

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД НА СВЧ

Гордиенко Ю. Е., Хаммуд Ф. М., Герасимов В. П.
Харьковский национальный университет радиотехники
61166, Харьков, пр. Ленина 14, каф. МЭПУ, тел. (0572) 7021362,
E-mail: meru@kture.kharkov.ua

Аннотация – Обосновывается численно-аналитический алгоритм исследования эффективной комплексной диэлектрической проницаемости мелкодисперсных сред в СВЧ диапазоне на базе строгих электродинамических соотношений. Описываются условия моделирования и постановки практических измерений, при которых обе составляющие комплексной диэлектрической проницаемости структурно неоднородных объектов имеют слабый вклад нелокальной части взаимодействия.

I. Введение

Адекватное моделирование зависимости эффективной диэлектрической проницаемости (ЭДП) на СВЧ дисперсных сред от состава и параметров компонент является весьма актуальной задачей в связи с разработкой СВЧ средств их диагностики. В самой диагностике существуют прямые и обратные задачи, поэтому экспериментальная градуировка таких средств имеет весьма ограниченные возможности. Необходима универсальная и компактная модель, обеспечивающая широкие исследования и точные количественные оценки. Существующие разработки [1], в том числе основанные на теории рассеяния [2], не удовлетворяют таким требованиям. В особенности проблематичной задача становится при необходимости моделирования сред с учетом СВЧ потерь.

II. Основная часть

В докладе освещается новый подход, основанный на одномодовом приближении моделирования СВЧ объемных резонаторов с микрослоистым заполнением [3]. Такое моделирование оказывается достаточно строгим для резонаторов волноводного типа (цилиндрических или прямоугольных) при распределении слоистости вдоль одной из координат и полном заполнении поперечного сечения каждым слоем.

Характеристическое уравнение такой резонансной системы, позволяющее оценивать зависимость действительной и мнимой частей резонансной частоты для заданного вида колебаний от параметров микрослоистого заполнения, имеет следующий вид

$$\text{th}\gamma_1 z_1 = -Y_{1,2} \frac{\text{th}\gamma_2 h_2 + Y_{2,3} \frac{\text{th}\gamma_3 h_3 + Y_{3,4} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1+\dots}}{1+Y_{3,4} \text{th}\gamma_3 h_3} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1+\dots}}{1+Y_{2,3} \text{th}\gamma_2 h_2} \frac{\text{th}\gamma_3 h_3 + Y_{3,4} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1+\dots}}{1+Y_{3,4} \text{th}\gamma_3 h_3} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1+\dots}}, \quad (1)$$

где $Y_{i,i+1} = \tilde{\epsilon}_i \gamma_{i+1} / (\tilde{\epsilon}_{i+1} \gamma_i)$ для РИП E-типа; $Y_{i,i+1} = \gamma_i / \gamma_{i+1}$ для РИП H-типа; $\tilde{\epsilon}_i = \epsilon'_i - j\epsilon''_i$; $\epsilon''_i / \epsilon'_i = \text{tg}\delta_i$;
 $\gamma_i = \omega_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 [\tilde{\epsilon}_i - (\omega_{кр} / \omega_0)^2]}$.

Суть предлагаемого подхода заключается в нахождении эффективного значения диэлектрической проницаемости микрослоистого объема через экви-

валентное изменение резонансной частоты, вызываемое внесением в поле рассматриваемого резонатора однородной, равной по объему среды. При этом устанавливаемое значение ЭДП находится из следующего уравнения

$$\text{th}\gamma_1 z_1 = -\frac{\gamma_{эфф} \epsilon_1}{\gamma_1 \epsilon_{эфф}} \text{th}\gamma_{эфф} h_{\Sigma}, \quad (2)$$

где $\gamma_{эфф} = \omega_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 [\tilde{\epsilon}_{эфф} - (\omega_{кр} / \omega_0)^2]}$;

$\tilde{\epsilon}_{эфф} = \epsilon'_{эфф} - j\epsilon''_{эфф}$; ω_0 - значение комплексной резонансной частоты, характеризующее в соответствии с уравнением (1) резонанс при введении в резонатор исследуемой микрослоистой среды; z_1 - толщина воздушной части резонатора не заполненной образцом; h_{Σ} - толщина образца.

Возможность поставить в соответствие найденные таким образом значения ЭДП с ЭДП реальной дисперсной среды нуждается в дополнительном обосновании. По-видимому, чтобы такое соответствие можно было предположить в первую очередь следует выполнить условия соответствия средних размеров компонентов и их диэлектрических параметров средним значениям толщины слоев с соответствующими диэлектрическими параметрами. Очевидно, что это не вызывает принципиальных трудностей.

Невыполненным по соответствию остается фактически одномерность модели в отличие от трехмерности реального объекта. Предположим, что для реализации трехмерности модели достаточно взять при микрослоистом объеме трехмерность электрической составляющей поля.

