

УДК 621.301.

Н. П. КУНДЕНКО, канд. техн. наук

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства (ХНТУСХ)  
им. Петра Василенко, г. Харьков**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ ОТКРЫТОЙ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ  
В РЕЖИМЕ СЛАБОЙ СВЯЗИ**

*Представлено преимущества метода эквивалентных схем для определения эффективности возбуждения колебаний в открытых резонансных системах.*

*Представлено переваги методу еквівалентних схем для визначення ефективності збудження коливань у відкритих резонансних системах.*

**Постановка проблемы**

Благодаря применению полусферической геометрии резонатора устраняются ошибки, связанные с определением углового положения образца, поскольку последний в этом случае помещается на плоское зеркало ОР [1, 2]. Образец должен располагаться в максимуме электрической компоненты поля стоячей волны в резонаторе. Это связано с необходимостью обеспечить наибольшую точность измерений. При этом одним из основных условий применимости метода ОР для измерения электрофизических характеристик веществ являются малые потери мощности в измеряемом образце, так как только в этом случае ОР с образцом остается высокодобротной резонансной системой, и сохраняются все преимущества такого метода измерений. Поэтому для диагностики с помощью ОР различных органических растворов толщина образца должна быть меньше величины скин-слоя. В ряде практических случаев бывает необходимо исследовать образцы, имеющие цилиндрическую форму. В этом случае возникает техническая трудность, связанная с расположением такого образца в объеме резонатора, т. к. при каждом измерении последний должен помещаться в область с одной и той же напряженностью электрического поля.

В сантиметровом диапазоне длин волн в качестве резонансной системы используется объемный цилиндрический резонатор с колебанием  $TM_{010}$ , который как раз и позволяет измерять электрофизические характеристики веществ, имеющих цилиндрическую форму [3]. При этом, если выполняется условие  $b \ll a$  ( $a$  – радиус резонатора,  $b$  – радиус цилиндрического образца), то поле в измеряемом веществе будет однородным [3]. Применение такого резонатора в миллиметровом диапазоне вызывает определенные трудности в связи с уменьшением его геометрических размеров и ростом поверхностного сопротивления металла, из которого он изготовлен [4]. Использование же сверхразмерного объемного резонатора не целесообразно, поскольку в такой резонансной системе кроме основного колебания  $TM_{010}$  будут возбуждаться еще и высшие. А это в итоге может привести к неверной трактовке результатов измерений. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры для угловой селекции спектра колебаний в таком резонаторе.

**Цель статьи** провести как теоретические, так и экспериментальные исследования по возбуждению в отрезке круглого волновода, выполненного в центре плоского зеркала резонатора, волны  $TM_{01}$  (и с помощью колебания  $TEM_{01q}$ ).

**Основная часть**

Исследования проводим с помощью метода эквивалентных схем [5, 6], который является довольно простым и наглядным. Само представление резонатора в виде колебательного контура с сосредоточенными постоянными имеет два основных недостатка: переходные процессы в резонаторе и его эквивалентной схеме могут быть различными; недостаточно полно раскрывается волновая природа процессов, происходящих в резонаторе. Однако если в резонаторе существует невырожденный высокодобротный тип колебаний с малыми потерями мощности, то анализ

энергетических характеристик резонансной системы с помощью метода эквивалентных схем можно считать обоснованным.

