m\pi}{a} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \right] \sin \frac{p\pi z}{L} \\
\dot{E}_{mz}^{mnp} &= \bar{y}_0 \frac{E_0^{mnp}}{\gamma_{\perp mn}^2} \frac{p\pi}{L} \left[ \frac{n\pi}{b} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \right] \sin \frac{p\pi z}{L} \\
\dot{H}_m^{mnp} &= jE_0^{mnp} \frac{\omega_{mnp}}{\gamma_{\perp mn}^2} \left( \bar{x}_0 \frac{n\pi}{b} \sin \frac{m\pi x}{a} \tilde{n} \cos \frac{n\pi y}{b} - \bar{y}_0 \frac{m\pi}{a} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \right) \cos \frac{p\pi z}{L}, \\
\dot{H}_{mz}^{mnp} &= 0,
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $E_0^{mnp}$  – амплитудный коэффициент, зависящий от величины мощности, введенной в резонатор;  $\gamma_{\perp mn}^2$  – поперечное волновое число.

Индексы  $m, n, p$  могут принимать следующие значения:  $m, n=1,2,3$  и  $p=0,1,2,3$ .

### **$H_{mnp}$ -колебания:**

$$\begin{aligned}
\dot{E}_m &= -iH_0^{mnp} \frac{\omega_{mnp}}{\gamma_{\perp mn}^2} \left( -\bar{x}_0 \frac{n\pi}{b} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} + \bar{y}_0 \frac{m\pi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \right) \sin \frac{p\pi z}{L}, \\
\dot{H}_m &= H_0^{mnp} \left[ \bar{z}_0 \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{L} - \right. \\
&\quad \left. - j \frac{1}{\gamma_{\perp mn}^2} \frac{p\pi}{L} \left( -\bar{x}_0 \frac{m\pi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} + \bar{y}_0 \frac{n\pi}{b} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \right) \cos \frac{p\pi z}{L} \right]. \tag{2} \\
\dot{E}_{mz} &= 0
\end{aligned}$$

В отличие от  $E$ -колебаний в данном случае:  $m, n = 0,1,2,\dots$  и  $p = 1,2,\dots$ , при этом  $m$  и  $n$  не могут одновременно быть равными нулю.

Прежде чем анализировать собственные колебания прямоугольного резонатора, отметим, что записанное представление полей не является единственно возможным. Можно тремя различными способами выбрать продольную ось  $z$ , т.е. получать резонатор, мысленно перегораживая три разных ортогонально ориентированных прямоугольных волновода, как показано на рис.1.а. Мы получим три различных классификации собственных колебаний.

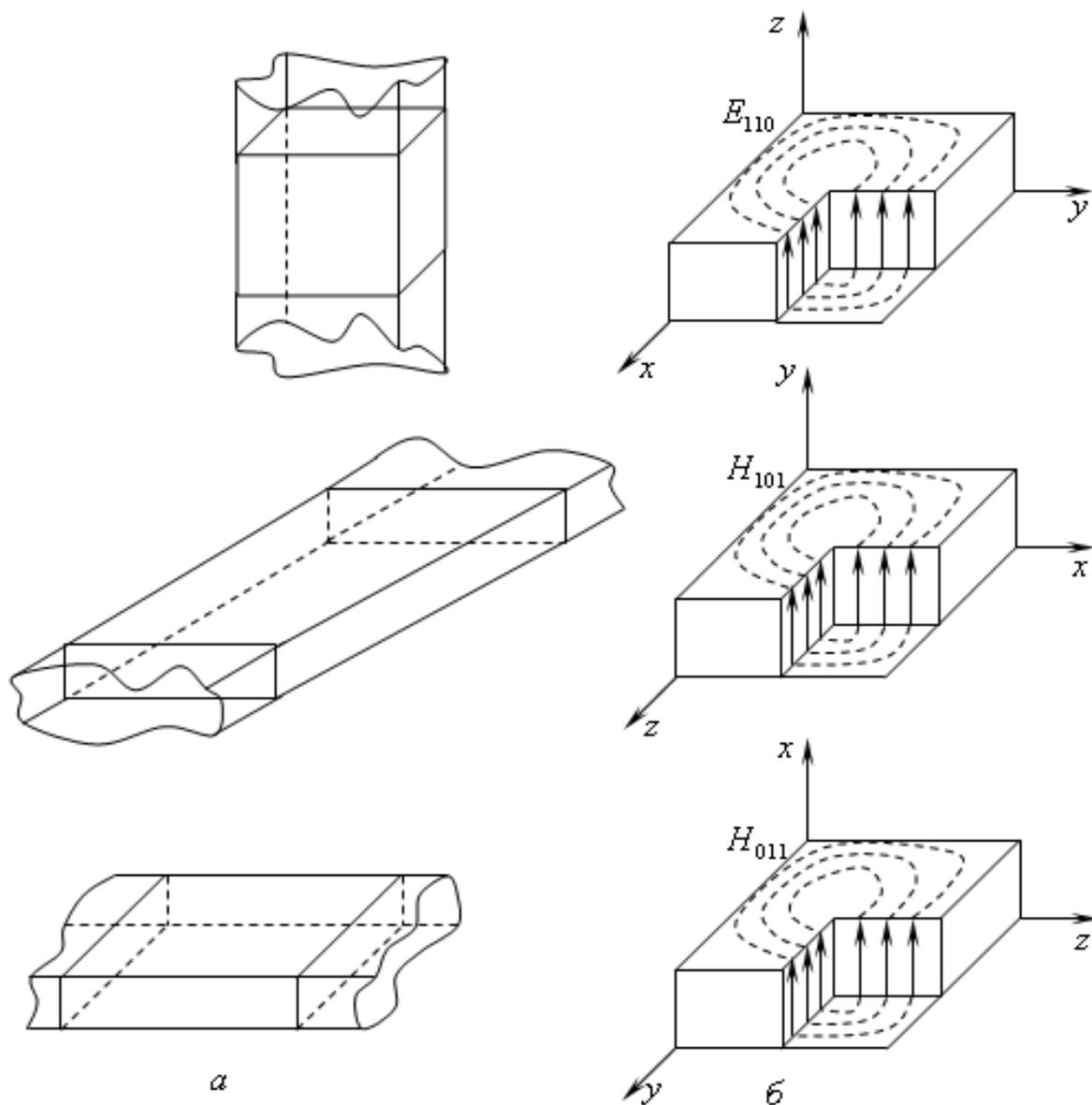


Рис.1. Три различных классификации собственных колебаний прямоугольного резонатора в зависимости от выбора продольной оси  $z$

Возвращаясь к выбору индексов  $m, n, p$  в формулах (1) и (2), видим, что любая комбинация этих трех целых чисел, одно из которых может быть заменено нулем, определяет один или несколько типов колебаний резонатора. Очевидно, что различные линейные комбинации полей такого рода также представляют собой собственные колебания.

