

# Метод цилиндрического резонатора $E_{010}$ для исследования диэлектриков на СВЧ

В.Н. Егоров, канд. техн. наук, В.В. Костромин, канд. техн. наук, Б.С. Романов, канд. физ.-мат. наук, А.П. Черницкий, канд. техн. наук

Широкое применение при изучении диэлектрических свойств электроизоляционных материалов (ЭИМ) в ОКБ КП в 60–70-х годах прошлого века нашел метод объемного цилиндрического резонатора (ЦР) с колебанием типа  $E_{010}$  [1,2]. Этот тип колебаний очень удобен при измерениях низких значений диэлектрической проницаемости  $\varepsilon \sim 2 - 4$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 10^{-5} - 10^{-3}$  электроизоляционных материалов, которые используются в качестве электрической изоляции кабельных изделий.

Сущность метода заключается в измерении электрических параметров цилиндрического резонатора с типом колебаний  $E_{010}$  без диэлектрического образца и с образцом в виде стержня, вводимого в резонатор соосно через отверстия в центре торцевых крышек цилиндрического резонатора. Исходными данными для расчета  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$  являются:

- резонансная частота пустого резонатора  $f_0$  и резонатора с образцом  $f_\varepsilon$ ;
- диаметр стержневого образца  $d = 2r$ ;
- добротность резонатора с образцом  $Q_\varepsilon$ ;
- добротность пустого резонатора  $Q_0$ ;
- диаметр резонатора  $D = 2R$ ;
- высота резонатора  $L$ .

Простые формулы для расчета  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$  образца в резонаторе  $E_{010}$  дает метод малых возмущений [3]:

$$\varepsilon = 1 + 0,539 \left( \frac{R}{r} \right)^2 \frac{f_\varepsilon - f_0}{f_0}, \quad (1)$$

$$\text{tg}\delta = \frac{0,269}{\varepsilon} \left( \frac{R}{r} \right)^2 \left( \frac{1}{Q_\varepsilon} - \frac{1}{Q_0} \right), \quad (2)$$

где  $f_0$  — резонансная частота пустого резонатора;  $f_\varepsilon$  — частота резонатора с образцом;  $Q_0$  — добротность пустого резонатора;  $Q_\varepsilon$  — добротность резонатора с образцом.

Погрешность метода малых возмущений растет с увеличением геометрических размеров образца. Максимальный радиус цилиндрического образца  $r_{\text{макс}}$  при измерении методом малых возмущений приближенно рассчитывается из соотношения

$$r_{\text{макс}} \leq \frac{R}{10\sqrt{\varepsilon}},$$

где  $R$  — радиус резонатора;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость образца.

С развитием вычислительной техники сложность расчетов по более строгим, чем метод малых возмущений, моделям, включающим функции Бесселя, перестала ограничивать практическое использование таких моделей. Более точные расчетные соотношения для данного метода приведены в рекомендации МЭК [4] и его отечественном аналоге [5].

В последующем методика измерения в  $E_{010}$  — резонаторе была усовершенствована специалистами Восточно-Сибирского НИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВС НИИФТРИ, г. Иркутск) [6]. В методике реализованы расчетные соотношения для  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$ .

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  (относительно воздуха) исследуемого образца рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \left( \frac{xc}{\pi d f_\varepsilon \sqrt{\varepsilon_2}} \right)^2 (1 + \Delta), \quad (3)$$

где  $c = 2,99792458 \cdot 10^{11}$  мм·с<sup>-1</sup> — скорость света в вакууме;  $d = 2r$  — диаметр образца, мм;  $f_\varepsilon$  — резонансная частота резонатора с образцом, Гц;  $\varepsilon_2 = 1,00060$  — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха при нормальных условиях;  $\Delta$  — поправка на влияние отверстий для ввода образца, рассчитывается методом возмущения и имеет вид:

$$\Delta = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = -2\delta f \cdot K_{1E}^{-1}; \quad (4)$$

