

УДК 621.37, 537.874.7

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Г.А. ПУХИР, М.А. ВИЛЬКОЦКИЙ, АБУКРАА А.С. АБДУЛССАЛАМ, Н.В. НАСОНОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, Беларусь*

Поступила в редакцию 16 января 2015

Предложены конструкции радиопоглотителей на основе влагосодержащих волокнистых материалов растительного происхождения и исследованы частотные зависимости их экранирующих характеристик в диапазоне частот 0,7...17 ГГц, отличающиеся низким коэффициентом отражения в широком диапазоне частот, высокой технологичностью формирования и доступностью исходных составляющих. Показано, что разработанные конструкции обладают эффективностью экранирования ЭМИ до 45 дБ при минимальном коэффициенте отражения в размере –15 дБ в исследуемом диапазоне частот.

Ключевые слова: экран электромагнитного излучения, радиопоглотитель, композиционный материал, волокнистый материал растительного происхождения.

Введение

Электромагнитное излучение – неотъемлемая составляющая современной цивилизации. Сегодня невозможно представить себе наше существование без технической инфраструктуры, охватывающей абсолютно все сферы деятельности человека. Информатизация общества привела к тому, что электронно-вычислительные системы контролируют наиболее важные и сложные процессы. Их отстранение или внезапное отключение может привести к серьезным финансовым, экологическим и социальным последствиям. Поэтому необходимость сосуществования с технической средой является очевидным фактом. Работа любых электронных технических средств связана с использованием электромагнитной энергии в той или иной форме. Кроме того, многие устройства являются непосредственными источниками таких излучений в широком диапазоне частот и мощностей, что создает небезопасную среду для функционирования других технических устройств, а также жизнедеятельности живых организмов в непосредственной близости с источниками таких излучений.

Радиоэлектронная аппаратура (от бытовых приборов до систем наземной и спутниковой связи), как правило, функционирует в микроволновом диапазоне. Что порождает проблему электромагнитной совместимости, а при высоких мощностях излучаемых волн и защиту оборудования и персонала от их негативного воздействия. Электронно-вычислительная техника использует весьма широкий частотный диапазон и чувствительна к воздействию практически любых электромагнитных полей и наводок [1].

В настоящее время разработка экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) и конструкций, обеспечивающих защиту персонала и технических объектов от нежелательного воздействия ЭМИ, является широкомасштабным процессом, в который вовлечено мировое научное сообщество. Ученые многих стран работают над созданием высокоэффективных методов и средств защиты от воздействия ЭМИ. Немаловажным фактором является доступность компонентов системы и надежность готовой защитной конструкции, что может быть обусловлено территорией создания и эксплуатации экранов ЭМИ.

Целью настоящей работы является создание и исследование эффективности конструкций широкополосных радиопоглотителей СВЧ-диапазона, отличающихся низким коэффициентом отражения в широком диапазоне частот, высокой технологичностью формирования и доступностью исходных материалов из волокон растительного происхождения.

Обоснование выбора компонентов радиопоглотителя

Эффективность экранирования определяется процессами отражения и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) в материале экрана:

$$\mathcal{E}_{\text{экр}} = \mathcal{E}_{\text{отр}} \cdot \mathcal{E}_{\text{погл}} \cdot \mathcal{E}_{\text{мотр}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{экр}}$ – общая эффективность экранирования; $\mathcal{E}_{\text{отр}}$ – эффективность экранирования за счет отражения первичной падающей электромагнитной волны (ЭМВ) от поверхности экрана; $\mathcal{E}_{\text{погл}}$ – эффективность экранирования за счет поглощения (внутренних преобразований) энергии в среде экрана при прохождении ЭМВ сквозь толщину стенки экрана; $\mathcal{E}_{\text{мотр}}$ – эффективность экранирования за счет потерь энергии ЭМВ от многократных переотражений от внутренних границ экрана [2].

