

ИМПЕДАНСНЫЕ МАГНИТНЫЕ СРЕДЫ – НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

Л. Х. Ангархаева, Ю. Б. Башкуев, В. К. Балханов

Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, Улан-Удэ, ул. М. Сахьяновой, 6
E-mail: ludang@rambler.ru

Представлены результаты анализа частотной зависимости поверхностного импеданса слоистых магнитных сред в диапазоне 1 Гц-10 ГГц. Показано, что структуры типа «диэлектрик на ферромагнитном основании» в широком диапазоне радиоволн имеют сильно-индуктивный импеданс с фазой импеданса до $-89,9^\circ$.

Ключевые слова: импеданс, магнитные среды, численное моделирование.

THE IMPEDANCE MAGNETIC MEDIA – SOME RESULTS OF ELECTRODYNAMIC MODELING

L. Kh. Angarkhaeva, Yu. B. Bashkuev, V. K. Balkhanov

Institute of Physical Materials Science of the SB RAS
Sakh'yanova str., 6, Ulan-Ude, Russia
E-mail: ludang@rambler.ru

Results of analysis of the frequency dependences of the surface impedance of layered magnetic media in a range of 1 Hz to 10 GHz are presented. Shown that structures of the form “dielectric on ferromagnetic bottom” have a high-inductive impedance with the phase up to $-89,9^\circ$ in a wide range of radio waves.

Keywords: impedance, magnetic media, numeric modeling.

Введение

Природные среды и технические материалы во многих случаях помимо электрических свойств, обладают также естественными и искусственными магнитными свойствами. В связи с этим являются актуальными исследования электродинамических характеристик для различных электропроводящих и магнитных сред, разработка и совершенствование алгоритмов и программ их моделирования [1]. Решение электродинамической задачи расчета поверхностного импеданса δ в случае однородной среды не представляет трудностей. Так, поверхностный импеданс дается выражением:

$$|\delta|e^{i\varphi} = (1 + \mu\epsilon + i\mu\sigma / \epsilon_0\omega)^{-1/2}. \quad (1)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №12-01-98006, №12-02-98002, №12-01-98010 и интеграционного проекта СО РАН № 11.

Здесь $|\delta|$ и φ - модуль и фаза поверхностного импеданса, ε_0 - диэлектрическая постоянная вакуума, ε и μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества, σ - удельная электропроводимость среды, ω - круговая частота. Разработан алгоритм решения прямой задачи расчета поверхностного импеданса в неоднородной градиентной магнитной полупроводящей среде с учетом зависимости μ , σ , ε от координаты z [2]. Целью работы является численное моделирование поверхностного импеданса слоистых магнитных сред в широком диапазоне частот.

Постановка задачи. Методика расчета поверхностного импеданса

Модель горизонтально-слоистой среды, несмотря на свою простоту, продолжает оставаться одной из базовых для геофизической электродинамики. Характеристика каждого слоя определяется 4 параметрами: удельной электропроводимостью σ_j , относительной диэлектрической проницаемостью ε_j , относительной магнитной проницаемостью μ_j и толщиной h_j .

Для расчетов использовано выражение приведенного поверхностного импеданса многослойной плоскопараллельной структуры в виде:

$$\delta = \delta_1 \frac{1 - R_{12}^{(n)} \exp(-i2k_{1z}h_1)}{1 + R_{12}^{(n)} \exp(-i2k_{1z}h_1)}, \quad (2)$$

$$\text{где } R_{j(j+1)}^{(n)} = \frac{\frac{\delta_j}{\mu_j} \alpha_{j+1}^+ - \frac{\delta_{j+1}}{\mu_{j+1}} \alpha_{j+1}^-}{\frac{\delta_j}{\mu_j} \alpha_{j+1}^+ + \frac{\delta_{j+1}}{\mu_{j+1}} \alpha_{j+1}^-} - \text{коэффициент отражения на границе раздела между } j\text{-м и}$$

$(j+1)$ -м слоями;

$$\alpha_j^\pm = 1 \pm R_{j(j+1)}^{(n)} \exp(-i2k_{jz}h_j);$$

$$k_{jz} = k_0 \sqrt{\varepsilon_{jk} - \sin^2 \Theta}; \quad k_0 = 2\pi / \lambda;$$

$$\delta_j = \sqrt{\varepsilon_{jk} - \sin^2 \Theta} / \varepsilon_{jk}, \text{ при } j=n \quad R_{n(n+1)}^{(n)} = 0, \quad \alpha_n^\pm = 1;$$

$$\varepsilon_{jk} = \varepsilon_j + i60\lambda\sigma_j - \text{относительная комплексная диэлектрическая проницаемость};$$

h_j – толщина j -го слоя; Θ - угол падения плоской вертикально поляризованной волны. При расчетах принято, что монохроматическая электромагнитная волна имеет зависимость от времени $\exp(-i\omega t)$.