$x$  — безразмерная величина, определяемая из уравнения

$$\frac{xJ_1(x)}{J_0(x)} - \frac{yZ_1(y)}{Z_0(y)} = 0, \quad (5)$$

где  $y = 2\pi r f_\varepsilon \sqrt{\varepsilon_2} / c$ ,  $J_n(y)$ ,  $N_n(y)$  — функции Бесселя и Неймана порядка  $n = 0; 1$ ;

$$\begin{aligned} Z_0(y) &= J_0(y) - [J_0(yR/r) / N_0(yR/r)] N_0(y), \\ Z_1(y) &= J_1(y) - [J_1(yR/r) / N_1(yR/r)] N_1(y). \end{aligned} \quad (6)$$

Для расчета  $\text{tg}\delta$  нагруженная добротность резонатора без образца  $Q_0$  и с образцом  $Q_\varepsilon$  пересчитыв-

ваеется в собственную добротность резонатора без образца  $Q_{00}$  и с образцом  $Q_{0\epsilon}$  по формуле

$$Q_{0i} = \frac{Q_i}{1 - 10^{-\gamma_i}}, \quad (7)$$

где  $\gamma_i = A_i/20$ ,  $A_i$  — ослабление, вносимое резонатором в тракт (дБ), индекс  $i$  принимает значения 0;  $\epsilon$ . Тангенс угла диэлектрических потерь исследуемого образца рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = K_{1\epsilon}^{-1} \left( \frac{1}{Q_{\epsilon 0}} - \frac{\eta}{Q_{00}} \right), \quad (8)$$

где  $K_{1\epsilon}$  — коэффициент заполнения резонатора по электрическому полю, равный отношению энергии электрического поля в образце к полной энергии резонатора:

$$K_{1\epsilon} = \left[ 1 + \xi \frac{[Z_1^2(yR/r) - (r/R)^2(Z_0^2(y) + Z_1^2(y))]}{\epsilon(r/R)^2[J_0^2(x) + J_1^2(x)]} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где  $\xi = J_0^2(x)/Z_0^2(y)$ ,  $Z_1(yR/r) = J_1(yR/r) - [J_0(yR/r)/N_0(yR/r)]N_1(yR/r)$ ,  $\eta$  — параметр, учитывающий изменение омических потерь в стенках резонатора после введения образца:

$$\eta = -\frac{R\sqrt{f_0/f_\epsilon}}{R+L} \times \left\{ 1 + \frac{\xi(L/R)Z_1^2(yR/r)}{\epsilon(r/R)^2[J_1^2(x) - J_0(x)J_2(x)] + \xi[Z_1^2(yR/r) - (r/R)^2(Z_1^2(y) - Z_0(y)Z_2(y))]} \right\}, \quad (10)$$

где  $Z_2(y) = J_2(y) - [J_0(yR/r)/N_0(yR/r)]N_2(y)$ .

Методика применима на частотах диапазона от 1 до 10 ГГц. Диапазон измеряемых параметров составляет от 1,5 до 10 по  $\epsilon$  и от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $10^{-2}$  по  $\operatorname{tg} \delta$ . Типичная расширенная неопределенность (предел относительной погрешности) измерений по данной методике составляет 1,5 % для  $\epsilon$  и не более 20 % для  $\operatorname{tg} \delta$ .

Наиболее удобно использование ЦР на частотах от 1500 до 7000 МГц, так как в этом диапазоне диаметр ЦР находится в пределах от 15 до 4 см, а диаметр стержня из исследуемого материала — от 2,7 до 10 мм. В нашей многолетней практике чаще всего использовалась измерительная установка с ЦР на рабочую частоту 3100 МГц. Образцы диаметром 6-7 мм изготавливали методом прессования гранул под давлением (полиэтилены). Стержни из более жестких материалов (фторопласты) изготавливали на токарном станке. На рис.1 приведена структурная схема измерительной установки.