Широко известными и распространенными являются экраны из металлических материалов. В зависимости от частотного диапазона такие экраны могут выполняться сплошными или сетчатыми. Эффективность таких экранов может быть рассчитана исходя из толщины слоя, проводимости и магнитных свойств металла. Высокая величина проводимости металлов обуславливает 99%-ное отражение энергии падающего ЭМИ.

В некоторых случаях условие снижения компонента $\mathcal{E}_{\text{отр}}$ является необходимым. Материалы и конструкции, действие которых основано на эффекте поглощения ЭМИ средой экрана, называют радиопоглощающими или поглотителями ЭМИ [3]. Формирование радиопоглотителей основано на согласовании волновых параметров слоев материала с параметрами свободного пространства и рассеянии энергии ЭМВ за счет геометрических неоднородностей поверхности конструкции радиопоглотителя.

Отдельного внимания требуют водосодержащие материалы экранов ЭМИ. Вода является наиболее широко распространенным поглотителем ЭМИ миллиметрового диапазона за счет диэлектрической поляризационной дисперсии, обеспечивающей высокие диэлектрические потери в СВЧ-диапазоне. Большинство материалов уступают воде по этому показателю. Однако появляется другая проблема, которая заключается в формировании определенной пространственной структуры на основе воды в жидкой фазе, так как именно жидкое состояние воды обеспечивает высокие диэлектрические потери. Диэлектрическая проницаемость сильно зависит от влагосодержания в материале, температуры и частоты излучения. С ростом влагосодержания материала увеличивается комплексная диэлектрическая проницаемость: как действительная часть, так и фактор потерь [4, 5].

В [6] приведены значения составляющих комплексной диэлектрической проницаемости для различных веществ при температуре 20 °С и 25 °С на частоте 10 ГГц в зависимости от влагосодержания. На основании этих данных, учитывая закономерность такой зависимости, можно смоделировать средние значения ϵ' и ϵ'' для различного содержания влаги в материале (табл. 1).

Таблица 1. Соответствие значений ϵ' и ϵ'' и содержания влаги в материале на частоте 10 ГГц

ϵ'	ϵ''	W, % масс	ϵ'	ϵ''	W, % масс
7,7	3,4	10	38,3	17,0	50
11,5	5,1	15	53,7	23,8	70
23,0	10,2	30	69,0	30,6	90

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты в диапазоне СВЧ носит нелинейный характер. При этом наибольшее влияние оказывает частота на действительную составляющую ϵ' . Это подтверждается экспериментальными и расчетными данными.

Поиск несущей основы или матрицы для жидкого наполнителя является актуальной задачей при разработке влагосодержащих композиционных экранирующих материалов. Для этих целей используются различные капиллярно-пористые порошковые и волокнистые

материалы. Известны конструкции на основе силикагеля, бентонита, тканого и нетканого полотна, шунгита и др. с различными способами герметизации для стабилизации влагосодержания композита [7–10]. Подобные материалы способны обеспечивать коэффициент передачи ЭМИ не менее -10 дБ при минимальном коэффициенте отражения $-10\dots-15$ дБ в СВЧ-диапазоне. В настоящей работе рассматривается возможность применения пористой волокнистой основы, в качестве которой используется древесная стружка хвойных пород. Дерево широко известно как волокнистый электроизоляционный материал. Из всех составных частей древесины волокнистым строением обладает только целлюлоза, содержащаяся в количестве до 50 % от веса абсолютно сухой древесины. Целлюлоза – один из самых основных видов полимерных материалов, имеет волокнистое строение и является главной составной частью стенок растительных клеток, и вместе с сопровождающими ее веществами составляет твердый остов всех растений, придавая им механическую прочность и эластичность [11]. Волокнистая структура, гигроскопичность, а также доступность, экологичность и малый вес исходного сырья обуславливают выбор данного материала как несущей основы для жидкого наполнителя. В качестве жидкого наполнителя предлагается использовать гидрофильный водный раствор хлорида кальция, который обеспечит стабилизацию уровня влагосодержания.

