

*V. A. Reshetov, S. B. Romadyonkina, O. S. Dragunkina*  
Saratov State University named after N. G. Chernyshevski, Saratov, Russia

*I. V. Ovchinnikova*  
Russian Chemistry-Technological University named after D. I. Mendeleev, Moscow, Russia

*D. L. Turunov*  
Samotlor Ltd, Samara, Russia

*A. B. Pivovarov*  
Vega-Favorite Ltd, Saratov, Russia

*An outlook of the application of differential-integral scanning calorimetry in the production and usage practice of composites based on various matrices and fillers is shown. A symbath relation between performance and the specific formation enthalpy loss and an automatic character of its distribution as the composite is being filled are found. The possibility to control over degradation processes by measuring the specific enthalpy of composites with time is proven.*

УДК 621

## **Преобразование СВЧ-колебаний в электродинамических системах с диэлектриком**

*И. Н. Антонов, А. В. Пивоваров*  
Саратовский государственный технический университет, г. Саратов, Россия

*Г. А. Овчинникова*  
Московский авиационный институт (Технический университет), Москва, Россия

*Рассмотрены методы расчета СВЧ-резонаторов, заполненных диэлектриком, а также преобразование СВЧ-колебаний в электродинамических системах.*

Собственная резонансная частота объемного резонатора зависит от типа волны, которую мы возбуждаем в нем, его геометрических размеров и диэлектрической проницаемости среды, заполняющей резонатор. Конструкция последнего определяет основной тип волны и по этой причине не меняется, изменить же собственную частоту можно в случае отклонения от номинального значения диэлектрического заполнения электродинамической системы. При взаимодействии с материалом заполнения изменяются параметры СВЧ-волн, такие как коэффициенты прохождения, отражения, ослабления, а также рассеяние и фаза. Следует отметить, что эти изменения характеризуют внутреннее состояние заполнения. Резонансные СВЧ-методы измерения нечувствительны к амплитудно-фазовым искажениям, обладают высокой точностью и чувствительностью.

Собственная резонансная частота объемного СВЧ-резонатора зависит от типа волны, возбуждаемой в резонаторе, его геометрических размеров и диэлектрической проницаемости заполнителя в нем. Основной тип волны, возбуждаемый в резонаторе, определяется его конструкцией и в процессе контроля не меняется. Поэтому собственная резонансная частота объемного резонатора уменьшается при отклонении параметров среды заполнения от номинальных. Рассмотрим преобразование СВЧ-колебаний в цилиндрическом резонаторе с типом волн  $H_{011}$  (рис. 1). Для нахождения численных зависимостей, связывающих размеры резонатора с параметрами

диэлектрика, воспользуемся методом малых возмущений для некоторого объема  $V$ , ограниченного замкнутой поверхностью  $S$ .

Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в объеме будут записаны как:

$$\begin{aligned} a - \operatorname{rot} \vec{H} &= j\omega_0 \varepsilon \vec{E}; \\ b - \operatorname{rot} \vec{E} &= -j\omega_0 \mu \vec{H}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\vec{E}, \vec{H}$  — векторы направленности электрического и магнитного полей, соответственно;

$\varepsilon$  и  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, соответственно, заполняющей объем  $V$ .

