

Научная статья  
УДК 537.3; 53.07  
doi: 10.17223/7783494/4/9

## Моделирование электромагнитной герметизации блоков высокочастотной аппаратуры с применением эластомеров на основе МУНТ

Александр Сергеевич Качалов<sup>1</sup>, Владимир Владимирович Масунов<sup>2</sup>,  
Александра Андреевна Павлова<sup>3</sup>, Евгений Юрьевич Коровин<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

<sup>1</sup> *kachalov.96@inbox.ru*

<sup>2</sup> *masunovvv@mail.ru*

<sup>3</sup> *sandy.surname@gmail.com*

<sup>4</sup> *korovin\_ey@mail.tsu.ru*

**Аннотация.** Проведено исследование поведения частотных зависимостей комплексных значений диэлектрической проницаемости эластомеров на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) от их частоты и концентрации. Показано, что увеличение концентрации МУНТ приводит к монотонному росту действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости. С использованием программного пакета CST STUDIO SUITE проведено моделирование влияния технологического зазора на электромагнитную герметизацию блока высокочастотной аппаратуры. Показана возможность применения синтезированных материалов для обеспечения электромагнитной герметизации в СВЧ диапазоне частот.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, электромагнитная герметизация, многостенные углеродные нанотрубки, моделирование, эластомеры, сверхвысокие частоты

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00686, <https://rscf.ru/project/23-29-00686/>. Авторы выражают благодарность В.Л. Кузнецову и С.И. Мосеевскому за предоставленные материалы. Измерение электромагнитных характеристик образцов выполнено на оборудовании ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ».

**Для цитирования:** Качалов А.С., Масунов В.В., Павлова А.А., Коровин Е.Ю. Моделирование электромагнитной герметизации блоков высокочастотной аппаратуры с применением эластомеров на основе МУНТ // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 4. С. 79–84. doi: 10.17223/7783494/4/9

Original article  
doi: 10.17223/7783494/4/9

## Modeling of electromagnetic sealing of high-frequency equipment units using MWCNT-based elastomers

Aleksandr S. Kachalov<sup>1</sup>, Vladimir V. Masunov<sup>2</sup>, Alexandra A. Pavlova<sup>3</sup>,  
Evgeny Yu. Korovin<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

<sup>1</sup> *kachalov.96@inbox.ru*

<sup>2</sup> *masunovvv@mail.ru*

<sup>3</sup> *sandy.surname@gmail.com*

<sup>4</sup> *korovin\_ey@mail.tsu.ru*

**Abstract.** Studies of the behavior of the frequency dependences of the complex permittivity of elastomers based on multi-walled carbon nanotubes as a function of concentration have been carried out. It is shown that an increase in the concentration of the MWCNT leads to monotonous increase in the real and imaginary parts. The influence of the technological gap on the electromagnetic sealing of a block of high-frequency equipment was simulated using the CST STUDIO SUITE software package. The possibility of using synthesized materials to provide electromagnetic sealing in microwaves is shown.

**Keywords:** permittivity, electromagnetic sealing, multi-walled carbon nanotubes, modeling, elastomers, microwaves

**Acknowledgments:** The research was funded by the Russian Science Foundation, Project No. 23-29-00686, <https://rscf.ru/project/23-29-00686/>. The authors express their gratitude to V.L. Kuznetsov and S.I. Moseenkov. The electromagnetic characteristics of the samples were measured using the equipment of the TSU Center for Radio Measurements.

**For citation:** Kachalov, A.S., Masunov, V.V., Pavlova, A.A. & Korovin E.Yu. (2023) Modeling of electromagnetic sealing of high-frequency equipment units using MWCNT-based elastomers. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 4. pp. 79–84. doi: 10.17223/7783494/4/9 (In Russian).

## Введение

Развитие и совершенствование технологии производства радиокомпонентов позволило существенно повысить рабочий диапазон частот аппаратуры специального и гражданского назначения, в том числе отвечающей за безопасность жизнедеятельности человека. Продвижение в высокочастотную область дает возможность повысить скорость обработки и передачи информации, но при этом приводит к увеличению концентрации радиокомпонентов на единицу площади и, как следствие, увеличению плотности токов и температуры. Кроме того, миниатюризация аппаратуры и продвижение в высокочастотную область привели к возникновению паразитного влияния отдельных функционально не связанных блоков, вызванного образованием излучателей, размеры которых кратны рабочей длине волны. Данное излучение может приводить к возникновению электромагнитной помехи на смежных блоках и нарушению их функционирования.