Результаты численного моделирования

Создана программа расчета поверхностного импеданса n -слойной структуры, учитывающая ее электромагнитные параметры: диэлектрические ε и магнитные μ проницаемости, электропроводимости σ и толщины h слоев. Проведено моделирование поверхностного импеданса двух-трехслойных сред. На рис. 1 представлены частотные зависимости модуля и фазы поверхностного импеданса тонкой трехслойной среды «диэлектрик на ферромагнитном основании» в широком диапазоне частот от 1 Гц до 10 ГГц, соответствующей реальной структуре «слой краски на стальном листе». Установлено, что двухслойная пленка диэлектрика «грунтовка-краска» толщиной 0,5 мм смещает фазу импеданса в сильно-сильноиндуктивную область уже на частотах от 100 Гц и выше. Модуль импеданса во всем частотном диапазоне удовлетворяет импедансным граничным условиям. Полученные значения импеданса показывают, что условия распространения

электромагнитных волн над такими структурами в широком диапазоне радиоволн будут иметь особенности, обусловленные появлением поверхностной электромагнитной волны. В практическом плане этот эффект может иметь место при распространении радиоволн диапазона 900 и 1800 МГц над автомобильными «пробками».

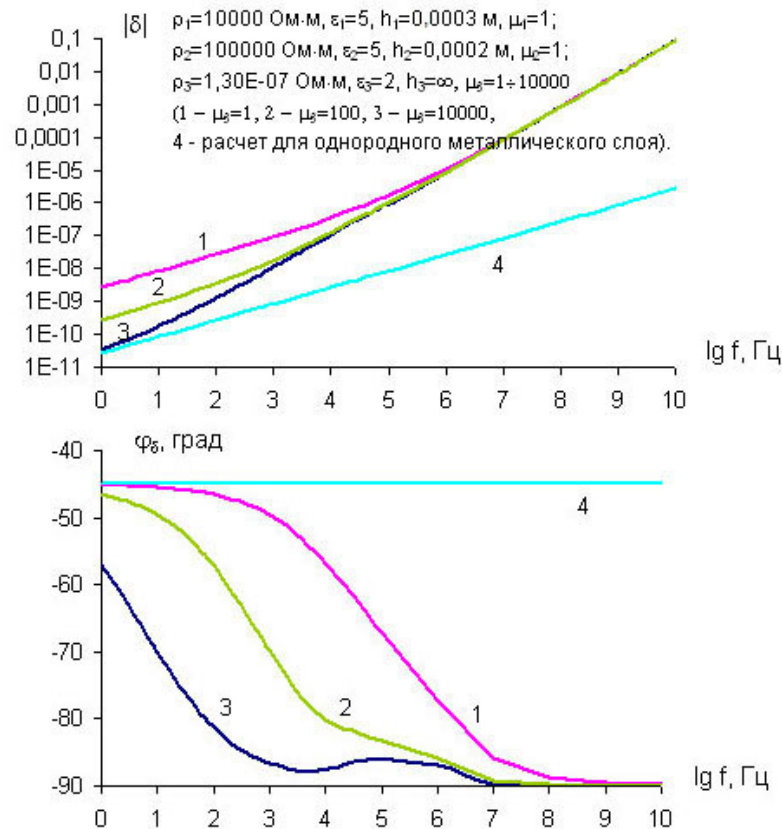


Рис. 1. Частотные зависимости модуля и фазы приведенного поверхностного импеданса трехслойной среды «диэлектрик на ферромагнитном основании».

