

УДК 621.37, 537.874.7

## ЭКРАНИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ РАСТВОРОСОДЕРЖАЩИХ МАТРИЦ

Н.В. КОВАЛЬЧУК, Н.В. НАСОНОВА, МУХАМЕД АЛИ АЛЬХАМРУНИ, А.А. ПОЗНЯК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 17 ноября 2011*

Экспериментально исследованы экранирующие характеристики капиллярно-пористых текстильных матриц, пропитанных гелем поливинилового спирта с добавлением хлорида калия и без добавки, а также одно- и двухслойных матриц с растворными наполнителями, содержащими порошкообразные оксиды металлов (оксида меди (I) (CuO), оксида цинка ZnO), шунгит и уголь активированный. Показано увеличение поглощающей ЭМИ способности экранов путем добавки в растворный наполнитель сильного электролита. Создание двухслойных экранов позволяет добиться управляемого и воспроизводимого изменения их радиопоглощающих свойств.

*Ключевые слова:* экранирующие характеристики, капиллярно-пористые матрицы, композиционные материалы.

### Введение

Повсеместное использование радиоаппаратуры практически во всех сферах деятельности человека повлекло за собой проблемы негативного воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) на биологические и технические объекты. Одним из способов решения данных проблем является экранирование биологических объектов и аппаратуры от внешнего воздействия ЭМИ и взаимных помех радиоаппаратуры, приводящих к ее неправильному функционированию. В связи с увеличением количества источников ЭМИ, усложнением и расширением спектрального состава излучаемой энергии совершенствуются и конструкции защитных экранов. К экранирующим конструкциям в зависимости от области применения могут предъявляться дополнительные требования, такие как малая масса, гибкость, прозрачность в оптическом диапазоне длин волн, малые габариты, в частности, небольшая толщина и др. [1]. Часто наряду с высокой эффективностью экранирования ЭМИ к материалам и конструкциям экранов предъявляются дополнительные условия по снижению доли отражаемой энергии и способности в значительной степени поглощать энергию ЭМИ.

В [2, 3] предлагается создавать экраны ЭМИ на основе капиллярно-пористых матриц, внутреннее поровое пространство которых заполняется растворами электролитов, что обуславливает их электрофизические, а, следовательно, и экранирующие характеристики [4].

Целью данной работы является исследование экранирующих характеристик капиллярно-пористых матриц на основе текстильных материалов, содержащих различные растворные наполнители, а также влияния добавки сильных электролитов на поглощающие ЭМИ свойства экранов в одно- и двухслойных экранах.

### Теоретическая часть

Процессы взаимодействия электромагнитного излучения с материалами включают отражение доли энергии от границ раздела воздух-материал и поглощение энергии электромагнитной волны вследствие преобразования части электромагнитной энергии в тепловую [5].

Доли электромагнитной энергии, участвующей в каждом из механизмов, зависят от свойств материалов – проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемостей. Уровень отражаемой энергии определяется разницей волновых сопротивлений свободного пространства и материала. Волновое сопротивление воздуха составляет  $120 \pi$ , а для проводящих материалов оно определяется как:

$$Z_{\text{мет}} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – проводимость среды;  $\omega$  – круговая частота,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала.

Для непроводящих:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu \cdot \mu_0}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}}, \quad (2)$$

где  $E$ ,  $H$  – электрическая и магнитная напряженности электромагнитного поля соответственно;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Высокий коэффициент отражения (до 99%) большинства металлов, из которых изготавливают экраны, объясняется их высокой проводимостью по сравнению с воздухом. В радиопоглощающих материалах для увеличения потерь также используются проводящие материалы, например, в виде порошков металлов, углерода, а также растворы электролитов. Механизм поглощения ЭМИ в диэлектриках связан с процессами поляризации. Введение проводящих компонентов в состав экрана создает дополнительные потери на проводимость.