В общем случае резонатор можно представить в виде параллельного или последовательного колебательных контуров. Представление резонатора в виде той или иной схемы является произвольным и зависит лишь от выбора плоскости отсчета [5]. Если эту плоскость поместить в минимуме стоячей волны напряжения в подводющем волноводе при расстройке, то в этом случае резонатор представляется в виде параллельного колебательного контура, а его входное сопротивление  $Z_{ex}$  будет величиной действительной и минимальной, т. е.  $Z_{ex} \perp Z_0 = 1/KCBH$  ( $Z_0$  – волновое сопротивление линии передачи). Если же плоскость эквивалентного представления расположена в максимуме стоячей волны напряжения в волноводе при расстройке, то резонатор представляется в виде последовательного колебательного контура. При этом входное сопротивление  $Z_{ex}$  также будет величиной действительной, но максимальной, т. е.  $Z_{ex} / Z_0 = KCBH$ . Однако, как показано в работе [7], в зависимости от величины связи свойства открытого и объемного резонаторов сильно отличаются. Поэтому, естественно предположить, что выбор эквивалентной схемы представления параметров ОР, в отличие от объемного резонатора, будет зависеть от величины связи с волноводным трактом. В режиме слабой связи ( $\Gamma > 0$ ) ОР, по-видимому, должен представляться в виде последовательного колебательного контура. В этом случае входное сопротивление в плоскости эквивалентного представления резонатора является величиной действительной и максимальной, как и сопротивление самого ОР при резонансе. В случае же сильной связи ( $\Gamma < 0$ ) ОР, по-видимому, можно представить в виде параллельного колебательного контура. При этом входное сопротивление в плоскости эквивалентного представления резонатора является величиной действительной и минимальной, как и сопротивление самого ОР при резонансе. Таким образом, устраняется неоднозначность в выборе эквивалентной схемы представления параметров ОР в режимах слабой или сильной связи.

Представим отражательный ОР, который характеризуется слабой связью с волноводной линией передачи ( $\Gamma > 0$ ), в виде последовательного колебательного контура с параметрами  $L_0, C_0, R_0$ . В этом случае максимум стоячей волны напряжения в волноводе при расстройке расположен в плоскости а–а (рис. 1а). Резонатор возбуждается с помощью идеального генератора напряжения, характеризуемого мгновенным значением э.д.с.  $e_r$  и имеющего внутреннее сопротивление  $R_r = 0$  [8]. УС представим в виде четырехполюсника, связанного с генератором и резонатором с помощью идеальных трансформаторов напряжения с коэффициентами трансформации  $n_1$  и  $n_2$ , соответственно. Связь ОР с подводющим волноводом будем описывать с помощью индуктивности связи  $L_{CB}$ . Это связано с тем, что мы рассматриваем в качестве элемента связи щель.

Активными потерями в УС пренебрегаем, поскольку только в этом случае связь генератора с резонатором можно рассматривать с помощью идеальных трансформаторов напряжения [5]. Сопротивлением  $R_{и}$  будем характеризовать связь ОР со свободным пространством. Оно характеризует излучение СВЧ мощности из элемента связи в окружающее пространство при возбуждении колебаний в ОР. Как генератор напряжения, с одной стороны, так и резонатор с УС – с другой, нагружены на волновое сопротивление  $Z_0$ .

Здесь необходимо отметить тот факт, что последовательное (рис. 1а) включение  $L_{CB}$  и  $R_{и}$  в УС не принципиально. Это обусловлено тем, что на участке цепи можно перейти от одной схемы включения к другой при условии, что ток и напряжение неизменны в тех частях схемы, которые не подверглись преобразованию [8].

Проводить энергетический анализ резонансной системы удобнее с помощью приведенной эквивалентной схемы, изображенной на рис. 1б. Условием резонанса в такой колебательной системе является равенство нулю суммы всех реактивных сопротивлений контура [8], тогда эквивалентная схема примет вид, изображенный на рис. 1в. Мощность  $P_1$  рассеянную в резонаторе, определим как

$$P_1 = n_1^2 n_2^2 R_0 I_r^2, \tag{1}$$

где  $I_r$  - действующее значение тока.

