

Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3.9 до 8 ГГц

А. Е. Щербаков ✉

ОАО "Завод Магнетон", Санкт-Петербург, Россия

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ a.e.shcherbakov@bk.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время композиционные материалы на основе электропроводящих полимеров находят широкое применение в различных областях. К сожалению, собственно электропроводящие полимеры имеют достаточно низкую механическую прочность, поэтому их применяют в виде композиционных материалов в сочетании с другими компонентами, обеспечивающими улучшенные базовые свойства, например механические. Отдельной ветвью развития подобных материалов стоит выделить композиционные материалы на основе текстиля, применяющиеся для экранирования электромагнитных волн. Ввиду низкой удельной плотности и, как следствие, небольшой массы, а также высокой эффективности поглощения данные материалы находят свое применение в сферах защиты человека от электромагнитного излучения.

Цель работы. Количественная оценка и анализ радиопоглощающих свойств двух- и трехкомпонентных текстильных композитов, присущих материалам вследствие наличия у них электропроводящих и магнитных характеристик.

Материалы и методы. Для измерения S-параметров использовался векторный анализатор цепей Keysight N5232A. Измерения проводились отдельно в двух диапазонах частот: 3.9...5.65 и 5.65...8 ГГц. Для выбранных диапазонов частот использовались волноводы с сечением 48×24 и 35×15 мм соответственно. В качестве экспериментальных образцов выступали композиционные материалы на основе нетканого текстиля, состоящего из вискозы и полиэфирного волокна в соотношении 60 и 40 % по массе соответственно.

Результаты. В ходе эксперимента определены параметры S11, характеризующие отражение волны от поверхности образца (S_r) (reflection), и параметры S12, характеризующие проницаемость образца (S_t) (transmittance). Получены данные для однослойных и многослойных образцов. Рассчитаны параметры диэлектрической и магнитной проницаемостей полученных материалов.

Заключение. Исследуемые материалы показали высокую степень как экранирования, так и поглощения электромагнитного излучения. Для образцов, содержащих магнетит, превалирует экранирующий характер электромагнитного излучения, для образцов на основе полипиррола основной характер взаимодействия поглощающий. Уровень общего поглощения образцов на основе полипиррола толщиной 6 мм составил 90 %. Полученные электрофизические параметры в дальнейшем возможно использовать при проектировании и моделировании радиопоглощающих изделий на основе исследуемого материала.

Ключевые слова: полипиррол, электропроводящие полимеры, радиопоглощающие материалы, магнетит, электромагнитные волны

Для цитирования: Щербаков А. Е. Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3.9 до 8 ГГц // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 68–79. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-68-79

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.09.2024; принята к публикации после рецензирования 24.10.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

Radio Absorption and Shielding of Electromagnetic Radiation by Polypyrrole- and Magnetite-Based Textiles in the 3.9...8 GHz Frequency Range

Alexandr E. Scherbakov ✉

JSC "Zavod Magneton", St Petersburg, Russia

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ a.e.shcherbakov@bk.ru

Abstract

Introduction. Composite materials based on electrically conductive polymers find application in various fields. However, the rather low mechanical strength of electrically conductive polymers require addition of other components to enhance their, e.g., mechanical properties. Another direction consists in the development of textile-based composite materials for shielding electromagnetic waves. Due to the low specific density and, respectively, low weight, as well as high absorption efficiency, such materials find application in the fields of human protection from electromagnetic radiation.

Aim. Quantitative assessment and analysis of the radio-absorbing properties of two- and three-component textile composites, which emerge due to their electrically conductive and magnetic characteristics.

Materials and methods. S parameters were measured using a Keysight N5232A vector circuit analyzer. Measurements carried out separately in two frequency ranges: 3.9...5.65 and 5.65...8 GHz. Waveguides of a given cross section were used for the selected frequency ranges (3.9...5.65 GHz – 48×24 mm; 5.65...8 GHz – 35×15 mm). The experimental samples were composite materials based on non-woven textiles consisting of viscose and polyester fiber in a ratio of 60 and 40 wt %, respectively.

Results. The S_{11} parameters characterizing wave reflection from the sample surface (S_r) (reflection) and the S_{12} parameters characterizing the sample permeability (S_t) (transmittance) were determined. Data for single- and multi-layered samples was obtained. The dielectric and magnetic permeability of the obtained materials was calculated.

Conclusion. The studied materials showed a high degree of both shielding and absorption of electromagnetic radiation. Magnetite-based samples demonstrated largely shielding properties against electromagnetic radiation; polypyrrole-based samples were characterized by absorbing properties. The total absorption level of 6-mm thick polypyrrole-based samples was 90 %. The obtained electrophysical parameters can be used when designing and modeling of radio-absorbing products based on the studied materials.

Keywords: polypyrrole, electrically conductive polymers, radio-absorbing materials, magnetite, electromagnetic waves

For citation: Scherbakov A. E. Radio Absorption and Shielding of Electromagnetic Radiation by Polypyrrole- and Magnetite-Based Textiles in the 3.9...8 GHz Frequency Range. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 68–79. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-68-79

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 20.09.2024; accepted 24.10.2024; published online 27.12.2024

Введение. Электропроводящие полимеры (ЭПП) с сопряженной структурой цепей представляют собой органические высокомолекулярные полупроводники и обладают уникальным комплексом свойств: электропроводностью до уровня 10^3 См/см; окислительно-восстановительной активностью; парамагнетизмом; электрохромными и электромеханическими свойствами. В настоящее время компо-

зиционные материалы на основе ЭПП находят широкое применение в таких областях, как антистатические и антикоррозионные покрытия [1]; источники питания и преобразования энергии [2]; сенсорики; медицина [3, 4]; материалы для экранирования и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) [5, 6]. Основными преимуществами ЭПП и, как следствие, наноструктур на их основе следует выделить высо-

Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3.9 до 8 ГГц

Radio Absorption and Shielding of Electromagnetic Radiation by Polypyrrole- and Magnetite-Based Textiles in the 3.9...8 GHz Frequency Rang

кую стабильность, как химическую, так и термостойкость, а также отсутствие растворимости в каких-либо органических и водных средах. Недавние исследования показали, что полимеры биосовместимы на клеточном уровне и могут быть использованы в медицине [7, 8], следовательно, могут применяться в быту и безопасно контактировать с кожей и слизистыми оболочками животных и человека.