В случае с диэлектриками (при отсутствии магнитных свойств) волновое сопротивление определяется величиной диэлектрической проницаемости, поэтому, чем выше способность диэлектрика реагировать на электрическое поле, тем ниже будет его волновое сопротивление, в теории это объясняется возникновением токов смещения, которые, в отличие от токов проводимости в проводниках, образуются смещением зарядов.

В радиопоглощающих материалах используют для снижения коэффициента отражения ЭМИ несколько принципов – создание условий для интерференции волн, отражаемых на различной глубине, формирование геометрии поверхности для рассеяния энергии ЭМИ в пространстве, а также создание плавного или ступенчатого перехода от свойств свободного пространства к материалу с высокими потерями. Последний подход часто реализуется путем создания многослойных композиционных материалов с градиентом концентрации наполнителя для получения заданных электрофизических свойств слоев [6].

Первый слой таких экранов является согласующим параметрами свободного пространства и экрана, вследствие диэлектрических свойств обладающим высоким волновым сопротивлением, последующие слои располагаются за ним и являются ослабляющими и отражающими электромагнитное излучение вследствие наличия проводящих компонентов.

### Экспериментальная часть

Использование текстильных материалов в качестве основы для экранов ЭМИ перспективно в связи с легкостью раскроя и соединения деталей в изделие, его герметизации, варьирования состава наполнителя текстильной матрицы, небольшим весом, возможностью создания экранов достаточно сложной формы и больших размеров в развернутом состоянии и компактностью в свернутом, обусловленной высокой гибкостью тканевой основы.

В композиционных экранирующих материалах широко применяются проводящие порошковые наполнители (углерод, металлы), закрепляемые в различных пластичных связующих с последующим отверждением или волокнистых матрицах. Серьезной проблемой в этом случае является обеспечение заданной концентрации порошка по объему матрицы. В случае композитных материалов, пропитанных водными растворами, использование порошков сильно затруднено прежде всего из-за необходимости формирования устойчивой суспензии. Поэтому предложено использовать гель, который позволяет не только равномерно распределить части-

цы порошка по объему коллоида в момент его приготовления, но также стабилизировать свойства матрицы, препятствуя оседанию порошка под действием силы тяжести и его скапливанию в нижней части образца при его вертикальном расположении, т. е. обеспечить седиментационную устойчивость системы, прежде всего за счет увеличения вязкости дисперсионной среды [7]. Для этого был выбран гель поливинилового спирта (ПВС), поскольку ПВС является нетоксичным, доступным и недорогим реагентом. Кроме того, ПВС характеризуется сравнительно неплохой химической стойкостью – он стабилен по отношению к разбавленным кислотам, щелочам, маслам, бензину и керосину [8].

Образцы для исследования представляли собой текстильные матрицы, пропитанные гелем на основе поливинилового спирта (ПВС), а также указанного геля, смешанного с различными порошковыми наполнителями. В качестве капиллярно-пористой матрицы использовали сверхуплотненное машинно-вязанное полотно толщиной 2 мм с поверхностной плотностью 1313 г/м<sup>2</sup> из полиакрилонитрильных волокон. Методика приготовления образцов и проведения измерений подробно изложена в [9]. Гелево-порошковые наполнители получали путем добавления в приготовленный гель следующих порошков: оксида цинка (ZnO), оксида меди (I) (Cu<sub>2</sub>O), угля активированного и шунгита.

Экспериментально были исследованы несколько серий образцов гибких экранов ЭМИ на текстильной основе:

а) однослойные экраны с водным и гелевыми наполнителями на основе геля ПВС в сочетании с порошками оксидов металлов: оксида цинка (ZnO), оксида меди (I) (Cu<sub>2</sub>O); а также углеродсодержащими материалами: порошком угля активированного и шунгита; все пропитки и наполнители приготавливали как с добавкой хлорида калия KCl, так и без нее;