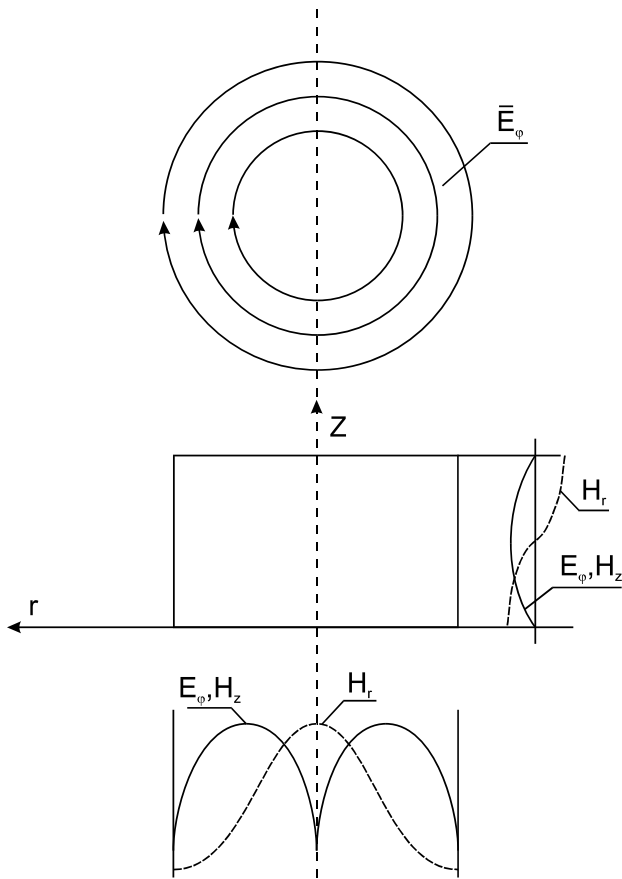


Рис. 1. Структура поля в резонаторе на волне  $H_{011}$

С помощью вектора Умова-Пойтинга можно установить связь между мощностью, поглощаемой внутри полости  $V$ , и энергией, входящей через поверхность  $S$  в единицу времени. Тогда в комплексно-сопряженной форме уравнения (1) будут иметь вид:

$$a \text{ — } \text{rot } \bar{H}^* = j\omega_0 \varepsilon \bar{E}^*; \tag{2}$$

$$b \text{ — } \text{rot } \bar{E}^* = -j\omega_0 \mu \bar{H}^*.$$

С помощью формулы

$$\text{div} [\bar{A}\bar{B}] = \bar{B} \text{rot } \bar{A} - \bar{A} \text{rot } \bar{B}$$

получим для уравнений (2, a, b)

$$-\text{div} [\bar{E}\bar{H}^*] = j [\mu \bar{H}\bar{H}^* - \varepsilon \bar{E}\bar{E}^*]. \tag{3}$$

Интеграл по объему  $V$  от (3) после преобразования левой части уравнения по формуле Гаусса-Остроградского в интеграл по поверхности  $S$  позволит получить поток вектора Умова-Пойтинга, который характеризует энергию, втекающую внутрь объема  $V$ , т. е.

$$N_S = \frac{1}{2} \int_S [\bar{E}\bar{H}^*] d\bar{S} = j \frac{\omega_0}{2} \left[ \int_V \mu \bar{H}\bar{H}^* dV - \int_V \varepsilon \bar{E}\bar{E}^* dV \right]. \tag{4}$$

Метод возмущений для небольших вариаций всех входящих в уравнения (1), (2), (4) величин позволяет получить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \text{rot } \delta \bar{H} &= j\delta\omega_0 \varepsilon \bar{E} + j\omega_0 \delta\varepsilon \bar{E} + j\omega_0 \varepsilon \delta \bar{E}, \\ \text{rot } \delta \bar{E} &= -j\delta\omega_0 \mu \bar{H} - j\omega_0 \delta\mu \bar{H} - j\omega_0 \mu \delta \bar{H}. \end{aligned} \tag{5}$$

Рассмотрим объем без потерь и окруженный идеально проводящей поверхностью  $S$ ; будем считать, что полость не содержит магнитных включений ( $\mu = 1$ ) и ее размеры не изменяются. Внутри такого объема внесем диэлектрик объемом  $\delta V_\varepsilon$  (рис. 2) с проницаемостью, которая отличается от проницаемости среды, заполняющей объем  $V$  на  $\delta\varepsilon$ , тогда уравнения (5) позволяют получить следующее уравнение:

$$\begin{aligned} j\delta\omega \left[ \int_V \mu \bar{H}\bar{H}^* dV - \int_V \varepsilon \bar{E}\bar{E}^* dV \right] - j\omega_0 \int_{\delta V_\varepsilon} \delta\varepsilon \bar{E}\bar{E}^* dV + \\ + j\omega_0 \left[ \int_V \mu \bar{H} \delta \bar{H}^* dV + \int_V \mu \delta \bar{H}\bar{H}^* dV \right] - \\ - j\omega_0 \left[ \int_V \varepsilon \bar{E} \delta \bar{E}^* dV - \int_V \varepsilon \delta \bar{E}\bar{E}^* dV \right] = 0, \end{aligned}$$

так как вариация энергии, втекающей в объем, равна нулю.