На рис. 1 и 2 представлены результаты численных оценок $\epsilon_{эфф}$ и $\text{tg}\delta_{эфф}$ двухкомпонентной среды с некоторой вариацией их параметров в зависимости от количества двухкомпонентных ячеек N для цилиндрического резонатора с E₀₁₁ и H₀₁₁ видом колебаний, соответственно. Резонансная частота резонатора без образца составляла $f_0 = 10^{10}$ Гц. Параметром в представленных зависимостях является отношение h_1/h_2 (1 - $h_1/h_2 = 4$; 2 - $h_1/h_2 = 1$; 3 - $h_1/h_2 = 0,25$; 4 - $h_1/h_2 = 1/99$).

Так как при H₀₁₁ виде колебаний электрическая составляющая СВЧ поля является также одномерной для микрослоистого заполнения, в отличие от E₀₁₁ вида колебаний, то и результаты получились существенно различны.

Небыстрое насыщение $\epsilon_{эфф}$ и $\text{tg}\delta_{эфф}$ в зависимости от N хорошо отражает физический смысл нелокального взаимодействия СВЧ поля с дисперсной средой.

Для установления адекватности формулируемой таким образом модели, были проведены численные оценки влагосодержания в трехкомпонентной дисперсной среде - порошок увлажненного полистирола различного сжатия.

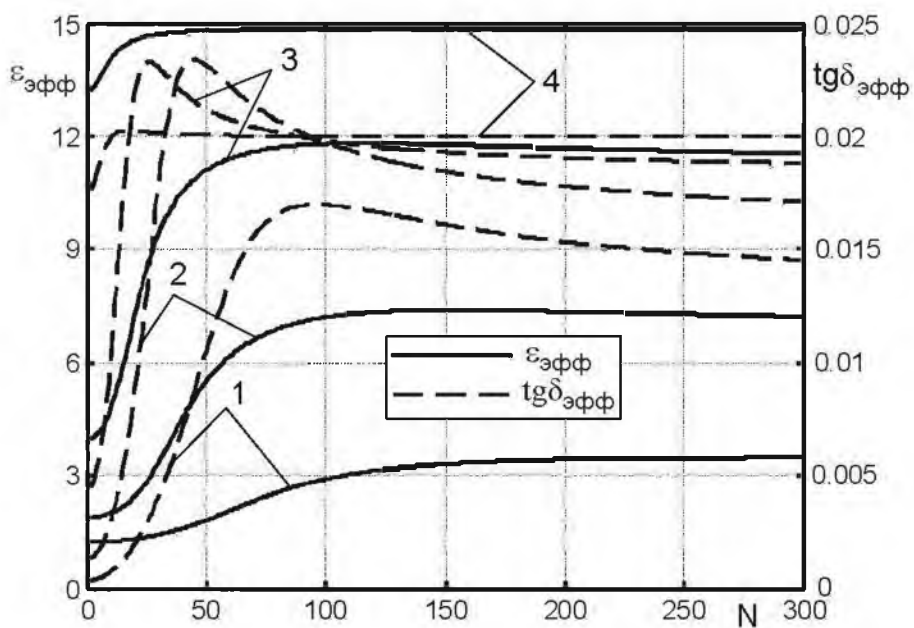


Рис. 1. Зависимость изменения $\epsilon_{эфф}$ и $tg\delta_{эфф}$ от количества ячеек N для РИП E_{011} -типа.

Fig. 1. Dependence of $\epsilon_{эфф}$ and $tg\delta_{эфф}$ change on the number of cells N for E_{011}

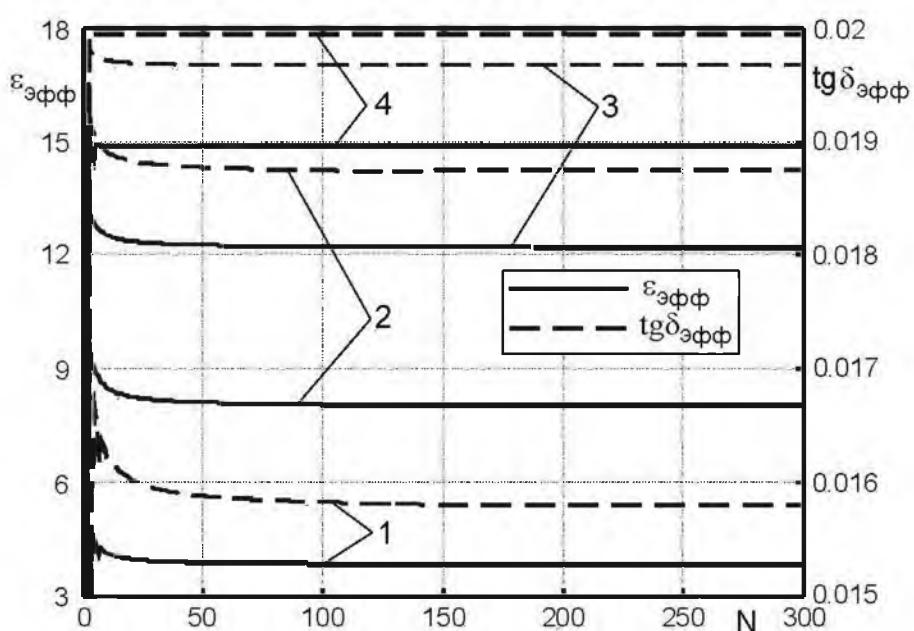


Рис. 2. Зависимость изменения $\epsilon_{эфф}$ и $tg\delta_{эфф}$ от количества ячеек N для РИП H_{011} -типа.