Водный раствор хлорида кальция обладает повышенной электропроводностью по сравнению с водой за счет появления свободных ионов, являющихся носителями заряда. Также из-за присутствия ионов происходит существенная модификация структуры воды, сопровождающаяся снижением диэлектрической проницаемости воды с одновременным уменьшением времени диэлектрической релаксации [12]. При этом увеличение отражения, обусловленное возрастанием удельной электропроводности раствора, с избытком компенсируется уменьшением доли отраженной энергии ЭМИ, связанным с уменьшением диэлектрической проницаемости воды и согласованием волновых сопротивлений материала и свободного пространства.

Методика проведения эксперимента

Для исследования был изготовлен композиционный материал на основе древесной стружки хвойных пород, пропитанной водным раствором хлорида кальция в равновесной концентрации. Из полимерной пленки были сформированы локальные модули для заполнения композиционным материалом, что позволило зафиксировать наполнитель и обеспечить его механическую защиту. Соединение отдельных модулей между собой легко осуществляется термообработкой. Готовые образцы конструкций экранов представлены в двух вариантах исполнения с различной длиной влагосодержащих участков.

Как показано в [13], наибольшей эффективностью экранирования обладают композиционные материалы с наибольшим влагосодержанием. Результаты исследований экранирующих характеристик композиционных влагосодержащих волокнистых материалов растительного происхождения в частотном диапазоне $8\dots12$ ГГц позволяют предложить их для формирования радиопоглощающих конструкций в более широком диапазоне частот. Исследованы два типа образцов конструкций: с модулями квадратной (рис. 1, а) и прямоугольной (рис. 1, б) форм, заполненными влагосодержащим волокнистым материалом. Размеры модулей составляют 5×5 см и 5×25 см для образцов с квадратными и прямоугольными модулями соответственно. Толщина конструкций составляет около 10 мм.

Экранирующие свойства разработанных конструкций оценивались путем измерения коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне частот $0,7\dots17$ ГГц. Оценка экранирующих характеристик исследуемых образцов проводилась в лабораторных условиях с помощью измерительного комплекса SNA 0,01–18. При проведении измерений исследуемый образец экрана закреплялся между рупорами антенн измерительного тракта. В качестве источника тестового сигнала мощностью порядка 1 мВт использовался генератор качающейся частоты. В ходе измерений были получены частотные зависимости коэффициентов передачи S_{21} (по модулю равен эффективности экранирования электромагнитного излучения) и отражения S_{11} .

