УДК 004.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Сухоцкий В.В., Пухир Г.А., Насонова Н.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, such998slava@outlook.com

Аннотация: для разработки электромагнитных экранов используются различные материалы, обладающие большими потерями в области пропускания электромагнитных волн. В последнее время появились разработки новых типов экранов на основе влагосодержащих материалов. В работе приводится краткое описание процесса моделирования свойств таких материалов на примере пористого наполнителя, пропитанного водным раствором хлорида кальция, распределенного в кремнийорганическом связующем. Показано, что путем рассмотрения влагосодержащего композита как многофазной структуры, можно рассчитать его диэлектрические параметры и оптимизировать параметры эффективности экранирования конструкции на его основе.

Ключевые слова: электромагнитный экран, водосодержащий композиционный материал, диэлектрическая проницаемость, моделирование.

I. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование параметров композиционного материала при конструировании электромагнитных экранов позволяет сокращать затраты времени и сырья на экспериментальные образцы, а также повысить эффективность готовых конструкций за счет решения задачи оптимизации с учетом требуемых выходных параметров. Зная закономерности взаимодействия компонентов материала с электромагнитным излучением определенной мощности и частоты, а также между собой, можно получить математическую модель, позволяющую учитывать множество параметров композита. При разработке новых экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) происходит подбор материалов, пригодных для использования в конкретном сценарии. Как правило, выбор материала экрана проводится исходя из обеспечения требуемой эффективности экранирования в заданном диапазоне частот при определенных ограничениях, связанных с технологическими и эксплуатационными свойствами готовой конструкции.

В настоящее время активно разрабатываются экраны на основе композиционных влагосодержащих материалов, так как вода – универсальный растворитель, может смешиваться с полярными веществами и позволяет создавать электролиты, обладающие свойством поглощения ЭМИ микроволнового диапазона. Для создания устойчивого материала с водным электролитом внутри используют влагопоглощающие материалы и каркас, способный изолировать воду и задерживать её внутри влагопоглощающих материалов.

Экспериментальные исследования показывают [1], что в диапазоне частот 8…12 ГГц в порошковых силикагелевых материалах при изменении влагосодержания от 20 до 55 мас. % величина ослабления может достигать 20 дБ, а коэффициент отражения от -12 до -5 дБ. В порошковых бентонитовых материалах повышение влагосодержания от 20 до 45 мас. % приводит к увеличению ослабления до 16 дБ, при коэффициенте отражения -8...-4,5 дБ. Многослойные конструкции на основе таких материалов позволяют увеличивать ослабление ЭМИ до 30 дБ и выше в диапазоне частот 8…12 ГГц.

Как следствие, эффективность влагосодержащих материалов для экранирования электромагнитного излучения высока, а разработка модели расчета параметров таких композитов актуальна.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ КОМПОЗИТА

Свойства диэлектрика на переменном токе описываются понятием комплексной диэлектрической проницаемости, состоящей из действительной и мнимой частей, которые обычно зависят от частоты. В радиочастотном диапазоне наблюдается рост действительной части комплексной диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков за счет дипольной поляризации [2]. Это приводит к энергетическим потерям, что можно эффективно использовать при экранировании электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Увеличение важности влагосодержащих материалов значительно увеличивает тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Поглощение энергии электромагнитного излучения в диапазоне частот до 300 ГГц в таких структурах описывается следующим уравнением [3]:

$$\varepsilon^* = \left(\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1+\omega^2\tau^2}\right) + j\left(\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}\right)1 + \omega\tau, \quad (1)$$

где ε_0, ε_∞ – статическое и высокочастотное значение диэлектрической проницаемости;

τ – время релаксации молекул воды, с;

ω – частота внешнего переменного электрического поля, рад/с.

Для моделирования влагосодержания материала на основе водного раствора хлорида кальция необходимо рассмотреть растворный наполнитель как многофазную структуру с распределением раствора в порах сорбента, выполняющего роль несущей основы жидкой фазы, где влагосодержание может быть описано через термодинамические параметры системы. Представленный алгоритм учитывает параметры одной поры сорбента, заполненной раствором, монослоя и всего композита.