б) двухслойные экраны, в которых первый слой представлял собой растворосодержащую матрицу с металлооксидным, а второй – с углеродсодержащим наполнителем. В слой, согласующий параметры свободного пространства и экрана, вследствие диэлектрических свойств обладающий высоким волновым сопротивлением, а в силу диэлектрических потерь полярного диэлектрика – поглощающий частично электромагнитное излучение, распространяющееся в материале, в качестве наполнителя геля ПВС входили либо оксиды цинка или меди (I) – на этот слой было направлено электромагнитное излучение. Второй, отражающий, слой содержал мелкодисперсный активированный уголь или шунгит, равномерно распределенный в геле ПВС для повышения проводимости слоя. Упомянутые двухслойные материалы были изготовлены в четырех модификациях каждая: без добавления и с добавлением сильного электролита – раствора хлорида калия в поглощающий, отражающий и в оба слоя одновременно.

### Результаты экспериментов

В данной работе были проведены исследования влияния сильного электролита в составе наполнителя гибкого экрана, а именно хлорида калия, на экранирующие свойства растворосодержащих текстильных матриц.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют влияние сильного электролита и проводящих и диэлектрических мелкодисперсных порошков, вводимых в наполнитель, на особенности взаимодействия композитных материалов с ЭМИ диапазона СВЧ. На рис. 1 приведены графики зависимости коэффициентов передачи и отражения от частоты для однослойных матриц с растворными наполнителями и суспензиями углеродных порошков, а на рис. 2 показаны аналогичные зависимости для влагосодержащих экранов, содержащих оксиды меди (I) Cu<sub>2</sub>O и цинка ZnO.

Как видно из результатов измерений (см. рис. 1), использование для пропитки текстильной матрицы геля ПВС вместо дистиллированной воды приводит к повышению как коэффициента передачи (на 1,8...2,0 дБ), так и коэффициента отражения (до 2,0 дБ) растворосодержащей капиллярно-пористой матрицы, что объясняется распределением воды между макромолекулами ПВС, связыванием молекул H<sub>2</sub>O водородными связями с полярными гидроксильными группами поливинилового спирта и, как следствие, уменьшением их подвижности и, предположительно, снижением диэлектрической проницаемости полученного геля по сравнению с дистиллированной водой.

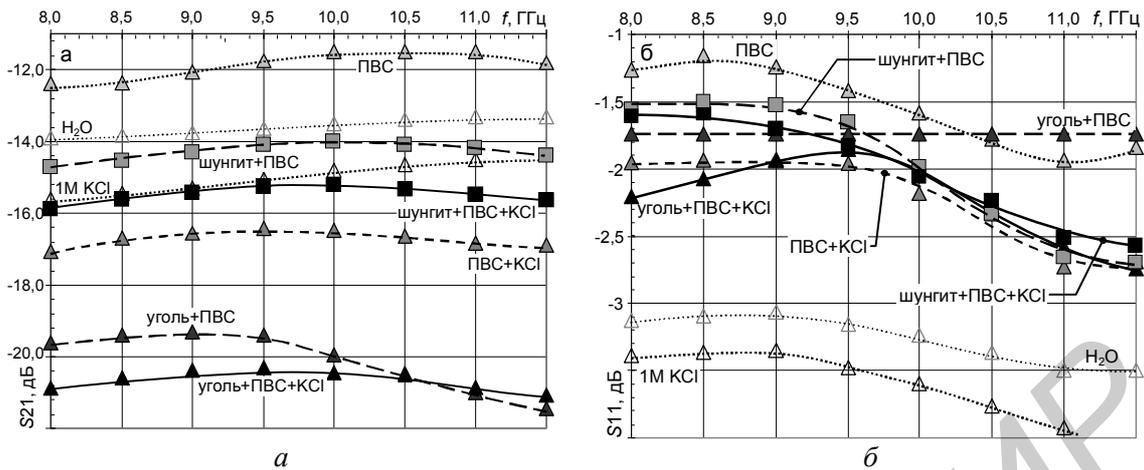


Рис. 1. Зависимость коэффициентов передачи  $S_{21}$  (а) и отражения  $S_{11}$ , дБ (б) однослойных текстильных матриц с различными растворными наполнителями от частоты  $f$ , ГГц

