

УДК 621.317, 621.372

РАСЧЕТ КОАКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА С УКОРАЧИВАЮЩЕЙ ЕМКОСТЬЮ

Ле Куанг Туен¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Теоретически и экспериментально исследуется коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью в дециметровом диапазоне длин волн. Рассчитывается резонансная частота коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью в квазистационарном приближении. Рассматривается представление поля коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью для разработки его строгой полноволновой электродинамической модели. Приводятся результаты измерения резонансной частоты и собственной добротности коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью.

Ключевые слова: коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью, дециметровый диапазон волн, квазистационарное приближение, полноволновая модель.

CALCULATION OF THE COAXIAL RESONATOR OF SHORTENING CAPACITY

Le QuangTuyen

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russia.

The article presents theoretical and experimental research of the coaxial resonator of shortening capacity in decimeter wavelength range. Resonant frequency of the coaxial resonator of shortening capacity is calculated in quasi-stationary approximation. The article discusses the field of the coaxial resonator of shortening capacity to develop its full-mode electrodynamic model. The author provides the results of measurement of resonance frequency and the Q factor of the coaxial resonator of shortening capacity.

Keywords: coaxial resonator of shortening capacity, decimeter wavelength range, quasi-stationary approximation, full-mode model

Введение. В диапазоне дециметровых волн широко применяются линии передач с *TEM*-волнами и резонаторы на их основе [1]. Распространенным типом измерительного резонатора в этом диапазоне является коаксиальный резонатор с зазором в центральном электроде, так называемой "укорачивающей емкостью", которая позволяет существенно уменьшить длину резонатора в сравнении с полуволновой. В зазор, т.е. в «укорачивающий конденсатор» такого измерительного резонатора помещается диэлектрический образец для точного измерения его параметров в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц. Коаксиальный резонатор с «укорачивающей емкостью» (КРУЕ) можно также рассматривать как «тороидальный резонатор» - один из типов квазистационарных резонаторов. Для расчета характеристик резонатора этого типа используются два подхода. Первый основан на квазистационарном приближении с аппроксимацией резонатора колебательным контуром с сосредоточенными параметрами (квазистационарная модель). Другой, более строгий, электродинамический подход основан на полноволновом представлении поля в резонаторе (полноволновая модель). В статье рассматриваются методы расчета КРУЕ и результаты теоретического и экспериментального исследования КРУЕ.

Квазистационарное приближение. На рис. 1, а показан разрез коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью в разрезе. Его размеры:

- радиус центрального электрода и внутренний радиус внешнего цилиндра соответственно;
- длины нижней и верхней коаксиальных частей;
- высота зазора;
- граничные поверхности двух областей соответственно.

¹Ле Куанг Туен, бакалавр, e-mail: tetuonglegu142@gmail.com
Le Quang Tuyen, a bachelor, e-mail: tetuonglegu142@gmail.com

При моделировании тороидального резонатора методом квазистационарного приближения, резонатор рассматривается как колебательный контур, составленный из индуктивных и емкостных элементов [2, 3], рассматривается как колебательный контур, составленный из индуктивных и емкостных элементов [2, 3].