Как следует из уравнений (1) и (2) каждая компонента поля в резонаторе зависит от трех координат  $x, y, z$ . Поэтому структура поля представляется

объемной картиной (рис. 2.). Чтобы правильно изобразить ее в пространстве, необходимо учесть, что зависимость компоненты от параллельной ей координаты (эпюра) отображается на картинах полей изменением длины силовых линий вдоль этой координаты, (например,  $H_z \sim \sin \frac{\pi}{L} z$  на рис. 2 внизу слева, отображено изменением длины силовой линии при изменении координаты  $z$ ). Зависимость (на эпюре) компоненты поля от ортогональной ей координаты, отображается на картине поля густотой силовых линий (см. ту же компоненту  $H_z \sim \cos \frac{\pi}{a} x$ , на рис. 2 внизу слева, отображена густота линий  $H_z$  вдоль оси  $x$  по закону соответствующей тригонометрической функции -  $\cos \frac{\pi}{a} x$ ).

Одна и та же структура поля соответствует разным обозначениям полей:  $E_{110}$ ,  $H_{101}$ ,  $H_{011}$ , если изменять направления осей системы координат (рис.1). Нулевой индекс при этом будет соответствовать той оси ( $x$ ,  $y$  или  $z$ ), вдоль которой поле однородно (не меняется).

Рассмотрим несколько картин силовых линий собственных колебаний прямоугольного резонатора. На рис. 2 показан тип колебаний  $H_{101}$ ; на рис. 3 – тип колебаний  $E_{111}$ . Если сравнить распределение поперечных компонент резонаторов с соответствующими снимками поперечных компонент полей волн в прямоугольном волноводе (сопоставляются стоячие и бегущие волны), то можно увидеть различие картин силовых электрических и магнитных линий.

В резонаторе поперечные компоненты сдвинуты по отношению друг к другу вдоль оси  $z$  на  $\Lambda/4$  (т.е. на  $T/4$ , где  $T$  - период колебаний). В резонаторе полные поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , а средние значения вектора Пойнтинга равны нулю.

Объемные резонаторы отличаются от колебательного контура с сосредоточенными параметрами наличием многих мод - колебаний. Многомодовость означает, что при одной и той же геометрии резонатора в нем при изменении частоты возникают последовательно различные виды колебаний,

имеющие разные параметры. 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 ( $x$  и  $y$ ) имеются вариации и по оси  $z$ , совпадающей с осью резонатора (рис. 2). Каждый тип колебания характеризуется собственной структурой поля (заданными индексами  $m, n, p$ ) и собственной резонансной частотой  $f_0$ .

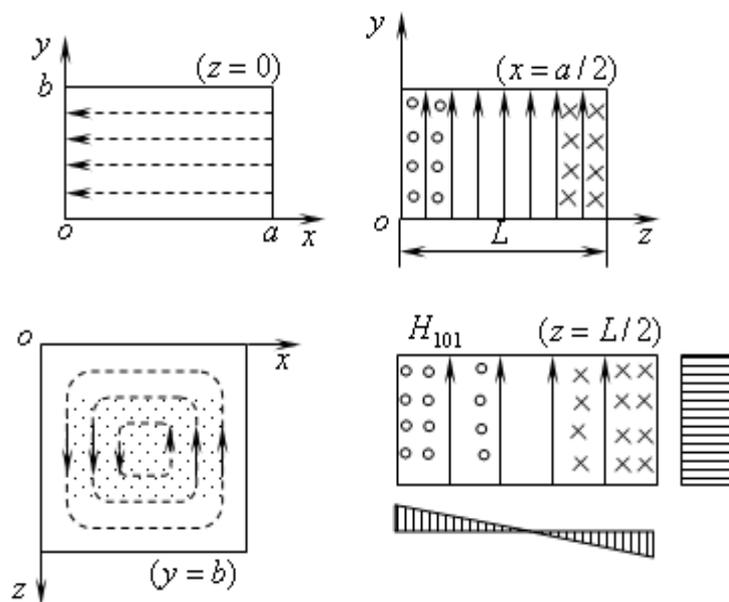


Рис.2. Структура поля  $H_{101}$  в прямоугольном резонаторе

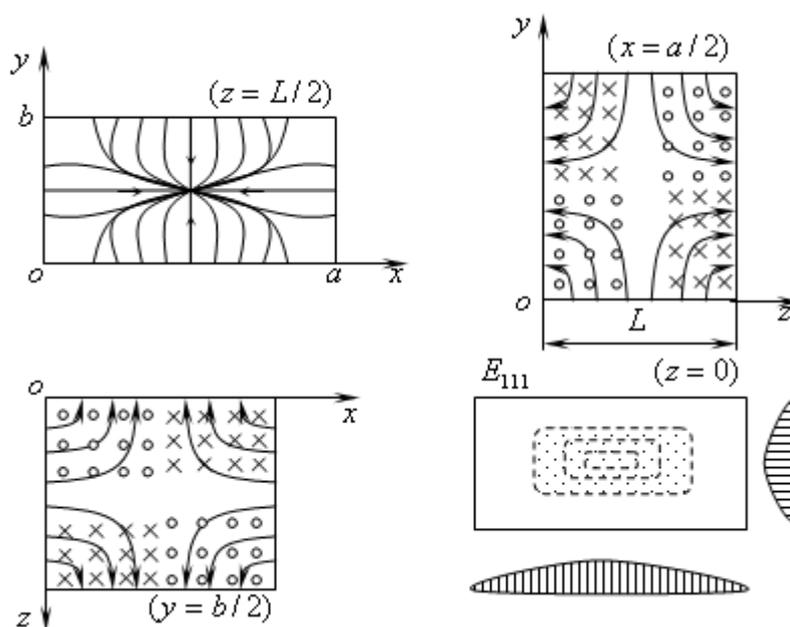


Рис.3. Структура поля  $E_{111}$  в прямоугольном резонаторе

## 2.2.2. Резонансная частота

Колебания резонатора с наименьшими резонансными частотами  $f_0$  называются основными или низшими.

Чтобы найти минимальное значение частоты при заданных размерах резонатора  $a$ ,  $b$ , и  $L$  (рис.2 и 3), надо минимизировать выражение для частоты  $\omega_{mnp}$  соответствующим выбором чисел  $m$ ,  $n$  и  $p$ . Одно из них, которое отвечает наименьшему размеру, берется равным нулю, а каждое значение оставшихся величин – единице. Соответствующий тип колебаний резонатора называется основным или низшим. Для прямоугольного резонатора основными типами колебаний считаются колебания  $H_{101}$  и  $E_{110}$ . Может случиться, что одному значению резонансной частоты  $f_0$  соответствует несколько различных типов колебаний. Такие колебания называются вырожденными.