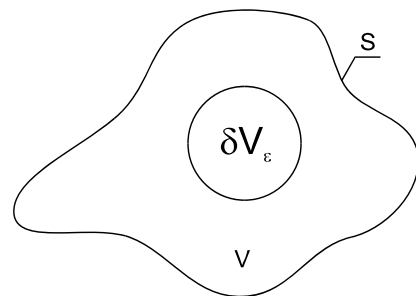


Рис. 2. Резонансная полость с диэлектрическим образцом

Подставляя в последнее уравнение значения  $\delta \bar{E}$  и  $\delta \bar{H}^*$  из (5), заменяя  $\bar{E}$  и  $\bar{E}^*$  их выражениями, полученными из (1), и исследуя тождества

$$\begin{aligned} \delta E \text{rot } \bar{H}^* - \bar{H}^* \text{rot } \delta \bar{E} = \text{div} [\delta \bar{H}^*], \\ \int_V \text{div} [\delta \bar{E}\bar{H}^*] dV = \int_S [\delta \bar{E}\bar{H}^*] dS = 0, \end{aligned} \tag{6}$$

получим после несложных преобразований

$$\frac{\delta\omega_0}{\omega_0} = - \frac{\int_{\delta V_\varepsilon} \delta\varepsilon \bar{E}\bar{E}^* dV}{\int_V \mu \bar{H}\bar{H}^* dV + \int_V \varepsilon \bar{E}\bar{E}^* dV}.$$

Пользуясь далее соотношением (6), из которого для рассматриваемого случая проводящей поверхности  $S$  (поток энергии  $N_S = 0$ ) следует, что

$$\int_V \mu \vec{H} \vec{H}^* dV = \int_V \varepsilon \vec{E} \vec{E}^* dV,$$

окончательно получим

$$\frac{\delta \omega_0}{\omega_0} = \frac{\delta f}{f_0} = - \frac{\int \delta \varepsilon \vec{E} \vec{E}^* dV}{2 \int \varepsilon \vec{E} \vec{E}^* dV}, \quad (7)$$

где  $f$  — собственная частота невозмущенной резонансной полости;

$\delta f = f_0 - f_1$  — изменение частоты при внесении диэлектрика;

$2 \int \varepsilon \vec{E} \vec{E}^* dV = W$  — энергия, запасенная в резонаторе.

В случае возбуждения резонатора на колебаниях типа  $H_{011}$  компонента электронного поля записывается как

$$E_\varphi(Z, r) = A \sin \frac{\pi Z}{l} J_1 \left( 3,83 \frac{r}{R} \right),$$

где  $l$  — высота резонатора;

3,83 — численное значение корня функции Бесселя  $J_1$ .

Используя соотношение (7) и проводя интегрирование числителя и знаменателя, получим, выбирая элемент объема  $dV = 2\pi r dr dz$ , следующее:

$$\begin{aligned} \frac{f_0 - f_1}{f_0} &= \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{\int_0^{R+d} \sin^{-2} \frac{\pi Z}{l} dZ \int_0^R J_1^2 \left( 3,83 \frac{r}{R} \right) r dr}{\int_0^0 \sin^{-2} \frac{\pi Z}{l} dZ \int_0^R J_1^2 \left( 3,83 \frac{r}{R} \right) r dr} = \\ &= \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{h}{R} \frac{\int_0^{h+d} \sin^{-2} \frac{\pi Z}{l} dZ}{\int_0^0 \sin^{-2} \frac{\pi Z}{l} dZ}, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $l$  — высота резонатора;

$d$  — толщина образца;

$h$  — расстояние от торцевой поверхности резонатора до нижней поверхности образца (рис. 3)

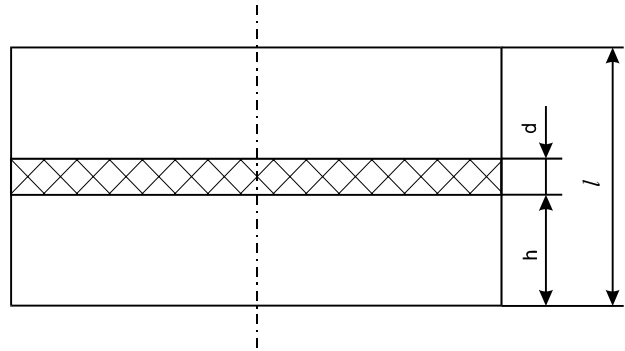


Рис. 3. Расположение диэлектрика в измерительном резонаторе

Преобразования выражения (8) приведут к расчетной формуле

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{\varepsilon - 1}{2} \left\{ \frac{d}{l} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{\pi}{l} d \right\}. \quad (9)$$

