

## ЗАПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ И СРЕД

А.А. Жуков, В.А. Мещеряков, Г.А. Редькин

Обсуждены возможности измерительных преобразователей на круглых металлодиэлектрических волноводах для контроля электрофизических свойств различных материалов и текучих сред. Исследование основано на результатах численного анализа круглого регулярного многослойного волновода с различным числом радиально-ступенчатых диэлектрических неоднородностей на поперечном сечении, выбранного в качестве модели реального измерительного устройства. Показана возможность разработки преобразователей с заранее заданной аппаратной функцией в зависимости от свойств исследуемых материалов и сред.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, постоянная распространения, многослойный круглый запредельный волновод

### Постановка задачи

Перспективность радиоволновых методов контроля обусловлена их совместимостью с современными методами обработки, сбора и передачи информации, возможностями организации измерений в труднодоступных, опасных и удаленных условиях. Существенный интерес представляют волноводные методы для непрерывного контроля состава текучей продукции в трубопроводах. В этом случае отрезок реального трубопровода замещается волноводом, в котором возбуждается заданный спектр электромагнитных типов волн. Информативным параметром будет постоянная распространения выбранного типа волны и ее зависимость от комплексной диэлектрической проницаемости контролируемого материала.

Измерительное устройство представляет собой отрезок металлической трубы большего сечения по сравнению с технологическим трубопроводом. Внутри этого отрезка трубы располагается полый цилиндрический диэлектрический вкладыш, внутренний диаметр которого равен диаметру контролируемого трубопровода. Эскиз волноводной секции, при использовании центрального слоя волновода в качестве исследуемого материала, изображен на рисунке 1. Центральное сечение волновода, обозначено на рисунке 1 как слой 1 радиуса  $r_1$ . Слои 2, 3, 4 являются концентрическими цилиндрами с внешними радиусами  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $R_a$  и разными значениями диэлектрической проницаемости. Последний слой ограничен металлическим экраном 5.

В зависимости от частоты зондирующего сигнала рассматриваемая структура может проявлять свойства: отрезка волноводной линии передачи переменного сечения, резонатора или реактивного аттенюатора. Резонансные свойства структура проявляет на частоте, равной критической для порождающего  $E_{01}$  типа колебаний регулярного волновода. Физически это означает, что при обращении в нуль постоянной распространения ( $k_0\Gamma' = 0$ ) волны  $E_{01}$  электромагнитные процессы не зависят от направления распространения  $z$ . Стоячая волна при этом образуется только по радиальной координате.

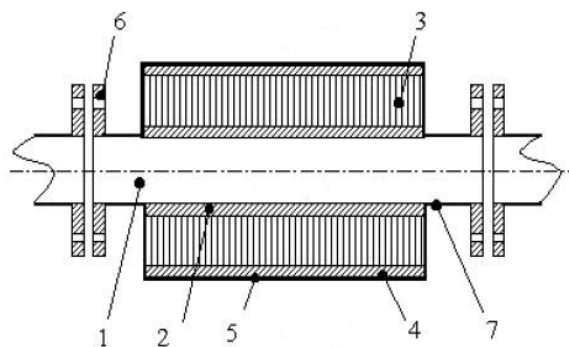


Рисунок 1 - Эскиз волноводной секции

### Математическая модель

Базовой электродинамической моделью измерительных ячеек для исследования электрофизических свойств различных материалов волноводным методом в широком диапазоне частот является круглый осесимметричный волновод. Поперечное сечение волновода (рисунок 2) представляет собой набор примыкающих друг к другу коаксиальных цилиндрических слоев. Наиболее удаленный от центра цилиндр имеет номер  $N$  и окружен металлическим экраном радиуса  $R_a$ . Количество цилиндров и соотношение их параметров определяют постоянную распро-

## РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

странения  $k_0\Gamma = k_0\Gamma' + jk_0\Gamma''$  на заданной частоте  $\omega = k_0 \cdot c$  электродинамического процесса.