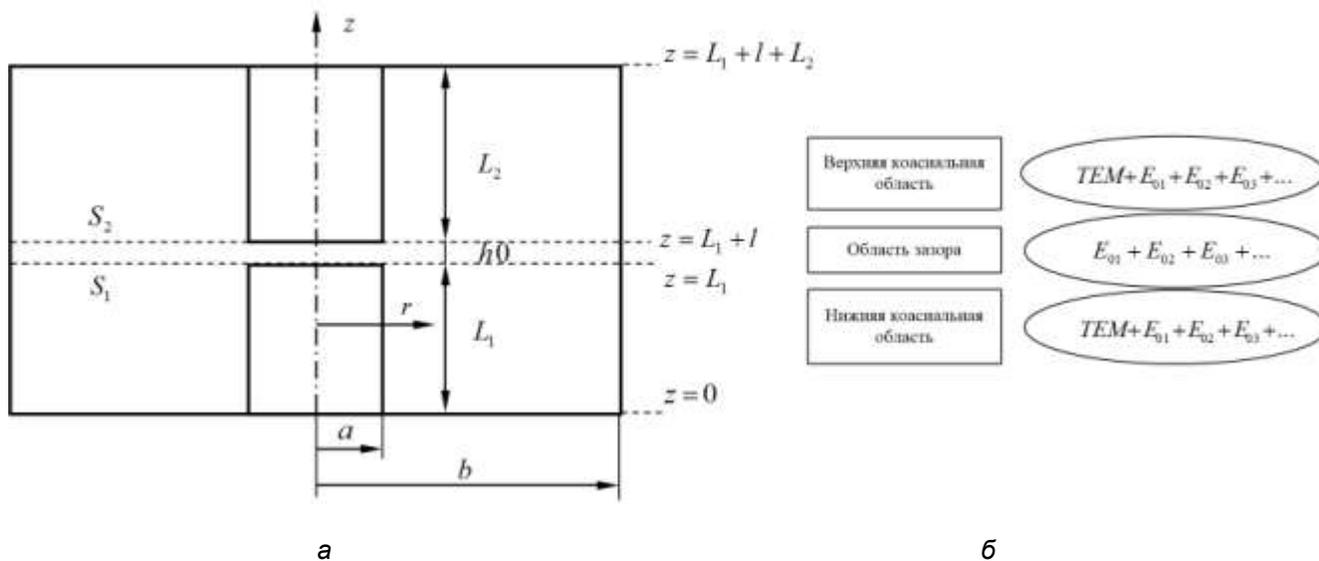


Рис. 1. Коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью (а) и поле в нем (б)

Электрическое поле низшего (основного) типа колебания сосредоточено в зазоре между плоскими торцевыми поверхностями верхнего и нижнего центральных электродов. Полная емкость зазора равна емкости параллельно соединенных емкости плоского конденсатора – зазора C_0 и емкости боковых поверхностей центральных электродов C_σ .

$$C_\Sigma = C_0 + C_\sigma. \quad (1)$$

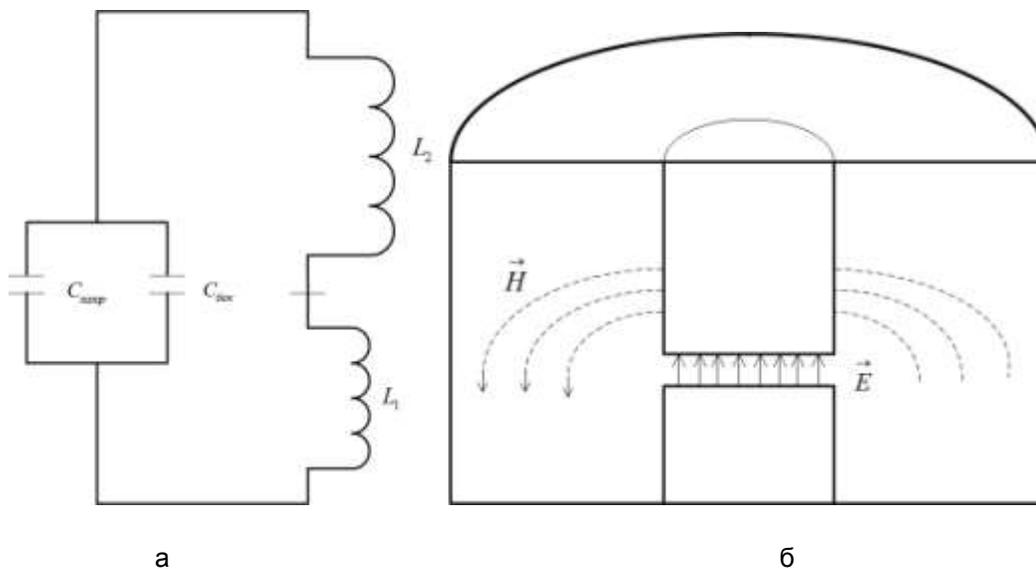


Рис. 2. Квазистационарный резонатор (а) и его эквивалентная схема (б)

Емкость плоского конденсатора-зазора, как известно, равна:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \pi a^2}{h_0}, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная вакуума; ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость среды в резонаторе. Боковая емкость центральных электродов приближенно рассчитывается по формуле [3]:

$$C_{\delta} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \cdot 2a \cdot \ln \left[\frac{2b - a}{h_0} \right]. \quad (3)$$

Магнитное поле сосредоточено в пространстве между центральными проводником и цилиндрическим корпусом КРУЕ. Входное сопротивление закороченных на конце отрезков коаксиальной линии выше и ниже зазора равно [3]:

$$X_{L1} = j \cdot \rho \cdot \operatorname{tg}(k_2 L_1), \quad (4a)$$

$$X_{L2} = j \cdot \rho \cdot \operatorname{tg}(k_2 L_2), \quad (4b)$$

где $\rho = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_2}} \cdot \ln \left(\frac{b}{a} \right)$ – волновое сопротивление коаксиальной линии [Ом]; $k = \frac{2\pi \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon_2}}{c}$ – волно-

вое число [м^{-1}]; c – скорость света в вакууме [м/с]; f – частота [Гц].

