

УДК 621.37, 537.874.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ
РАЗЛИЧНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ГИБКИХ ЭКРАНОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИХ ЭКРАНИРУЮЩИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ:
II. РАСТВОРЫ ХЛОРИДОВ, СУЛЬФАТОВ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ РАСТВОРЫ СОЛЕЙ**

С.В. ГАЛУШКА, АЛИ АЛЬХАМРУНИ МУХАМЕД, Н.В. НАСОНОВА, А.А. ПОЗНЯК

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

Поступила в редакцию 26 сентября 2012

Исследованы экранирующие характеристики гибких радиопоглощающих материалов, представляющих собой текстильную матрицу, пропитанную водными растворами хлоридов, сульфатов и комбинированных солевых растворов в диапазонах частот 8...12 и 27...37 ГГц.

Ключевые слова: экранирование электромагнитного излучения, эффективность, поглощение, отражение, растворные наполнители, текстильная матрица, гибкие экраны, растворы солей.

Введение

Области применения экранирующих материалов и конструкций разнообразны – это и радиоэкология и защита персонала, обеспечение электромагнитной совместимости чувствительного электронного оборудования, проведение измерений и калибровок, снижение побочных электромагнитных излучений устройств обработки информации, скрытие объектов от обнаружения [1] и т. д. При этом важна не только общая эффективность экранирования ЭМИ, как величина, показывающая, насколько снижается мощность ЭМИ за пределами экрана, но и величина энергии, отражаемой от экрана, и распространяющейся в область пространства, в которой находится источник.

Для создания эффективных экранов ЭМИ обычно используют металлы, обладающие высокой проводимостью, и их сплавы, в виде сплошных или перфорированных листов, сеток [2]. Металлические порошки, волокна и частицы других форм также добавляются в различные пластмассы и резины для повышения проводимости. Кроме металлов для экранов применяется углерод в различных формах. Другой класс материалов, обладающих свойствами ослабления ЭМИ, включает вещества с магнитными потерями, в частности, ферриты [3,4].

Современные конструкции экранов ЭМИ обычно включают комбинацию материалов с проводящими и магнитными потерями, многослойные структуры на основе полимерных матриц, заполненных проводящими и магнитными порошками [5]. Форма, размеры, концентрации частиц и их соотношение варьируются, позволяя изменять электрофизические и экранирующие характеристики таких материалов [6,7].

В работах [8,9] предложено создавать экраны ЭМИ на основе капиллярно-пористых матриц, внутреннее поровое пространство которых заполняется растворами электролитов, что обуславливает их электрофизические, а следовательно, и экранирующие характеристики. На свойства влагосодержащих материалов влияют как параметры структуры самой матрицы, так и свойства используемого раствора, т. е. проводимость и диэлектрическая проницаемость.

Изменение этих параметров достигается введением в состав раствора солей различных металлов, органических добавок и других компонентов. В развитие этих предложений, а также работы [10], и осуществлено предлагаемое исследование.

Целью работы является получение новых экспериментальных данных о влиянии природы и концентрации различных солей, а также их смесей на экранирующие характеристики пропитанных этими растворами капиллярно-пористых матриц на текстильной основе в СВЧ диапазоне и их анализ.

Исследования проводились с сульфатами и хлоридами металлов. С электрической точки зрения сульфаты и хлориды обладают различными концентрациями ионов того или иного знака, т. е. концентрациями носителей заряда, их массой, подвижностью и, как итог, электропроводностью. Например, в результате диссоциации 1 М раствора хлорида натрия образуется по 1 молю однозарядных анионов и катионов, а при диссоциации 1 моля сульфата натрия образуется два моля тех же однозарядных катионов натрия и моль двухзарядного сульфат-аниона существенно большей массы, чем хлорид, т. е. проводимость раствора сульфата выше. Кроме того, хлориды и сульфаты металлов обычно нетоксичные, доступные и недорогие соединения.