Стоит заметить, что классу ЭПП присуще интенсивное поглощение ЭМИ в видимой области спектра, ближней ИК-области, а также способность к поглощению в СВЧ-диапазоне. Это позволяет использовать полимеры в качестве экранов и адсорберов ЭМИ для защиты приборов и человека. К сожалению, собственно ЭПП имеют достаточно низкую механическую прочность, поэтому их применяют в виде композиционных материалов в сочетании с другими компонентами, обеспечивающими улучшенные механические характеристики, а также придающими материалам другие полезные свойства. Текстиль, модифицированный ЭПП, обладает всем перечисленным комплексом свойств, присущих полимерам, и может иметь широкий спектр применений от сенсорики и медицины до накопления и превращения энергии [9, 10].

В настоящее время получены разнообразные виды композиционных материалов ЭПП, в том числе и на основе текстиля [11–13].

Благодаря многофункциональности ЭПП (кислотно-основным и окислительно-восстановительным свойствам полимеров) разработаны химические методы получения более сложных, трех и четырехкомпонентных композитов, например материалов, модифицированных наночастицами благородных металлов [14] или оксидами редокс-активных переходных металлов [15]. Такие материалы используются для гетерогенного катализа или в сенсорах и электрохимических источниках питания.

Несмотря на большое количество композиционных материалов, свойства их значительно различаются, что зависит не только от состава, т. е. природы и количественного соотношения компонентов, но и от методов получения материалов. По этой причине получение новых композиционных материалов остается актуальной задачей.

Исходя из этого, на базе Института высокомолекулярных соединений РАН были разрабо-

таны два типа композиционных материалов: двухкомпонентный композитный текстиль, модифицированный электропроводящей формой полипиррола (ППи), и трехкомпонентный материал, содержащий еще и наночастицы магнетита (Fe^3O^4). Полученные материалы сочетают в себе функциональные свойства активных компонентов (электропроводность, взаимодействие с ЭМИ, редокс-активность, магнетизм) и общие механические свойства ткани.

Таким образом, целью работы явилось исследование радиопоглощающих свойств двух- и трехкомпонентных текстильных композитов, присущих материалам вследствие наличия у них электропроводящих и магнитных характеристик.

Проведена качественная оценка свойств поглощения и экранирования ЭМИ в диапазоне частот 3.9...8 ГГц. Данный частотный диапазон выбран ввиду возможности экстраполяции полученных характеристик на более высокий частотный диапазон и моделирования свойств поглощения предполагаемых изделий в дальнейшем.

Материалы и методы. Оборудование и расходные материалы. В качестве метода анализа был выбран волноводный метод измерений. Выбранный метод, в отличие от распространенного рупорного метода, позволяет установить значения как магнитной и диэлектрических проницаемостей, так и других электрофизических параметров композиционных материалов при использовании NRW-метода (Nicolson–Ross–Weir) [16–18]. Выбор NRW-метода обуславливался простотой реализации алгоритма расчета электрофизических параметров материалов, также данный метод является предпочтительным при работе с материалами со сложной структурой.

Для измерения S-параметров используется векторный анализатор цепей Keysight N5232A. Измерения проводились отдельно в двух диапазонах частот: 3.9...5.65 и 5.65...8 ГГц. Для выбранных диапазонов частот использовались волноводы с сечением 48×24 и 35×15 мм соответственно.

Экспериментальные образцы. В качестве экспериментальных образцов выступали композиционные материалы на основе нетканого текстиля, состоящего из вискозы и полиэфирного волокна в соотношении 60 и 40 % по массе соответственно. Материал выбирался по принципу наибольшей эффективности осажде-

ния ЭПП. Также данный материал имел развитую структуру, способствующую лучшему согласованию волнового сопротивления объема образца и свободного пространства ввиду наличия достаточного объема воздуха между уложенными нитями ткани. Материалом-модификатором выступала окисленная форма электропроводящего ППи. Модификация ткани ППи проводилась путем гетерофазного синтеза полимера на поверхности текстиля. Дополнительная модификация двухкомпонентного композиционного материала магнитным компонентом в виде наночастиц магнетита, высаженных на поверхность ППи, проводилась методом соосаждения солей железа. Общий вид композиционных материалов представлен на рис. 1.

Полученные композиционные материалы нарезались на образцы размером 48×24 и 35×15 мм для соответствия сечению используемого волновода. В табл. 1 приведены значения толщин образцов и числа слоев модифицированной ППи ткани.

Данные, полученные в ходе измерения образцов, будут обозначены согласно приведенным в табл. 1.

Технологический процесс и методика проведения эксперимента. В ходе эксперимента определены параметры S_{11} , характеризующие отражение волны от поверхности образца (S_r) (reflection), и параметры S_{12} , характеризующие проницаемость образца (S_t) (transmittance).

Измерения проводились следующим образом. Образец размещался в измерительной ячейке, ко-

Табл. 1. Значения толщин и обозначения образцов

Tab. 1. Thickness values and sample designations

Ткань, модифицированная		Толщина, мм (кол-во слоев)
ППи	ППи и магнетитом	
1.1	2.1	2 (1)
1.2	2.2	4 (1)
1.3	2.3	4 (2)
1.4	2.4	6 (1)
1.5	2.5	6 (2)
1.6	2.6	6 (3)
1.7	2.7	7.5 (3)

торая была соединена с волноводом прямоугольного сечения и коаксиально-волновым переходом (КВП), передающим сигнал от порта векторного анализатора. Схема размещения образца симметрична относительно плоскости образца для каждого из портов и представлена на рис. 2.

При определении S -параметров использовалась сборка волновода и КВП для каждого из портов. Для определения параметров полного поглощения, реализуемого при двойном прохождении электромагнитной волной объема поглотителя (SHORT), за измерительной ячейкой устанавливался металлический экран.