При длине закороченного с одной стороны отрезка коаксиальной линии менее четверти волны в нем, его входное сопротивление, как известно, имеет индуктивный характер. Сопротивление зазора имеет емкостный характер

$$X_c = \frac{1}{j\omega C_{\Sigma}}. \quad (5)$$

Условием резонанса является равенство нулю полного реактивного сопротивления, т.е.

$$X_c + X_{L1} + X_{L2} = \frac{1}{j\omega C_{\Sigma}} + j \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} kL_1 + j \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} kL_2 = 0, \quad (6)$$

или

$$\frac{1}{\rho \cdot \omega C_{\Sigma}} - \operatorname{tg} kL_1 - \operatorname{tg} kL_2 = 0. \quad (7)$$

Расчет КРУЕ в квазистационарном приближении проводился в среде «Маткад -14». Исследовался КРУЕ с размерами: внутренний диаметр внешнего цилиндра $2b = 152,2$ мм, диаметр центрального электрода $2a = 38$ мм; длина нижней и верхней коаксиальных частей – $L_1 = 26$ мм и $L_2 = 38,5$ мм; высота зазора $h_0 = 3,2$ мм. При таких размерах расчетная резонансная частота КРУЕ в квазистационарном приближении составила $f_{расч} = 555,2$ МГц.

Полученный результат отличается от экспериментального значения ($f_{эксн} = 551,6$ МГц). Из расчета показано, что емкость зазора всегда превышает её расчетное значение на некоторую неизвестную величину ΔC . При помещении в зазор измеряемого диэлектрического образца величина ΔC изменяется неизвестным образом, что может приводить к значительной погрешности измерения диэлектрических параметров в квазистационарном приближении. Точно рассчитать КРУЕ с диэлектрическим образцом в зазоре в квазистационарном приближении невозможно. Более строгой является полноволновая модель КРУЕ, которая на данном этапе рассматривается в отсутствие образца в нем.

Полноволновая модель. Основным вопросом в строгой (полноволновой) модели резонатора является представление поля в разных областях внутри резонатора. Наиболее распространенным подходом является метод частичных областей с представлением поля в каждой области в виде ряда по полной ортогональной системе функций данной области и последующим «сшиванием» полей на общих границах областей и наложением граничных условий на стенках резонатора. Разбиение внутреннего объема резонатора на частичные области целесообразно делать так, чтобы эти области имели простую геометрическую форму (рис. 1, а) с известной полной ортогональной системой (собственных) функций – собственных волн (рис.1, б). Расчет тороидального резонатора по методу полноволновой модели заключается в строгом исследовании поля резонатора, описании всех типов азимутально-однородных волн, возможных в резонаторе [2, 4]. В общем случае поле тороидального резонатора представляется в виде суммы полей волны ТЕМ и бесконечного ряда волн E_{0m} . Объем тороидального резонатора условно разделяется на три области: нижняя коаксиальная область, расположенная ниже зазора; верхняя коаксиальная область - выше зазора и область зазора. Будем рассматривать резонатор с резонансной частотой ниже критической частоты волны E_{01} (и всех других E_{0m} волн) в коаксиальных частях резонатора и в области зазора. При этом ограничении (всегда выполняющемся в практических конструкциях резонатора) все волны E_{0m} будут затухающими.

Поле в нижней коаксиальной области резонатора представим в виде суммы полей распространяющейся волны ТЕМ и затухающих волн E_{0m} . Волна ТЕМ при $0 \leq z \leq L_1$, $a \leq r \leq b$ может рассматриваться как колебание ТЕМ в коаксиальной линии (1), причем волна в резонаторе является стоячей, поэтому электрические и магнитные компоненты описываются в виде:

$$E_{z,0} = 0, \quad (8a)$$

$$E_{r,0} = \frac{A_0}{2\pi \cdot r} \sin(k_2 z), \quad (8б)$$

$$H_{\varphi,0} = -j \frac{A_0}{W_2 \cdot 2\pi \cdot r} \cos(k_2 z), \quad (8в)$$

где r, φ, z – цилиндрические координаты; A_0 – амплитуда поля ТЕМ волны в нижней коаксиальной части – $W_2 = 120\pi \sqrt{\mu_2 / \varepsilon_2}$ – характеристическое сопротивление среды в резонаторе; μ_2 – относительная магнитная проницаемость среды в резонаторе; $k_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \mu_0 \mu_2}$ – волновое число в воздухе.