Для снижения уровня электромагнитных помех наиболее часто используют методы экранирования на основе типовых конструкций, которые отражают, многократно переотражают или поглощают электромагнитное излучение внутри корпуса. Для электромагнитного экранирования применяются как сплошные экраны на основе стальных, медных, алюминиевых и магниевых сплавов, так и сетчатые [1, 2]. В справочной литературе приводятся экспериментальные данные по эффективности экранирования таких материалов, однако для случая технологического разделения экранирующего корпуса данные отсутствуют. При технологическом разделении и в результате несовершенства изготовления экранирующих корпусов возникают паразитные зазоры и щели между элементами корпуса, которые приводят к образованию диполя вследствие разности потенциалов между элементами корпуса и дальнейшему паразитному электромагнитному излучению.

Появление таких зазоров и щелей связано не только с несовершенством механической обработки, но и с дальнейшей технологией изготовления корпуса, так, например, толщина антикоррозийного покрытия магниевых сплавов составляет 20–30 мкм.

Для устранения паразитного излучения из этих технологических зазоров, как правило, применяют проводящие эластомеры, в которых в качестве активного компонента используется материалы с высокой удельной проводимостью, например, порошки меди, в том числе дополнительно покрытые серебром. Для снижения массогабаритных параметров таких

материалов могут использоваться порошки пористой меди [3], проводящих нитей [4] или композиты на основе графена [5].

Целью данной работы является разработка материала для обеспечения электромагнитной герметизации блоков высокочастотной аппаратуры с варьируемым уровнем электромагнитного экранирования и сниженными весовыми характеристиками. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи: синтезировать исходные материалы с заданными структурными параметрами методом термического разложения этилена на катализаторах металлов переходной группы; методами радиоволновой диагностики определить электромагнитные параметры изготовленных композиционных материалов; для оценки эффективности электромагнитного экранирования синтезируемых материалов использовать компьютерное моделирование с применением современных систем автоматизированного проектирования.

## Материалы и методы

Для снижения весовых характеристик материалов, применяемых для электромагнитной герметизации, в данной работе предлагается использовать многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), которые обладают уровнем электропроводности, сравнимым с медью при существенно меньшем весе.

Используемые МУНТ получены по технологии, описанной в [6], путем термического разложения этилена на Fe-Co-содержащих катализаторах при температуре 660–700°C с последующей отмывкой от катализатора в соляной кислоте. Данный метод является наиболее продуктивным и позволяет получать МУНТ с различным числом слоев и варьируемым отношением длины к диаметру [7]. Средний диаметр используемых МУНТ составил 22 нм, количество стенок – 20–25, площадь удельной поверхности – 135 м<sup>2</sup>/г. Выбор среднего диаметра и количества слоев обусловлен тем, что данный тип МУНТ обладает большими значениями комплексной диэлектрической проницаемости по отношению к МУНТ с меньшим диаметром и числом слоев [8].

В качестве полимерной матрицы использовалась смесь резиновая ИРП-1401. Смешивание производится на холодных вальцах с коэффициентом трения 1:1,15. В качестве вспомогательного вещества, облегчающего введение порошка МУНТ в матрицу, использовано силиконовое масло марки ПМС-100. Доля порошка МУНТ в смеси варьировалась от 0,5 до

4 весовых процентов. Выбор концентраций обусловлен тем, что уровень порога перколяции для данного вида трубок составляет 6–10 массовых процентов, в зависимости от типа применяемого связующего [7].

Для исследования частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости применялись векторный анализатор цепей PNA-X N5247A и метод на основе коаксиального волновода с сечением тракта 7/3,05. Для расчета комплексных значений диэлектрической проницаемости по измеренным параметрам матрицы рассеяния использовался программный продукт [9]. В основе программного продукта лежит прямой метод расчета электромагнитных параметров материалов, основанный на модифицированной модели Николсона–Роса–Виера. Метод представляет собой общий подход для расчета электромагнитных параметров материала через измеренные  $S$ -параметры. Погрешность метода не превышает 5% для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости [10].

Для моделирования влияния технологического зазора на электромагнитную герметизацию блока высокочастотной аппаратуры использовался программный пакет CST STUDIO SUITE. В качестве модели выбран куб с размером ребра 100 мм, величина зазора 500 мкм. При моделировании использовались следующие настройки: в качестве источника выбран дискретный порт с импедансом 50 Ом; форма зондирующего сигнала – гауссоида с длительностью 1 нс; частота от 300 МГц до 18 ГГц; гексагональный тип разбиения; 752 812 ячеек.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости для синтезированных материалов. Из полученных результатов видно, что увеличение концентрации введенных МУНТ приводит к равномерному увеличению значений действительных и мнимых частей диэлектрической проницаемости.