Методика проведения эксперимента

Механизмы взаимодействия ЭМИ с материалами рассмотрены в [11], там же приведено обоснование использования текстильных полотен в качестве капиллярно-пористых матриц для создания экранов ЭМИ, а также методики приготовления образцов ткани для последующей пропитки и проведения измерений и расчетов, кратко охарактеризованы свойства использованного трикотажного полотна. Схематическое изображение экспериментальных установок для проведения измерений показано на рис. 1 и 2.

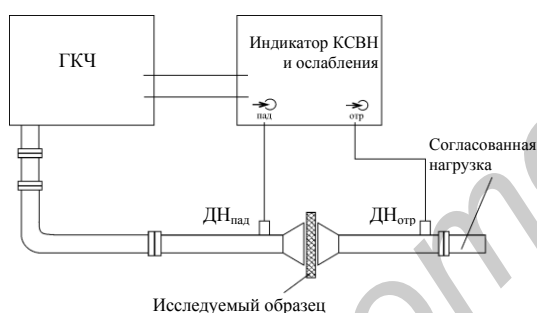


Рис. 1. Схема измерения ослабления, вносимого исследуемым образцом

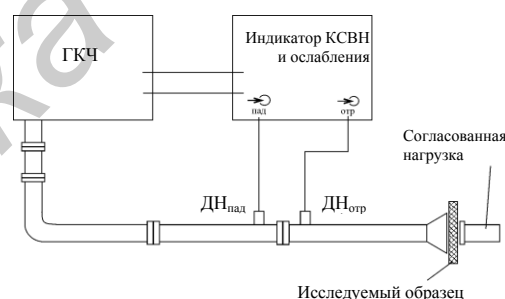


Рис. 2. Схема измерения КСВН исследуемых образцов

Для исследования экранирующих характеристик созданных образцов экранов ЭМИ использовались панорамные измерители КСВН и ослабления (таблица).

Таблица. Оборудование для исследования экранирующих характеристик образцов

Диапазон частот, ГГц	8–12	27–37
Используемое оборудование	ГКЧ-61, Я2Р-67	Р2-65 (с ГКЧ)
Сечение волноводного тракта, мм		7,2×3,4
Диапазон измерения ослабления, дБ	–35...0	–35...0
Погрешность измерения ослабления, дБ	$\pm(0,5+0,05A)$	$\pm(0,5+0,05A)$
Диапазон измерения КСВН	1,06...5,0	1,06...5,0
Погрешность измерения КСВН, % в диапазоне значений 1,2...2,0	$\pm(5 \cdot \text{КСВН} + 2)$	
Погрешность измерения КСВН, % в диапазоне значений 2,0...5,0	$\pm 5 \text{КСВН} + 2 \cdot 100 / \left(100 - \pm 5 \text{КСВН} + 2 \frac{\text{КСВН}}{\text{КСВН} + 1} \right)$	

Панорамный измеритель КСВН и ослабления работает по принципу отдельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн. Сигнал, пропорциональный мощности, падающей на нагрузку, выделяется направленным детектором падающей волны ($\text{ДН}_{\text{пад}}$). Ослабление, вносимое исследуемым образцом, определяется отношением сигналов, выделяемых $\text{ДН}_{\text{отр}}$ и $\text{ДН}_{\text{пад}}$ (рис. 1). Сигнал, отраженный от исследуемой нагрузки, выделяется направленным детектором отраженной волны ($\text{ДН}_{\text{отр}}$) (рис. 2)

и используется для определения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН).

Исследования проводились в панорамном режиме измерения КСВН и ослабления. Калибровка приборов осуществлялась во всем рабочем диапазоне частот по стандартной методике после установки диапазона качания частоты и уровня падающей мощности. В качестве излучателя и приемника сигнала в диапазоне 27...37 ГГц использовались рупорные антенны. При измерении в диапазоне частот 8...12 ГГц образец зажимался между фланцами волноводов, такой способ при малой толщине образца принимался эквивалентным использованию измерительной ячейки.