Для получения частотной зависимости электрофизических параметров, в частности диэлектрической и магнитной проницаемостей, полученные в рамках измерения S -параметры обрабатывались с помощью специально разработанного программного обеспечения, реализующего NRW-метод. При расчетах использовались следующие соотношения. Коэффициент отражения (KO) от образца рассчитывается по формуле



а



б

Рис. 1. Тканевый поглотитель на основе: а – вискозы и полипиррола; б – вискозы, полипиррола с добавлением магнетита

Fig. 1. Textile absorbent based on: а – viscose and polypyrrole; б – viscose, polypyrrole with the addition of magnetite

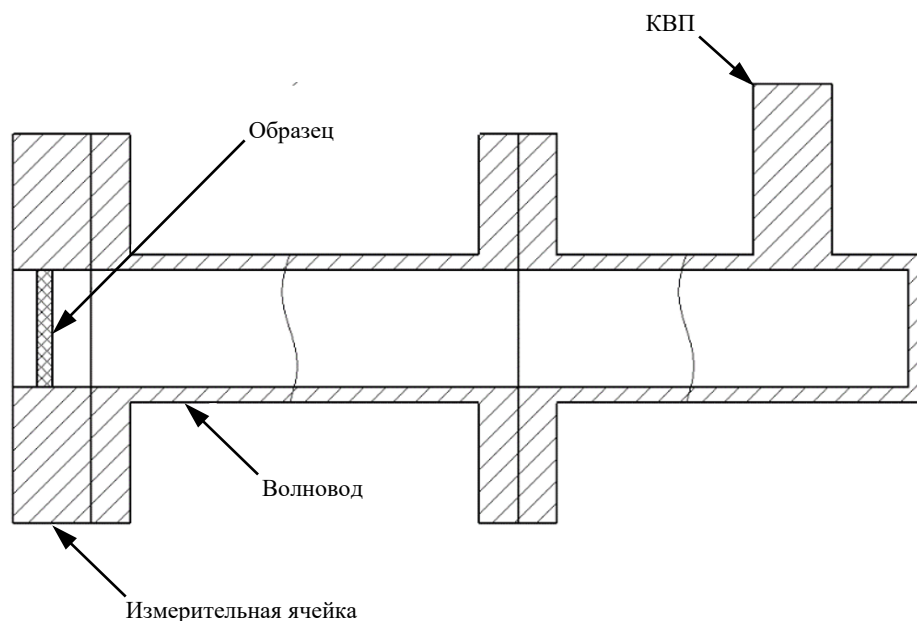


Рис. 2. Схема размещения образца
Fig. 2. Sample placement diagram

$$KO = K \pm \sqrt{K^2 - 1}, \quad (1)$$

где $K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{21}}$ – установочный коэффициент. Знак в (1) выбирается согласно условию $|KO| \leq 1$.

Далее вычисляется коэффициент прохождения (передачи) (КП):

$$КП = \frac{S_{11} - S_{12} - KO}{1 - (S_{11} + S_{21})KO}. \quad (2)$$

Затем рассчитываются комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости по формулам

$$\mu_r = \frac{1 + KO}{(1 - KO)\Lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[\left(\frac{1}{\lambda_c^2} \right) - \left(\frac{1}{\Lambda^2} \right) \right]},$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; λ_c – критическая длина волны в измерительном волноводе; Λ – коэффициент, определяемый выражением

$$\Lambda^2 = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{КП} \right) \right]^2. \quad (4)$$

Здесь L – толщина образца.

Отдельно стоит отметить, что выражение (4) имеет бесконечное количество значений (мнимая часть КП рассчитана с точностью до $2\pi n$, где n – произвольное целое число). Поэтому для определения точных значений рассчитывается групповое время задержки сигнала при прохождении по волноводу для каждого n -го решения (3) и сравнивается с его действительным групповым временем задержки (4):

$$\tau_{g n} = L \frac{d}{df} \left(\frac{\mu_r \varepsilon_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right)^{1/2};$$

$$\tau_g = - \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{df},$$

где φ – фаза КП. Правильное значение $n = k$ должно удовлетворять условию $\tau_{g k} - \tau_g = 0$ [19].

Результаты. Результаты измерений параметров прохождения и отражения электромагнитных волн. На рис. 3 приведены частотные зависимости параметров S_t и S_r для однослойного текстиля различной толщины в диапазонах частот 3.9...5.65 и 5.65...8 ГГц.