Полученные частотные зависимости использовались при дальнейшем моделировании эффективности герметизации с помощью синтезированных материалов на основе МУНТ.

На рис. 2 представлены результаты моделирования влияния технологического зазора на электромагнитную герметизацию модели блока высокочастотной аппаратуры. Видно существенное уменьшение интенсивности наведенного поля при применении материала с большей концентрацией введенных МУНТ.

На рис. 3 представлены результаты измерения напряженности электрического поля пробником, установленным на расстоянии 1 мм от технологического зазора. Моделирование показало, что излучение из объема носит резонансный характер, что, вероятно, связано с образованием щелевой антенны. Положение максимумов напряженности электрического поля незначительно изменяется по частоте с увеличением концентрации введенных МУНТ, что может быть связано с изменением электрической длины ребра куба, вследствие внесения диэлектрического материала.

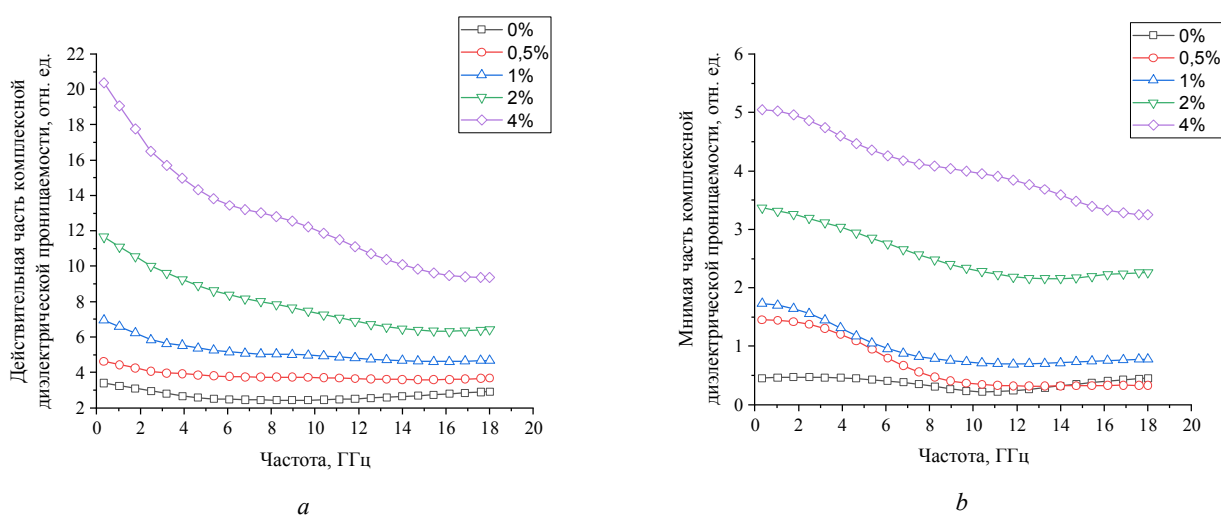


Рис. 1. Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости синтезированных материалов:  $a$  – действительная часть;  $b$  – мнимая часть

Fig. 1. Frequency dependencies of permittivity of synthesized materials:  $a$  – real part;  $b$  – imaginary part