Отличие от экспериментов и их результатов, обсуждавшихся ранее [11,12], в том, что в качестве наполнителя капиллярно-пористой матрицы использовали растворы солей и их смеси без каких-либо иных добавок, а диапазон частот был расширен и, наряду с исследованиями радиопоглощающих и экранирующих характеристик в частотном диапазоне 8...12 ГГц, были исследованы характеристики, как и в работе [10], и в диапазоне 27...37 ГГц.

Для пропитки матриц использовали дистиллированную воду, 0,1 и 1 М растворы хлоридов натрия (NaCl), калия (KCl) и меди (CuCl₂); сульфатов меди (CuSO₄), никеля (NiSO₄), марганца (MnSO₄), цинка (ZnSO₄); смеси 1 М растворов солей KCl и NaCl, NiSO₄ и MnSO₄, K₃[Fe(CN)₆] и KCl, CuSO₄ и NiSO₄, смесь 0,4 М раствора K₂Cr₂O₇ и 1 М раствора KCl. Методика приготовления растворов солей подробно рассмотрена в [10]. Для комбинированных солевых наполнителей использовали ранее приготовленные растворы солей, смешивая их в соотношении 1:1 по объему. В остальном методика приготовления экспериментальных образцов идентична изложенной в [11].

Результаты и их обсуждение

Растворы хлоридов. Графики зависимостей коэффициентов отражения и передачи для хлоридов в различных частотных диапазонах показаны на рис. 3. Для исследования использовались 1,0 М и 0,1 М растворы хлоридов натрия, калия и меди.

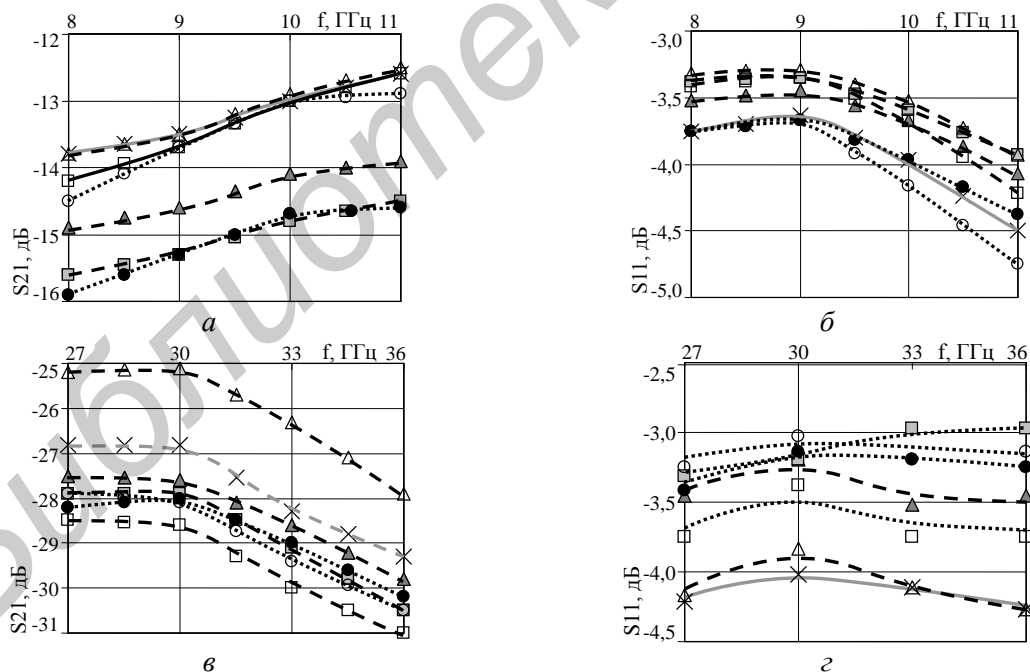


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов передачи (а, в) и отражения (б, г) для образцов с растворами хлоридов:

●—●—●— CuCl₂ (1 М), ▲—▲—▲— NaCl (1 М), ■—■—■— KCl (1 М),
 ○—○—○— CuCl₂ (0,1 М), △—△—△— NaCl (0,1 М), ▣—▣—▣— KCl (0,1 М), ×—×—×— H₂O дист.