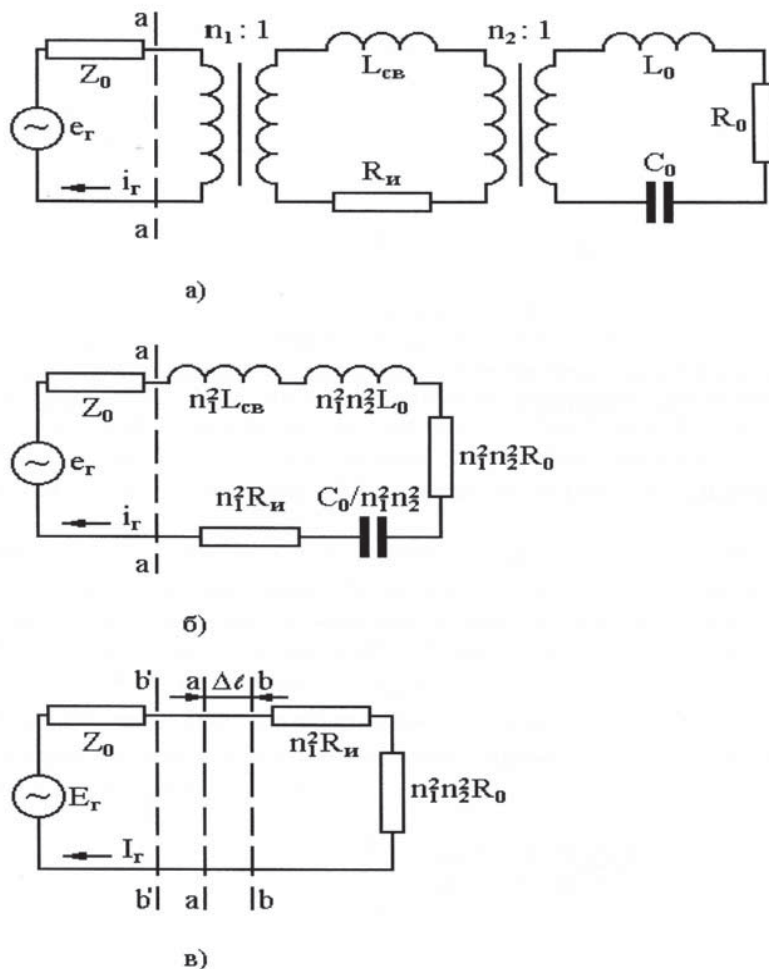


Рис. 1. Эквивалентные схемы отражательного ОР, представленного в виде последовательного колебательного контура

Мощность  $P_2$ , рассеянная в резонаторе и окружающем его пространстве, равна

$$P_2 = (n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_{н}) I_r^2. \tag{2}$$

Эффективность возбуждения колебания в ОР найдем как отношение мощностей  $P_1$  и  $P_2$ . С учетом выражений (1) и (2) запишем в окончательном виде:

$$\eta_1 = 1 / \left( 1 + \frac{R_{н}}{n_2^2 R_0} \right). \tag{3}$$

Наличие элемента связи приведет к тому, что при настройке в резонанс максимуму стоячей волны напряжения в линии сместится на  $\Delta l$  из плоскости  $a-a$  в плоскость  $b-b$ .

Поскольку мы выбрали индуктивную связь, то смещение произойдет в сторону резонатора. Для емкостной связи ОР с подводящим волноводом (отверстие связи) максимум стоячей волны напряжения при настройке в резонанс сместится в сторону генератора (плоскость  $b'-b'$ ). Поскольку положительное направление отсчета  $l$  мы выбрали  $I$  генератору, то для индуктивной связи  $\Delta l$  берется со знаком "-", а для емкостной - ее знаком "+".

В момент резонанса в плоскости  $b-b$  входное сопротивление

$Z_{bb} = (n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_H)$  и коэффициент отражения  $\Gamma_{OP}$  величины действительные. Однако все рассуждения о представлении резонатора в виде последовательного колебательного контура с сосредоточенными постоянными справедливы только для плоскости  $a-a$ . Поэтому необходимо трансформировать  $Z_{bb}$  и  $Z_{OP}$  в эту плоскость, где они будут уже комплексными величинами. Для трансформации  $Z_{bb}$  используем известное выражение [9] связывающее сопротивление в некотором сечении линии ( $b-b$ ) с сопротивлением  $Z$  произвольном сечении линии ( $a-a$ )

$$\frac{Z_{aa}}{Z_0} = \frac{Z_{bb} + j Z_0 \operatorname{tg} \varphi / 2}{Z_0 + j Z_{bb} \operatorname{tg} \varphi / 2}, \quad (4)$$

где  $\varphi = 2 \gamma \Delta l$ ,

$\gamma = 2 \pi / \lambda_g$  - постоянная распространения волны в данной линии,

$\lambda_g$  - длина волны в волноводе.