Используя данные расчетов по формулам 2-3, можно найти эквивалентную массу соли (кг) и эквивалентную массовую долю соли в растворе, соответственно:

$$\mathrm{m_{sol,eq}} = \frac{\mathrm{m_{H_2O}\cdot M_{sol}\cdot(1-RH)}}{\mathrm{M_{H_2O}\cdot RH}}, \qquad \xi_{\mathrm{eq}} = \frac{\mathrm{m_{sol,eq}}}{\mathrm{m_{sol,eq}+m_{H_2O}}}, \quad (2)$$

где $\mathrm{m_{H_2O}} = 1$ кг – допущенная масса воды в растворе,

$\mathrm{M_{sol}} = 0.111$ кг/моль – молярная масса хлорида кальция;

$\mathrm{M_{H_2O}} = 0.018$ кг/моль – молярная масса молекулы воды.

Находим объём раствора с максимально возможной массовой долей соли в порах гранул ($м^3$):

$$\mathrm{V_{sol,req}} = \frac{\mathrm{m_{sol,req}}}{\rho_{\mathrm{sol}}(\xi_{\mathrm{eq}},\mathrm{T_{air}})} = \frac{\xi_0\cdot\rho_{\mathrm{sol}}(\xi_0,\mathrm{T_{air}})\cdot\phi_{\mathrm{p}}\cdot\varphi_{\mathrm{g}}}{\xi_{\mathrm{eq}}\cdot\rho_{\mathrm{sol}}(\xi_{\mathrm{eq}},\mathrm{T_{air}})}. \quad (3)$$

Находим объем воды, поглощенной связующим из раствора, которым пропитаны гранулы ($м^3$):

$$\Delta\mathrm{V_{sol}} = \frac{\mathrm{m_{mono}}}{\rho_{\mathrm{H_2O}}\cdot(1-\xi_{\mathrm{eq}})} = \frac{\rho_{\mathrm{H_2O}}\cdot\delta_{\mathrm{m}}\cdot\mathrm{A_{ext}}}{\rho_{\mathrm{H_2O}}\cdot(1-\xi_{\mathrm{eq}})} = \frac{\delta_{\mathrm{m}}\cdot\mathrm{A_{ext}}}{(1-\xi_{\mathrm{eq}})} = \frac{6\cdot\delta_{\mathrm{m}}\cdot\varphi_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}\cdot(1-\xi_{\mathrm{eq}})}. \quad (4)$$

где $\delta_{\mathrm{m}} = 2.9\times10^{-10}$м – толщина монослоя воды;

$\rho_{\mathrm{H_2O}}$ – плотность насыщенного водяного пара при заданной температуре

Рассчитанные параметры позволяют получить итоговые коэффициенты заполнения пор раствором и воздухом, соответственно:

$$\mathrm{C_{pore}} = \min\left(1, \frac{\max(0,\mathrm{V_{sol,req}}-\Delta\mathrm{V_{sol}})}{\mathrm{V_p}}\right), \qquad \mathrm{C_{air}} = 1 - \mathrm{C_{pore}}. \quad (5)$$

Представленная математическая модель была обработана в программной среде Matlab [4] и получена зависимость содержания раствора в порах готового материала (рис. 1).

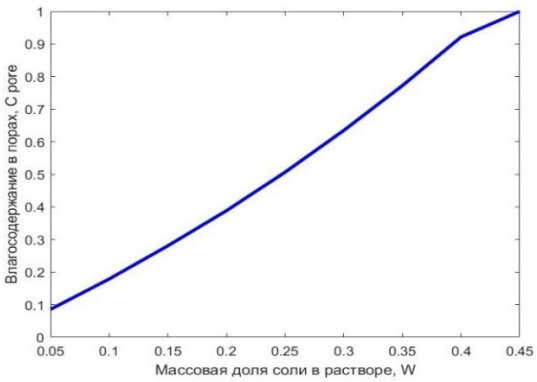


Рисунок 1. Зависимость итогового коэффициента заполнения пор раствором от концентрации соли в растворе

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТА

Для моделирования диэлектрических параметров итогового материала необходимо учитывать влагосодержание материала и особенности взаимодействия каждого компонента композиционного материала электромагнитного экрана с электромагнитным излучением определенной частоты.