Резонансная частота прямоугольного резонатора определяется выражением [1]:

$$f_{0\ mnp} = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{\hat{a}}\right)^2 + \left(\frac{p}{L}\right)^2}, \quad (3)$$

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

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

## 2.2.3. Активная резонансная проводимость резонатора

Активная резонансная проводимость резонатора  $G$  - это отношение удвоенной мощности потерь в резонаторе к квадрату амплитуды напряжения  $U$  между wybranными двумя точками (1 и 2) на внутренней поверхности резонатора

$$G_0 = \frac{2P_{\text{вд.д.д.}}}{U^2} = \frac{2P_{\text{вд.д.д.}}}{\left| \int_1^2 E_l dl \right|^2} \quad (4)$$

где  $E_l$  – напряженность электрического поля между выбранными точками резонатора 1 и 2,  $dl$  – расстояние между точками 1 и 2.

Активная проводимость резонатора зависит от переменного напряжения, поэтому изменяется при изменении точек отсчета. Резонатор, включенный в передающую линию (параллельно или последовательно), располагая проводимостью  $G$  или сопротивлением  $R$  на резонансной частоте, является эквивалентным элементом схемы в целом, на котором теряется часть передаваемой мощности или вся мощность. Это зависит от согласования сопротивлений передающей линии и резонатора.

#### 2.2.4. Добротности объёмного резонатора

Добротность объёмного резонатора для определённого типа колебаний определяют отношением [2,3]

$$Q = 2\pi \frac{W}{W_n} = 2\pi \frac{W}{P_n T} = \omega_0 \frac{W}{P_n} \quad , \quad (4)$$

где  $W$  – запасённая при резонансе внутри полости электромагнитная энергия;  $W_n$  – энергия потерь за время одного периода  $T$ ,  $P_n$  – мощность потерь.

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

$Q_0$  - собственной,  $Q_{\text{вн}}$  - внешней,  $Q_{\text{н}}$  - нагруженной.

$$Q_0 = \omega_0 \frac{W}{P_{\text{вд.д.д.}}} \quad , \quad (5)$$

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

$$Q_{\text{ât}} = 2\pi \frac{W}{P_{\text{пот.рез.}}} = \omega_0 \frac{W}{P_{\text{пот.рез.}}}, \quad (6)$$

внешняя добротность  $Q_{\text{вн}}$  учитывает мощность, расходуемую в цепях, нагружающих резонатор.

Если резонатор имеет несколько элементов связи, то  $W_{\text{расс.нагр.}}$  будет равна сумме мощностей, рассеянных в этих цепях.

$$Q_H = 2\pi \frac{W}{W_{\text{расс.рез.}} + W_{\text{расс.нагр.}}}, \quad (7)$$

Выражением  $Q_H$  – нагруженной добротности, учитываются все виды потерь в резонаторе и нагрузках, связанных с ним.

Собственная добротность резонатора рассчитывается по формулам (5) [3], которые для типов колебаний  $H_{mnp}$  и  $E_{mnp}$  имеют вид:

$$Q_{0H_{mnp}} = \frac{\omega_0^2}{2\delta} \frac{La\hat{\mu}\epsilon \chi_{mn}^2}{\left[ aL \left\{ \left( \frac{pm\pi}{aL} \right)^2 + \chi_{mn}^4 \right\}^2 + \hat{a}L \left\{ \left( \frac{pn\pi}{\hat{a}L} \right)^2 + \chi_{mn}^4 \right\}^2 + a\hat{a} \left( \frac{p\pi q_{mn}}{L} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

$$Q_{0E_{mnp}} = \frac{1}{2\delta} \frac{aL\hat{a} \chi_{mn}^2}{\left[ aL \left\{ \left( \frac{pn}{\hat{a}} \right)^2 \right\} + \left\{ \hat{a}L \left( \frac{pm}{a} \right)^2 \right\} + a\hat{a} \chi_{mn}^2 \right]}, \quad (9)$$

где  $\omega_0 = \frac{2\pi f_0}{c}$  – резонансная круговая частота резонатора;

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

$\chi_{mn}^2 = \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2$  – поперечное волновое число.

### 2.3. Возбуждение резонатора и его эквивалентные схемы

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. 4). Поворотом петли вокруг оси можно возбуждать электрические или магнитные колебания.

В практических радиотехнических системах СВЧ диапазона часто используют проходную схему включения резонатора (схема четырёхполосника), при которой через один элемент связи резонатор возбуждается, а через другой элемент связи выводится энергия из резонатора.

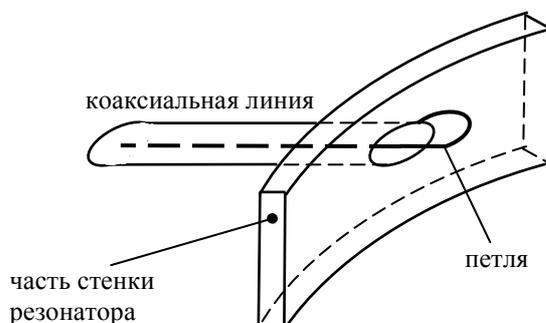


Рис. 4. Петлевой возбуждатель

Резонатор, возбуждаемый на конкретном типе колебаний, можно представить объемным колебательным контуром (рис.5а). На этом рисунке  $Y_{01}$  и  $Y_{02}$  – волновые проводимости (величины обратные волновым сопротивлениям) входной и выходной линий (в исследуемом резонаторе - коаксиальные линии),  $G$  – собственная активная проводимость резонатора в плоскости максимальной напряженности поля -  $AA$ . Эквивалентная схема резонатора четырёхполосника (рис. 5б) легко может быть сведена к схеме двухполосника (рис.5в) путём трансформации (пересчетом параметров) проводимости  $Y_{02}$  к сечению  $AA$  резонатора, которая может быть выполнена по соотношению

$$Y'_{02} = G \frac{Q_0}{Q_{\text{вн. вых.}}} \quad (11)$$

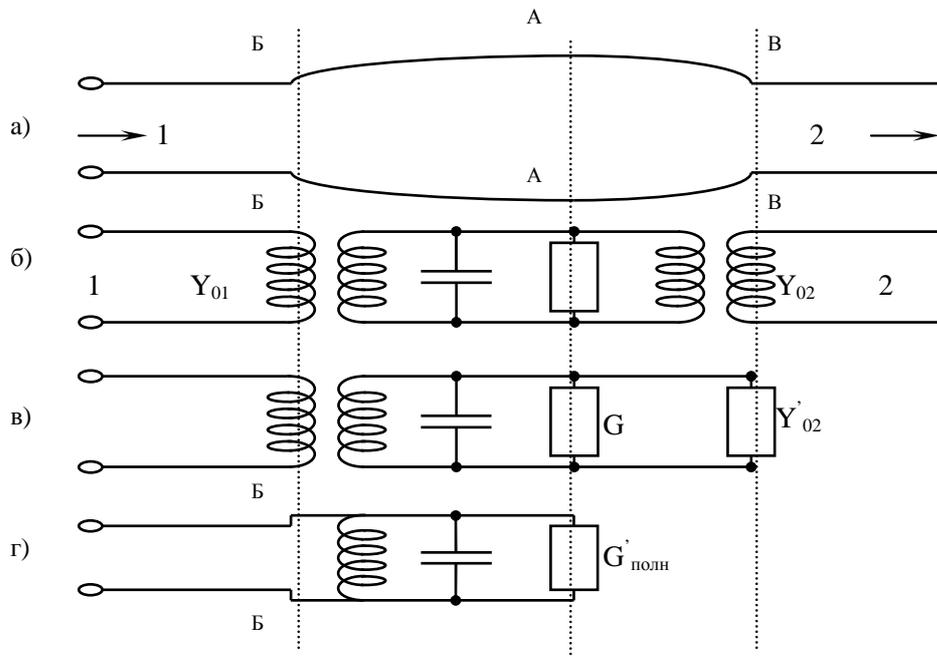


Рис.5.Эквивалентная схема нагруженного резонатора

Трансформированная активная проводимость  $\acute{O}'_{02}$  параллельна собственной активной проводимости резонатора  $G$  и полученный контур характеризуется новой величиной “собственной” добротности  $Q_0'$ , которая связана с  $Q_0$  следующим образом