Аналогичным образом можем записать  $\dot{\Gamma}_{OP}$  в сечении линии ( $a-a$ ), зная  $\Gamma_{OP}$  в сечении ( $b-b$ )

$$\dot{\Gamma}_{OP} = |\Gamma_{OP}| e^{-j\varphi} = |\Gamma_{OP}| (\cos \varphi - j \sin \varphi). \quad (5)$$

С другой стороны [9]

$$\dot{Z}_{aa} / Z_0 = (1 + \dot{\Gamma}_{OP}) / (1 - \dot{\Gamma}_{OP}). \quad (6)$$

$$\left(1 + \frac{n_1^2 R_H}{n_1^2 n_2^2 R_0}\right) = \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (1 - 2 |\Gamma_{OP}| \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2) + 2 |\Gamma_{OP}| \sin \varphi}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (1 - 2 |\Gamma_{OP}| \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2) - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} 2 |\Gamma_{OP}| \sin \varphi}} \frac{Z_0}{n_1^2 n_2^2 R_0}. \quad (7)$$

Если теперь ОР поместить в экранирующий металлический цилиндр, то это равносильно тому, что  $R_H \rightarrow 0$ .

$$\frac{n_1^2 n_2^2 R_0}{Z_0} = \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (1 - 2 |\Gamma_{ЭОР}| \cos \varphi + \Gamma_{ЭОР}^2) - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} 2 |\Gamma_{ЭОР}| \sin \varphi}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (1 - 2 |\Gamma_{ЭОР}| \cos \varphi + \Gamma_{ЭОР}^2) + 2 |\Gamma_{ЭОР}| \sin \varphi}}. \quad (8)$$

Теперь запишем в окончательном виде выражение, определяющее эффективность возбуждения колебаний в ОР в режиме слабой связи

$$\eta_1 = \frac{\left[ \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (1 - 2 |\Gamma_{ЭОР}| \cos \varphi + \Gamma_{ЭОР}^2) + 2 |\Gamma_{ЭОР}| \sin \varphi \right]^{1/2}}{\left[ \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (1 - 2 |\Gamma_{OP}| \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2) + 2 |\Gamma_{OP}| \sin \varphi \right]^{1/2}} \times \frac{\left[ 1 - 2 |\Gamma_{OP}| \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2 - 2 |\Gamma_{OP}| \sin \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right]^{1/2}}{\left[ 1 - 2 |\Gamma_{ЭОР}| \cos \varphi + \Gamma_{ЭОР}^2 - 2 |\Gamma_{ЭОР}| \sin \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right]^{1/2}}. \quad (9)$$

Выразим добротности открытой резонансной системы через параметры эквивалентной схемы (см. рис.1б):

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{CB}} + \frac{1}{Q_{BH}}, \quad (10)$$

т. е. мы получили выражение, отличающееся от известного соотношения для объемных резонаторов [5] наличием добротности связи ОР со свободным пространством. Когда ОР помещается в экранирующий металлический цилиндр  $R_H \rightarrow 0$  ( $Q_{BH} \rightarrow \infty$ ), и нагруженная добротность  $Q_H$  как экранированного открытого, так и объемного резонаторов, будет определяться собственной добротностью ( $Q_0$  и добротностью связи  $Q_{CB}$ ).

Введем коэффициент связи волноводного тракта с ОР как отношение мощности, рассеянной в подводящем волноводе, к мощности, рассеянной в резонаторе.

Вводя коэффициент связи волноводного тракта с открытой резонансной системой (ОР и свободное пространство) как отношение мощности, рассеянной во внешней цепи, к мощности, рассеянной в резонаторе и окружающем его пространстве,

т. е.

$$\beta_3 = \frac{Z_0 I_T^2}{(n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_H) I_T^2} = \frac{Z_0}{n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_H} = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2} = \eta_1 \beta_1, \quad (11)$$

выражение для нагруженной добротности  $Q_H$  ОР можно представить в виде

$$Q_H = \eta_1 Q_0 / (1 + \beta_3). \quad (12)$$

Полученное выражение показывает, что нагруженная добротность ОР по сравнению с нагруженной добротностью объемного резонатора [4], имеющего такую же собственную добротность  $Q_0$  и такую же связь с подводящим волноводом  $\beta = \beta_3$ , меньше в  $\eta_1$  раз. Выражение позволяет по измеренным значениям  $Q_H$ ,  $\beta_3$  и  $\eta_1$  определить собственную добротность  $Q_0$  ОР. С другой стороны, для объемного резонатора  $\eta_1 = 1$ , поскольку отсутствует связь со свободным пространством, и в режиме согласования ( $\beta_3 = 1$ )  $Q_H = Q_0 / 2$ , что хорошо согласуется с известными результатами.