Для данной структуры проведен ряд модельных расчетов для анализа особенностей поведения импеданса при меняющихся параметрах слоев. На рис. 2 представлены частотные зависимости модуля и фазы поверхностного импеданса для другой двухслойной структуры с более проводящими свойствами ($\sigma_1=1 \text{ См/м}$ и $\sigma_2=100 \text{ См/м}$) и толстым слоем ($h_1=10 \text{ мм}$) для различных значений магнитной проницаемости второго слоя в диапазоне частот от 100 кГц до 10 ГГц. Здесь также наблюдается существенное влияние магнитной проницаемости на значения модуля и фазы поверхностного импеданса в НЧ-СЧ-ВЧ-ОВЧ диапазонах. Так, на частоте 100 кГц варьирование μ_2 с 1 до 1000 приводит к уменьшению модуля импеданса от 0,00025 до 0,000027 и смещению фазы импеданса от -48° до сильно-индуктивного значения -79° . Минимальное значение фазы импеданса данной структуры в рассматриваемом диапазоне составляет -89° . Модуль импеданса удовлетворяет импедансным граничным условиям в диапазоне до 1 ГГц.

Заключение

Разработан и реализован алгоритм расчета поверхностного импеданса слоистых сред с учетом электрических и магнитных свойств двух-трехслойных структур. Показано, что структура типа «диэлектрик на ферромагнитном основании» в широком диапазоне

радиоволн имеет сильно-индуктивный импеданс с фазой импеданса до $-89,9^\circ$. Результаты расчетов показывают, что магнитная проницаемость существенно влияет на значения модуля и фазы поверхностного импеданса.

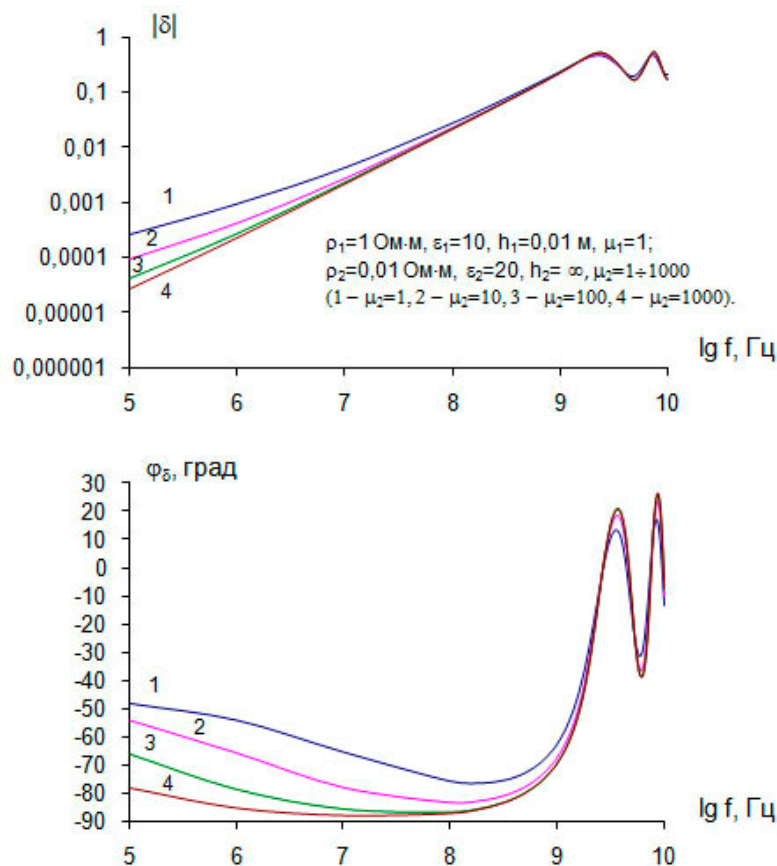


Рис. 2. Частотные зависимости модуля и фазы приведенного поверхностного импеданса двухслойной проводящей среды при различных значениях μ_2 .

Библиографические ссылки

1. Трунин М. Р. Поверхностный импеданс монокристаллов ВТСП в микроволновом диапазоне // УФН. 1998. Т. 168. № 3. С. 931–952.
2. Ангархаева Л. Х., Балханов В. К. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012612509. Расчет поверхностного импеданса градиентной среды с учетом магнитной проницаемости. М.: РОСПАТЕНТ. 07.03.2012.

References

1. Trunin M. R. Surface impedance of HTSC single crystals in the microwave band. *Phys. Usp.*, 1998, no. 41, pp. 843–863
2. Angarkhaeva L. Kh., Balkhanov V. K. *Raschet poverkhnostnogo impedansa gradientnoy sredy s uchetom magnitnoy pronitsaemosti*, Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM, Moscow, Rospatent, 07.03.2012.