Как известно, диссоциированные ионы в водном растворе окружены гидратной оболочкой, молекулы воды в которой упорядочены, но иным образом, нежели в объеме раствора. Изменение структуры раствора имеет своим следствием изменение его динамических свойств, то есть, введение ионов влияет на подвижность окружающих их молекул воды. Степень такого

влияния зависит, помимо всего прочего, от природы ионов. Время жизни молекул воды в первой гидратной оболочке может быть как больше, так и меньше времени жизни молекулы воды в узле решетки чистой (или объемной) воды [13]. Предполагается, что большее время жизни молекул воды в первой гидратной оболочке иона приводит к снижению подвижности дипольных молекул воды во внешнем электромагнитном поле, что выражается в увеличении энергии, требуемой на ориентацию диполей, а следовательно, и увеличении потерь поглощения энергии ЭМИ, в снижении восприимчивости молекул воды к внешнему ЭМ воздействию и, как следствие, уменьшению диэлектрической проницаемости воды.

Анализ графиков показывает, что в диапазоне 8...12 ГГц коэффициент передачи (S_{21}) текстильных матриц, пропитанных 0,1 М растворами хлоридов, незначительно меньше коэффициента передачи образца сравнения с водой. С ростом концентрации растворов коэффициент передачи существенно снижается (рис. 3, а). Наибольшей эффективностью экранирования ЭМИ обладают образцы, пропитанные 1 М раствором хлорида калия или меди (S_{21} достигает значений до -15,7...-15,9 дБ).

Такой же коэффициент отражения, как и у водонаполненного образца, показали текстильные матрицы с 0,1 и 1 М растворами хлорида меди, а остальные хлоридсодержащие матрицы имеют больший коэффициент отражения, что объясняется их повышенной проводимостью из-за присутствия солей металлов, и соответственно, возникновением токов проводимости, повышающих уровень электромагнитной энергии, распространяющейся обратно в направлении источника. А значит, наилучшими радиопоглощающими свойствами из рассмотренных обладает текстильная капиллярно-пористая матрица, пропитанная 1 М раствором хлорида меди, т. к. этот образец имеет наиболее низкий коэффициент передачи и низкий коэффициент отражения (рис. 3, б).

В диапазоне частот 27...37 ГГц коэффициент передачи всех образцов ниже, чем водонаполненного, вследствие увеличенной электропроводности растворов электролитов по сравнению с водой (рис. 3, в) и разница между ними не превышает величины погрешности измерений. Наименьший коэффициент передачи из представленных образцов имеет текстильная матрица с 0,1 М раствором хлорида калия (S_{21} до -31 дБ). Разницу в полученных характеристиках нельзя объяснить только различной электропроводностью рассматриваемых солей металлов. Вероятно, имеют место особенности взаимодействия электромагнитной волны с гидратными оболочками различных катионов. Небольшая разница в характеристиках различных образцов с хлоридами может объясняться тем, что время жизни молекул воды в гидратных оболочках ионов мало, а следовательно возможный ответ, характеризующий различие в природе ионов, находится в более высоком диапазоне частот.

Из результатов измерений видно, что увеличение концентрации соли металла, а следовательно, проводимости раствора, приводит к снижению коэффициента передачи волноводного тракта с образцом за счет повышения доли отражаемой энергии. При этом с увеличением частоты разница в коэффициентах передачи и отражения для образцов с различной концентрацией солей металлов снижается и составляет порядка 1...1,2 дБ.

