

# РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 614.89:537.868

## ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ В ИЗМЕРЕНИЯХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ

Кунденко Н. П., Черенков А. Д., Кунденко А. Н.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка*

*Приведены результаты исследования по возбуждению в отрезке круглого волновода, выполненного в центре плоского зеркала резонатора.*

**Постановка проблемы.** При исследовании электрофизических параметров веществ необходимо переходить к резонансным системам, адекватным рассматриваемому диапазону длин волн – к открытым резонансам (ОР). Общий недостаток существующих резонансных систем – это излучение энергии во внешнее пространство, что в итоге приводит к значительному снижению добротности. С укорочением рабочей длины волны будут также уменьшаться и размеры самих резонаторов. Все это делает проблематичным использование открытых диэлектрических резонаторов в коротковолновой части миллиметрового и, тем более, в субмиллиметровом диапазонах длин волн.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В миллиметровом диапазоне длин волн ОР является высокочувствительным инструментом для измерения электрофизических характеристик веществ [1, 2, 3]. Благодаря применению полусферической геометрии резонатора устраняются ошибки, связанные с определением углового положения образца, поскольку последний в этом случае помещается на плоское зеркало ОР [3]. 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

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

**Основные материалы исследования.** Рассмотрим задачу о возбуждении волны  $TM_{01}$  в отрезке круглого волновода, выполненного в центре одного из зеркал ОР, с помощью колебания  $TEM_{01q}$ . Предполагаем, что апертуры зеркал резонатора бесконечны и коэффициент отражения от раскрыва круглого волновода равен нулю. Запишем выражение для поперечных составляющих электрического поля волны  $TM_{01}$  ( $m = 0, n = 1$ )

$$\dot{E}_\rho = \frac{i\beta}{\gamma_\perp} E_{0z} J_1(\gamma_\perp \rho). \quad (1)$$

Теперь выпишем соотношение для амплитудного распределения напряженности электрического поля колебания  $TEM_{01q}$  в плоскости  $Z = 0$ , которое в цилиндрической системе координат имеет вид

$$E_e(x, y) = A_{01} \frac{\sqrt{2} \rho}{w_0} \exp\left(-\frac{\rho^2}{w_0^2}\right) \sin\phi, \quad (2)$$

где  $A_{01}$  - амплитудный коэффициент,

$w_0$  - радиус пятна поля основного колебания  $TEM_{00q}$  ОР в плоскости  $Z = 0$ .

Как известно из теории зеркальных антенн, для получения высокого коэффициента использования поверхности (КИП) необходимо обеспечить согласование полей в фокальной плоскости рефлектора и в раскрыве антенного облучателя. С физической точки зрения это тоже самое, что согласовать поле возбуждаемого в ОР колебания с полем волноводной волны, распространяющейся, в данном случае, по отрезку круглого волновода, выполненного в центре одного из зеркал резонатора. Теперь запишем выражение, которое будет определять эффективность возбуждения волны  $TM_{01}$  в круглом волноводе с помощью колебания ОР  $TEM_{01q}$

$$\eta = \frac{128}{\pi^2} \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2}. \quad (3)$$

В качестве следующего шага оценим эффективность возбуждения волны  $TM_{01}$  в круглом волноводе с помощью колебания  $TEM_{01q}$  ОР, когда учитывается векторный характер электромагнитного поля. Запишем выражение (1) с учетом ориентации вектора  $E_w$  в волне  $TM_{01}$

$$E_w = B_{01} J_1(\gamma_\perp \rho) \rho_0, \quad (4)$$

где  $B_{01} = i\beta E_{0z} / \gamma_\perp$ .

Теперь выпишем соотношение для амплитудного распределения напряженности электрического поля колебания  $TE_{01q}$  в плоскости  $Z = 0$ , которое в декартовой системе координат с учетом векторного характера электромагнитного поля имеет вид

$$E_e(\rho, \phi) = A_{01} \frac{\sqrt{2} \rho}{w_0} \exp\left(-\frac{\rho^2}{w_0^2}\right) \left(\rho_0 \cos^2 \phi - \phi_0 \frac{1}{2} \sin 2\phi\right). \quad (5)$$