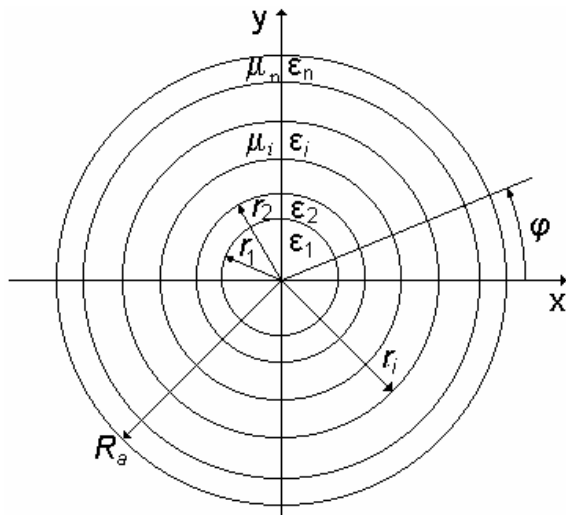


Рисунок 2 - Круглый многослойный волновод

Такая структура допускает строгое решение граничной задачи [1, 2]. Постоянная распространения определяется из решения уравнений Максвелла для поставленной граничной задачи. Предполагается, что электромагнитное поле в волноводе описывается функцией вида:

$$E, H \sim \Phi(\rho) \exp[j(\omega t + n\phi + k_0\Gamma z)]$$

где  $z$  – направление распространения (ось волновода) в цилиндрической системе координат  $(\rho, \phi, z)$ .

В этом случае уравнения Максвелла сводятся к волновым уравнениям вида:

$$\xi^2 \frac{d^2 e_z}{d\xi^2} + \xi \frac{de_z}{d\xi} + (\xi^2 - n^2) e_z = 0,$$

$$\xi^2 \frac{d^2 h_z}{d\xi^2} + \xi \frac{dh_z}{d\xi} + (\xi^2 - n^2) h_z = 0,$$

$$\text{где } \xi = \rho\chi, \chi^2 = \varepsilon\mu - \Gamma^2.$$

Общее решение этих уравнений представляет собой линейную комбинацию функций Бесселя  $J_n(\xi)$  и Неймана  $N_n(\xi)$ . Радиальные и азимутальные составляющие электрического и магнитного полей выражаются через соответствующие им продольные компоненты. С учетом непрерывности касательных составляющих полей на границе раздела сред и условий в центре волновода и на внешней границе формируется дисперсион-

ное уравнение. При таком подходе дисперсионное уравнение формируется в неявном виде и допускает лишь численный анализ. Методика локализации решений и идентификации мод основывается на принципе аргумента для комплексных функций. Такой подход в сочетании с экстраполяционным прогнозированием позволяет осуществлять селекцию любого типа собственных мод и определять картину распределения составляющих поля в волноводе.

Решение проводится численно для допустимых физических реализаций электромагнитного поля и заданных граничных условий. Алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ, позволяющих вычислять полный спектр собственных волн и структуры составляющих их электромагнитных полей в заданном частотном диапазоне для комплексных значений материальных параметров слоев.

### Полученные результаты

Возможность использования отрезка волноводной линии передачи на запердельных частотах как реактивного аттенюатора можно оценить из результатов, приведенных на рисунке 3. Соотношения радиусов двухслойного волновода выбраны из условия обеспечения максимальной чувствительности к изменению свойств исследуемого материала ( $r_1/R_a=0.56$ ,  $k_0R_a=0.09$ ,  $\mu_1=\mu_2=1$ ).

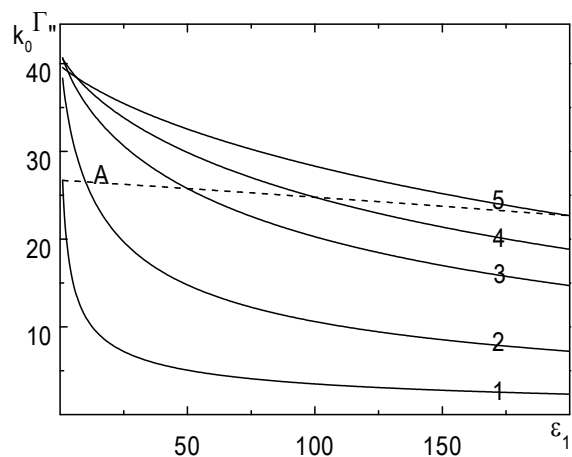


Рисунок 3 - Зависимость мнимой части постоянной распространения волны E01 двухслойного круглого волновода от диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_1$  внутреннего слоя

Линии 1, 2, 3, 4, 5 получены для диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2$  внешнего слоя равной соответственно 1, 10, 50, 100 и 200. Линия А на рисунке соответствует зависимости мнимой части постоянной распространения

ЗАПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ И СРЕД

ния волны  $E_{01}$  однородного волновода радиуса  $R_a$  от диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ . Видно, что имеется возможность оптимального выбора вида зависимости  $k_0\Gamma''(\epsilon)$ .