Растворы сульфатов. Графики зависимостей коэффициентов отражения и передачи в различных частотных диапазонах для образцов, наполненных растворами сульфатов, показаны на рис.4. В эксперименте использовали 1,0 М и 0,1 М растворы сульфатов марганца, никеля, меди и цинка. Выбор ионов металлов обусловлен различиями в их природе и размерах ионов, что влияет на подвижность катионов и, как следствие, проводимость раствора соли. Известно, что в случае многозарядных катионов металлов в водных растворах происходит образование гидроксо- и оксомостиков, что приводит к полимеризации аквагидроксо- и гидроксокомплексов [14] и созданию в растворе цепочечных и пространственных структур. Наличие и характер таких структур, по мнению авторов, неизбежно оказывает влияние на взаимодействие ЭМИ и раствора электролита.

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что в диапазоне 8...12 ГГц увеличение концентрации соли в жидкостном наполнителе ведет к уменьшению коэффициента передачи (см. рис. 4, а) на 1...1,5 дБ. Наименьший коэффициент передачи показал образец, наполненный 1 М раствором сульфата цинка (S_{21} до -5 дБ). В то же время его коэффициент отражения немного меньше коэффициента отражения образца сравнения (см. рис. 4, б) поскольку электропроводность раствора сульфата цинка наименьшая, что свидетельствует

о радиопоглощающих свойствах такого раствора на этих частотах. Влияния концентрации растворов наполнителей на коэффициент отражения не обнаружено.

В частотном диапазоне 27...37 ГГц коэффициенты передачи 0,1 М растворов существенно ниже коэффициента передачи дистиллированной воды, а 1 М растворов – близки (рис. 4, в). Эти парадоксальные результаты, возможно, объясняются долей молекул воды, участвующих в образовании гидратных оболочек диссоциированных ионов сильного электролита. Наибольшей эффективностью экранирования обладает образец, наполненный 0,1 М раствором сульфата никеля (S_{21} до -33 дБ).

