

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ О ВОЗБУЖДЕНИИ  $TM_{01}$  ВОЛНЫ  
В ОТРЕЗКЕ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА

Кунденко Н. П., Егорова О. Ю., Бровко К. Ю., Кунденко А. Н.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко*

Проведены теоретические исследования по возбуждению в отрезке круглого волновода, выполненного в центре плоского зеркала резонатора, волны  $TM_{01}$  с помощью колебания  $TEM_{01q}$ . На основании анализа особенностей возбуждения волны  $TM_{01}$  в круглом волноводе с помощью неаксиально-симметричного колебания резонансной системы выявлено, что эта волна будет возбуждаться с максимальной эффективностью при диаметре волновода равном  $a/w_0 = 1,433$ .

**Постановка проблемы.** Существенный недостаток резонансных систем – это проблема перестройки частоты. Поэтому при измерении электрофизических параметров веществ с большими потерями необходимо использовать генераторы СВЧ, имеющие большой диапазон перестройки по частоте. А это, в свою очередь, ухудшает точность измерений, поскольку в этом случае нельзя использовать частотную стабилизацию СВЧ генератора, которая легко осуществима при работе на фиксированной частоте. 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]. При проведении исследований используются, как правило, плоские образцы, а в резонаторе возбуждается основное колебание  $TEM_{00q}$ . Благодаря применению полусферической геометрии резонатора устраняются ошибки, связанные с определением углового положения образца, поскольку последний в этом случае помещается на плоское зеркало ОР. 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 из-

мерении 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 [5]. 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].

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

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

Для эффективного возбуждения волноводной волны  $TM_{01}$  с помощью рассматриваемого колебания открытой резонансной системы большое значение имеет не только амплитудное распределение электромагнитных полей в плоскости анализа ( $Z = 0$ ), но и ориентация векторов напряженности электрического поля. Поэтому 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.

Представим соотношение для амплитудного распределения напряженности электрического поля ко-

лебания  $TE_{M_{01q}}$  в плоскости  $Z = 0$ , которое в декартовой системе координат с учетом векторного характера электромагнитного поля имеет вид

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

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

$$\eta = 8 \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405 u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2}. \quad (3)$$

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  $TE_{M_{01q}}$  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  $TE_{M_{01q}}$  в аксиально-симметричное колебание  $TE_{01q}$ . Аналогичная ситуация должна иметь место и в рассматриваемой нами резонансной системе. Во-первых, как и в указанных выше работах, так и в нашем случае рассматривается аксиально-симметричная волна в круглом волноводе (в данном случае  $TM_{01}$ ). При проведении различного рода измерений с использованием такой открытой резонансной системы исследуемый образец должен помещаться на поверхность поршня, который, расположен в круглом волноводе. А именно наличие поршня и является вторым необходимым условием для преобразования колебания ОР  $TE_{M_{01q}}$  в аксиально-симметричное. Кроме того, для волн типа ТМ характерно наличие  $E_z$ -компоненты электрического поля. А поскольку резонатор с отрезком круглого волновода образуют единую электродинамическую систему, то при возбуждении в ОР аксиально-симметричного колебания электрическое поле должно иметь  $E_z$ -компонента. Поэтому колебания в такой открытой электродинамической системе необходимо уже классифицировать не как  $TE_{M_{01q}}$ , а как  $TM_{01q}$  колебания. Следовательно можно сказать, что такой ОР сродни цилиндрическому объемному резонатору, в котором существуют колебания  $TM_{plq}$ .

В связи с этим представляет практический интерес рассмотреть эффективность возбуждения волны

$TM_{01}$  в круглом волноводе, выполненном в центре плоского зеркала, с помощью аксиально-симметричного колебания  $TM_{01q}$  (рис. 1 б), в которое преобразуется исходное колебание ОР  $TE_{M_{01q}}$  (рис. 1 а) при наличии короткозамыкающего поршня в волноводе.

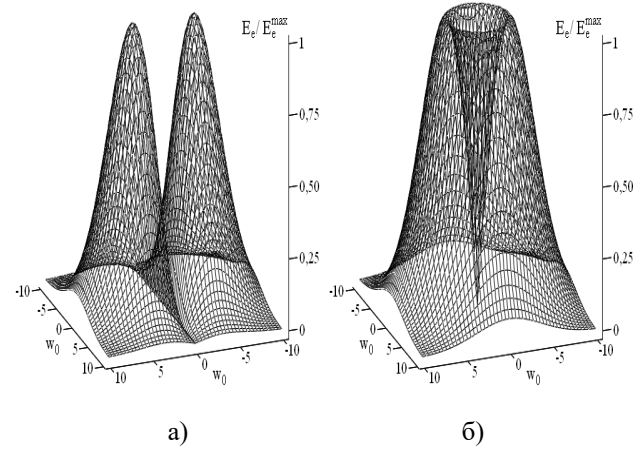


Рисунок 1 - Амплитудное распределение электрического поля колебаний  $TE_{M_{01q}}$  (а) и  $TM_{01q}$  (б) на плоском зеркале полусферического ОР

В этом случае возбуждающее поле в декартовой системе координат будет иметь вид

$$E_e(x, y) = E_x(x, y)x_0 + E_y(x, y)y_0. \quad (4)$$

$E_x(x, y)$  и  $E_y(x, y)$  - компоненты электрического поля, которые будут определяться соотношениями

$$E_x(x, y) = A_{01} \frac{\sqrt{2} x}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right),$$

$$E_y(x, y) = A_{01} \frac{\sqrt{2} y}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right).$$

