

УДК 004.353.2:537.531

СНИЖЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКРАНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Г.А. ПУХИР, У.М. ХАРМА, Н.Н. ГРИНЧИК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2017

Аннотация. Приведено теоретические и экспериментальное обоснование создания многослойного экрана ЭМИ на основе влагосодержащих материалов, коэффициент отражения электромагнитной волны для которого снижен с $-1,5$ до -6 дБ в диапазоне $8 \dots 12$ ГГц. Полученный результат достигнут за счет ступенчатого изменения электромагнитных характеристик путем увеличения концентрации наполнителя.

Ключевые слова: многослойный экран электромагнитного излучения, коэффициент отражения, влагосодержащие материалы.

Abstract. The theoretical and experimental justification for creating a multilayer EMR shield based on moisture-containing materials is presented, the reflection coefficient of the electromagnetic wave for which is reduced from -1.5 to -6 dB in the range $8 \dots 12$ GHz is given. The obtained result is achieved due to a stepwise change in the electromagnetic characteristics by increasing the concentration of the filler.

Keywords: multilayer electromagnetic radiation shield, reflection coefficient, moisture-containing materials.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 104, No. 2, pp. 96–100

Reduction of the reflection coefficient of multilayered electromagnetic radiation shield structure based on water-containing materials.

H.A. Pukhir, O.M. Khrma, N.N. Grinchik

Введение

Влагосодержащие материалы известны своими экранирующими электромагнитное излучение радиочастотного диапазона свойствами [1–3]. Использование водосодержащего наполнителя позволяет увеличить проводимость материала и обеспечить высокий уровень ослабления электромагнитного излучения (ЭМИ). Проблема формирования объемно-пространственной структуры на основе таких материалов решается путем распределения жидкой среды в пористой или волокнистой матрице. Многослойные материалы и конструкции на их основе используют для повышения эффективности экранирования в первую очередь за счет увеличения толщины экранирующего слоя. В настоящей работе рассматривается зависимость отражающей электромагнитное излучение способности многослойных влагосодержащих композиционных материалов от особенностей структурного распределения жидкого наполнителя основы композита, который может включать в себя микро- и макропоры (двойная пористость).

Методика измерения и моделирования электромагнитных характеристик экранов

Для исследования экранирующих ЭМИ свойств были изготовлены образцы композиционных влагосодержащих материалов с различным влагосодержанием по массе

образца. В качестве наполнителя использовалась дистиллированная вода. Толщина одного слоя материала составляла 1,5 мм. Толщина готового многослойного образца составляла порядка 4,5 мм. Влагосодержание оценивалось в массовом соотношении компонентов путем гравиметрических измерений с использованием лабораторных весов первого класса точности.

Экранирующие характеристики были получены путем детектирования напряжения падающего, прошедшего и отраженного сигналов источника электромагнитного излучения при взаимодействии с исследуемым материалом. Измерения величины ослабления ЭМИ и коэффициента отражения осуществлялись с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослабления Я2Р-67 с использованием генератора ГКЧ-61 в диапазоне 8...12 ГГц. [4]. Калибровка приборов осуществлялась во всем рабочем диапазоне частот по стандартной методике после установки диапазона качания частоты и уровня падающей мощности. Коэффициент отражения $K_{отр}$ определялся расчетным путем на основании полученных значений КСВН по формуле:

$$K_{отр} = 20 \cdot \lg \frac{КСВН - 1}{КСВН + 1}. \quad (1)$$

В качестве несущей основы композита использовались волокнистые гигроскопичные материалы в виде машинно-вязанного и нетканого полотен. Результаты исследований представлены в виде частотных зависимостей величин ослабления и отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц.

Для моделирования взаимодействия ЭВМ микрогетерогенной электрохимической структуры использовалась методика, предложенная Н.Н. Гринчиком [5]. Согласно данной методике, уравнения электромагнитного поля Максвелла сводятся к обобщенному волновому векторному уравнению вида:

$$\left(\varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \lambda \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = \frac{1}{\mu \mu_0} (\nabla^2 \vec{E} - \text{grad div} \vec{E}). \quad (2)$$

При этом на границах раздела смежных сред должно выполняться условие непрерывности нормальной составляющей полного тока:

$$\left[\lambda E_x + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \right]_{y=\zeta} = 0. \quad (3)$$

Согласно данной методике, для численного моделирования распространения сигнала в гетерогенной среде можно использовать схемы сквозного счета без необходимости введения и определения поверхностного заряда поверхностного тока.

Расчеты проводились с использованием пакета ComsolMultiphysics 3.3 и метода «кожуха», т.е. выбиралась прямоугольная область с размерами порядка 20 длин волн. На границе прямоугольной области были заданы периодические функции $E_x(t) = \sin(10^9 t)$, $E_y(t) = \cos(10^9 t)$. Параметры среды, заполняющей прямоугольник (воздух): $\varepsilon_r = 1 \cdot 000001$, $\mu_r = 1$, $\lambda = 0$. Внутри прямоугольника в 2D находится маскируемый объект – четырехугольник, сделанный из меди ($\varepsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$, $\lambda = 5,998 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Время расчета 10^{-6} сек с шагом 10^{-7} . Размер расчетной области $0,6 \times 0,6$ м.