Рис.1. Структурная схема измерительной установки: 1 — генератор СВЧ с калиброванным аттенуатором; 2 — индикатор резонанса с выходом напряжения развертки (осциллограф); 3 — частотомер; 4,6 — развязывающие вентили; 5 — измерительный резонатор ЦР-3100; 7 — детектор СВЧ; 8 — вольтметр

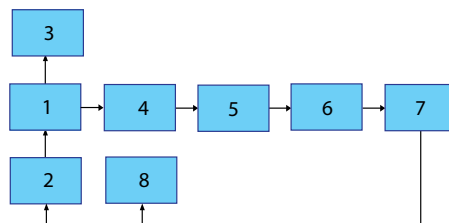


Рис.2. Внешний вид измерительной установки

В измерительной установке использовались следующие средства измерений:

- генератор Г4-80;
- частотомер: ЧЗ-54 с преобразователем ЯЗЧ-87 или частотомер ЧЗ-61;
- осциллограф: С1-48Б или С1-76;
- вольтметр: В7-40 или В7-32.

Все указанные приборы в настоящее время с успехом могут быть заменены современными скалярными анализаторами СВЧ цепей типа Р2М-04, Р2М-18 с компьютерным управлением и генераторами СВЧ на основе высокостабильных синтезаторов частоты (рис.3). Структурная схема установки на базе прибора Р2М-04 и резонатора ЦР-3100 приведена на рис. 4.

Имеющиеся в составе прибора программы обработки данных позволяют практически мгновенно «снимать» резонансные кривые и определять все необходимые данные для расчетов по формулам (3)—(10).

Время измерений характеристики одного образца сократилось с 1,0—1,5 ч до 3—5 минут. Это дает возможность одновременно с повышением производительности установки снизить погрешности измерений за счет колебаний температуры окружающей среды в процессе измерений.

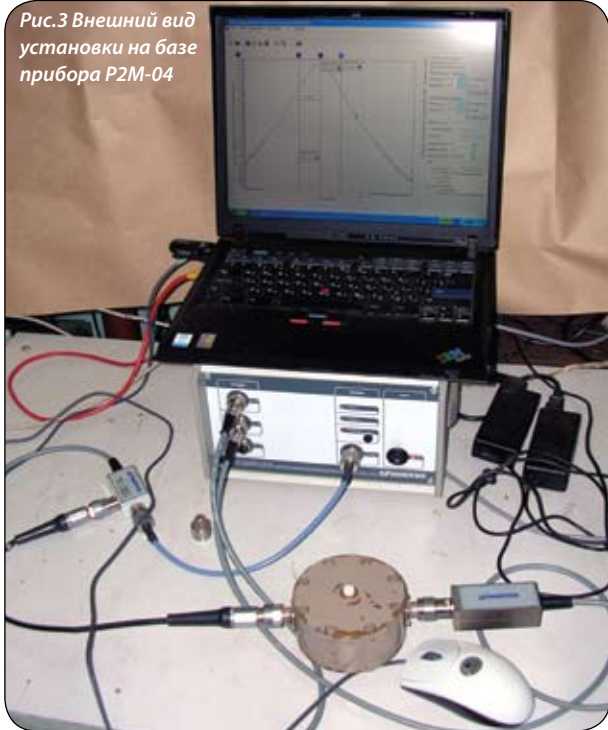


Рис.3 Внешний вид установки на базе прибора Р2М-04

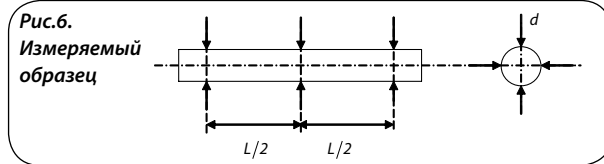


Рис.6. Измеряемый образец

Образец диэлектрика должен быть выполнен в форме цилиндрического стержня кругового поперечного сечения (рис. 6) и должен плотно входить в центральные отверстия резонатора. Допускается применение сменных пробок, цанг или разрезных втулок, обеспечивающих отсутствие зазоров между образцом и стенками отверстий резонатора. Глубина отверстий должна быть не менее диаметра образца.