Переходя к цилиндрической системе координат и с учетом формул перехода

$$x_0 = \rho_0 \cos \phi - \phi_0 \sin \phi, \quad y_0 = \rho_0 \sin \phi + \phi_0 \cos \phi,$$

$$x = \rho \cos \phi, \quad y = \rho \sin \phi,$$

получим в окончательном виде выражение, определяющее возбуждающее поле

$$\|E_e(\rho, \phi)\|^2 = A_{01}^2 \pi \frac{w_0^2}{2}. \quad (5)$$

$$H(\rho, \phi) = A_{01}^2 B_{01}^2 \frac{2}{w_0^2} 4 \pi^2 \left| \int_0^a \rho^2 \exp\left(-\frac{\rho^2}{w_0^2}\right) J_1(\gamma_\perp \rho) d\rho \right|^2. \quad (6)$$

Получим в окончательном виде выражение для эффективности возбуждения волны  $TM_{01}$  в круглом волноводе с помощью колебания ОР  $TM_{01q}$  ("воловоый глаз")

$$\eta = 16 \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405 u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2}, \quad (7)$$

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

Результаты расчета по формуле (7) представлены на рис. 2 (кривая 3).

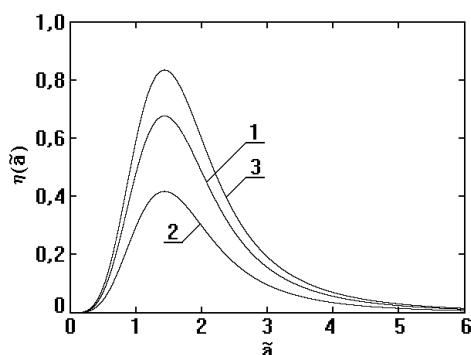


Рисунок 2 - Эффективность возбуждения волны  $TM_{01}$  в отрезке круглого волновода, выполненного в центре плоского зеркала ОР, с помощью колебаний  $TEM_{01q}$  и  $TM_{01q}$  резонансной системы

Как видно из рис. 2, 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  $\tilde{a} = 1,433$ .

**Выводы.** 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  $TEM_{01q}$ . С помощью метода эквивалентных схем проанализирована эффективность возбуждения колебаний  $TEM_{01q}$  и  $TM_{01q}$  в открытой резонансной системе щелевым элементом связи. А 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  $TM_{01q}$  при указанном выше диаметре круглого волновода.

#### Список используемых источников

1. Кунденко Н. П. Анализ резонансных систем для измерения электрофизических параметров веществ / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 03/97. – С. 56–62.
2. Кунденко Н. П. Анализ методов построения источников КВЧ излучения с высокой стабильностью

их частоты / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/8 (56). – С. 18–22.

3. Кунденко Н. П. Определение параметров перестройки частоты полудискового диэлектрического резонатора / Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 4/9 (58). – С. 29–32.

4. Кунденко Н. П. Определение добротности открытой резонансной системы в режиме слабой связи / Н. П. Кунденко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 11/105. – С. 66–71.

5. Кунденко Н. П. Теоретические исследования оптического резонатора в отрезке круглого волновода: материалы XI міжнародної науково-технічної конференції "Вібрації в техніці та технологіях" (23-25 квітня.) / Н. П. Кунденко // М-во освіти і науки, молоді та спорту України. - Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратьюка. – 2012. - Вип. 2/32. – С. 132–138.

6. Кунденко М. П. Электромагнитные технологии в процессе криоконсервации / М. П. Кунденко, П. О. Кравченко, О. М. Кунденко, Анне Енсен // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка "Пробл. енергозабезпеч. та енергозбереж. в АПК України". – Вип. 187. – Харків: ХНТУСГ, 2017. – С. 79-81.

#### Анотація

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ $TM_{01}$ ХВИЛІ У ВІДРІЗКУ КРУГЛОГО ХВИЛЕВОДУ

Кунденко М. П., Сторова О. Ю.,  
Бровко К. Ю., Кунденко О. М.

Проведено теоретичні дослідження щодо порушення у відрізку круглого хвилеводу, виконаного в центрі плоского дзеркала резонатора, хвилі  $TM_{01}$  за допомогою коливання  $TEM_{01q}$ . На підставі аналізу особливостей збудження хвилі  $TM_{01}$  в круглому хвилеводі за допомогою неаксиально-симметричного коливання резонансної системи виявлено, що ця хвиля буде порушуватися з максимальною ефективністю при діаметрі хвилеводу дорівнює  $a/w_0 = 1,433$ .

#### Abstract

### THEORETICAL STUDIES ABOUT EXCITATION OF $TM_{01}$ WAVES IN THE CIRCLE OF A ROUND WAVEGUIDE

N. Kundenko, O. Egorova, K. Brovko, A. Kundenko

Theoretical studies on the excitation of a circular waveguide made in the center of the plane mirror of the resonator, wave  $TM_{01}$  with the help of the  $TEM_{01q}$  oscillation are carried out. Based on the analysis of the excitation characteristics of the  $TM_{01}$  wave in a circular waveguide using a non-axially symmetric oscillation of the resonance system, it is revealed that this wave will be excited with maximum efficiency at a waveguide diameter equal to  $a/w_0 = 1,433$ .