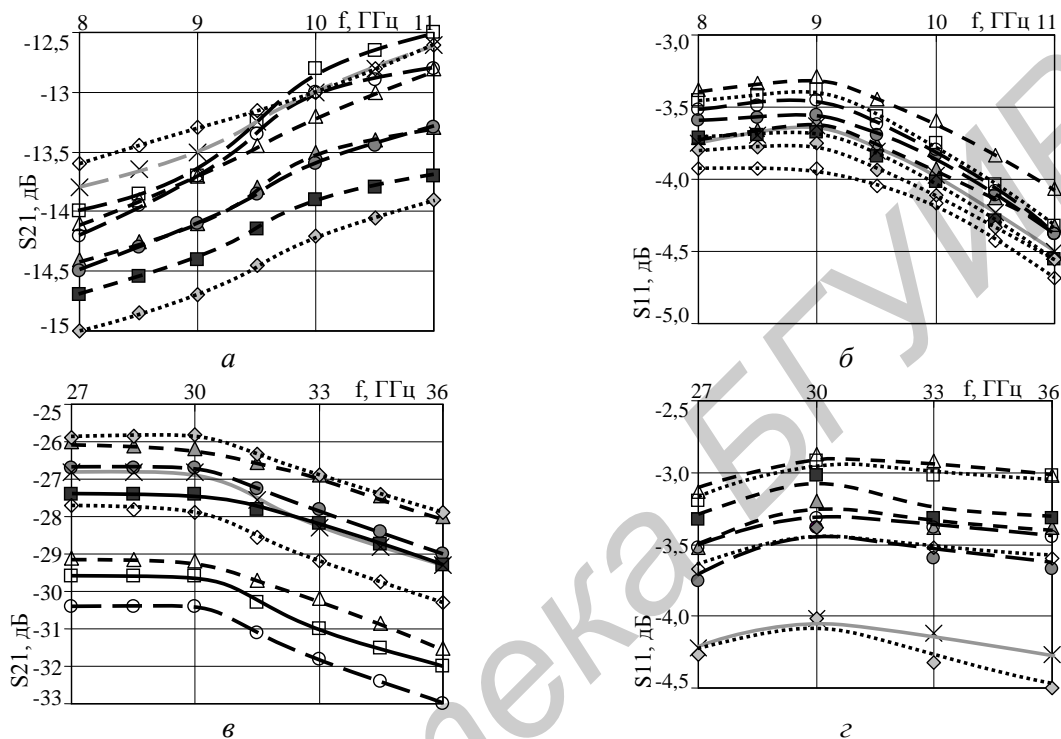


Рис. 4. Зависимость коэффициентов передачи (а, в) и отражения (б, г) от частоты для образцов с растворами сульфатов:

—▲— MnSO_4 (1,0 М), —■— CuSO_4 (1,0 М), —●— NiSO_4 (1,0 М), ...◆... ZnSO_4 (1,0 М),
 —▲— MnSO_4 (0,1 М), —■— CuSO_4 (0,1 М), —●— NiSO_4 (0,1 М), ...◆... ZnSO_4 (0,1 М), —×— H_2O дист.

Из-за электропроводности растворов электролитов их коэффициент отражения выше по сравнению с образцом, заполненным дистиллированной водой. Коэффициент отражения меньше, чем у матрицы сравнения, имеет только образец с 1 М раствором сульфата цинка, но его коэффициент передачи несколько больше водного, поэтому эффективность радиопоглощения сравниваемых образцов приблизительно равна. Также можно отметить, что увеличение концентрации сульфатных растворов в рассмотренных случаях приводит к уменьшению отражения (рис. 4, г). Следовало ожидать, что увеличение электропроводности, являющееся следствием роста концентрации, должно было бы вызвать и возрастание отражения, но, вероятно, происходит диссипация энергии ЭМИ за счет взаимодействия с гидратными оболочками ионов. С ростом концентрации ионов возрастает также доля молекул воды, участвующих в создании их гидратных оболочек и увеличивается доля энергии падающей электромагнитной волны, расходуемой на их разрушение.

В результате выполнения исследований экспериментальных образцов гибких экранов ЭМИ с наполнителями, представляющими растворы электролитов, видно, что разбавленные растворы кислот и солей (результаты настоящей работы и [10]) по своим свойствам слабо отличаются от воды; т. е. на подавление ЭМИ большое влияние оказывает растворитель (дистиллированная вода), который обладает высоким поглощением ЭМИ [15]. Лишь в случае достаточно концентрированных растворов, не менее 1,0 М, речь может идти о существенных различиях в коэффициентах передачи и отражения ЭМИ между водой и исследованными растворами. Предполагается также, что существенное влияние на экранирующие и поглощающие свойства рассмотренных материалов оказывает и взаимодействие с молекулами воды, составляю-

щими гидратную оболочку ионов.

Комбинированные солевые наполнители. В продолжение предыдущих исследований в качестве наполнителя текстильной матрицы использовались смеси следующих 1,0 М растворов солей: KCl и NaCl, NiSO₄ и MnSO₄, K₃[Fe(CN)₆] и KCl, CuSO₄ и NiSO₄; а также смесь 0,4 М раствора K₂Cr₂O₇ и 1 М раствора KCl. Исследование экранирующих характеристик этих образцов проводилось только в диапазоне частот 27–37 ГГц. Графики зависимостей коэффициентов отражения и передачи для образцов с комбинированными солевыми наполнителями в указанном частотном интервале показаны на рис. 5.