Для растворного наполнителя необходимо рассчитать:

1) коэффициент преломления раствора хлорида кальция:

$$n = n_{H_2O} + n_{добав} \cdot \xi_0 - 100 \cdot \Delta n \cdot {\xi_0}^2; \quad (6)$$

2) проводимость ионов хлорида кальция в растворе (См):

$$\sigma_{CaCl_2} = \frac{\xi_0 \cdot 2 \cdot e_0 \cdot \left(U_{Ca^{2+}} + U_{Cl^-}\right) \cdot \rho_{sol}(\xi,T) \cdot 10^{-3}}{M_{sol}}; \quad (7)$$

3) проводимость ионов воды в растворе (См):

$$\sigma_{H_2O} = \frac{(1-\xi_0) \cdot \xi_0 \cdot 2 \cdot e_0 \cdot (U_{H^+} + U_{OH^-}) \cdot \rho_{sol}(\xi,T) \cdot 10^{-3}}{M_{sol}}; \quad (8)$$

4) время релаксации молекул воды в растворе (с):

$$t_0 = \frac{4 \cdot \mu_{вязкости\ р-ра} \cdot d_{молекулы\ воды}}{k \cdot T_{air}}; \quad (9)$$

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости раствора может быть рассчитана по формуле:

$$\varepsilon' = \left(\frac{t_0 \cdot c}{m} + \sqrt{1 - \left(\frac{c}{l \cdot f}\right)^2}\right)^2 + \left(\frac{c}{l \cdot f}\right)^2; \quad (10)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость раствора тогда определяется как:

$$\varepsilon_{el}{}^* = \varepsilon' + \frac{\varepsilon' - n^2}{1 + (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_0)^{1-\alpha_{неидеал}}} - \frac{i \cdot (\sigma_{CaCl_2} + \sigma_{H_2O}) \cdot m}{\varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l \cdot n}; \quad (11)$$

Находим комплексную диэлектрическую проницаемость поры гранулы с раствором и воздухом:

$$\varepsilon_{pore}{}^* = \frac{(-1) \cdot (\varepsilon_{el}{}^* - 2 - 3\varepsilon_{el}{}^* \cdot C_{pore} + 3 \cdot C_{pore})}{2}. \quad (12)$$

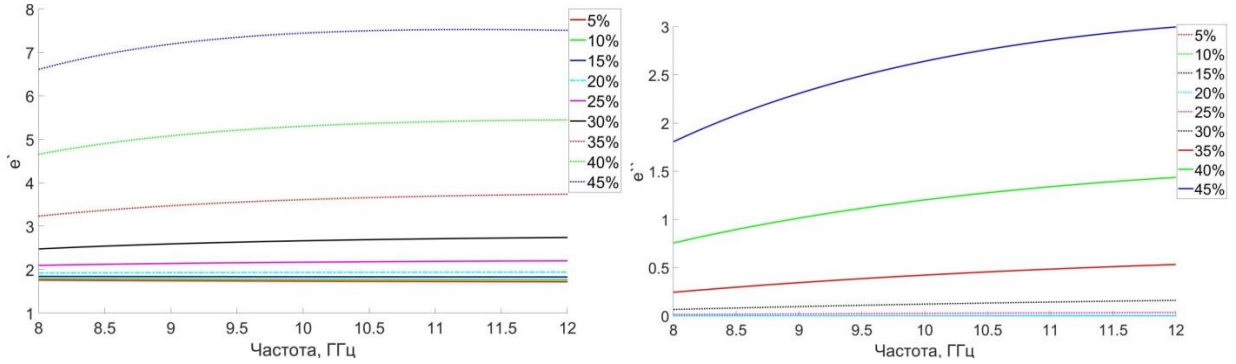
Вычисляем комплексную диэлектрическую проницаемость 1 гранулы, пропитанной раствором:

$$\varepsilon_{gr}{}^* = \frac{(-1) \cdot (\varepsilon_{pore}{}^* - 2 \cdot \varepsilon_{silic} - 3 \cdot \varepsilon_{pore}{}^* \cdot \phi_p + 3 \cdot \varepsilon_{silic} \cdot \phi_p)}{2}. \quad (13)$$