Учитывается в (9), что образец располагается в максимуме электрического поля и что  $d \ll l$  и  $\frac{d}{l} \rightarrow 0$ , можно получить

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} \approx (\varepsilon - 1) \frac{d}{l}. \quad (10)$$

Из формулы (10) видна линейная зависимость между частотой и толщиной образца: чувствительность тем выше, чем больше отношение  $\frac{\varepsilon - 1}{l}$ . Следовательно,

при конструировании нужно стремиться уменьшить высоту резонатора. Для экспериментальных исследований в сантиметровом диапазоне  $f$  составляет 9—10 ГГц.

Резонатор состоит из двух одинаковых обьединенных пазом для пропускания диэлектрических пробных образцов, при этом паз должен полностью перекрывать полость резонатора. Включая резонатор на проход с помощью петель магнитных диполей, осуществляются его возбуждение и связь с регистрирующим устройством.

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. Частота генератора периодически изменяется по линейному закону синхронно с напряжением горизонтальной развертки осциллографа. В момент совпадения частот генератора и измерительного резонатора на экране осциллографа возникает резонансная кривая. Сигнал с волномера подается на горизонтальный вход осциллографа через сумматор. Резонансную частоту отсчитывают по совмещению метки на линии развертки осциллографа, соответствующей вершине резонансной кривой.

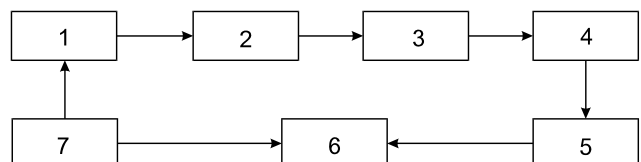


Рис. 4. Функциональная схема установки:

1 — СВЧ-генератор; 2 — резонансный волномер; 3 — вентиль; 4 — измерительный резонатор; 5 — детектор; 6 — осциллограф; 7 — генератор пилообразного напряжения

Изменение измерительного зазора (паза) от 1 до 3 мм не изменяет чувствительности резонансного преобразователя. Эта чувствительность определяется по формуле

$$k = \frac{\Delta f}{f_0 \Delta d},$$

где  $\Delta d$  — толщина слоя диэлектрика.

Повышение рабочих частот приводит к увеличению чувствительности, так как длина резонатора  $l$  может быть значительно уменьшена. На рис. 5 приведена зависимость собственной частоты резонатора  $f$  от заполнения измерительного зазора  $\Delta d^*$  и зависимость  $\Delta f$  от  $\Delta d^*$  для зазора (паза)  $\Delta l = 2$  мм.

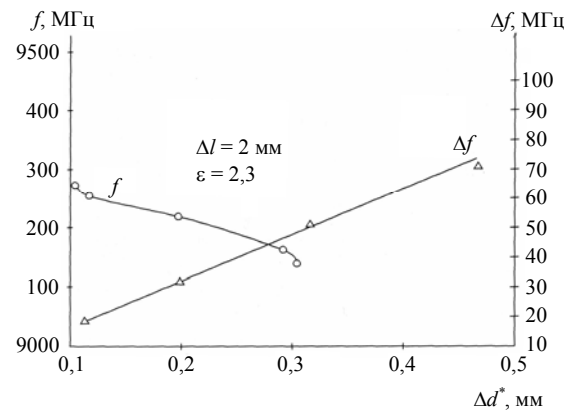


Рис. 5. Зависимости собственной частоты резонатора  $f$  от толщины диэлектрика  $\Delta d^*$  и изменения частоты  $\Delta f$  резонатора от  $\Delta d^*$  при  $\Delta l = 2$  мм (пленка полиэтилена —  $\varepsilon = 2,3$ )

Статья поступила в редакцию 12 июня 2004 г.

## Transformation of microwave oscillations in electrodynamic systems with dielectric

*I. N. Antonov, A. V. Pivovarov*

Saratov State Technical University, Saratov, Russia

*G. A. Ovchinnikova*

Moscow Aircraft Institute (Technical University), Moscow, Russia

*The computational methods for microwave resonators, filled by dielectric, have been surveyed in the paper.*