

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ С ПРОВОЛОЧНЫМИ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Демидчик В. И., Сицко Н. Ю.  
Белорусский государственный университет  
5 Курчатова, Минск, Беларусь

тел. +375(017)2095878 e-mail: demidvi@bsu.by, sitsko1@rambler.ru

**Аннотация** – Разработана использующая аппарат интегральных уравнений методика оценки эффективных электродинамических параметров композиционных материалов с включениями в виде тонких проводящих волокон произвольной геометрии с диэлектрическим покрытием. Методика апробирована на включениях в виде диполя, витка, канонической спирали.

## I. Введение

Изучение электродинамических свойств искусственных композиционных сред представляет научно-практический интерес. Композиты используются при проектировании радиопоглощающих материалов и покрытий различного назначения [1]; потенциальной перспективой использования композитов является возможность фокусировки электромагнитных волн (ЭМВ), получение трехмерных изображений в микроволновом диапазоне, радиолокационное маскирование объектов [2].

Как правило, композиционные материалы представляют собой диэлектрическую матрицу, заполненную проводящими волокнами [3], которые могут быть заключены в тонкую диэлектрическую оболочку с относительной диэлектрической проницаемостью отличной от проницаемости матрицы. Электродинамические свойства композиционных сред определяются геометрическими размерами, формой, концентрацией и взаимным расположением волокон. Ряд методик, базирующихся на теории эффективных сред, позволяет по характеристикам взаимодействия ЭМВ с одиночной частицей найти эффективные значения магнитной ( $\mu_{eff}$ ) и диэлектрической ( $\epsilon_{eff}$ ) проницаемостей среды в целом.

В статье приводятся методика и результаты моделирования эффективных электродинамических параметров композитов в виде диэлектрической матрицы с тонкопроволочными проводящими включениями, покрытыми тонким диэлектрическим слоем.

## II. Основная часть

Методика моделирования состоит из четырех этапов.

На первом этапе решается задача рассеяния ЭМВ на волокне с помощью модифицированного интегрального уравнения Поклингтона, учитывающего наличие диэлектрической оболочки [4]:

$$\int_L I(s') K(s, s', \epsilon_a, d) ds' = i\omega\epsilon_0 E_\tau^i, \quad (1)$$

$K(s, s', \epsilon_a, d)$  – ядро интегрального уравнения [4],  $\omega$  – циклическая частота,  $\epsilon_a, \epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость покрытия и диэлектрическая постоянная,  $d$  – толщина покрытия,  $E_\tau^i$  – касательная к проводнику составляющая электрического поля падающей электромагнитной волны.

Падение ЭМВ рассматривается с трех взаимно-ортогональных направлений, для каждого из которых исследуется случай как вертикальной, так и горизонтальной поляризации волны.

На втором этапе по найденному амплитудно-фазовому распределению тока рассчитываются электрический и магнитный дипольные моменты для каждого случая возбуждения:

$$\vec{p} = \frac{1}{i\omega} \int_S \vec{J} ds', \quad \vec{m} = \frac{\mu_0}{2} \int_S \vec{r} \times \vec{J} ds', \quad (2-3)$$

$\vec{J}$  – плотность тока,  $S$  – длина проводника рассеивателя,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

На третьем этапе по найденным значениям дипольных моментов рассчитываются коэффициенты поляризуемости (КП) [5], используя соотношения:

$$\vec{p} = \alpha_{ee} \vec{E} + \alpha_{em} \vec{H}, \quad \vec{m} = \alpha_{me} \vec{E} + \alpha_{mm} \vec{H}, \quad (4-5)$$

где  $\alpha_{ee}, \alpha_{em}, \alpha_{me}, \alpha_{mm}$  – КП, являющиеся тензорами 2-го порядка.