$$Q_0' = Q_0 \frac{G}{G + \acute{O}'_{02}} \quad (12)$$

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

Добротность  $Q_0'$  может быть измерена, но для пояснения метода измерения следует провести вторую трансформацию параметров резонатора к сечению ББ, по уравнению

$$G'_{\text{вв}} = \acute{O}'_{01} \frac{Q_{\acute{a}\acute{i} \cdot \acute{a}\acute{o}}}{Q'_0} = Y_{01} \left( 1 + \frac{Q_{\acute{a}\acute{o}}}{Q_0} \right) \quad (13)$$

Полученный параллельный колебательный контур (рис.5г) является нагрузкой входной линии, включенный по схеме двухполюсника. При настройке

резонатора в резонанс его реактивная проводимость становится равной нулю, на конце входной линии передачи будет находиться активная проводимость  $G'_{\text{вх}}$ . Она может быть определена с помощью измерительной линии, включённой на входе резонатора.

## 2.4. Методы измерения добротностей

Все существующие способы измерения добротности резонатора можно отнести к методам либо четырёхполюсника (рис. 5б), либо двухполюсника (рис. 5г).

2.5.1. Методом четырёхполюсника по резонансной кривой измеряется резонансная частота и полоса пропускания частот по уровню половинной мощности резонансной кривой объёмного резонатора. Возбуждение осуществляется на определённом типе колебаний (рис.6). Для этого на входе резонатора включается генератор, перестраиваемый в диапазоне частот, а на выходе резонатора - индикаторное устройство.

Нагруженная добротность определяется по формуле:

$$Q_n = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (14)$$

где  $\Delta f = f_{03} - f_{04}$  - полоса частот резонансной кривой резонатора на уровне  $0,5 I_{\text{max}}$ .

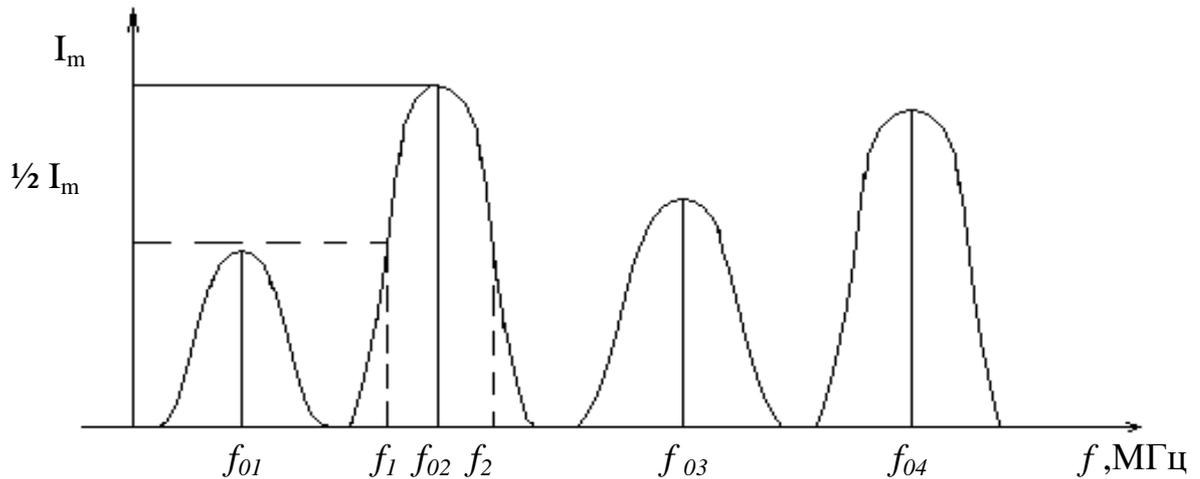


Рис. 6. Резонансные кривые различных типов колебаний в резонаторе

2.5.2. Метод двухполюсника позволяет кроме нагруженной добротности резонатора  $Q_H$  измерить “собственную” добротность резонатора -  $Q_0$ , учитывающую потери в выходной цепи, а также внешнюю добротность резонатора  $Q_{вн.вх.}$ . Метод основан на использовании в эксперименте измерительной линии, включенной на входе резонатора, либо посредством панорамных измерений на заданном виде колебаний. С помощью измерительной линии измеряются активная  $G'_{полн}$  и реактивная  $B$  проводимости резонатора (рис.5г). Собственная добротность  $Q_0$  изолированного колебательного контура в экспериментах определяется по формуле [2]:

$$Q_0 = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{G_0} \left( \frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (15)$$

По аналогии, может быть определена упомянутая выше “собственная добротность”

$$Q'_0 = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{G'_H} \left( \frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (16)$$

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

$$Q_H = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{(G'_H + 1)} \left(\frac{dB}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_0}, \quad (17)$$

а вносимая добротность или внешняя в виде соотношения

$$Q_{вн.вх.} = \frac{f_0}{2} \left(\frac{dB}{df}\right)_{\omega=\omega_0} \quad \text{или}$$

$$Q_{вн.вх.} = 2Q_0 \frac{Q_H}{Q_0} - Q_H = G'_H Q'_0 \quad (18)$$

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

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_H} - \frac{2}{Q_{вн.вх.}} \quad (19)$$

Формула (17) записана для случая согласованных входных и выходных линий с резонатором 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  $Q_H$ , величину, измеренную методом четырёхполюсника. В формулах (16÷18) 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 расчёте добротностей в формулах (16 ÷ 18) можно использовать частоту  $f_0$  вместо частоты  $\omega_0$ . Как активная проводимость  $G'_H$ , так и скорость изменения

реактивной проводимости  $\left(\frac{dB}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_0}$  могут быть измерены с помощью круговой диаграммы полных проводимостей, или полных сопротивлений.

## 2.5. Измерение параметров резонатора на заданном типе колебания

В данной работе проводится автоматизированное построение частотных характеристик коэффициента передачи  $K_{\text{пер}}$ , коэффициента отражения  $|\tilde{A}|$  и коэффициента стоячей волны  $K_{\text{св}}$  резонатора в заданном диапазоне частот и последующие измерения соответствующих параметров - резонансной частоты, нагруженной добротности - по полученным характеристикам.