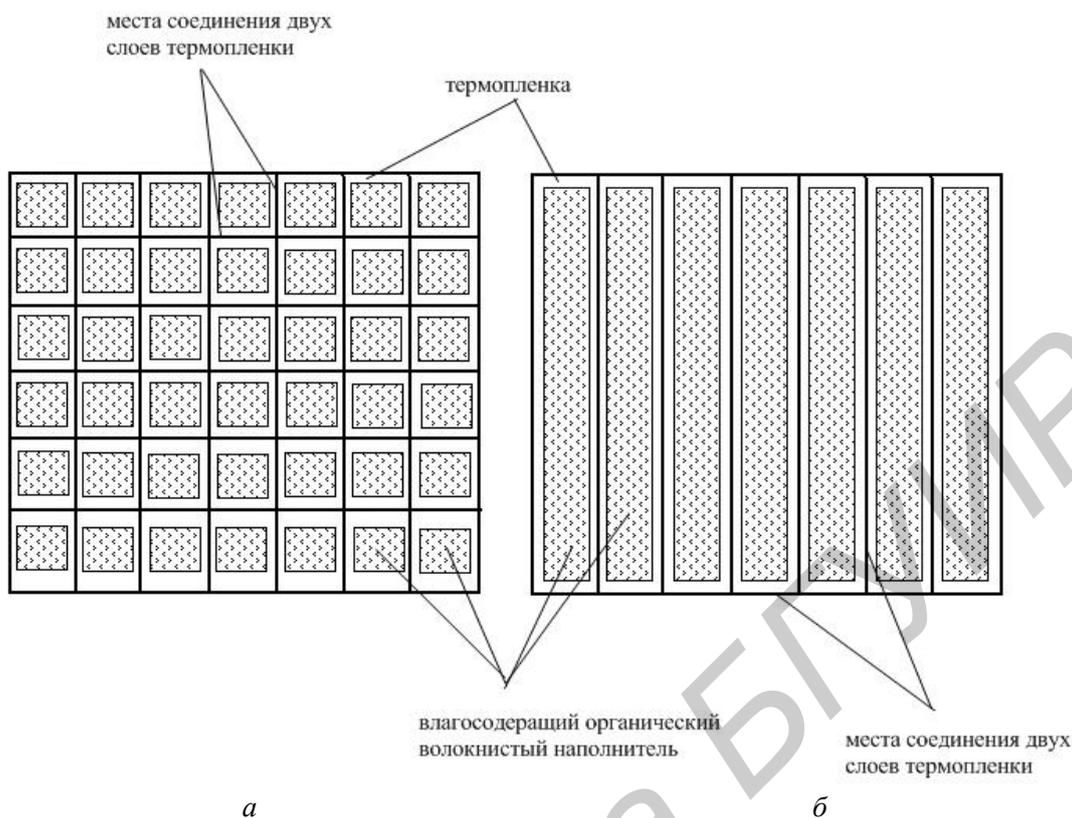


Рис. 1 Схематическое изображение конструкций радиопоглотителей ЭМИ на основе влагосодержащих волоконистых материалов: а – с квадратными модулями; б – с прямоугольными модулями

Расчетные формулы измерительного процесса приведены ниже:

$$S_{21} = \sqrt{\frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{пад}}}}, \quad (2)$$

где S_{21} – коэффициент передачи, дБ; $U_{\text{пр}}$ – амплитудное значение напряжения прошедшего через образец ЭМИ, В.; $U_{\text{пад}}$ – амплитудное значение напряжения падающей ЭМВ, В.

$$S_{11} = \sqrt{\frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}}}, \quad (3)$$

где S_{11} – коэффициент отражения, дБ; $U_{\text{отр}}$ – амплитудное значение напряжения, отраженного от образца, В.; $U_{\text{пад}}$ – амплитудное значение напряжения падающей ЭМВ, В.

В процессе измерений для сравнения за образцами устанавливался металлический отражатель (алюминиевая фольга) на диэлектрической подложке толщиной от 1,5 до 5 мм. Наличие слоя проводящего материала позволяет получить многослойную конструкцию с улучшенными характеристиками эффективности экранирования ЭМИ, а также имитировать использование разрабатываемой конструкции на металлической поверхности. Варьирование толщиной вспененного полимера позволяет выбрать оптимальный вариант многослойной конструкции с наилучшим согласованием параметров слоев.

Результаты и их обсуждение

Коэффициент передачи ЭМИ для разработанных конструкций достигает –25 дБ для однослойных образцов и до –45 дБ для двухслойных конструкций с металлическим отражателем (см. рис. 2). Наименьшим коэффициентом передачи обладают образцы с прямоугольными влагосодержащими модулями. При этом направление расположения данных модулей в случае двухслойной конструкции на коэффициент передачи существенного влияния

не оказывает (рис. 2, б). Особый интерес представляет низкочастотная область экранирования в диапазоне 0,5...3 ГГц, где наименьший коэффициент передачи (менее -40 дБ) обеспечивает двухслойный образец. Однослойная конструкция более эффективна в частотном диапазоне 3,5...17 ГГц (рис. 2, а).