$$\Gamma_{OP} = \frac{n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_H - Z_0}{n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_H + Z_0} = \frac{1 - \beta_3}{1 + \beta_3}, \quad (13)$$

$$\Gamma_{ЭОР} = \frac{n_1^2 n_2^2 R_0 - Z_0}{n_1^2 n_2^2 R_0 + Z_0} = \frac{1 - \beta_1}{1 + \beta_1}. \quad (14)$$

Если теперь сравнить эти два выражения, то можно заметить, что  $(1 - \beta_3) > (1 - \beta_1)$ , т.к.  $\beta_3 < \beta_1$ , поскольку  $\eta_1 < 1$ . С другой стороны,  $(1 + \beta_3) < (1 + \beta_1)$  по той же причине. Это говорит о том, что при помещении ОР в экранирующий металлический цилиндр, значение коэффициента отражения от резонатора падает. Это и понятно из простых физических соображений. Когда помещаем ОР в экранирующий металлический цилиндр, мы устраняем канал утечки энергии в окружающее пространство. Следовательно, мы уменьшили потери в резонансной системе, а поскольку рассматривается режим слабой связи ОР с подводящим волноводным трактом ( $Z_{ex} / Z_0 > 1$ ), то снижение  $Z_{ex}$  приведет к уменьшению коэффициента отражения от резонатора ( $\Gamma_{ЭОР}$ ). Но здесь не обходимо



помнить, что все рассуждения относятся только к случаю существования в резонаторе высокодобротного невырожденного колебания. Выразим основные параметры ОР:

### Вывод

С помощью метода эквивалентных схем проанализирована эффективность возбуждения колебаний  $TE_{m_{01q}}$  и  $TM_{m_{01q}}$  в открытой резонансной системе щелевым элементом связи. Показано, что с помощью метода эквивалентных схем можно определять эффективность возбуждения колебаний в открытых резонансных системах, включенных в состав волноводной линии передачи, в режимах слабой связи с нагрузкой.

### Список литературы

1. Breeden K.H. Fabry-Perot cavity for dielectric measurements / K. H. Breeden, J. B. Langley // Review of Scientific Instruments. – 1969. – Vol. 40, No. 9. – P. 1162–1163.
2. Jones R.G. Precise dielectric measurements at 35 GHz using an open microwave resonator / R.G. Jones // Proc. IEE. – 1976. – Vol. 123, No. 4. – P. 285–290.
3. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М: Госуд. Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963. – 404 с.
4. Ширман Я. Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы / Я. Д. Ширман. – М.: Госуд.изд-во лит-ры по вопросам связи и радио. – 1959. – 380 с.
5. Альтман Дж. Устройства СВЧ / Дж. Альтман; пер. с англ, под ред. И. В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 488 с.
6. Малышев В. А. Об эквивалентности резонаторов и колебательных контуров / В. А. Малышев // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, № 8. – С. 1631–1637.
7. Miyazaki Y. Excitation properties of electromagnetic fields in Fabry-Perot resonators / Y. Miyazaki // Journal of the Physical Society of Japan. – 1974. – Vol. 37, No. 4. – P. 1153–1163.
8. Курс теоретических основ электротехники / [Аржанников Е. П., Брунов Б. Я., Гольденберг Л. М., Наумов Н. А.]; под ред. Б. Я. Брунова. – Л.: Изд-во Военной Краснознаменной академии связи, 1957. – 572 с.
9. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ: В 2-х т. / И. В. Лебедев. – М.: Высшая школа, 1970. – Т.1. – 440 с.

### DETERMINATION OF GOOD QUALITY OF RESONANT OPEN SYSTEM IS IN MODE OF LOOSELY-COUPLED INTERFACE

N. P. KUNDENKO, Cand. Tech. Scie.

*Advantages of method of equivalent charts are presented for determination of efficiency of excitation of vibrations in resonant open system.*

Поступила в редакцию 03.09 2012 г.