Fig. 2. Dependence of $\epsilon_{эфф}$ and $tg\delta_{эфф}$ change on the number of cells N for H_{011}

На рис. 3 приведены зависимости расчетных и измеренных значений $\epsilon_{эфф}$ и $tg\delta_{эфф}$ от влагосодержания $w = h_{воды}/(h_{воды}+h_{возд}+h_{полист}) = V_{воды}/V_{обр}$ и $p = V_{возд}/V_{обр}$.

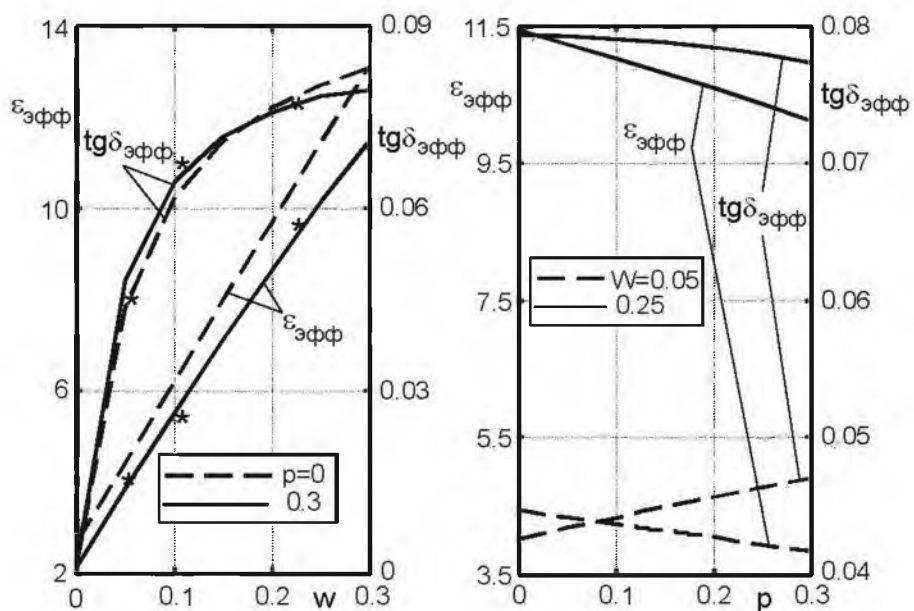


Рис. 3. Зависимость изменения $\epsilon_{эфф}$ и $tg\delta_{эфф}$ от параметров w и p .

Fig. 3. Dependence of $\epsilon_{эфф}$ and $tg\delta_{эфф}$ change on w and p parameters

В эксперименте w и p изменялись путем высушивания пробы и изменения её объема сжатием, соответственно.

Расположение экспериментальных точек на теоретических зависимостях показывает, что в пределах точности измерения $\epsilon_{эфф}$ и $tg\delta_{эфф}$ совпадения достаточно хорошие.

III. Заключение

Нетрудно видеть, что такой подход не предполагает трудностей моделирования многокомпонентных сред, а также сред с наноразмерным включением при широком диапазоне вариации электрических параметров компонент.

IV. Список литературы

1. Бензарь В. К. Техника СВЧ влагометрии. Минск: Высшая школа, 1974. 349 с.
2. Боярский Д.А., Тихонов В.В. Модель эффективной диэлектрической проницаемости влажных и мерзлых почв в СВЧ диапазоне // Радиотехника и электроника, 1995, № 6, с. 914-917.
3. Гордиенко Ю.Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника, 1996, Вып. 100, с. 253-260

NUMERICAL MODEL OF EFFECTIVE DIELECTRIC PERMEABILITY OF DISPERSE ENVIRONMENTS ON THE MICROWAVE

Gordyenko Yu. Ye., Hammoud F. M., Gerasimov V. P.
 Kharkov National University of Radio Electronics
 (ME Department, 14, Lenin Ave., Kharkov, 61166
 Tel.: (057) 702-13-62
 E-mail: mepu@kture.kharkov.ua

Abstract – Grounded in this paper is numerical-analytical algorithm for research of efficient complex dielectric permeability of fine-dispersed environments in microwave band on the basis of strict electrodynamic proportions. Conditions of modeling and posing of practical measurements at which both components of complex dielectric permeability of structurally non-uniform objects have weak contribution of non-local part of interaction are described.