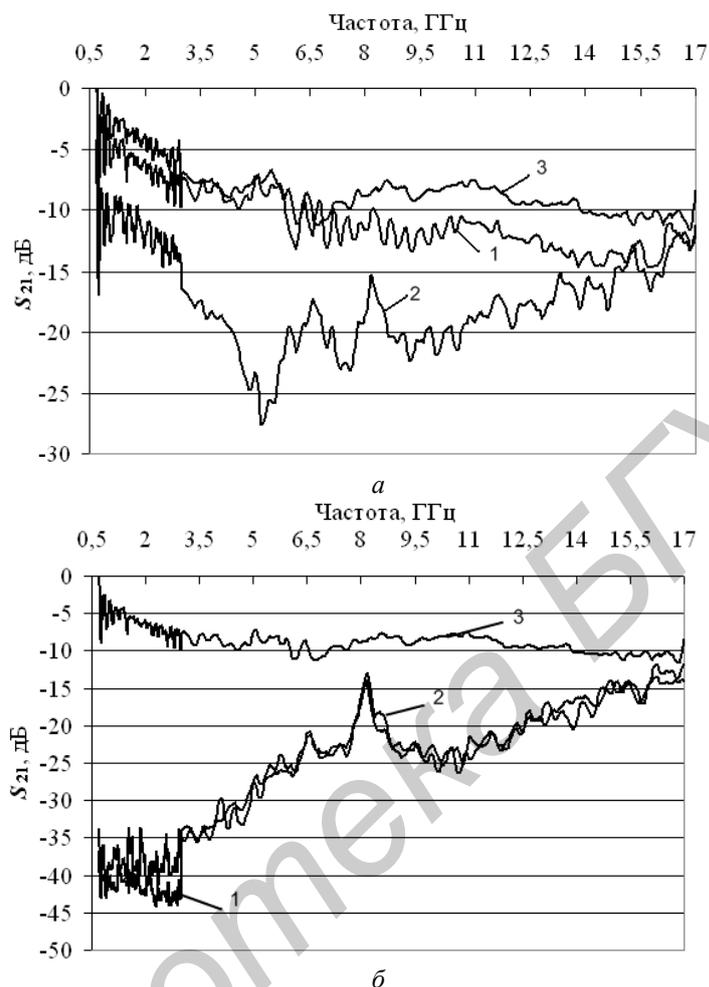


Рис. 2 Коэффициент передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц для разработанных образцов: а – однослойная конструкция; б – двухслойная конструкция с металлическим отражателем; 1 – образец с горизонтальным расположением прямоугольных модулей; 2 – образец с вертикальным расположением прямоугольных модулей; 3 – образец с квадратными влагосодержащими модулями

Критерием отнесения экранирующих материалов и конструкций к радиопоглотителям является снижение характеристики коэффициента отражения ниже -8 дБ. Результаты измерения показателя S_{11} представлены на рис. 3. Показано, что исследуемые образцы элементов конструкций экранов ЭМИ обеспечивают среднюю величину коэффициента отражения порядка -10 дБ. В исследуемом частотном диапазоне наблюдаются резонансные всплески коэффициента отражения на частотах порядка 2 и 8 ГГц. Однослойная конструкция позволяет получить минимальное значение коэффициента отражения -20...-24 дБ в частотном диапазоне 1...16 ГГц (рис. 3, б). Более равномерной характеристикой обладает образец с квадратными модулями, заполненными влагосодержащим волокнистым материалом.

Двухслойная конструкция с металлическим отражающим слоем позволяет снизить коэффициент отражения ЭМВ от поверхности экрана до -15 дБ (рис. 3, в, г). Характер частотных зависимостей коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц для однослойных и двухслойных конструкций похож, т.к. наибольшая доля отраженной энергии ЭМВ приходится на внешний, относительно источника излучения, влагосодержащий слой.