Геометрические размеры образца:

- диаметр  $(0,05-0,10) \cdot D$ , длина не менее  $1,6 \cdot L$ , где  $D$  и  $L$  – диаметр и высота резонансной полости;
- конусность не более  $0,02$  мм;
- эллиптичность не более  $0,02$  мм;
- изгиб оси не более  $0,1$  мм.

Диаметр образца  $d$  измеряют с погрешностью не более  $\pm 0,005$  мм в шести точках, указанных на рисунке. Вычисляют среднее арифметическое значение этих измерений.

Вычисление результатов измерения проводят на компьютере по программе «CylRez», разработанной специалистами Восточно-Сибирского филиала ВНИИФТРИ.

Точность результатов измерения параметров резонатора без образца  $f_0$ ,  $A_0$ ,  $Q_{00}$  контролируется сравнением со значениями, указанными в технической документации на измерительный резонатор. Точность измерения диэлектрических параметров образцов контролируется с помощью комплекта стандартных образцов диэлектриков с аттестованными значениями  $\epsilon$  и  $\text{tg} \delta$ .

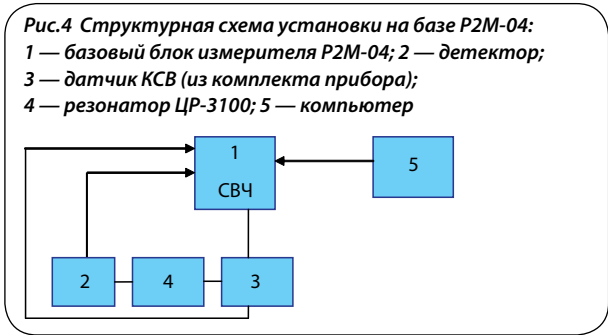


Рис.4 Структурная схема установки на базе Р2М-04: 1 — базовый блок измерителя Р2М-04; 2 — детектор; 3 — датчик КСВ (из комплекта прибора); 4 — резонатор ЦР-3100; 5 — компьютер

Чертеж измерительного резонатора с колебанием  $E_{010}$  на частоте 3100 МГц приведен на рис. 5.

Измерительный резонатор должен иметь собственную добротность не менее 10000 и переходное ослабление на резонансной частоте не менее 20 дБ.

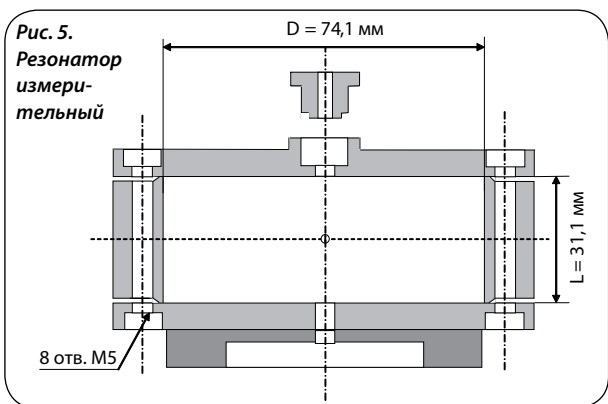


Рис. 5. Резонатор измерительный

## Литература

1. Кокшаров А.М. Электрические свойства электроизоляционных материалов на сверхвысоких частотах: автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 1971.
2. Бейкин А.И. Исследование диэлектрических характеристик новых полимерных электроизоляционных материалов: автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 1979.
3. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: ГИФМЛ, 1963.
4. Публикация МЭК 377-2-77.
5. ГОСТ 27496.2-87.
6. Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента. 2007. №2. С. 5—38.