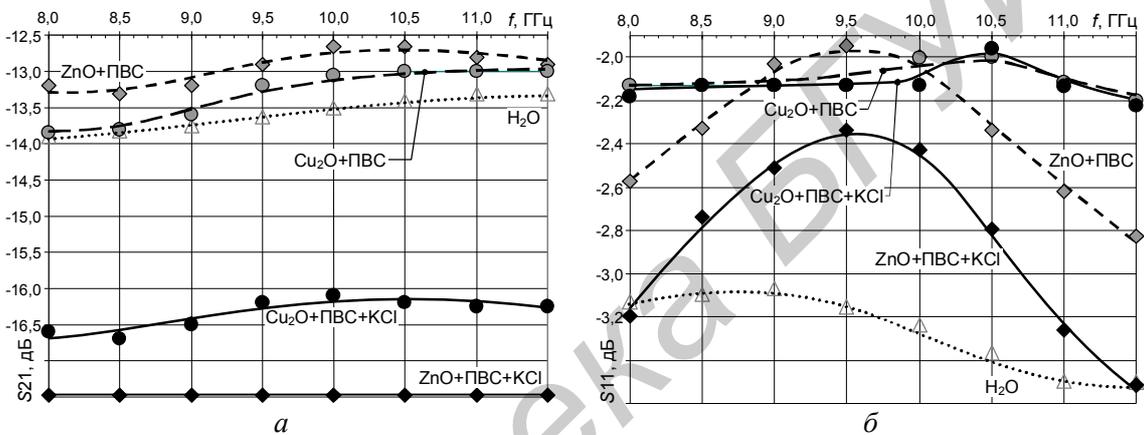


Рис. 2. Зависимость коэффициентов передачи  $S_{21}$  (а) и отражения  $S_{11}$ , дБ (б) однослойных текстильных матриц с различными растворными наполнителями от частоты  $f$ , ГГц

Пропитка капиллярно-пористых матриц суспензиями углеродных порошков на основе геля ПВС (рис. 1) заметно снижает коэффициент передачи (на 2,0–7,3 дБ) при незначительном изменении коэффициента отражения (на 0,4–0,7 дБ) по сравнению с исходным гелем из-за влияния проводящих свойств углеродных частиц и возникновения локальных потерь на проводимость, не приводящих к уменьшению волнового сопротивления материала в целом.

Характеристики отражения и передачи ЭМИ текстильных матриц с гелевыми суспензиями порошков упомянутых оксидов (рис. 2) в среднем на 1–2 дБ ниже, чем характеристики образцов, пропитанных гелем ПВС без добавок, что может быть объяснено влиянием диэлектрических свойств металлоксидных порошков на общие электрофизические свойства композитных материалов. Эффективность экранирования текстильных матриц, содержащих наполнитель с суспензиями проводящих порошков, ожидаемо выше по сравнению с характеристиками образцов с металлоксидными порошками вследствие вклада в общее ослабление энергии ЭМИ потерь на проводимость.

Сравнение экранирующих характеристик текстильных матриц, пропитанных гелем ПВС, дистиллированной водой и 1 М раствором КСl, показывает, что введение в раствор КСl приводит к снижению коэффициентов передачи и отражения ЭМИ даже по сравнению с дистиллированной водой, что свидетельствует об увеличении поглощения электромагнитной энергии вследствие потерь за счет рассеяния энергии ЭМИ в виде тепла. Как мы полагаем, введение примеси сильного электролита, полностью диссоциированного на ионы, увеличивает тем самым количество частиц, способных колебаться под действием переменного электрического поля, за счет чего происходит поглощение энергии ЭМИ и ее диссипация. Установленный факт подтверждается также результатами по исследованию влияния сильного электролита на экранирующие характеристики раствороносодержащих текстильных матриц (рис. 1 и 2). Получено, что добавление в растворный наполнитель хлорида калия приводит к снижению коэффициента

передачи на 1 дБ (для суспензий проводящих порошков) – 4 дБ (для суспензий металлоксидных порошков и геля ПВС) и незначительному снижению коэффициента отражения.