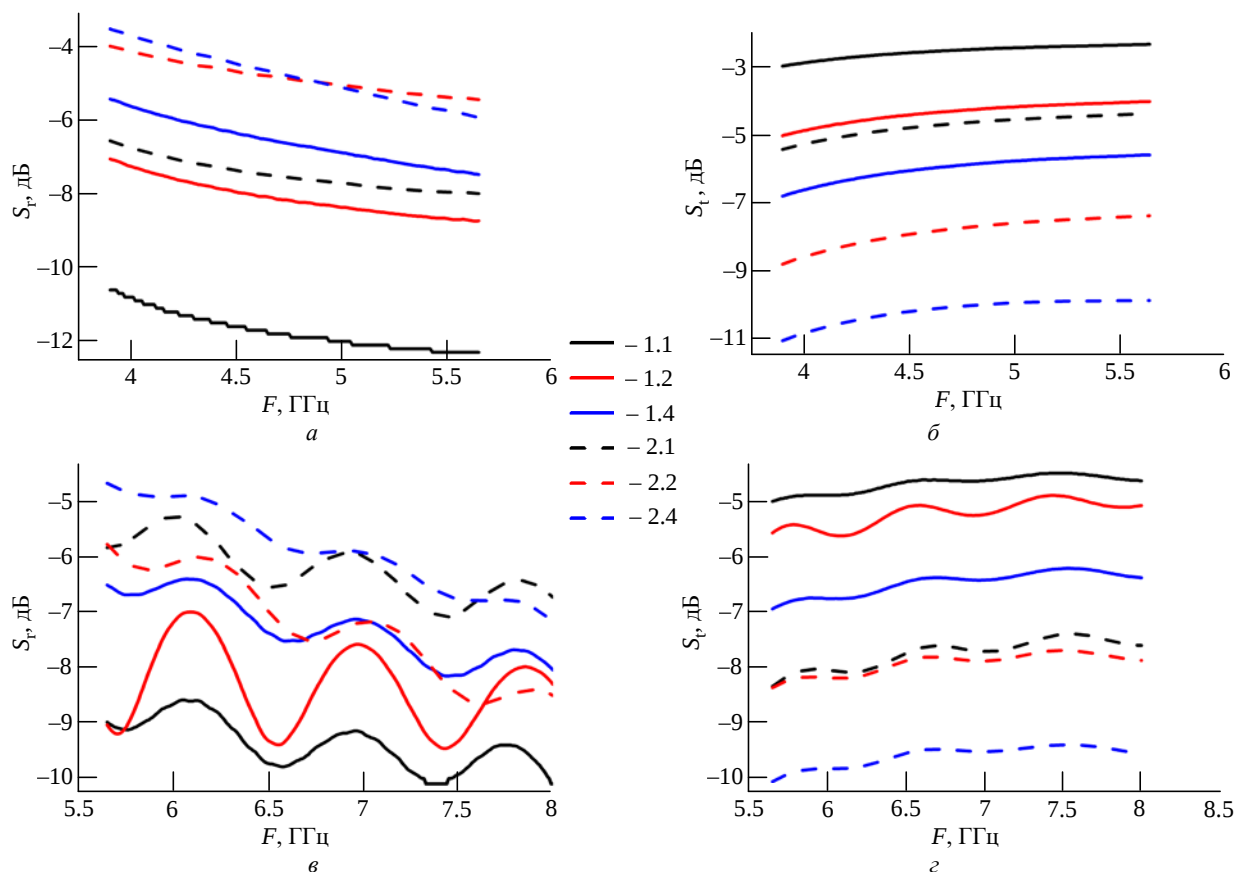


Рис. 3. Частотные зависимости параметров $S_r(a, \epsilon)$ и $S_t(b, z)$ для диапазонов: $a, б$ – 3.9...5.65 ГГц; $в, г$ – 5.65...8 ГГц (ППи – сплошные линии; ППи- Fe_3O_4 – штриховые линии)

Fig. 3. Frequency dependencies of $S_r(a, \epsilon)$ and $S_t(b, z)$ parameters for the bands: $a, б$ – 3.9...5.65 GHz; $в, г$ – 5.65...8 GHz (PPi – solid lines; PPi- Fe_3O_4 – dashed lines)

Полученные в ходе измерения образцов параметры материалов обозначены согласно табл. 1.

Видно, что проницаемость образцов для ЭМИ закономерно снижается с увеличением толщины композиционного текстиля. Это говорит о том, что с электромагнитным излучением взаимодействует весь объем образца даже при толщине текстиля 6 мм и существует резерв повышения его экранирующей способности за счет дальнейшего увеличения толщины. Нетканая матрица состоит из хаотически уложенных волокон, разделенных значительным свободным пространством. Благодаря свободному пространству улучшается согласование волнового сопротивления объема композиционного текстиля и свободного пространства вне образца, при этом электромагнитная волна способна взаимодействовать с большим объемом композиционного материала, вследствие чего с увеличением толщины общий показатель поглощения улучшается при незначительном росте отражающей способности материала.

Отдельно стоит выделить проявление эффекта осцилляции на образцах, измеренных в диапазоне частот 5.65...8 ГГц. Подобное поведение частотных зависимостей говорит о том, что в рамках данного диапазона проявляется эффект взаимодействия электромагнитной волны, по длине сопоставимой с размерами образца. Для получения характеристик диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов использовались данные, полученные на однослойных образцах толщиной 2 мм.

В результате измерений параметров (рис. 4, 5) для многослойных образцов можно наблюдать разбиение характеристик на группы, в большей степени зависящие от количества используемых слоев. Пример разбиения приведен на рис. 4 для диапазона частот 3.9...5.65 ГГц. В дальнейшем для восприятия будут отображены единичные представители количества слоев.

Подобное разбиение говорит о существенном вкладе имеющейся воздушной прослойки

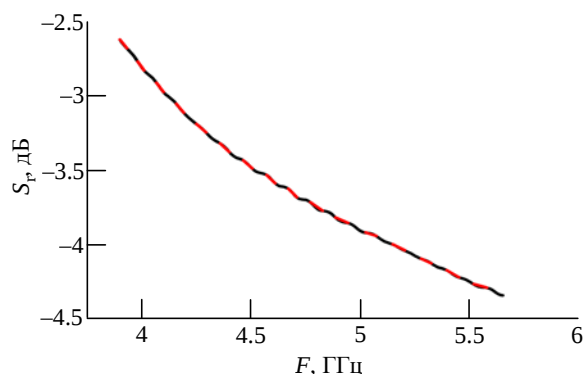


Рис. 4. Пример наложения графиков

Fig. 4. Example of superimposing graphs

между слоями материала. Имеет место эффект межслойного переотражения, который вносит более существенный вклад в механизм взаимодействия электромагнитной волны и объема образца, чем толщина материала. Эффект межслоевого отражения возникает за счет разницы волнового сопротивления свободного воздушного пространства Z и объема образца, опреде-

ляемого согласно формуле $Z = (\mu/\epsilon)^{1/2}$. Отдельно такое группирование материалов говорит об эффективности использования многослойных структур для экранирования ЭМИ. Подобный эффект также можно использовать при реализации градиентных структур поглотителей для увеличения эффективности при сохранении общей толщины материала.

Результаты расчета электрофизических параметров образцов. Полученные данные измерений S_t и S_r были пересчитаны в характеристики диэлектрической проницаемости при помощи NRW-метода. На рис. 6, а, б приведены частотные зависимости для ϵ' , на рис. 6, в, г – для μ' .

Зависимости, полученные в ходе исследования композиционных материалов в частотном диапазоне 5.65...8 ГГц, представляют большой интерес, значения диэлектрической проницаемости имеют нелинейный характер.