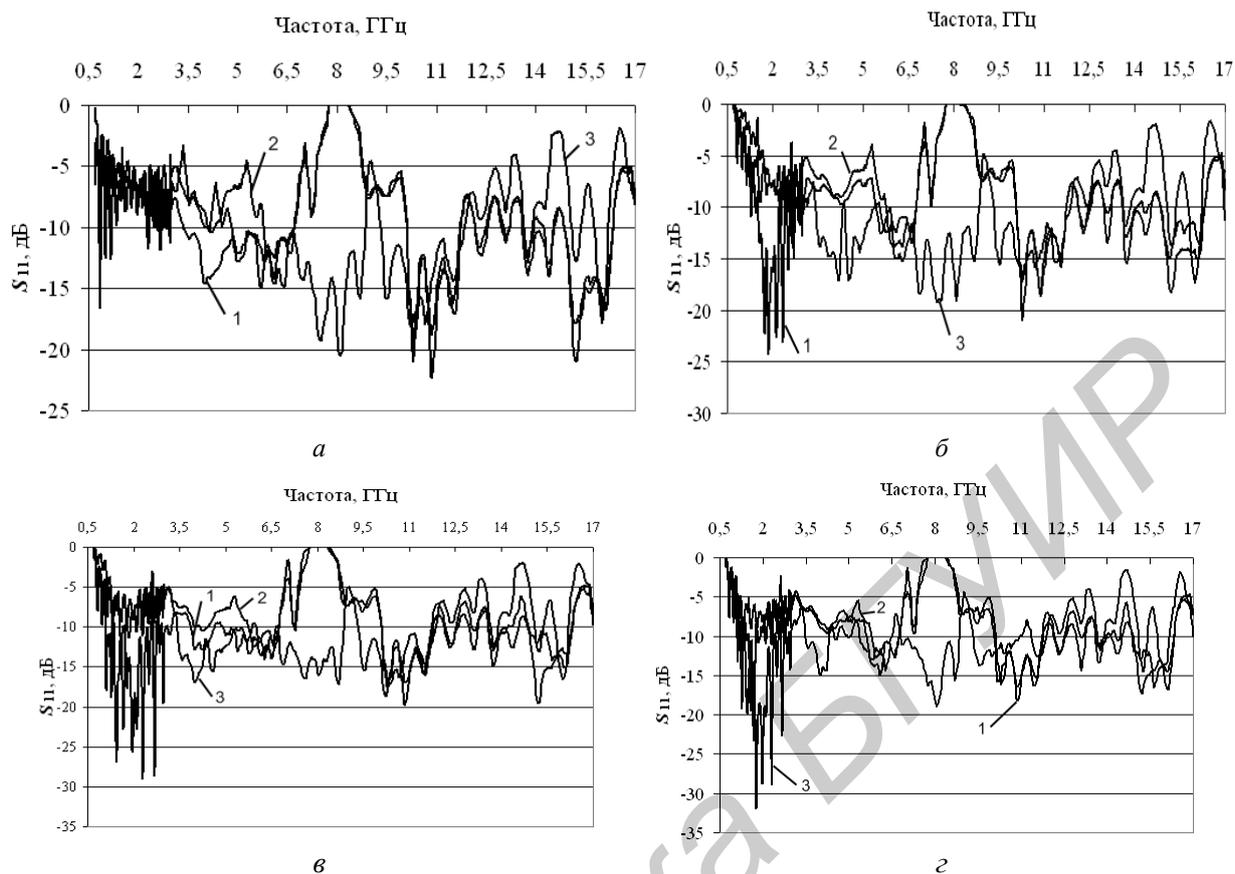


Рис. 3. Частотные характеристики коэффициента отражения ЭМИ однослойными конструкциями в диапазоне 0,7...17 ГГц: *а* – без металлического отражателя; *б* – с металлическим отражателем за образцом; двухслойных конструкций: *в* – без металлического отражателя; *г* – с металлическим отражателем за образцом; 1 – образец с горизонтальным расположением прямоугольных модулей; 2 – образец с вертикальным расположением прямоугольных модулей; 3 – образец с квадратными влагосодержащими модулями