Экспериментальная часть

Трехслойные экраны толщиной порядка 4,5 мм на основе влагосодержащих материалов с высокой концентрацией наполнителя позволяют снижать уровень ЭМИ более чем на 40 дБ в СВЧ-диапазоне, что подтверждают результаты измерений при воздействии источника излучения малой мощности. На рис.1 представлена частотная характеристика коэффициента отражения композиционного многослойного материала с различным влагосодержанием на основе машинно-вязанного полотна в диапазоне 8...12 ГГц. За исследуемым образцом экрана ЭМИ при измерениях КСВН и последующих расчетов по формуле (1) коэффициента отражения располагался металлический отражатель, а измерения проводились в режиме короткого замыкания.

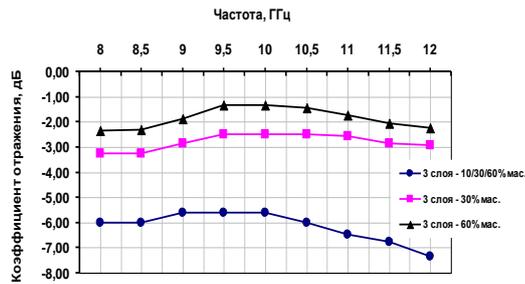


Рис. 1. Частотная характеристика коэффициента отражения композиционным материалом на основе машинно-вязанного полотна с влагосодержанием от 10 до 60 % мас.

Коэффициент отражения однослойного материала при максимальном влагосодержании 60 % мас. составляет $-2,5 \dots -3,5$ дБ. Для трехслойного композита с максимальным наполнением водой коэффициент отражения повышается на 1 дБ. Незначительно меняется данный показатель при концентрации наполнителя 30 % мас. Наименьшим значением коэффициента отражения обладает образец в виде трехслойной структуры с градиентом влагосодержания 10...60 %. Слои при этом располагались в порядке возрастания по мере удаления от источника ЭМИ.

На рис. 2 представлена частотная характеристика коэффициента отражения композиционного многослойного материала с различным влагосодержанием на основе нетканого полотна в диапазоне 8...12 ГГц.

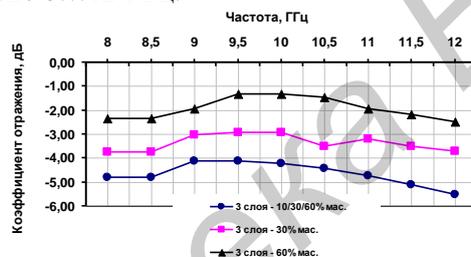


Рис. 2. Частотная характеристика коэффициента отражения композиционным материалом на основе машинно-вязанного полотна с влагосодержанием от 10 до 60 % мас.

Наименьшим значением коэффициента отражения $-5,5$ дБ обладает образец в виде трехслойной структуры с градиентом влагосодержания 10...60 %. Слои также располагались в порядке возрастания по мере удаления от источника ЭМИ. Для трехслойного композита с концентрацией наполнителя 30 % мас. коэффициент отражения повышается до -3 дБ. Трехслойный образец с максимальным влагосодержанием 60 % мас. по всем слоям показывает наибольший коэффициент отражения порядка -2 дБ.

При моделировании параметров экранов на четырехугольнике (2D) из меди размещалась ткань с параметрами $\epsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$, $\lambda = 0,04$ Ом·м и геометрией E_x и E_y компонент поля. По результатам расчетов с использованием формул (2–3) и заданными граничными условиями видно, что ткани обеспечивают значительное уменьшение отражательной способности меди. В то же время без укрытия тканями медь, как и любой проводящий материал, даже для малых размеров (размер области $10^{-2} \times 1,4 \cdot 10^{-12}$ м), обладает свойством фокусировки электромагнитного поля на острых гранях. Медь также укрывалась тканью с большей величиной коэффициента удельного электрического сопротивления $\lambda = 0,4$ Ом·м. Является неожиданным тот факт, что укрытие меди машинно-вязанной тканью (сочетание макро- и микропор) размер расчетной области ($\leq 4 \cdot 10^{-4}$ м) также приводит к эффекту уменьшения интенсивности отраженных электромагнитных волн. Данный эффект может быть связан с изменением пропорции между количеством макро- и микропор, вследствие уменьшения межпорового пространства между волокнами.

С учетом диэлектрических и проводящих свойств компонентов многослойных экранов ЭМИ можно предположить о возможности управления экранирующими характеристиками. Учитывая особенности взаимодействия электромагнитных волн в пространстве с различными средами, моделирование параметров системы позволяет определить оптимальный состав слоев.