В этом случае имеется возможность наблюдать и проводить необходимые измерения не только в пределах одного типа колебаний (рис.7), а обнаруживать и одновременно измерять при необходимости параметры резонатора на других типах колебаний (рис.8).

Коэффициентом стоячей волны ( $K_{\text{св}}$ ) называется отношение максимума напряжения к минимуму напряжения в стоячей волне, полученной в линии:

$$K_{\text{св}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} = \frac{U_0 (|\tilde{A}| + 1)}{U_0 (|\tilde{A}| - 1)} = \frac{(|\tilde{A}| + 1)}{(|\tilde{A}| - 1)} \quad (20)$$

При резонансе  $f_0$ , когда реактивная проводимость становится равной нулю, а активная проводимость резонатора, возможно, окажется равной волновой проводимости линии передачи,  $U_{\text{min}}$  становится равным  $U_{\text{max}}$  и  $K_{\text{св}}$  будет минимален (рис.7).

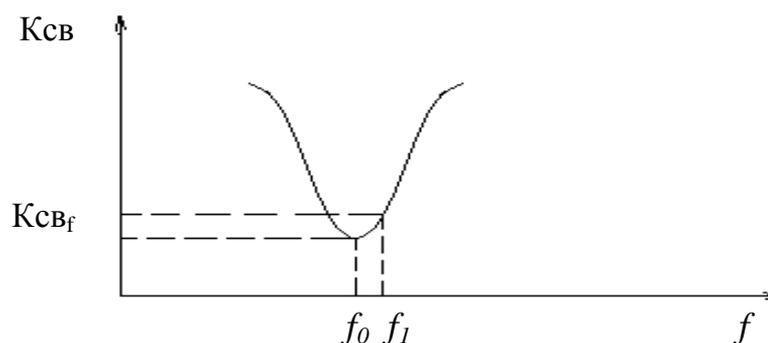


Рис. 7. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты для одного колебания

В панорамных измерителях частотных характеристик (рис.8) коэффициента передачи  $K_{пер}$ , коэффициента отражения  $|\tilde{A}| = S_{11}$  и коэффициента стоячей волны  $K_{св}$  для резонатора используется маркер, отмечающий частоты в ходе проведения измерений с высокой точностью.

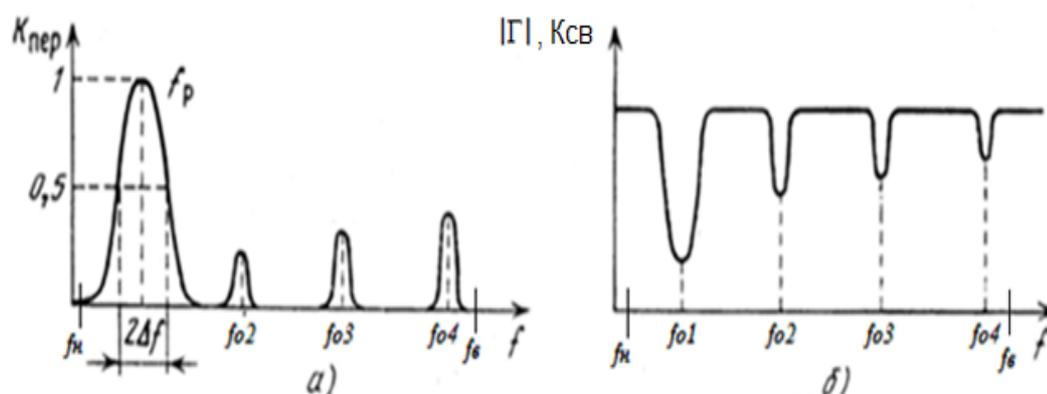


Рис. 8 – Формы зависимостей на экране дисплея панорамных измерителей характеристик коэффициента передачи (а) и коэффициента отражения и коэффициента стоячей волны(б).

В ходе проведения панорамных измерений на каждом или конкретно заданном виде колебаний экспериментально определяются следующие параметры и величины объемного резонатора:

\*резонансная частота;

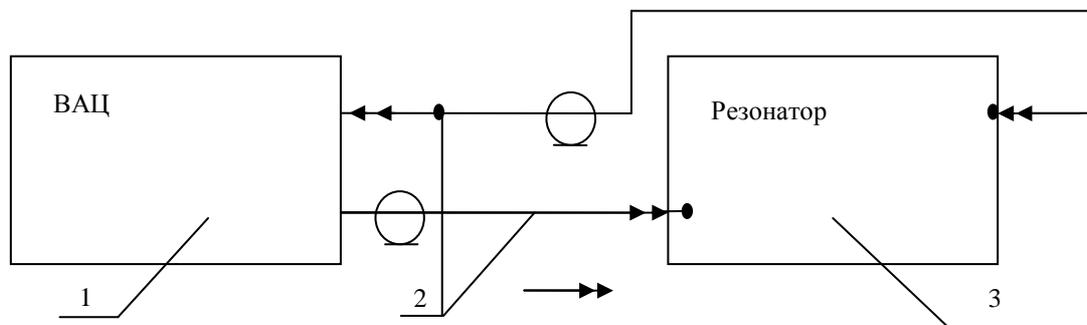
\*добротности резонатора;

\*коэффициент стоячей волны  $K_{св}$  в полосе резонансных частот (характеризует согласование резонатора с трактом); Коэффициент стоячей волны изменяется в пределах  $1 \leq K_{св} \leq \infty$ . Причем единица соответствует отличному согласованию, а большая величина – полному рассогласованию линии с резонатором. Допускается согласование в тракте, когда  $K_{св} \leq 2$ .

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1. Описание установки и методики эксперимента

Схема экспериментальной установки для исследования параметров прямоугольного резонатора включает: прибор **ВАЦ- векторный анализатор цепей**, коаксиальные линии передачи, связывающие вход и выход резонатора прямоугольного сечения с прибором ВАЦ, и сам резонатор прямоугольного сечения.



1-ВАЦ- векторный анализ цепей; 2-Коаксиальные линии передачи;  
3-Прямоугольный резонатор

Рис. 9. Схема экспериментальной установки для исследования параметров прямоугольного резонатора

Прибор **ВАЦ** (передняя панель прибора ВАЦ– векторного анализатора цепей – представлена на рис.10) работает в диапазоне частот 300 кГц -3,6 ГГц и позволяет в данной работе измерять параметры различных типов колебаний резонатора в диапазоне частот. С помощью прибора ВАЦ резонатор может быть исследован двумя методами: как по методу 2-х полюсника и так и методом 4-х полюсника.