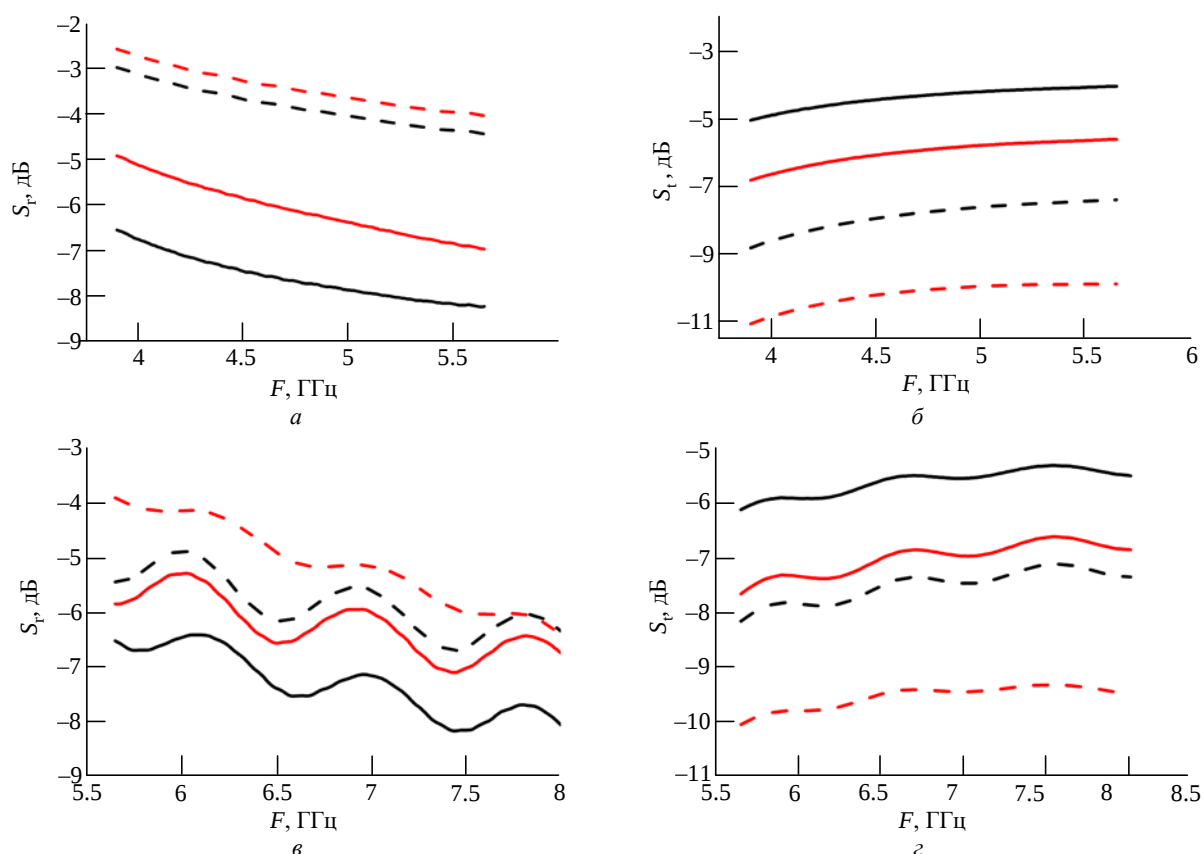


Рис. 5. Частотные зависимости параметров S_r (а, в) и S_t (б, г) многослойных образцов для диапазонов: а, б – 3.9...5.65 ГГц; в, г – 5.65...8 ГГц (ППи – сплошные линии; ППи- Fe_3O_4 – штриховые линии)

Fig. 5. Frequency dependencies of S_r (a, в) and S_t (б, г) parameters of multilayered samples for the bands: а, б – 3.9...5.65 GHz; в, г – 5.65...8 GHz (PPi – solid lines; PPI- Fe_3O_4 – dashed lines)

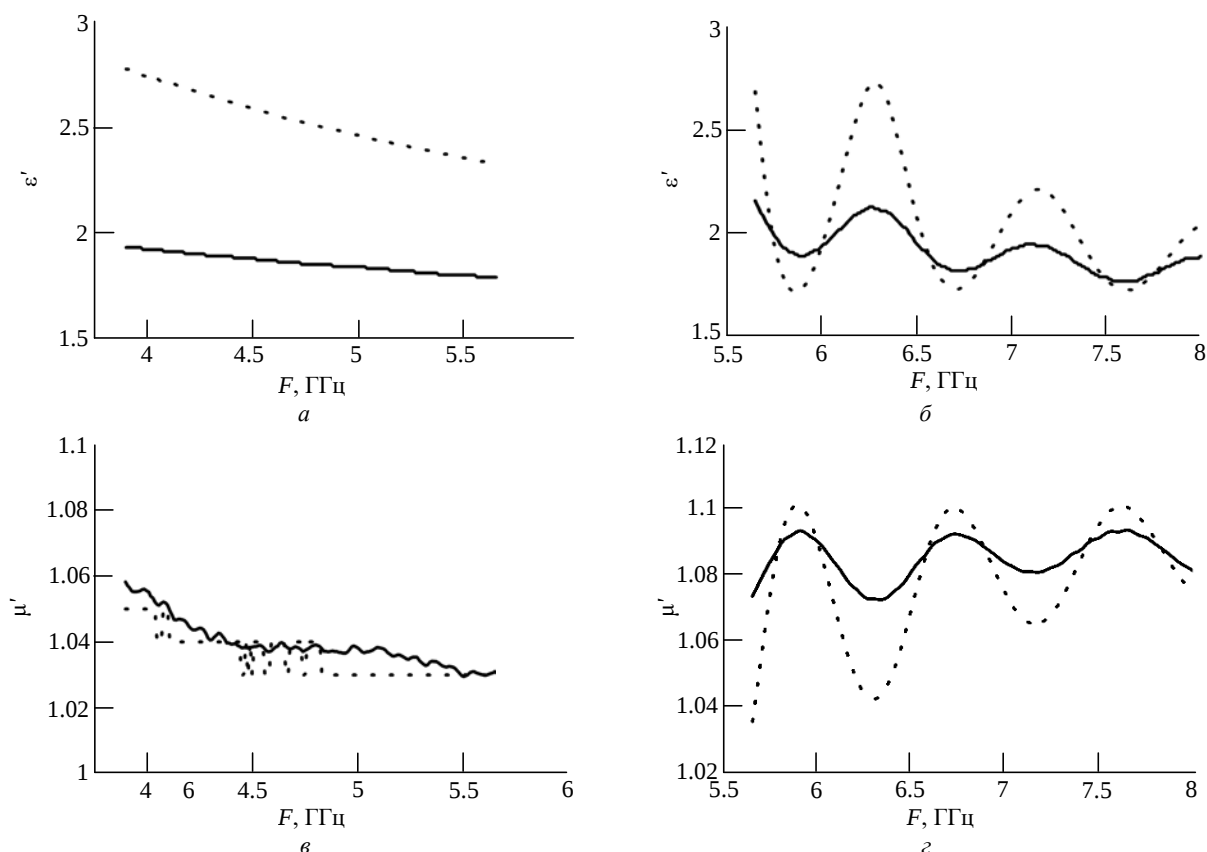


Рис. 6. Частотные зависимости параметров ε' (а, б) и μ' (в, з) для диапазонов: а, в – 3.9...5.65 ГГц; б, з – 5.65...8 ГГц (ППи – сплошные линии; ППи- Fe_3O_4 – пунктирные линии)

Fig. 6. Frequency dependencies of ε' (a, б) and μ' (в, з) for the bands: а, в – 3.9...5.65 GHz; б, з – 5.65...8 GHz (PPI – solid lines; PPI- Fe_3O_4 – dotted lines)

Ярко выраженная осцилляция для S-параметров также наблюдается и для параметров ε' и μ' . Для образцов с содержанием магнетита амплитуда изменения параметров имеет больший диапазон. Зависимости имеют схожий характер поведения как для материала, содержащего ППи и магнетит, так и для содержащего только ППи. Общая совокупность зависимостей магнитной и диэлектрической проницаемостей влияет на общее увеличение волнового сопротивления образца, что, в свою очередь, приводит к изменению характера взаимодействия – с поглощения на экранирование для материалов, содержащих магнетит. Полученные результаты также возможно использовать для компьютерного моделирования и прогнозирования свойств поглощения сложных структур на основе полученного материала.