На четвертом этапе проводится гомогенизация параметров среды. Используется модель на базе теории Максвелла-Гарнетта [6]:

$$\epsilon_{eff} = f(2b_{ee}, 2b_{em}, b_{me}, b_{mm}, n) / f_1, \quad (6)$$

$$\mu_{eff} = f(-b_{ee}, 2b_{em}, b_{me}, -2b_{mm}, n) / f_1, \quad (7)$$

$$f_1 = f(-b_{ee}, -b_{em}, b_{me}, b_{mm}, n), \quad (8)$$

$$f(b_1, b_2, b_3, b_4, n) = \left(1 + \frac{nb_1}{3}\right) \left(1 + \frac{nb_4}{3}\right) + n^2 \frac{b_2 b_3}{9}, \quad (9)$$

$$b_{ee} = \frac{\text{tr} \alpha_{ee}}{\epsilon_m}, b_{em} = -i \frac{\text{tr} \alpha_{em}}{\sqrt{\mu_m \epsilon_m}}, \quad (10-13)$$

$$b_{me} = -i \frac{\text{tr} \alpha_{me}}{\sqrt{\mu_m \epsilon_m}}, b_{mm} = \frac{\text{tr} \alpha_{ee}}{\mu_m}$$

где  $\text{tr}$  – оператор суммы диагональных элементов тензора,  $\epsilon_m, \mu_m$  – относительные эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Разработанная методика апробирована на композитах с включениями различной геометрии: диполь, разомкнутый виток, спираль, диполь-виток-диполь.

В качестве примера на рис.1 представлена характерная зависимость действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости от частоты для включения диполь-виток-диполь при различной диэлектрической проницаемости покрытия с параметрами: радиус проводника  $a=0.1$ мм, длина верхнего и нижнего диполя  $l=5$ мм, радиус витка  $r=5$ мм, толщина покрытия  $d=0.1$ мм, концентрация  $n=10^5 \text{ м}^{-3}$ .

На частоте  $\sim 3.6$  ГГц, для которой суммарная длина волокна приблизительно соответствует половине длины волны, наблюдается резонанс эффективных параметров. С увеличением диэлектрической проницаемости наблюдается как смещение резонанса в низкочастотную область, так и увеличение амплитуды резонанса.

Для магнитной проницаемости наблюдается резонанс на тех же частотах, но амплитудное значение при резонансе составляет не более 1.2.

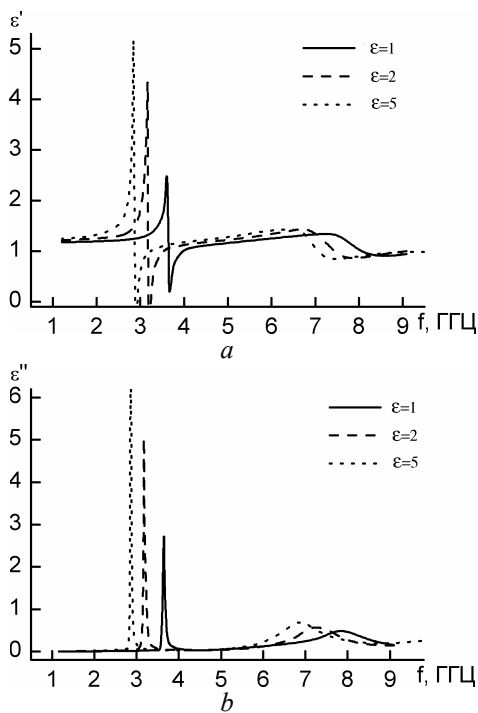


Рис. 1. Эффективная диэлектрическая проницаемость.

Fig. 1. Effective permittivity

Полученные результаты для проводников без оболочки близки к данным, приведенным в [7].

### III. Заключение

Предлагаемая методика позволяет оценивать эффективные параметры композитов с включениями в виде как тонких проводящих волокон, так и волокон с диэлектрическим покрытием.