По аналогии с тем, как мы это делали выше, вычислим квадраты норм функций возбуждающего и рабочего полей. В качестве следующего шага рассмотрим соотношение, которое после подстановки в него значений  $E_e(\rho, \phi)$  и  $E_w(\rho, \phi)$  примет вид

$$H(\rho, \phi) = A_{01}^2 B_{01}^2 \frac{2}{w_0^2} \pi^2 \left| \int_0^a \rho^2 \exp\left(-\frac{\rho^2}{w_0^2}\right) J_1(\gamma_\perp \rho) d\rho \right|^2. \quad (6)$$

Запишем выражение, которое будет определять эффективность возбуждения волны  $TM_{01}$  в круглом волноводе с помощью колебания ОР  $TE_{01q}$ .

$$\eta = 8 \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405 u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2}. \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что и в этом случае имеет место явно выраженный максимум эффективности возбуждения рассматриваемой волны в круглом волноводе при изменении его радиуса  $a$  с помощью колебания  $TE_{01q}$  открытой резонансной системы. И величина  $\eta$  достигает максимального значения, равного 0,418, при том же самом значении  $\tilde{a} = 1,433$ . Однако, при оценке эффективности возбуждения волны в волноводе всегда необходимо учитывать векторный характер электромагнитного поля. Поскольку рассмотрение только амплитудного распределения полей приводит к завышенному значению эффективности возбуждения волноводной волны. Как показано в работах [4, 5] при возбуждении волны  $TE_{01}$  в отрезке круглого волновода, выполненного в центре одного из зеркал ОР и содержащего поршень, происходит преобразование колебания резонансной системы  $TE_{01q}$  в аксиально-симметричное колебание  $TE_{01q}$ . Получим в окончательном виде выражение для эффективности возбуждения волны  $TM_{01}$  в круглом волноводе с помощью колебания ОР  $TE_{01q}$  ("воловый глаз"). Результаты расчета по формуле показывают, что в этом случае эффективность возбуждения рассматриваемой волноводной волны стала существенно выше. При этом, как и в предыдущих случаях, имеется явно выраженный максимум по  $\eta$ , который имеет значение равное 0,835 при  $\tilde{a} = 1,433$ .

$$\eta = 16 \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405 u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2}, \quad (8)$$

где, как и выше,  $u = \rho/a$ ,  $\tilde{a} = a/w_0$ .

**Выводы.** В данной работе проведено изучение особенностей возбуждения волны  $TM_{01}$  в отрезке круглого волновода, выполненного в центре одного из зеркал резонатора, с помощью первого высшего неаксиально-симметричного колебания  $TE_{01q}$ . Поскольку задачи электродинамики обладают принципом взаимности, то можно утверждать, что с эффективностью равной 0,835 волноводная волна  $TM_{01}$  будет возбуждаться в резонансной системе аксиально-симметричное колебание  $TE_{01q}$  при указанном выше диаметре круглого волновода.

#### Список использованных источников

1. Afsar M. N. Millimeter – wave dielectric measurement of materials / M. N. Afsar, K. Button // Proc. of the IEEE. – 1985. – Vol. 73, No. 1. – P. 131–153.
2. Кунденко Н. П. Исследование открытой резонансной системы с отрезком круглого волновода / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/5 (57). – С. 10-13.
3. Кунденко Н. П. Анализ характеристик открытого резонатора для измерения диэлектрической проницаемости жидких биологических веществ / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – 2012. – Вип. 26/2012. – С. 50–55.
4. Kuzmichev I. K. An open resonator for physical studies / I. K. Kuzmichev, P. N. Melezhik, A.Ye. Poyedinchuk // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. - 2006. – Vol. 27, No. 6. – P. 857-869.
5. Попков А. Ю. Открытый резонатор с отрезком круглого волновода: расчет и эксперимент / А. Ю. Попков, И. К. Кузьмичев // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14. - № 4. – С. 425-432.

#### Анотація

#### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИМІРУ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

Кунденко М. П., Черенков О. Д., Кунденко О. М.

*Приведені результати дослідження по збудженню у відрізьку круглого хвилеводу, виконаного в центрі плоского дзеркала резонатора.*

#### Abstract

#### RESEARCHES OF RESONANT SYSTEMS IN MEASURING OF ELECTROPHYSICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

N. Kundenko, A. Cherenkov, A. Kundenko

*Research results are resulted on excitation in the segment of round waveguide, executed in a center the flat mirror of resonator.*