Как рассматривалось в теоретической части, создание многослойных структур с градиентом электрофизических свойств по толщине позволяет снизить долю отражаемой от экрана энергии за счет улучшения согласования волновых сопротивлений свободного пространства и материала. В данной работе была исследована эффективность экранирования двухслойных гибких текстильных экранов ЭМИ с гелевыми суспензиями проводящих и диэлектрических мелкодисперсных порошков. По результатам исследований (рис. 1 и 2) слой, содержащий в наполнителе оксид металла, использовался в качестве поглощающего, а углеродсодержащий слой, имеющий более высокие значения коэффициента отражения, располагался за ним для увеличения ослабления ЭМИ. Энергия электромагнитного излучения, отраженная от второго слоя, снова ослабляется, проходя вновь через оксидсодержащий слой.

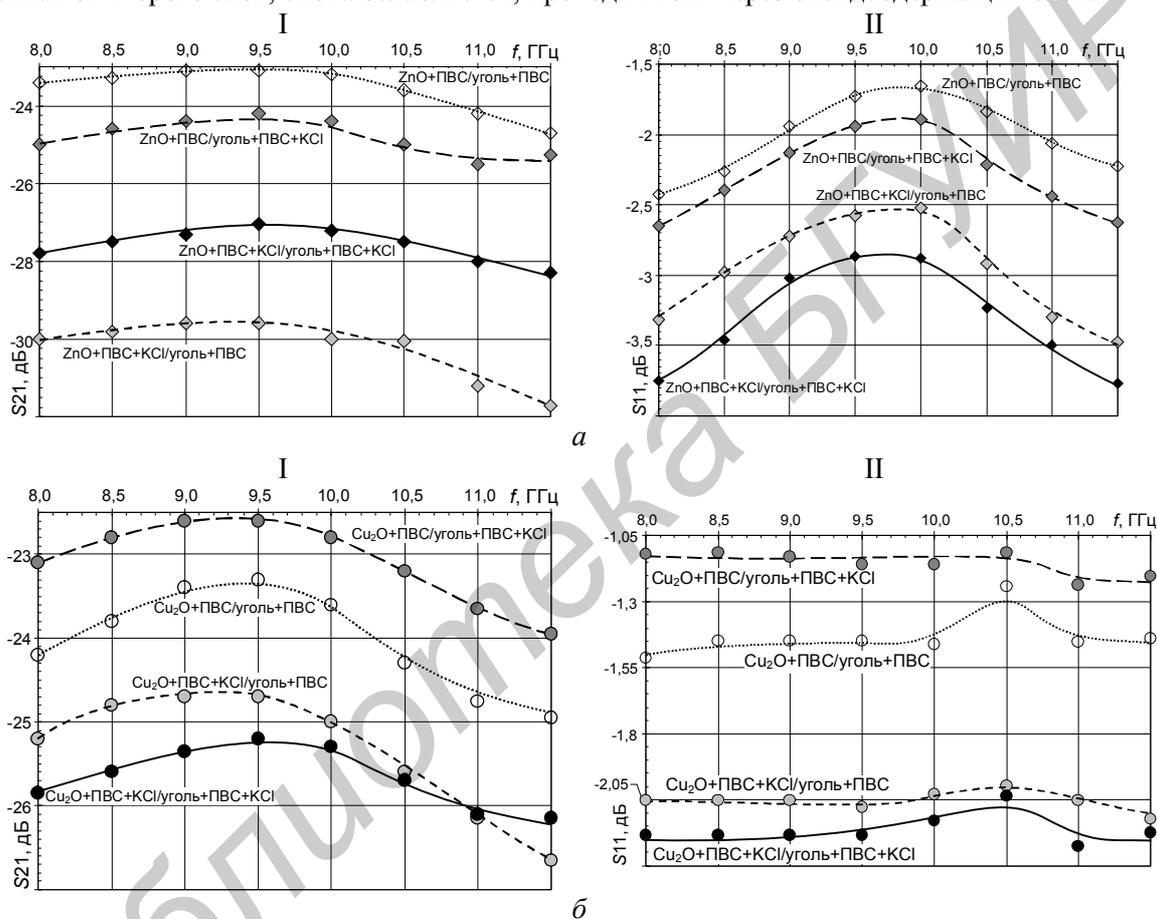


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  (I) и отражения  $S_{11}$ , дБ (II) двухслойных текстильных матриц с гелево-порошковыми наполнителями на основе оксидов металлов: ZnO (а) и  $Cu_2O$  (б) от частоты  $f$ , ГГц

Все двухслойные образцы имели сходный характер зависимости экранирующих характеристик от наличия в растворном наполнителе сильного электролита, результаты измерений которых представлены на рис. 3 и 4. С точки зрения оптимальности эффективности экранирования, наименьшими характеристиками коэффициента передачи и отражения обладали, как правило, двухслойные экраны с добавками хлорида калия в первый (оксидсодержащий) слой или в оба слоя.

Кроме того, рис. 4 на примере двухслойной системы с гелевой суспензией оксида цинка в первом слое и шунгита во втором слое иллюстрирует зависимость экранирующих характеристик от последовательности расположения слоев по отношению к источнику ЭМИ. Как и предполагалось, в том случае, когда первым к источнику ЭМИ расположен шунгитсодержащий слой, коэффициент отражения несколько выше, тогда как коэффициент передачи практически не зависит от ориентации слоев.