Компоненты волн E_{0m} будут:

Продольная

$$E_{z,m} = A_m Z_0(\chi_m r) \cos(h_m z), \quad (9a)$$

поперечные

$$E_{r,m} = -\frac{\gamma_m}{\chi_m} A_m Z_1(\chi_m r) \sinh(\gamma_m z), \quad (9б)$$

$$H_{r,m} = \frac{j}{\chi_m} \frac{k_2}{W_2} A_m Z_1(\chi_m r) \cosh(\gamma_m z), \quad (9в)$$

где A_m – амплитуда поля волны E_{0m} и

$$Z_0(\chi_m r) = J_0(\chi_m r) + P_m N_0(\chi_m r),$$

$$Z_0'(\chi_m r) = J_0'(\chi_m r) + P_m N_0'(\chi_m r) = -Z_1(\chi_m r) = -J_1(\chi_m r) - N_1(\chi_m r),$$

χ_m -поперечное волновое число, h_m -продольное волновое число,

$$h_m = \sqrt{k_2^2 - \chi_m^2} < 0, \quad h_m = -j\gamma_m, \quad \text{где } \gamma_m^2 = \sqrt{\chi_m^2 - k_2^2} > 0.$$

В верхней коаксиальной части состав волн такой же, как в нижней части, но с другими, в общем случае, амплитудами и начальными фазами.

Волна TEM:

$$E_{z,L} = 0, \quad (10a)$$

$$E_{r,L} = \frac{B_0}{2\pi \cdot r} \sin(k_2 z + \Theta), \quad (10б)$$

$$H_{\varphi,L} = -j \frac{B_0}{W_2 \cdot 2\pi \cdot r} \cos(k_2 z + \Theta), \quad (10в)$$

где B_0 – амплитуда поля TEM волны в области выше зазора. Фаза поля Θ определится из граничного условия $E_{r,m} = 0$ при $z = L_1 + h_0 + L_2$

$$\Theta = -k_2 L + \pi. \quad (11)$$

Компоненты волн E_{0m} :

Продольная:

$$E_{z,m} = B_m Z_0(\chi_m r) \cos(h_m z + \Theta_m), \quad (12a)$$

поперечные:

$$E_{r,m} = -\frac{\gamma_m}{\chi_m} B_m Z_1(\chi_m r) \sinh(\gamma_m z + \Theta_m), \quad (12б)$$

$$H_{r,m} = \frac{j k_2}{\chi_m W_2} B_m Z_1(\chi_m r) \cosh(\gamma_m z + \Theta_m), \quad (12в)$$

где $\Theta_m = -\gamma_m L$, B_m – амплитуда поля волн E_{0m} – в области выше зазора.

В области зазора при $L_1 \leq z \leq L_1 + h_0$ и $0 \leq z \leq b$ волна TEM возбуждает затухающие E_{0q} волны. Поле в этой области представляется как сумму затухающих встречных волноводных волн E_{0q} с компонентами:

$$E_{z,q} = J_0(\eta_q r) [C_q \exp(-\beta_q z) + D_q \exp(\beta_q z)], \quad (13a)$$

$$E_{r,q} = \frac{\beta_q}{\eta_q} J_1(\eta_q r) [C_q \exp(-\beta_q z) - D_q \exp(\beta_q z)], \quad (13б)$$

$$H_{\varphi,q} = j \frac{k_2}{W_2} \frac{J_1(\eta_q r)}{\eta_q} [C_q \exp(-\beta_q z) + D_q \exp(\beta_q z)], \quad (13в)$$

где $\beta_q = \sqrt{\eta_q^2 - k_q^2} > 0$, C_q, D_q – амплитуды встречных волноводных волн E_{0q} . Граничное условие $E_{z,q} = 0$ при $r = b$ приводит к равенству $\eta_q = V_{0,q} / b$, где $V_{0,q}$ – q-тый корень функции Бесселя порядка $n = 0$.

Экспериментальные результаты. Описанный выше КРУЕ исследовался экспериментально с помощью скалярного анализатора цепей P2M-18 в режиме измерения ослабления четырехполюсника. На рис. 3. приведена экспериментальная резонансная характеристика КРУЕ.

По экспериментальной резонансной частоте и размерам резонатора были рассчитаны поперечные волновые числа волн E_{0m} как корни уравнения, полученного из выражения для компоненты поля

$E_z(r)$ при граничном условии $E_z(r) = 0$ при $r = a$, $r = b$. В таблице приведены полученные значения безразмерных поперечных волновых чисел $\chi_m \cdot a$.