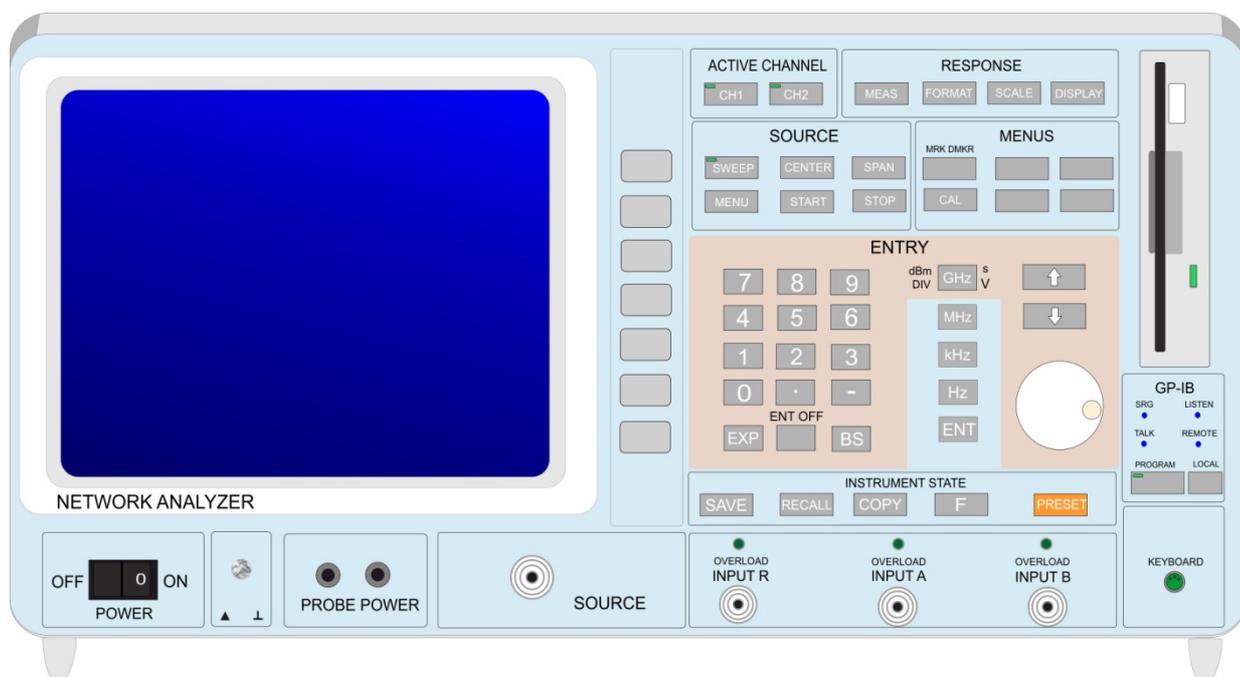


Рис.10. Передняя панель прибора ВАЦ– векторного анализатора цепей

Отраженный сигнал (при несогласовании сопротивлений передающей линии и входа резонатора) возвращается на прибор, преобразуется для измерений. Прощедший на выход резонатора сигнал поступает на второй «ввод» прибора ВАЦ для анализа. При исследовании резонатора на экран дисплея прибора ВАЦ можно, при необходимости, вывести:

- зависимости коэффициентов отражения по входу и выходу -  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ;
- зависимости коэффициентов передачи -  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  .
- зависимость (по входу) коэффициента стоячей волны Ксв в полосе частот.

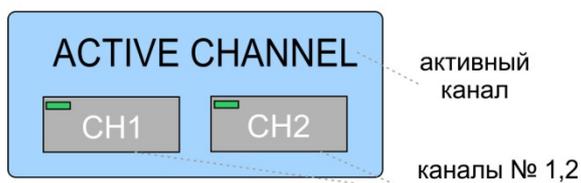
Резонатор возбуждается двумя петлями связи, расположенными с торцов. Петли могут быть установлены плоскостью витка под углом  $45^{\circ}$  к днищу и к продольной оси, что необходимо для возбуждения резонатора на различных типах колебаний, либо под углом  $90^{\circ}$  или  $0^{\circ}$ .

### 3.2. Работа с прибором ВАЦ

Рассмотрим назначение клавиш на вертикальной панели (рис.10), с которыми предстоит работать в данной лабораторной установке.

Назначение клавиш на приборе отмечено на английском языке, в описании перевод дан на русском.

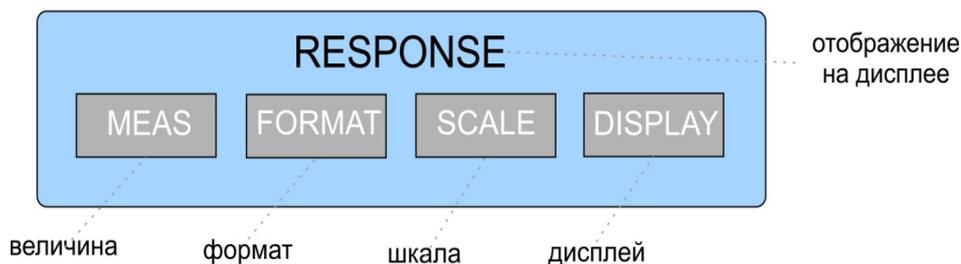
### 1. Блок клавиш 1



Блок имеет две клавиши, к которым подключается вход и выход исследуемой нагрузки.

В работе будут задействованы оба канала.

### 2. Блок клавиш 2



Блок 2 включает в себя 4 клавиши, имеющие значения:

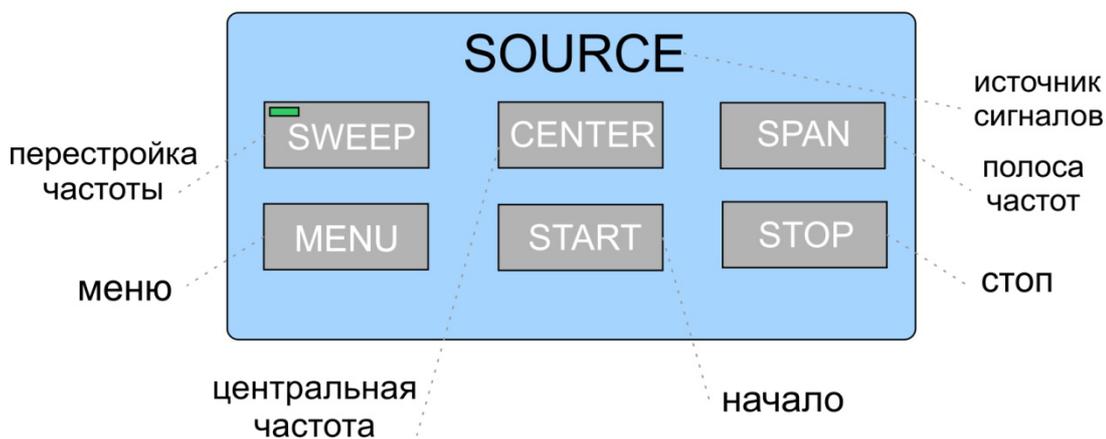
ВЕЛИЧИНА (MEAS) - измеряемая величина;