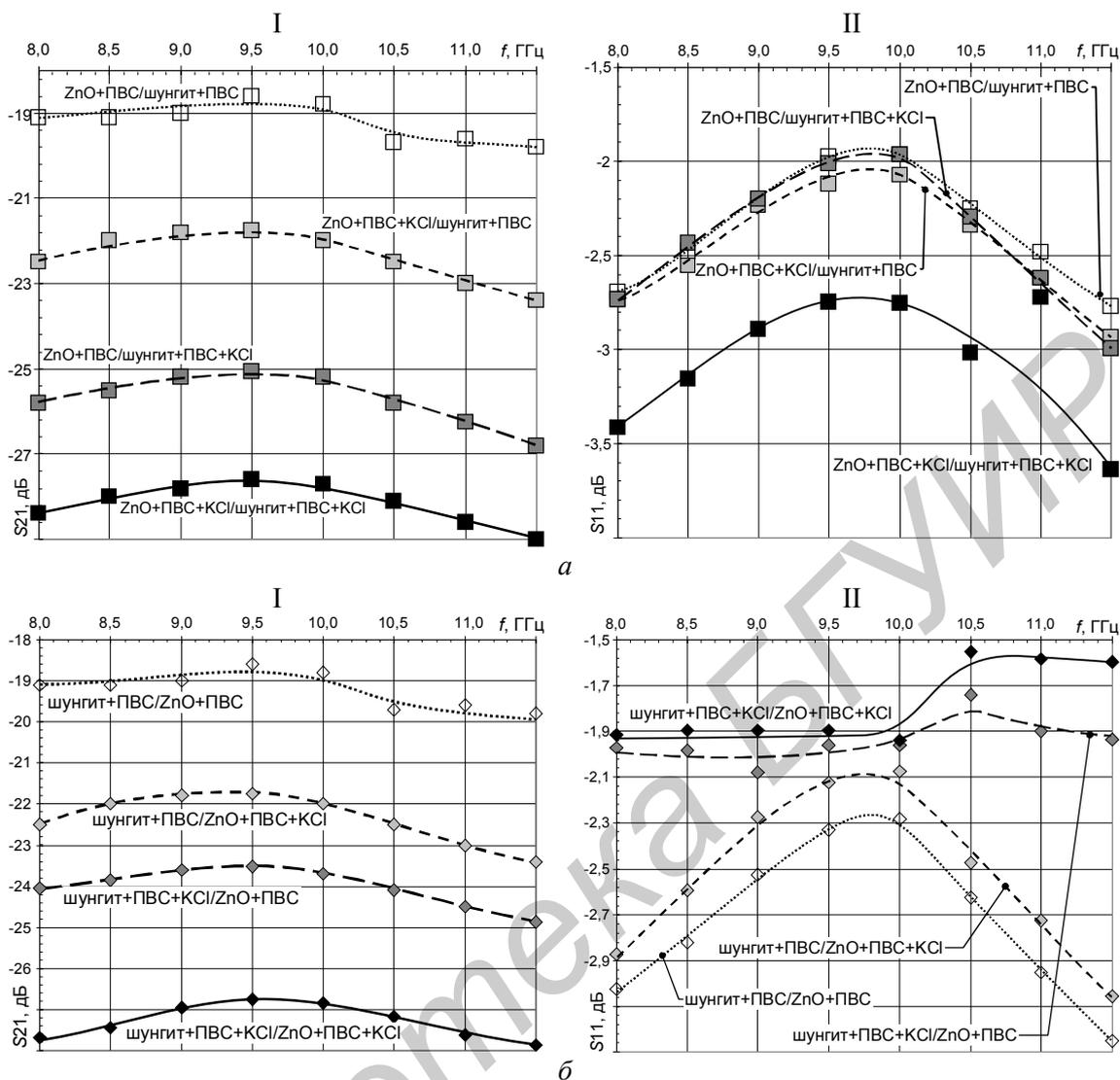


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  (I) и отражения  $S_{11}$ , дБ (II) двухслойных текстильных матриц с гелево-порошковыми наполнителями на основе ZnO и шунгита, различным образом ориентированных по отношению к направлению распространения радиоволн: оксидсодержащим слоем (а) и шунгитсодержащим слоем (б) к источнику, от частоты  $f$ , ГГц

### Выводы

Показана возможность увеличения поглощающей ЭМИ способности экранов ЭМИ на основе текстильных матриц с гелевым растворным наполнителем путем добавки сильного электролита на примере KCl, а создание двухслойных экранов позволяет добиться управляемого и воспроизводимого изменения их экранирующих свойств.

## SHIELDING CHARACTERISTICS OF TEXTILE MATRICES FILLED WITH SOLUTIONS

N.V. KOVALTCHOUK, N.V. NASONOVA, MUHAMED ALI ALHAMRUNI, A.A. POZNYAK

### Abstract

The results of experimental investigation of shielding characteristics of capillary-porous textile matrices impregnated with polyvinyl alcohol gel with the addition of potassium chloride and

without additives, as well as single and double-layered matrices filled with solutions containing powdered metal oxides (such as titania ( $\text{TiO}_2$ ), zirconia ( $\text{ZrO}_2$ )) and shungite and activated charcoal are given. The EMR absorption capability of shields increases as a result of strong electrolyte (KCl) addition into the solution. Double-layered shields can achieve controlled and reproducible changes in their radio-absorbing properties.

### Литература

1. Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М. и др. Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах. Минск, 2006.
2. Лыньков Л.М., Бозуш В.А., Колбун Н.В. // Докл. БГУИР. 2004. №5. С. 152–167.
3. Колбун Н.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. и др. // Вестник ПГУ, Сер. В. Прикладные науки. 2004. №12. С. 30–34.
4. Бозуш В.А., Зубаревич О.И., Колбун Н.В. и др. // Материалы 15-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2005. С. 637–639.
5. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М., 1982.
6. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. // Радиотехника и электроника. 2003. №2. С. 196–209.
7. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М., 1975.
8. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник Л., 1978.
9. Головатая С.В., Ковальчук Н.В., Насонова Н.В. и др. // Докл. БГУИР. 2010. №8 (54). С. 71–77.