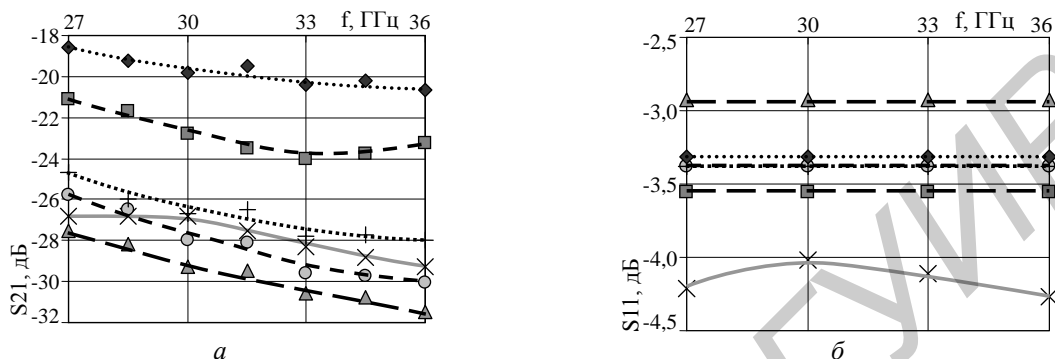


Рис. 5. Зависимость коэффициентов передачи (а) и отражения (б) от частоты для образцов с комбинированными растворными солевыми наполнителями:

○ — KCl+NaCl, ■ — NiSO₄+MnSO₄, ◆ — CuSO₄+NiSO₄,
 ▲ — K₂Cr₂O₇+KCl, × — K₃[Fe(CN)₆]+KCl, — — — H₂O дист.

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что в диапазоне 27...37 ГГц наименьшим коэффициентом передачи обладает образец с наполнителем из смеси 0,4 М раствора бихромата калия и 1 М раствора хлорида калия (S₂₁ до –31,4 дБ). Коэффициенты отражения ЭМИ рассматриваемых образцов выше, чем у водонаполненного, вследствие присутствия диссоциированных ионов и несущественно отличаются друг от друга (рис. 5, б).

При анализе результатов обнаружено, что эффективность экранирования образцами с наполнителями из смеси растворов в основном меньше, чем с растворами, из которых они получены, за исключением смеси 0,4 М раствора K₂Cr₂O₇ и 1 М раствора KCl. Эта смесь ослабляет ЭМИ выше, чем составляющие ее растворы по отдельности. На отражении ЭМИ смешивание электролитов отразилось слабо.

Следует отметить, что исследованные материалы имеют лучшие характеристики по сравнению с аналогичными по толщине экранами из трикотажных полотен с металлическими нитями. У последних в диапазоне 8...12 ГГц коэффициент передачи достигает только –9 дБ при коэффициенте отражения до –6 дБ [16].

Заключение

В результате выполнения измерений и анализа их результатов можно сформулировать следующие выводы:

- разбавленные (0,1 М) растворы солей по своим свойствам слабо отличаются от воды; т. е. на подавление ЭМИ большое влияние оказывает растворитель (дистиллированная вода), который обладает высоким поглощением ЭМИ;
- гибкие экраны с наполнителями из различных индивидуальных солевых растворов в диапазоне частот 27...37 ГГц имеют меньший коэффициент передачи ЭМИ, чем гибкие экраны с наполнителями на основе их комбинаций.

Далее приведены самые эффективные из исследованных гибкие экраны ЭМИ на основе полиакрилонитрильного полотна толщиной 2 мм с различными наполнителями.

Материалы, поглощающие ЭМИ. Наилучшими радиопоглощающими свойствами из числа исследованных растворов солей в диапазоне частот 8...12 ГГц обладает 1,0 М раствор ZnSO₄ (коэффициент пропускания до –15 дБ при коэффициенте отражения до –4,6 дБ). В частотном интервале 27...37 ГГц наилучшим радиопоглотителем является образец, пропитанный дистиллированной водой, коэффициент передачи до –29,3 дБ при коэффициенте отражения до –4,3 дБ.