Результаты измерений параметров полного поглощения электромагнитных волн. На рис. 7 приведены параметры поглощения ЭМИ (K), реа-

лизующего при двойном прохождении электромагнитной волной объема композиционного материала разной толщины. Для сравнения параметры K приведены для коммерческого радиопоглощающего материала ПЭВ-Л толщиной 4 и 6 мм.

Видно, что как для образцов, содержащих ППи, так и для образцов, содержащих ППи и магнетит, во всем диапазоне частот коэффициент K непрерывно растет с увеличением толщины образцов. В то же время эффективность коммерческого поглотителя лимитирована толщиной 4 мм. Дальнейшее повышение K с ростом толщины невозможно из-за высокого волнового сопротивления объема материала, и, как следствие, увеличения его отражательной способности ЭМИ. Следует отметить, что в диапазоне частот 3.9...5.65 ГГц большим показателем K обладает материал на основе ППи и магнетита. Для диапазона 5.65...8 ГГц коэффициент поглощения K выше для образцов на основе ППи. На основе полученных данных можно говорить

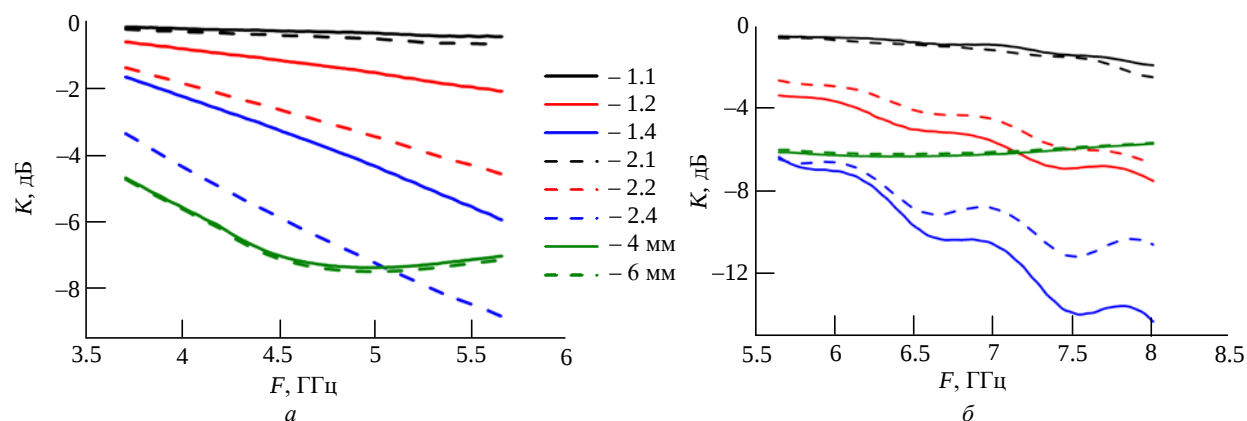


Рис. 7. Частотные зависимости параметров полного поглощения K для диапазонов: a – 3.9...5.65 ГГц; b – 5.65...8 ГГц
Fig. 7. Frequency dependences of the total absorption parameters K for the ranges: a – 3.9...5.65 GHz; b – 5.65...8 GHz

о высоком уровне экранирования ЭМИ композиционным текстилем. Практически во всем диапазоне исследуемых частот коэффициент K образцов толщиной 6 мм превышает параметры коммерческих образцов толщиной 4 и 6 мм.

Говоря о преимуществах полученных материалов, необходимо учесть также, что плотность композиционного текстиля (1.2 г/см^3) в 3 раза ниже плотности коммерческого поглотителя на основе карбонильного железа (4 г/см^3). К тому же текстиль значительно превосходит ПЭВ-Л по комфорту за счет использования биосовместимых материалов и пористой, "дышащей", т. е. проницаемой для жидкостей и газов структуре. В диапазоне частот 6...8 ГГц композиционный текстиль снижает мощность ЭМИ более чем на 90 % и имеет тенденцию к увеличению не только экранирующей, но и поглощающей способности при больших частотах.

Заключение и выводы. Для анализа свойств взаимодействия ЭМИ и поглощающей ткани на основе ЭПП ППи, а также магнетита, на основе оксидов железа использован волноводный метод измерений, особенностью которого является возможность интерпретации получаемых S -параметров в параметры магнитной и диэлектрической проницаемостей с помощью NRW-метода. Были получены частотные зависимости параметров S_t и S_r , выявляющие характер взаимодействия материала с ЭМИ для образцов разной толщины и количества слоев. Так, для образцов, содержащих как ППи, так и магнетит, преобладает экранирующий характер взаимодействия с ЭМИ, что, в свою очередь, позиционирует его как материал, возможный для использова-

ния в качестве средства защиты человека от воздействия ЭМИ. Материал на основе ППи характеризуется большим уровнем поглощения ЭМИ. Подобный материал продемонстрировал тенденцию к увеличению толщины слоя и, как следствие, увеличению эффективности поглощения.

Отдельно стоит выделить многослойные материалы, которые пусть и не показали значительного увеличения показателей поглощения в зависимости от общей толщины образца, однако имели наиболее высокую экранирующую способность уже при использовании минимальных толщин. Подобное поведение может быть использовано как для увеличения показателей экранирования при прямом применении, так и при создании многослойных градиентных структур для увеличения показателей поглощения.

Полученные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей позволяют применять компьютерное моделирование и прогнозирование свойств поглощения сложных структур на основе полученного материала.

Показатели полного поглощения K , реализуемого при двойном прохождении ЭМИ сквозь образец, показали снижение мощности ЭМИ более чем на 90 % для образцов на основе ППи. Общий характер взаимодействия имеет тенденцию к увеличению не только экранирующей, но и поглощающей способности при больших частотах и больших толщинах. В то же время для образцов коммерческого поглотителя потолок поглощающей способности остается на уровне 4 мм, тогда как материал на основе ППи имеет запас для увлечения толщины. Так, образцы толщиной 6 мм превышают параметры K коммерческих образцов толщиной 6 мм.