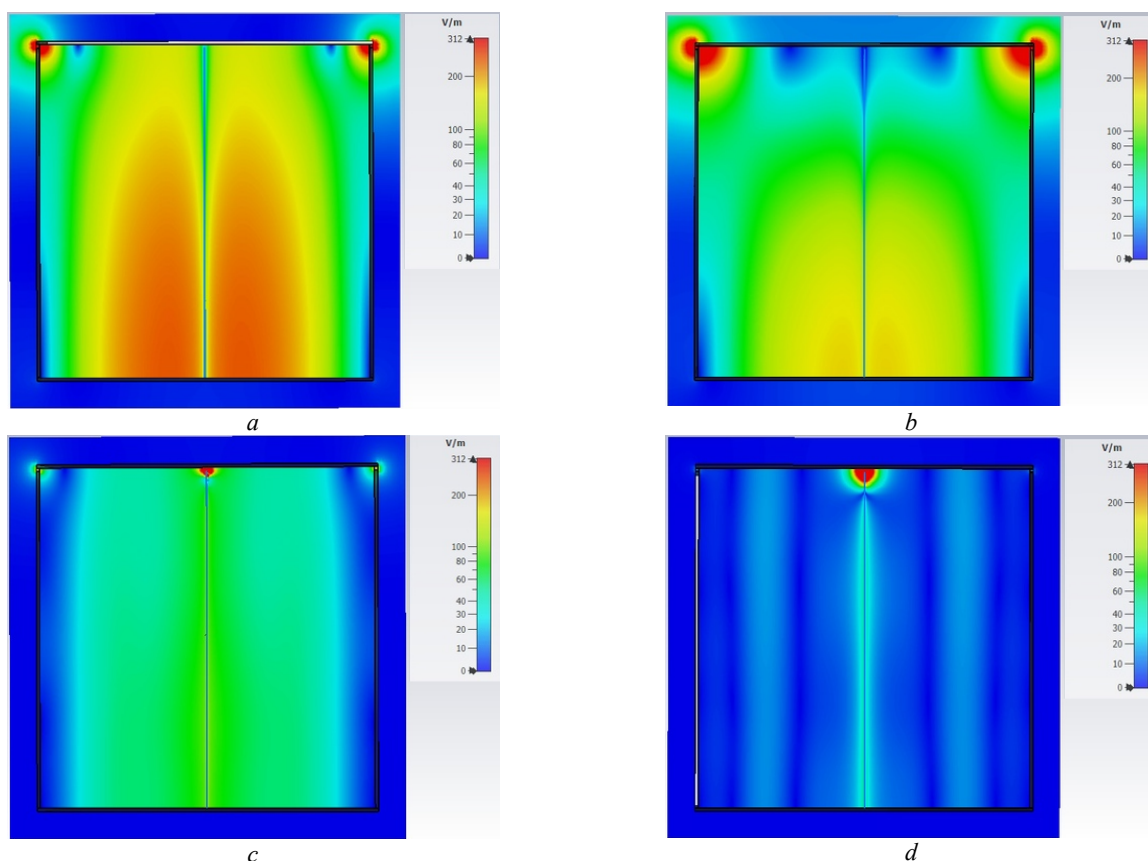


Рис. 2. Результаты моделирования прокладки в технологическом зазоре в зависимости от концентрации введенных МВНТ:  $a - 0\%$ ;  $b - 0,5\%$ ;  $c - 2\%$ ;  $d - 4\%$

Fig. 2. Results of modeling a gasket in a technological gap depending on the concentration of introduced MWCNTs:  $a - 0\%$ ;  $b - 0,5\%$ ;  $c - 2\%$ ;  $d - 4\%$