ФОРМАТ (FORMAT) - регулировка размеров выбранной величины;

ШКАЛА (SCALA) -

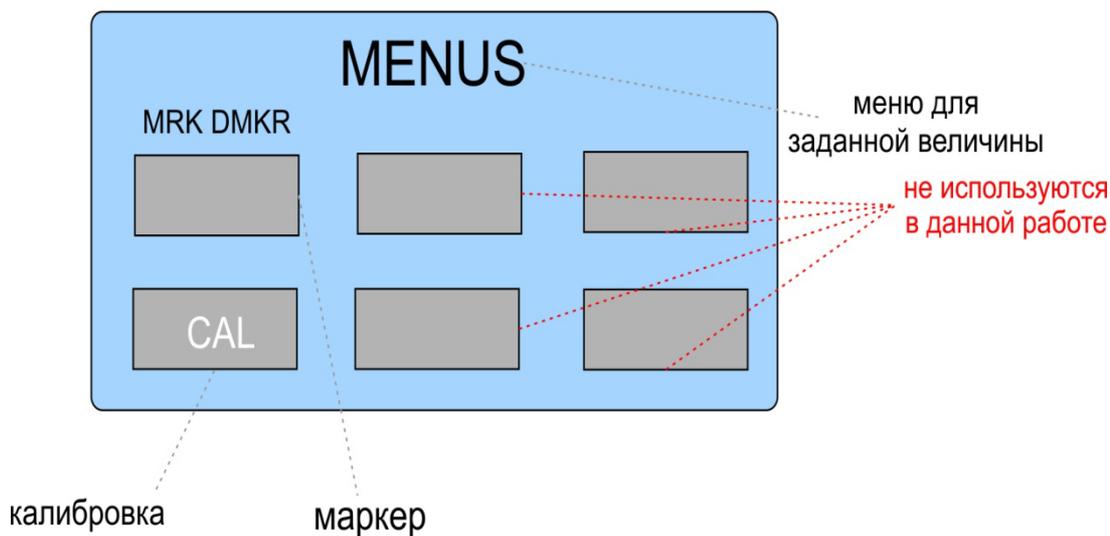
ДИСПЛЕЙ (DISPLEY) – вывести результаты на дисплей.

### 3. Блок клавиш 3



Этот блок клавиш позволяет задавать, изменять, управлять частотой сигнала, подаваемого на исследуемое устройство.

#### 4. Блок клавиш 4

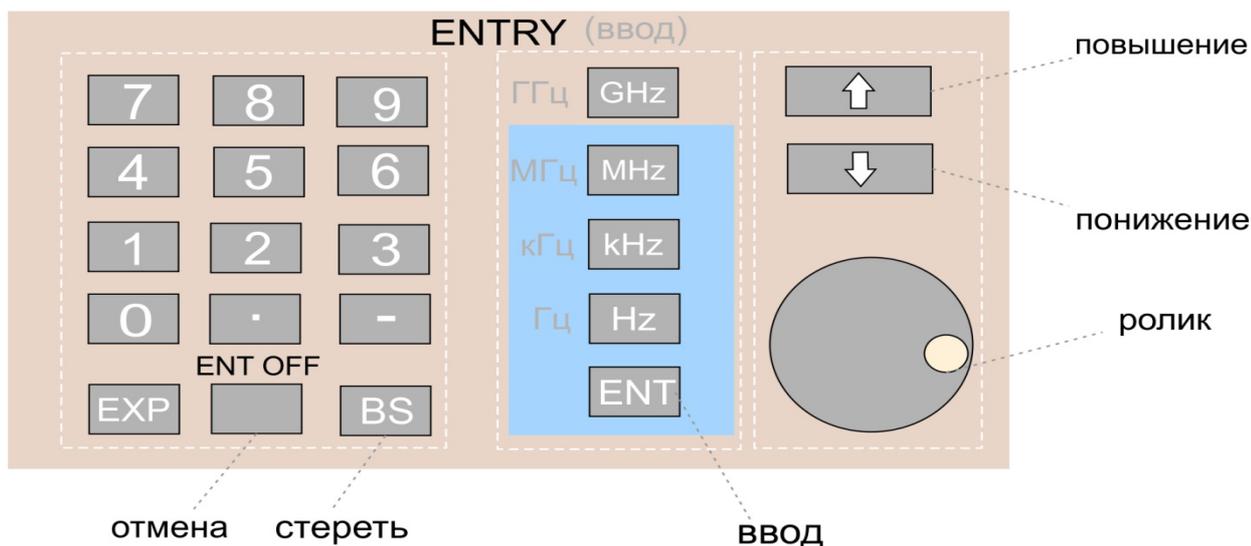


В работе из этого блока очень часто используется только клавиша «МАРКЕР»; калибровка схемы - «CAL» - выполнена оператором заранее.

5. Блок клавиш 5

6. Блок клавиш 6

7. Блок клавиш 7



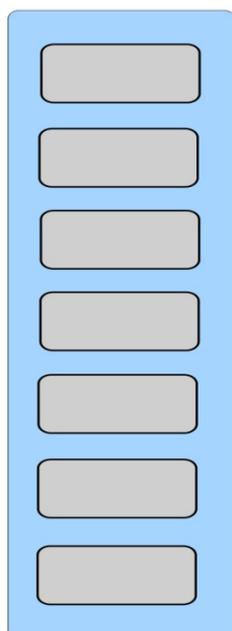
Клавиши блока 5 служат для цифрового определения диапазона исследуемых частот (например: набирается частота **3600**) .

Клавиши блока 6 позволяют установить размерность заданных блоком 5 частот (например: для набранной частоты 3600**МГц**).

Если при наборе цифр сделана ошибка, то клавишами «ENT OFF» или «BS» в блоке 5 можно стереть введенные величины и повторить новый набор.

Блок клавишей 7 и «РОЛИК» позволяют плавно перемещать маркер по характеристикам на экране дисплея.

## 8. Блок клавиш 8



Семь клавиш в блоке 8, расположенных на вертикальной панели прибора справа от дисплея, не имеют однозначных названий, но при задаваемых блоком 2 режимах, в правой части дисплея (слева от блока 8), высвечиваются (столбцом) смысл этих 8 – ми клавиш.

Смысл их отличается при разных нажатиях на клавиши блока 2. Когда высветился смысл клавиш 8, то в левом верхнем углу дисплея можно дополнительно получить необходимую

численную информацию по разным величинам.

Например: нажав клавишу «MEANS» на блоке 2, на экране дисплея возникают значения 8 клавишей (сверху вниз -  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  и др.). Если сейчас нажать клавишу «FORMAT», то на дисплее появится размерность у этих 8 клавиш, по смысловому значению совпадающая с предыдущими их обозначениями (log, фаза, потери, SMITH). Нажатие клавиши «SCALA» - дает номинал желаемой величины.

При активном втором вводе (нажата клавиша 2 первого блока), затем клавиша «MEANS» на экране высвечиваются характеристики  $S_{21}(f)$ ,  $S_{22}(f)$  и т.п.