Отметим, что результаты данного исследования коррелируют со схожими результатами, полученными для подобных композитных материалов, при использовании другого типа матрицы носителя [11].

С учетом повышенной комфортности материала композиционный текстиль является перспективным для использования в сфере обеспечения защиты человека от негативного воздействия ЭМИ.

Список литературы

1. The Effect of Conductive Polyaniline on the Anti-Fouling and Electromagnetic Properties of Polydimethylsiloxane Coatings / Y. Guo, Y. Qi, C. Zhang, S. Zhang, Z. Zhang // *Polymers*. 2023. Vol. 15, iss. 13. P. 2944. doi: 10.3390/polym15132944
2. Conductive polymers for stretchable supercapacitors / Y. Wang, Y. Ding, X. Guo, G. Yu // *Nano Research*. 2019. Vol. 12. P. 1978–1987. doi: 10.1007/s12274-019-2296-9
3. Rivers T. J., Hudson T. W., Schmidt C. E. Synthesis of a novel, biodegradable electrically conducting polymer for biomedical applications // *Advanced Functional Materials*. 2002. Vol. 12, iss. 1. P. 33–37. doi: 10.1002/1616-3028(20020101)12:1<33::AID-ADFM33>3.0.CO;2-E
4. Otero T. F., Martinez J. G., Arias-Pardilla J. Biomimetic electrochemistry from conducting polymers. A review: artificial muscles, smart membranes, smart drug delivery and computer/neuron interfaces // *Electrochimica Acta*. 2012. Vol. 84. P. 112–128. doi: 10.1016/j.electacta.2012.03.097
5. Development and investigation of electromagnetic shielding fabrics with different electrically conductive additives / V. Rubežienė, J. Baltušnikaitė, S. Varnaitė-Žuravlio, A. Sankauskaitė, A. Abraitienė, J. Matuzas // *J. of Electrostatics*. 2015. Vol. 75. P. 90–98. doi: 10.1080/00405000.2017.1347229
6. Layer by layer deposition of PEDOT, silver, and copper to develop durable, flexible, and EMI shielding and antibacterial textiles / S. Riaz, S. Naz, A. Younus, A. Javid, S. Akram, A. Nosheen, M. Ashraf // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. Vol. 650, art. № 129486. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129486
7. Yu Z., Zhen T., Jisheng H. 5-Block copolymer for skin-compatible electronics // *Semiconducting Polymer Materials for Biosensing Applications*. 2024. P. 125–161. doi: 10.1016/B978-0-323-95105-0.00009-7
8. Electrochemical control of bone microstructure on electroactive surfaces for modulation of stem cells and bone tissue engineering / D. Cao, J. Martinez, R. Anada, E. Hara, H. Kamioka, E. Jager // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2023. Vol. 24, iss. 1. Art. № 2183710. doi: 10.1080/14686996.2023.2183710
9. Sensing and Tactile Artificial Muscles from Reactive Materials / L. V. Conzuelo, J. Arias-Pardilla, J. Cauich-Rodríguez, M. A. Smit, T. F. Otero // *Sensors*. 2010. Vol. 10, iss. 4. P. 2638–2674. doi: 10.3390/s100402638
10. A flexible polypyrrole/silk-fiber ammonia sensor assisted by silica nanosphere template / C. She, G. Li, W. Zhang, G. Xie, Y. Zhang, L. Li, F. Yue, S. Liu, Ch. Jing, Y. Cheng, J. Chu // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. Vol. 317. Art. № 112436. doi: 10.1016/j.sna.2020.112436
11. Rybicki T., Stempień Z., Karbownik I. EMI Shielding and Absorption of Electroconductive Textiles with PANI and PPy Conductive Polymers and Numerical Model // *Energies*. 2021. Vol. 14, iss. 22. Art. № 7746. doi: 10.3390/en14227746
12. Electromagnetic Radiation Shielding by Composites of Conducting Polymers and Wood / I. Sapurina, N. Kazantseva, J. Prokes, P. Saga, J. Stejskal // *J. of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 95, iss. 4. P. 807–814. doi: 10.1002/app.21240
13. Recent advances in electromagnetic interference (EMI) shielding textiles: A comprehensive review / S. Akram, M. Ashraf, A. Javid, H. Affan-Abid, S. Ahmad, Y. Nawab, A. Rasheed, Zh. Xue, A. Nosheen // *Synthetic Metals*. 2023. Vol. 294. Art. № 117305. doi: 10.1016/j.synthmet.2023.117305
14. Sapurina I., Stejskal J. Composites of Multi-Wall Carbon Nanotubes, Polyaniline, and Noble-Metal Nanoparticles for Potential Application in Electrocatalysis // *Chemical Papers*. 2009. Vol. 63, iss. 5. P. 579–585. doi: 10.2478/s11696-009-0061-3
15. Polyaniline-coated multi-wall carbon nanotubes containing nickel nanoparticles / E. N. Konyushenko, N. E. Kazantseva, J. Stejskal, M. Trchová, J. Kovarova, I. Sapurina, M. M. Tomishko, O. V. Demicheva, J. Prokeš Konyushenko // *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008. Vol. 320, iss. 3–4. P. 231–240. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.05.036
16. Vicente A. N., Dip G. M., Junqueira C. The step by step development of NRW method // *SBMO/IEEE MTT-S Intern. Microwave and Optoelectronics Conf., Natal, Brazil, 29 Oct. 2011–01 Nov. 2011*. IEEE, 2011. P. 738–742. doi: 10.1109/IMOC.2011.6169318
17. Sadeghi S., Mousavi S. M., Pommerenke D. A Method to Determine the Permittivity of Anisotropic Thin Sheet Absorber Materials // *Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 04–08 Sept. 2023*. IEEE, 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274270
18. Rohde and Schwarz. Measurement of dielectric material properties. Application note. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/00aps_undefined/RAC-0607-0019_1_5E.pdf (дата обращения: 19.11.2024).
19. Лобекин В. Н., Татаренко А. С., Бичурин М. И. Методики измерения параметров метаструктур на основе сплит-кольцевых резонаторов // *Вестн. НовГУ. Сер. Технические науки*. 2020. № 5 (121). С. 25–28.