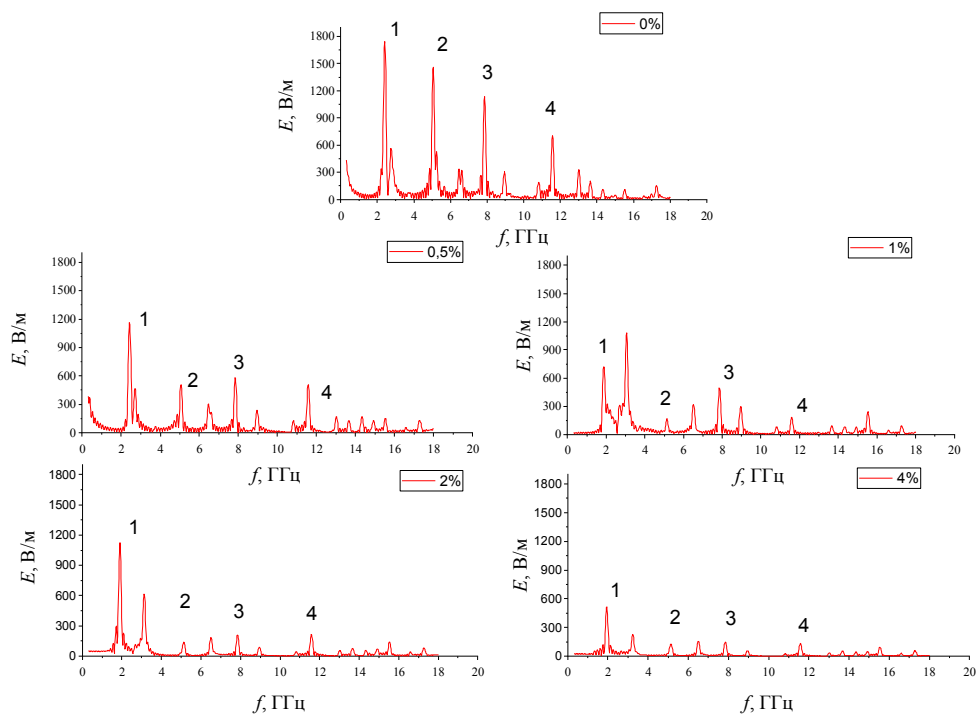


Рис. 3. Влияние устанавливаемой прокладки на интенсивность напряженности электрического поля в месте технологического зазора

Fig. 3. The influence of the installed gasket on the intensity of the electric field at the location of the technological gap

Для оценки эффективности электромагнитной герметизации выделим 4 «основных моды» на рис. 3, определяемые по максимуму напряженности электрического поля. Уровень эффективности электромагнитной герметизации определим по отношению напряженностей полей на соответствующих модах с герметизирующей прокладкой и без. Полученные результаты оценки представлены в таблице.

Видно, что изменение концентрации введенных МУНТ позволяет варьировать уровень электромагнитного экранирования блока высокочастотной аппаратуры. Оптимальное содержание МУНТ в данном случае выбирается исходя из требований к уровню наведенного внешнего поля. Данный уровень определяется при испытаниях на электромагнитную совместимость в соответствии тактико-техническими характеристиками испытываемой аппаратуры.

### Заключение

Экспериментально получены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости синтезированных композиционных материалов на основе эластомера и МУНТ с концентрацией от 0,5 до 4% по массе. Дальнейшее увеличение концентрации МУНТ вплоть до перколяционного порога проводимости позволит увеличить значения комплексной диэлектрической проницаемости материала. Однако повышение концентрации приводит к существенному снижению эластичности полимера и переходу от упругой к пластической деформации, что является существенным недостатком при демонтаже крышки

блока при проведении ремонтных и регламентных работ, а также при настройке аппаратуры.

### Оценка эффективности электромагнитной герметизации

«Мода»	1	2	3	4
0,5%	1,5	2,9	2,1	1,4
1%	1,6	8,9	2,4	3,8
2%	1,6	10	5,5	3,4
4%	3,8	11,5	7,7	5,6

Моделирование герметизации блока высокочастотной аппаратуры показало, что изменение концентрации МУНТ от 0,5 до 4% позволяет получать материалы с варьируемым уровнем электромагнитного экранирования. Это дает возможность использовать материал с меньшей или большей концентрацией в зависимости от требований к величине наведенного внешнего поля.

Таким образом, синтезированные материалы на основе МУНТ могут эффективно применяться для обеспечения электромагнитной герметизации блоков высокочастотной аппаратуры с варьируемым уровнем электромагнитного экранирования в зависимости от заданных тактико-технических характеристик герметизируемого блока.

Кроме того, применение таких материалов позволяет существенно выиграть в весовых характеристиках по сравнению с традиционно применяемыми включениями на основе металлов, что особенно важно при производстве блоков летательных аппаратов.

### Список источников

1. Иванов А.А., Комнатнов М.Е. Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 110–142.
2. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. М. : Грифон, 2019. 720 с.
3. Lu T., Gu H., Hu Y., Zhao T., Zhu P., Sun R., Wong C.-P. Three dimensional copper foam-filled elastic conductive composites with simultaneously enhanced mechanical, electrical, thermal and electromagnetic interference (EMI) shielding properties // Proceedings of IEEE Electronic components and technology conference. Las Vegas, USA, 28–31 May 2019. P. 1916–1920. doi: 10.1109/ECTC.2019.00295
4. Voicu V., Patru I., Dina L.A. Shielding effectiveness evaluation using a non-standardized method // Proceedings of International conference on electromechanical and power systems. Iasi, Romania, 11–13 Oct. 2017. P. 208–2011. doi: 10.1109/SIELMEN.2017.8123300
5. Altun M., Karteri I., Gunes M. A study of EMI shielding effectiveness of graphene based structures // Proceedings of International artificial intelligence and data processing symposium. Malatya, Turkey, 16–17 Sept. 2017. P. 1–5. doi: 10.1109/IDAP.2017.8090166
6. Мосеенков С.И., Коровин Е.Ю., Красников Д.В. Исследование электромагнитных характеристик композиционных материалов на основе МУНТ с различными структурными характеристиками // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 9–2. С. 92–96.
7. Mazov I.N., Kuznetsov V.L., Moseenkov S.I., Ishchenko A.V., Rudina N.A., Romanenko A.I., Buryakov T.I., Anikeeva O.B., Macutkevic J., Seliuta D., Valusis G., Banyis J. Structure and electrophysical properties of multiwalled carbon nanotube/polymethylmethacrylate composites prepared via coagulation technique // Nanoscience and Nanotechnology Letters. 2011. Vol. 3 (1). P. 18–23. doi: 10.1166/nml.2011.1113
8. Suslyayev V.I., Kuznetsov V.L., Zhuravlev V.A., Mazov I.N., Korovin E.Y., Moseenkov S.I., Dorozhkin K.V. An investigation of electromagnetic response of composite polymer materials containing carbon nanostructures within the range of frequencies 10 MHz – 1.1 THz // Russian Physics Journal. 2013. Vol. 55 (8). P. 970–976. doi: 10.1007/s11182-013-9909-7
9. Коровин Е.Ю., Пухальский С.О., Балаиов М.В. Программа получения и обработки данных с векторных анализаторов цепей серии PNA при измерении электромагнитных характеристик композиционных материалов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020666888, 17.12.2020. Заявка № 2020666026 от 08.12.2020.