Электрофизические свойства влагосодержащих материалов в большей степени определяются диэлектрической и магнитной проницаемостями, проводимостью наполнителя и в меньшей степени аналогичными свойствами основы. Коэффициент отражения ЭМИ от экрана может быть минимальным при согласовании волновых параметров внешнего слоя многослойного экрана с волновыми параметрами среды источника излучения (свободного пространства).

Минимальное отражение ЭМИ будет достигаться при максимальном поглощении ЭМВ. Если волокнистая основа «сухая», когда равновесная относительная влажность $\varphi \leq 0,4$, то она фактически является диэлектриком и поэтому происходит отражение ЭМВ от поверхности объекта. Если основа «мокрая», тогда $\varphi \rightarrow 1$, то практически все поры и микропоры заполнены влагой и происходит отражение ЭМВ от объекта, т.к. обычная вода не является дистиллятом. При наличии соли электропроводность воды возрастает. Так, в 10%-м водном растворе NaCl электропроводность составляет 0,0825 Ом·м. В структуре влагосодержащей основы макропоры находятся на периферии, а микропоры в середине. Именно в этом случае интенсивность отраженной волны является минимальной. В силу сказанного, для снижения коэффициента отражения целесообразно использовать многослойные экраны с различным влагосодержанием (различной капиллярной структурой).

Заключение

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что одним из способов снижения многослойными влагосодержащими материалами коэффициента отражения ЭМИ диапазона 8...12 ГГц является создание многослойной структуры экрана со ступенчатым изменением электромагнитных характеристик путем увеличения концентрации наполнителя.

Таким образом, для этих целей наиболее эффективно использование сред с двойной пористостью, т.е. сочетание микропор и макропор, при этом микропористые нити должны хорошо проводить электрический ток. Для лучшего согласования волновых сопротивлений экрана и свободного пространства внешним к источнику ЭМИ слоем целесообразно располагать слой с наименьшим влагосодержанием.

Список литературы

1. Пухир Г.А., Пулко Т.А., Насонова Н.В. Выбор растворных наполнителей влагосодержащих экранирующих материалов для защиты информационных объектов от воздействия электромагнитных излучений // Тез. докл. VIII Белорусско-российской науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации». Браслав, 24–28 мая 2010 г. С. 76.
2. Экранирующие характеристики текстильных растворосодержащих матриц / Н.В. Ковальчук [и др.] // Докл. БГУИР. 2011. № 8 (62). С. 27–33.
3. Колбун Н.В., Альябад Х.М., Лыньков Л.М. Водосодержащие пенополимерные материалы для создания экранов электромагнитного излучения // Докл. БГУИР. 2008. № 1 (31). С. 87–92.
4. ГОСТ 22261–94 Средства измерений электрических и магнитных величин: Общие технические условия.
5. Водосодержащие капиллярно-пористые экраны электромагнитного излучения. Теория и практика / Н.Н. Гринчик [и др.]. Минск: Бестпринт, 2016. 238 с.

References

1. Puhir G.A., Pulko T.A., Nasonova N.V. Vybora rastvornykh napolnitelej vlagosoderzhashchih jekranirujushchih materialov dlja zashhity informacionnyh objektov ot vozdeystvija jelektromagnitnyh izluchenij // : tez. dokl. VIII Belorussko-rossijskoj nauch.-tehn. konf. «Tehicheskie sredstva zashhity informacii». Braslav, 24–28 maja 2010 g. S. 76. (in Russ.)
2. Jekranirujushhie harakteristiki tekstil'nyh rastvorosoderzhashchih matric / N.V. Koval'chuk i dr. // Dokl. BGUIR. 2011. № 8 (62). S. 27–33. (in Russ.)
3. Kolbun N.V., Al'jabad H.M., Lyn'kov L.M. Vodosoderzhashhie penopolimernye materialy dlja sozdaniya jekranov jelektromagnitnogo izluchenija // Dokl. BGUIR. 2008. № 1 (31). S.87–92. (in Russ.)
4. GOST 22261–94 Sredstva izmerenij jelektricheskikh i magnitnyh velichin: Obshhie tehicheskie uslovija. (in Russ.)
5. Vodosoderzhashhie kapilljarno-poristyje jekrany jelektromagnitnogo izluchenija. Teorija i praktika / N.N. Grinchik [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2016. 238 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Харма У.М., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Пухир Г.А., ассистент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гринчик Н.Н., д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник отделения теплофизики ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровка, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-85-58;
e-mail: pukhir@tut.by;
Пухир Галина Александровна

Information about the authors

Khrma O.M., PG student of the information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Pukhir H.A., assistant of the information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Grinchik N.N., D. Sci., associate professor, leading researcher of thermophysics department of SSI «Heat and mass transfer institute of the Belarus NAS named after A.V. Lykov».

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
тел. +375-17-293-85-58;
e-mail: pukhir@tut.by;
Pukhir Halina Aleksandrovna