Материалы, ослабляющие ЭМИ. Наименьший коэффициент пропускания в интервале частот 8...12 ГГц имеет текстильное полотно, содержащее в качестве жидкостного наполнителя 1,0 М растворы CuCl_2 и KCl (коэффициенты пропускания практически одинаковы и достигают значений 15,9 дБ), а в диапазоне частот 27...37 ГГц – пропитанное 0,1 М раствором NiSO_4 с коэффициентом пропускания до –33 дБ.

В работе удалось достичь высоких показателей экранирования ЭМИ гибкими и тонкими материалами, которые по сравнению с аналогичными по толщине экранами из трикотажных полотен с металлическими нитями имеют преимущество в поглощении ЭМИ, имеют меньшую удельную массу, а также значительно проще и дешевле в изготовлении, что обуславливает технико-экономическую эффективность их применения. Полученные данные необходимы для дальнейших исследований в области экранирования; также результаты этих исследований могут использоваться для изготовления гибких электромагнитных экранов, применяемых в различных сферах: в военной области для снижения радиолокационной заметности объектов и повышения их помехозащищенности; в области экологической защиты живых организмов от вредного воздействия ЭМИ; в области защиты информации для подавления электромагнитного канала утечки информации; для защиты устройств обработки и хранения информации от воздействия ЭМИ; в измерительной и контрольной аппаратуре; в других областях науки и техники.

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF NATURE AND CONCENTRATION OF VARIOUS FILLERS FOR EM-SHIELDS UPON THEIR SHIELDING EFFECTIVENESS ON MICROWAVE: II. CHLORIDE, SULFATE SOLUTIONS AND THEIR COMBINATIONS

S.V. HALUSHKA, ALI ALHAMRUNI MUHAMED, N.V. NASONOVA, A.A. POZNYAK

Abstract

The shielding effectiveness of flexible radioabsorbing materials on the basis of textile matrices impregnated with aqueous solutions of chloride, sulfate solutions and their combinations in the frequency bands of 8...12 and 27...37 GHz is investigated.

Список литературы

1. *Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М., и др.* Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах. Минск, 2006.
2. *Виноградов Е.М.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. М., 1986.
3. *Михайловский Л.К.* // Зарубежная радиоэлектроника. 2000. №9. С. 21–28.
4. *Чепарин В.П.* Гироманитная бестоковая электроника. М., 1997.
5. *Inui T., Yoshiuchi S., Harada T., et.al.* // Int. Symp. Electromagnetic Compatibility. 1989. Vol. 2. P. 775–779.
6. *Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А.* // Радиотехника и электроника. 2003. Т.48, №2. С. 196–209.
7. *Пономаренко А.Т., Шевченко В.Г., Казанцева Н.Е., и др.* // Матер., техн., INSTR. 2001. Т.6, №2. С. 11–22.
8. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В., и др.* // Докл. БГУИР. 2004. Т.2, №3. С.152–167.
9. *Колбун Н.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В., и др.* // Вестник ПГУ, Сер. В. 2004. №12. С. 30–34.
10. *Галушка С.В., Мухамед Али Альхамруни, Насонова Н.В., и др.* // Докл. БГУИР. 2012. №5(67). С. 110–115.
11. *Головатая С.В., Ковальчук Н.В., Насонова Н.В., и др.* // Докл. БГУИР. 2010. №8(54). С. 71–77.
12. *Ковальчук Н.В., Насонова Н.В., Мухамед Али Альхамруни, и др.* // Докл. БГУИР. 2011. №8(62). С. 27–33.
13. *Глебов А.Н., Буданов А.Р.* // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 72–78.
14. *Кукушкин Ю.Н.* // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т.7, №6. С. 26–31.
15. *Колбун Н.В., Борботько Т.В., Терех И.С., и др.* // Матер. докл. Меж. науч.-техн. семинара «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных». Минск, 2004. С. 78–84.
16. *Богуш В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В., и др.* Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Минск, 2003.