Заключение

Рассмотрены частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения для образцов конструкций радиопоглотителей ЭМИ на основе влагосодержащих волокнистых материалов в диапазоне 0,7...17 ГГц. Представлены результаты измерения данных параметров для однослойных и двухслойных конструкций с металлическим отражающим слоем, а также с различными влагосодержащими модулями – квадратной и прямоугольной формы. Разработанные конструкции обладают эффективностью экранирования от 10 до 45 дБ. Наименьшей величиной коэффициента передачи обладают образцы с прямоугольными влагосодержащими модулями, что может быть связано с большей концентрацией влагосодержащего включения в объеме элемента конструкции. Для влагосодержащих материалов характерно достаточно высокое значение показателя отражения ЭМВ от поверхности. Однако предложенные образцы на основе волокнистых материалов из древесной стружки, пропитанной раствором, позволяют при высокой эффективности экранирования ЭМИ снизить коэффициент отражения до -15 дБ в широком диапазоне частот 3,5...17 ГГц, что может быть обусловлено хлопьеподобной формой волокнистого наполнителя и формой расположения влагосодержащих модулей. Наименьшим коэффициентом отражения обладают конструкции с влагосодержащими модулями квадратной формы, что может быть связано с меньшей концентрацией влагосодержащего наполнителя в ограниченном объеме образца, а также с более равномерной периодичностью влагосодержащих модулей, разделенных слоем радиопрозрачного герметизирующего слоя.

Таким образом, рассмотренные влагосодержащие композиционные материалы на основе волокон растительного происхождения, пропитанных водным раствором хлорида кальция, с достаточной эффективностью могут быть использованы в качестве элементов как экранирующих, так и радиопоглощающих конструкций для защиты персонала и оборудования от нежелательного воздействия ЭМИ и утечки информации по техническим каналам в СВЧ-диапазоне.

RADIOABSORBING STRUCTURES BASED ON COMPOSITE WATER-CONTAINING FIBER MATERIALS OF VEGETATION ORIGIN

H.A. PUKHIR, M.A. VILKOTSKIY, ABOUKRAA A.S. ABDULSSALAM, N.V. NASONOVA

Abstract

Radioabsorbing structures are designed on the basis of water-containing fiber composites. The developed radioabsorbers are characterized by a low reflection coefficient in a wide frequency band, high processibility and availability of the components. Their shielding characteristics were studied in the frequency range of 0.7...17 GHz. It is shown that the developed structures are characterized by the shielding effectiveness up to 45 dB and the reflection coefficient about -15 dB in the studied frequency band.

Список литературы

1. *Богуш В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В. и др.* Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Минск, 2003.
2. *Шапиро Д.Н.* Основы теории электромагнитного экранирования. Л., 1975.
3. СВЧ поглотители // НИП «ТРИМ». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.trimcom.ru/Geom_rus.htm. — Дата доступа: 16.01.2015.
4. *K. Kupfer* Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. New York, 2005.
5. *Trabelski S., Kraszewski A.W., Nelson S.O.* // Collection of papers. April, 1999. P. 178–183.
6. *Wisniewski A.* // Collection of papers. April, 1999. P. 143–147.
7. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В. и др.* // Докл. БГУИР. 2004. Т. 2, № 3. С. 152–167.
8. *Лыньков Л.М., Махмуд М.Ш., Криштопова Е.А.* // Вест. ПГУ. Сер. Фундаментальные науки. 2012. № 4. С. 103–108.
9. *Inui T., Yoshiuchi S., Harada T., et al.* // Int. Symp. Electromagnetic Compatibility. Nagoya, 1989. Vol. 2. P. 775–779.
10. *Ковальчук Н.В., Насонова Н.В., Мухамед Али Альхамруни и др.* // Докл. БГУИР. 2011. №8 (62). С. 27–33.
11. *Хюккель В.* Теоретические основы органической химии. Том 2. Л., 1934.
12. *Робинсон Р., Стокс Р.* Растворы электролитов. М., 1963.
13. *Пухир Г.А., Насонова Н.В., Пулко Т.А.* // Матер. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 8–13 сент. 2013. С. 718–719.