Основным достоинством методики является сочетание скорости расчета, универсальности по отношению к геометрии включения, возможности рассмотрения металлодиэлектрических волокон. Данная методика может применяться с другими процедурами гомогенизации, в которых КП одиночного включения используются для определения эффективных параметров композитов.

### IV. Список литературы

- [1] Казанцева Н. Е., Рывкина Н. Г., Чмутин И. А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона // Радиотехника и электроника, 2003, т. 48, № 2, с. 196–209
- [2] Блюх К. Ю., Блюх Ю. П. Что такое левые среды и чем они интересны? // УФН, Т. 174, № 73. – с. 339 – 447.
- [3] Виноградов А. П. Электродинамика композиционных материалов. М: УРСС, 2001. – 208 с.
- [4] Demidchik V. I., Sitsko N. U. Investigation of integral equation for dielectric-coated thinwire conductors // Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques 2003, September 9-12, Sevastopol, Ukraine, ICATT'03 Proceeding – Vol. 2. – pp. 723-725.
- [5] Демидчик В. И., Ситско Н. Ю. Методика расчета коэффициентов поляризуемости для одиночных проволочных рассеивателей произвольной геометрии // Мат. конф. «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров» 10-11 апреля 2007 Минск. – Ч. 1, с. 124 – 127.

- [6] Guerin F., Bannelier P., Labeyrie M. Scattering of electromagnetic waves by helices and application to the modeling of chiral composites. I: simple effective medium theories // J.App.Physics. vol.28, 1995. – pp.623 – 656.
- [7] Ishimaru A., Lee S.-W., Kuga Y. et al. Generalized constitutive relations for metamaterials based on the quasi-static Lorentz theory // IEEE vol.51, No.10 2003. – pp.2550 – 2557

## TECHNIQUE FOR CALCULATION OF EFFECTIVE PARAMETERS OF COMPOSITE MATERIALS WITH EMBEDDED THIN-WIRE METAL-DIELECTRIC INCLUSIONS

Demidchik V. I., Sitsko N. Yu.

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Tel: +375(017)2095878. E-mail: demidvi@bsu.by

**Abstract** – On the basis of method of integral equation a new technique was developed suitable for calculating effective electrodynamic parameters of composite materials with inclusions in the form of thin conductive fibers of arbitrary shape with dielectric coating. The technique was examined on the inclusions in the form of a dipole, a coil and a canonical helix.

### I. Introduction

Composite materials are used at designing radio absorbing materials and coverings for different purposes [1]. A potentially advanced field of composite materials application is the possibility of EMW focusing, generation of 3D images in a microwave frequency range, object radar masking [2].

Thus the estimation of composite material effective parameters is an actual problem.

The paper presents the technique and simulation results of effective parameters of composite materials in the form of a dielectric matrix with thin-wire conductive inclusions covered with a thin dielectric layer.

### II. Main Part

The technique consists of four stages.

On the first stage the task of EMW scattering on a single inclusion is solved using the method of integral equation [4]. EMW incidence is considered from 3 mutually orthogonal directions, and for each direction 2 independent cases of linear polarization were considered.

On the second stage using the obtained amplitude-phase current distribution along the fiber electrical and magnetic dipole moments are calculated for each case of scattering.

On the third stage the polarizability coefficients are calculated using the obtained dipole moments [5].

On the fourth stage the homogenization procedure is carried out for the composite material parameters on the basis of polarizability coefficients [6].

The technique was tested on a number of inclusions in the form of a conductor, a broken coil, a canonical helix.

Fig. 1 shows the typical simulation results for canonical helix.

### III. Conclusion

The proposed technique allows estimating effective parameters of composite material with the inclusions in the form of both thin metallic fibers and fibers with dielectric coating. The major advantage of the proposed technique is the combination of calculation speed, versatility in relation to the inclusion geometry, possibility to consider metal-dielectric fibers. The technique can be used together with other homogenization procedures in which the polarizability coefficient of a single inclusion is used to determine the effective parameters of composite materials.