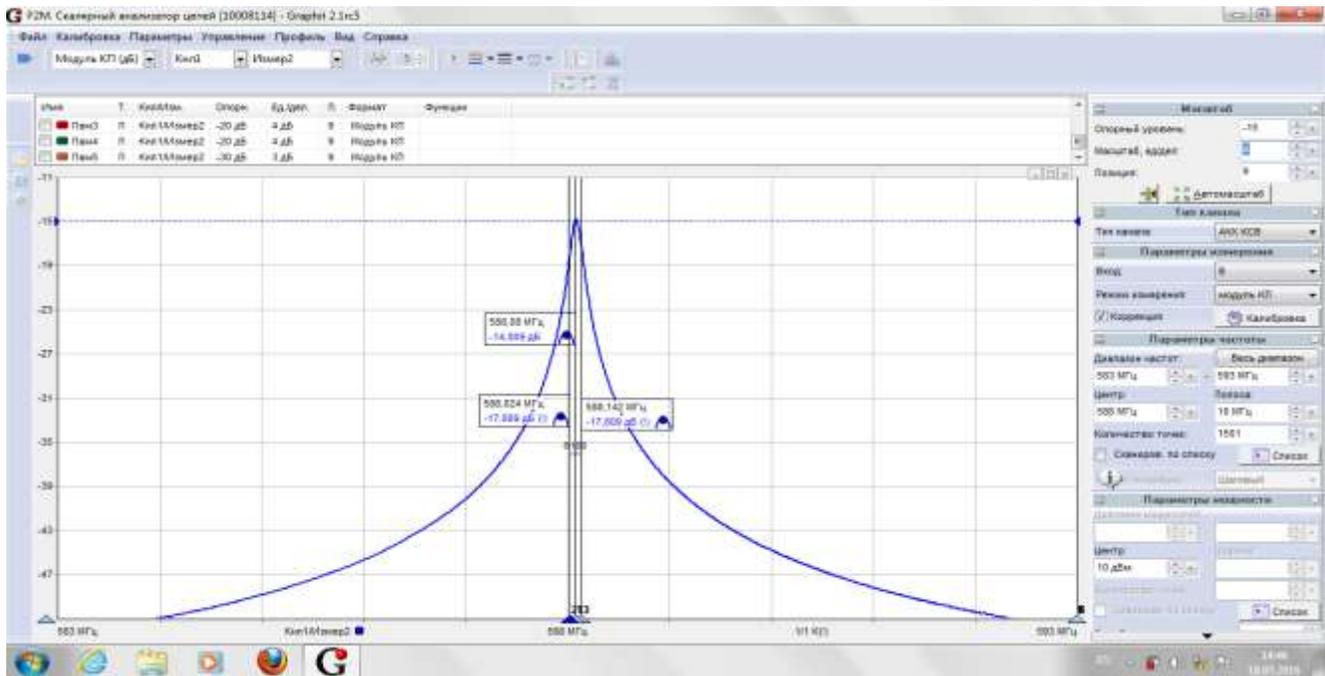


Рис. 3. Экспериментальная резонансная характеристика КРУЕ

Значения безразмерных поперечных волновых чисел $\chi_m \cdot a$ для КРУЕ

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\chi_m \cdot a$	1,0244	2,081	3,132	4,182	5,230	6,278	7,326	8,374	9,421	10,469
m	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\chi_m \cdot a$	11,516	12,564	13,611	14,659	15,706	16,753	17,800	18,848	19,895	20,942

Заключение. Коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью имеет собственную добротность более 6000 на частоте 550 МГц, что не достижимо в других типах резонаторов с аналогичными или меньшими размерами. Расчет пустого резонатора в квазистационарном приближении дает отличие от эксперимента на 3,6 МГц.

Для дальнейшего повышения точности расчета КРУЕ, в том числе, с магнитодиэлектрическим образцом в укорачивающем зазоре, необходимо продолжение работ по полноволновой модели этого резонатора. На данном этапе работы найдены значения поперечных волновых чисел в исследованном резонаторе на его экспериментальной резонансной частоте.

Биографический список

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: ГИФМЛ, 1963. 403 с.
2. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение волн: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1989. 543 с.

3. Орлов С.И. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов. М.: Советское радио, 1970. 256 с.
4. James Baker-Javis and Bill F.Riddle – Dielectric Measurements using a reentrant cavity mode-matching analysis, NIST Tech. note 1384. 1996, 12 p.