Информация об авторе

Щербаков Александр Евгеньевич – магистр по специальности электроника и наноэлектроника (2021, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер-конструктор ОАО "Завод Магнетон". Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов: радиопоглощающие материалы; антенные технологии; электромагнитное излучение; технологии разработки и производства безэховых камер.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: a.e.shcherbakov@bk.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2219-2375>

References

1. Guo Y., Qi Y., Zhang C., Zhang S., Zhang Z. The Effect of Conductive Polyaniline on the Anti-Fouling and Electromagnetic Properties of Polydimethylsiloxane Coatings. *Polymers*. 2023, vol. 15, iss. 13, p. 2944. doi: 10.3390/polym15132944
2. Wang Y., Ding Y., Guo X., Yu G. Conductive Polymers for Stretchable Supercapacitors. *Nano Research*. 2019, vol. 12, pp. 1978–1987. doi: 10.1007/s12274-019-2296-9
3. Rivers T. J., Hudson T. W., Schmidt C. E. Synthesis of a Novel, Biodegradable Electrically Conducting Polymer for Biomedical Applications. *Advanced Functional Materials*. 2002, vol. 12, iss. 1, pp. 33–37. doi: 10.1002/1616-3028(20020101)12:1<33::AID-ADFM33>3.0.CO;2-E
4. Otero T. F., Martinez J. G., Arias-Pardilla J. Biomimetic Electrochemistry from Conducting Polymers. A Review: Artificial Muscles, Smart Membranes, Smart Drug Delivery and Computer/Neuron Interfaces. *Electrochimica Acta*. 2012, vol. 84, pp. 112–128. doi: 10.1016/j.electacta.2012.03.097
5. Rubežienė V., Baltušnikaitė J., Varnaitė-Žuravliova S., Sankauskaitė A., Abraitienė A., Matuzas J. Development and Investigation of Electromagnetic Shielding Fabrics with Different Electrically Conductive Additives. *J. of Electrostatics*. 2015, vol. 75, pp. 90–98. doi: 10.1080/00405000.2017.1347229
6. Riaz S., Naz S., Younus A., Javid A., Akram S., Nosheen A., Ashraf M. Layer by Layer Deposition of PEDOT, Silver, and Copper to Develop Durable, Flexible, and EMI Shielding and Antibacterial Textiles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022, vol. 650, art. no. 129486. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129486
7. Yu Z., Zhen T., Jisheng H. 5-Block Copolymer for Skin-Compatible Electronics. *Semiconducting Polymer Materials for Biosensing Applications*. 2024, pp. 125–161. doi: 10.1016/B978-0-323-95105-0.00009-7
8. Cao D., Martinez J., Anada R., Hara E., Kamioka H., Jager E. Electrochemical Control of Bone Microstructure on Electroactive Surfaces for Modulation of Stem Cells and Bone Tissue Engineering. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2023, vol. 24, iss. 1, art. no. 2183710. doi: 10.1080/14686996.2023.2183710
9. Conzuelo L. V., Arias-Pardilla J., Cauch-Rodríguez J., Smit M. A., Otero T. F. Sensing and Tac-
- tile Artificial Muscles from Reactive Materials. *Sensors*. 2010, vol. 10, iss. 4, pp. 2638–2674. doi: 10.3390/s100402638
10. She C., Li G., Zhang W., Xie G., Zhang Y., Li L., Yue F., Liu S., Jing Ch., Cheng Y., Chu J. A Flexible Polypyrrole/Silk-Fiber Ammonia Sensor Assisted by Silica Nanosphere Template. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021, vol. 317, art. no. 112436. doi: 10.1016/j.sna.2020.112436.
11. Rybicki T., Stempień Z., Karbownik I. EMI Shielding and Absorption of Electroconductive Textiles with PANI and PPy Conductive Polymers and Numerical Model. *Energies*. 2021, vol. 14, iss. 22, art. no. 7746. doi: 10.3390/en14227746
12. Sapurina I., Kazantseva N., Prokes J., Saga P., Stejskal J. Electromagnetic Radiation Shielding by Composites of Conducting Polymers and Wood. *J. of Applied Polymer Science*. 2005, vol. 95, iss. 4, pp. 807–814. doi: 10.1002/app.21240
13. Akram S., Ashraf M., Javid A., Affan-Abid H., Ahmad S., Nawab Y., Rasheed A., Xue Zh., Nosheen A. Recent Advances in Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Textiles: A Comprehensive Review. *Synthetic Metals*. 2023, vol. 294, art. no. 117305. doi: 10.1016/j.synthmet.2023.117305
14. Sapurina I., Stejskal J. Composites of Multi-Wall Carbon Nanotubes, Polyaniline, and Noble-Metal Nanoparticles for Potential Application in Electrocatalysis. *Chemical Papers*. 2009, vol. 63, iss. 5, pp. 579–585. doi: 10.2478/s11696-009-0061-3
15. Konyushenko E. N., Kazantseva N. E., Stejskal J., Trchová M., Kovarova J., Sapurina I., Tomishko M. M., Demicheva O. V., Prokeš Konyushenko J. Polyaniline-coated Multi-Wall Carbon Nanotubes Containing Nickel Nanoparticles. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008, vol. 320, iss. 3–4, pp. 231–240. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.05.036
16. Vicente A. N., Dip G. M., Junqueira C. The Step by Step Development of NRW Method. *SBMO/IEEE MTT-S Intern. Microwave and Optoelectronics Conf., Natal, Brazil, 29 Oct. 2011–01 Nov. 2011. IEEE*, 2011, pp. 738–742. doi: 10.1109/IMOC.2011.6169318
17. Sadeghi S., Mousavi S. M., Pommerenke D. A Method to Determine the Permittivity of Anisotropic

Thin Sheet Absorber Materials. Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 04–08 Sept. 2023. IEEE, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274270

18. Rohde and Schwarz. Measurement of dielectric material properties. Application note. Available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/

dl_application/00aps_undefined/RAC-0607-0019_1_5E.pdf (accessed: 19.11.2024).

19. Lobekin V. N., Tatarenko A. S., Bichurin M. I. Methods for measuring the parameters of metastructures based on split-ring resonators. Vestnik NovSU. Iss.: Engineering Sciences. 2020, no. 5, pp. 25–28. (In Russ.)

Information about the author

Alexandr E. Shcherbakov – Master's degree in electronics and nanoelectronics (2021, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University), Postgraduate student of the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Design engineer of JSC "Magnetron Plant". Author of 5 scientific publications. Area of expertise: radio-absorbing materials; antenna technologies; electromagnetic radiation; technologies for the development and production of anechoic chambers.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: a.e.shcherbakov@bk.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2219-2375>