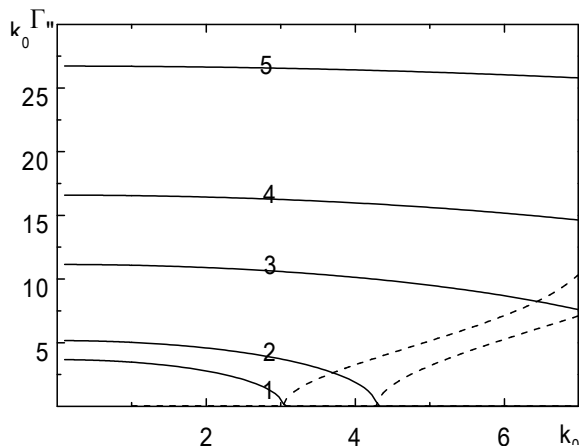


Рисунок 4 - Зависимость постоянной распространения волны  $E_{01}$  от волнового числа

На рисунке 4 представлены зависимости постоянной распространения волны  $E_{01}$  двухслойного волновода от волнового числа ( $r_1/R_a=0.56$ ,  $\epsilon_2=\mu_1=\mu_2=1$ ). Линии 1, 2, 3, 4, 5 получены для диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  внутреннего слоя равной соответственно 100, 50, 10, 4 и 1. Пунктирными кривыми изображены действительные части постоянной распространения. Видно, что при различных диэлектрических заполнениях затухание  $k_0\Gamma''$  очень слабо зависит от частоты. Поэтому в качестве бездисперсионной измерительной ячейки отрезки таких волноводов могут быть использованы, по крайней мере, при десятикратном изменении частоты.

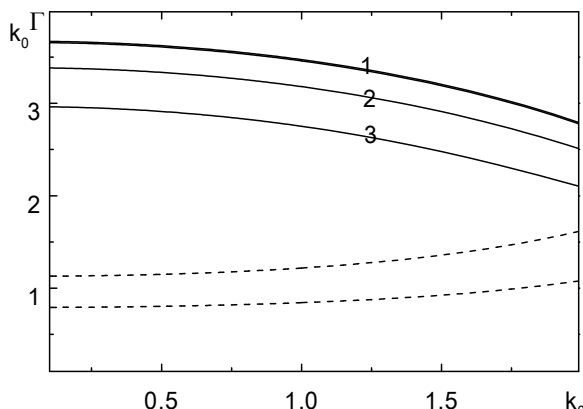


Рисунок 5 - Зависимость постоянной распространения волны  $E_{01}$  от волнового числа при различных значениях тангенса угла потерь

следующей среды

Влияние диссипативных потерь на постоянную распространения волны  $E_{01}$  (сплошная линия – мнимая часть, пунктирная – действительная часть постоянной распространения) двухслойного волновода показано на рисунке 5. Тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) материала внутреннего слоя равен 0-0.1 – кривая 1, 0.5 – кривая 2 и 1 – кривая 3.

Видно, что кривые затухания совпадают в интервале  $\text{tg } \delta = 0-0.1$ .

Экспериментальная проверка результатов численного моделирования выполнялась на смесях нефть - вода и показала удовлетворительное согласие с предсказаниями теории. Полученные результаты являются научной основой для исследования взаимодействия электромагнитных полей с веществами различной природы и физической основой для разработки элементов приемно-передающих трактов и измерительной техники СВЧ.

#### Выводы

Представленные результаты показывают возможность и перспективность разработки на основе отрезков запердельных круглых металлодиэлектрических волноводов, проявляющих свойства реактивных аттенуаторов, комплекса измерительных широкодиапазонных датчиков для исследования и контроля диэлектрической проницаемости различных материалов и сред.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 год». Государственный контракт № 14.740.11.0335 от 17 сентября 2010 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.А., Редькин Г.А., Мудров А.Е., Хасанов В.Я. Контроль электрофизических параметров текучих сред радиоволновыми методами на запердельных волноводах. // Дефектоскопия. – 1998. – № 10. – с. 47–58.
2. Редькин Г. А., Мещеряков В.А., Жуков А.А. Собственные электромагнитные волны в неоднородно-слоистых круглых волноводах // Изв. вузов. Физика. – 2006. – №9. – С. 15–19.

К.ф.-м.н., доцент **А.А. Жуков**, к.ф.-м.н., доцент **В.А. Мещеряков**, тел. (3822) 413973. E-mail: mva@elefot.tsu.ru, к.ф.-м.н., с.н.с. Редькин Г.А. – Национальный Исследовательский Томский государственный университет, кафедра радиоэлектроники, г. Томск.