### 3.3. Домашнее задание

**Этот пункт всегда выполняется перед экспериментальными измерениями.**

3.3.1. Рассчитать резонансные частоты, используя формулу (1), для типов колебаний, заданных таблицей 3.1, которые могут возбуждаться или нет, в прямоугольном резонаторе с размерами  $a*b*L=72*34*247$  мм в диапазоне частот **1900-3600 МГц**.

3.3.2. Изобразить структуру электромагнитных полей колебаний в прямоугольном резонаторе, рассчитанных в п.3.3.1.

3.3.3. Изобразить возможные положения петель возбуждения колебаний, заданных таблицей 3.1, в исследуемом резонаторе.

3.3.4. Рассчитать собственные добротности резонатора (формулы 7 и 8) для типов колебаний  $E_{mnp}$  или  $H_{mnp}$ , задаваемых таблицей 3.1. для дальнейших измерений.

Таблица 3.1 – Виды колебаний, заданные бригаде для расчетов.

№ бригады	1	2	3	4	5	6
ВИД колебания	$H_{101}$	$E_{111}$	$E_{113}$	$H_{104}$	$E_{112}$	$H_{102}$
	$H_{102}$	$H_{103}$	$H_{102}$	$H_{102}$	$H_{105}$	$E_{111}$
	$E_{110}$	$H_{104}$	$H_{103}$	$E_{112}$	$H_{101}$	$H_{101}$
письменный ответ на контр.вопросы №,№	4.1	4.2	4.4	4.14	4.13	4.7
	4.11	4.9	4.6	4.8.	4.12	4.11
	4.3	4.5	4.8	4.12	4.6	4.5

### 3.4. Порядок выполнения работы

**3.4.1.** Включить прибор ВАЦ в сеть (черная клавиша POWER) и клавишу первого канала (на блоке 1 «Ch - 1») дать установиться рабочему режиму 3-4 мин.

**3.4.2.** Получить на экране дисплея характеристику  $S_{11}(f)$  для нахождения резонансных частот возбуждаемых видов колебаний. Для этого:

- на блоке 3 нажать клавишу «START» и набрать частоту начала диапазона исследований, используя блоки 5 и 6:

- на блоке 3 нажать клавишу «STOP» и провести набор частоты (используя блоки 5 и 6) конца диапазона;

- в блоке 2 нажать клавишу «величина – MENS», на экране справа дисплея высвечивается смысловое значение клавиш блока 8;

- нажать клавишу блока 8 соответствующую « $S_{11}$ » - на экране возникает в заданном диапазоне частот эта характеристика (рис.8,б);

**3.4.3.** Нажать клавишу «Маркер» (блок 4), появится метка на экране; плавно изменяя частоту «Роликом» - блок 7- перемещаем метку по кривой  $S_{11}(f)$ . Измерить для каждого вида колебаний и записать в таблицу 3.2:



**3.4.4.** Включить канал 2 (клавиша «СН2») и повторить все измерения по п.3.4.3. с характеристикой отражения (рис.8,б), но входной сигнал поступает на выход резонатора, и внести результаты измерений в таблицу 3.3.(все величины пометить индексом «2»- режим отражения от выхода резонатора ).

Таблица 3.3

Экспериментальные результаты для видов колебаний  
со стороны выхода резонатора

Тип колебаний	$f_{расч}$	$f_{02}$	$(S_{22})_{02}$	$[Γ]_{02}$	$K_{св02}$	$Q_{н2}$		
	ГГц	$f_{12}$	$(S_{22})_{12}$	$[Γ]_{12}$	$K_{св12}$	на		
		$f_{22}$ ГГц	$(S_{22})_{22}$	$[Γ]_{22}$	$K_{св22}$	выходе		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
$H_{101}$								
$E_{110}$								
Другие типы колебаний								

**3.4.5.** Включить канал 1 (клавиша «СН1»), входной сигнал поступает на вход резонатора, и повторить все измерения по п.3.4.3. с характеристикой **передачи**  $S_{21}$  ( $K_{пер}$ , рис.8,а), и внести результаты измерений в таблицу 3.4.(все величины пометить индексом «п»- режим передачи) .

Таблица 3.4

Экспериментальные результаты по **коэффициенту передачи** для видов колебаний по каналу 1

Тип колебаний	$f_{\text{расч}}$	$f_{0\text{п}}$	$(S_{21})_{0\text{п}}$	$[\Gamma]_{0\text{п}}$	$K_{\text{св}0\text{п}}$	$Q_{\text{н}2}$		
	ГГц	$f_{1\text{п}}$	$(S_{21})_{1\text{п}}$	$[\Gamma]_{1\text{п}}$	$K_{\text{св}1\text{п}}$	на выходе		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
$H_{101}$								
$E_{110}$								
Другие типы колебаний								

**Сделать выводы:** о совпадении или нет (в процентах несовпадение) частот расчетных и измеренных тремя способами, о величинах добротностей, о соотношениях  $K_{\text{св}0}$ ,  $K_{\text{св}1}$ ,  $K_{\text{св}2}$  в трех проведенных измерениях, характеризующих согласование разных видов колебаний с входным трактом и выходным т. п.

**Напоминание:** величина  $K_{\text{св}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}}$ , где  $U_{\text{max}}$  - максимальная величина напряжения стоячей волны в передающем тракте,  $U_{\text{min}}$  - минимальная величина напряжения стоячей волны в передающем тракте.

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Какие типы колебаний могут возбуждаться в призматическом 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. Чем отличаются структуры полей  $E$  и  $H$  в прямоугольном волноводе и резонаторе, образованном на его основе?

4.9. Дайте определение добротности резонатора. Какие виды потерь энергии в нем присутствуют?

4.10. Если возбуждающие петли расположить при  $z=L/2$ , 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  $E_{110}$ ?

4.13. Прямоугольный резонатор возбуждается на типе колебаний  $H_{101}$ . Как будет называться этот тип колебаний, если оси «у» и «z» поменять местами?

4.14. Какой тип колебаний в исследуемом резонаторе будет низшим?

4.15. Что такое коэффициент передачи схемы, в которую включен резонатор?

4.16. Что характеризуют коэффициенты  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  в схеме, в которую включен резонатор?

## **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, где это требуется.

5.4. Измеренные параметры резонатора на заданных типах колебаний: резонансная частота; добротности, определенным по разным кривым.

5.5. Выводы по результатам сравнения экспериментальных и теоретических данных (частот, добротностей).

5.6. Дать письменный ответ на 3 контрольные вопроса, указанных в таблице 3.1.

## **6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие/ Боков Л.А., Замотринский В.А., Мандель А.Е. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013.- 410с.

2. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ, т. I- М.: Высшая школа, 1971, 446с.

3. Никольский В. В., Т.И.Никольская. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие/ В.В Никольский, Т.И.Никольская. 4-е изд. - М.: Либроком, 2010, - 544с.