Для готового композиционного материала комплексная диэлектрическая проницаемость рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{comp}{}^* = \frac{(-1) \cdot (\varepsilon_{gr}{}^* - 2 \cdot \varepsilon_{silic} - 3 \cdot \varepsilon_{gr}{}^* \cdot \varphi_g + 3 \cdot \varepsilon_{silic} \cdot \varphi_g)}{2}; \quad (14)$$

Диэлектрические параметры материала также были обработаны в программной среде Matlab. Результаты моделирования представлены на рисунке 2 в виде частотных зависимостей в диапазоне 8 – 12 ГГц.



а) б)

Рисунок 2. Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (действительная часть (а) и мнимая часть (б)) образцов композитов с различной концентрацией растворного наполнителя пор (от 5 до 45 масс.%) в диапазоне 8 – 12 ГГц

Результаты моделирования коррелируют с данными экспериментальных исследований [5] образцов экранирующих композиционных материалов на основе пористого силикагелевого материала, пропитанного водным раствором хлорида кальция различной концентрации (массовая доля соли – 5-45 % с шагом 5%), распределенного в кремнийорганическом связующем (объемная доля гранул в материале составляет 50 %). Пористость гранулы диаметром 2 мм была принята за 60 %.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов моделирования и сравнения с экспериментальными данными измерений комплексной диэлектрической проницаемости композиционных влагосодержащих материалов можно сделать вывод, что закономерности диэлектрических параметров композита требуют знания особенности его структуры и учета всех компонентов такой системы. Так, для влагосодержащих материалов важно учитывать распределение влаги в порах сорбента и физико-химические свойства раствора. Данные результаты могут быть приближены к реальным значениям и на их основе можно реализовать модель расчета экранирующих характеристик ослабления и отражения электромагнитного излучения для оптимизации задачи конструирования эффективных электромагнитных экранов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Водосодержащие пенополимерные материалы для создания экранов электромагнитного излучения / Н. В. Колбун, Х. М. Альлябад, Л. М. Лыньков – Мн. : БГУИР, 2008. – с.87-92.

[2] Хиппель, А. Диэлектрики и их применение : Пер. с англ. под ред. Д.М. Казарновского / А. Хиппель. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1959. – 80 с.

[3] Бензарь, В.К. Техника СВЧ-влагометрии / В.К.Бензарь. – Минск: Вышэйшая школа, 1974. – 374 с.

[4] Пакет прикладных программ Matlab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mathworks.com. – Дата доступа: 15.09.2026.

[5] Насонова Н.В. Взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с влагосодержащими материалами на основе различных пористых матриц / Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21–24 сент. 2021 г. / Белорус. гос.ун-т; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 330-334.

MODELING OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF MOISTURE-CONTAINING SHIELDING MATERIALS

V. Sukhotski, H. Pukhir, N. Nasonova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
such998slava@outlook.com

Abstract: various materials exhibiting high losses in the electromagnetic wave transmission range are used to develop electromagnetic shields. Recently, designs of new types of shields based on moisture-containing materials have emerged. This article provides a brief description of the process of modeling the properties of such materials using the example of a porous filler impregnated with aqueous calcium chloride solution distributed in an organosilicon binder. It is shown, that by considering the moisture-containing composite as a multiphase structure, it is possible to calculate its dielectric parameters and optimize the shielding efficiency parameters of a structure based on it.

Keywords: electromagnetic shield, moisture-containing composite material, permittivity, modeling.