10. Chalapat K., Sarvala K., Li J., Paroanu G. S. Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009. Vol. 57. P. 2257–2269.

#### References

1. Ivanov, A.A. & Komnatnov, M.E. (2019) Obzor analiticheskikh modelej dlya ocenki effektivnosti ekranirovaniya metallicheskih korpusov na osnove metoda ekvivalentnoj cepi [Review of analytical models for assessing the shielding effectiveness of metal enclosures based on the equivalent circuit method]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2. pp. 110–142.
2. Kechiev, L.N. (2019) *Ekranirovanie radioelektronnoj apparatury. Inzhenernoe posobie* [Shielding of radio-electronic equipment. Engineering manual]. Moscow : Grifon.
3. Lu, T., Gu, H., Hu, Y., Zhao, T., Zhu, P., Sun, R. & Wong, C.-P. (2019) Three dimensional copper foam-filled elastic conductive composites with simultaneously enhanced mechanical, electrical, thermal and electromagnetic interference (EMI) shielding properties. In: *Proceedings of IEEE Electronic components and technology conference*. Las Vegas, USA, 28–31 May 2019. pp. 1916–1920. doi: 10.1109/ECTC.2019.00295
4. Voicu, V., Patru, I. & Dina, L.A. (2017) Shielding effectiveness evaluation using a non-standardized method. In: *Proceedings of International conference on electromechanical and power systems*. Iasi, Romania, 11–13 Oct. 2017. pp. 208–211. doi: 10.1109/SIELMEN.2017.8123300.
5. Altun, M., Karteri, I. & Gunes, M. (2017) A study of EMI shielding effectiveness of graphene based structures. In: *Proceedings of International artificial intelligence and data processing symposium*. Malatya, Turkey, 16–17 Sept. 2017. pp. 1–5. doi: 10.1109/IDAP.2017.8090166.
6. Moseenkov, S.I., Korovin, E.Yu. & Krasnikov, D.V. (2014) Issledovanie elektromagnitnykh harakteristik kompozitsionnykh materialov na osnove munt s razlichnymi strukturnymi harakteristikami [Study of the electromagnetic characteristics of composite materials based on multi-walled carbon nanotubes with various structural characteristics]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 57 (9-2). pp. 92–96.
7. Mazov, I.N., Kuznetsov, V.L., Moseenkov, S.I., Ishchenko, A.V., Rudina, N.A., Romanenko, A.I., Buryakov, T.I., Anikeeva, O.B., Macutkevic, J., Seliuta, D., Valusis, G. & Banys, J. (2011) Structure and electrophysical properties of multiwalled carbon nanotube/polymethylmethacrylate composites prepared via coagulation technique. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*. 3(1). pp. 18–23. doi: 10.1166/nml.2011.1113.
8. Suslyayev, V.I., Kuznetsov, V.L., Zhuravlev, V.A., Mazov, I.N., Korovin, E.Yu., Moseenkov, S.I. & Dorozhkin, K.V. (2013) An investigation of electromagnetic response of composite polymer materials containing carbon nanostructures within the range of frequencies 10 MHz - 1.1 THz. *Russian Physics Journal*. 55(8). pp. 970–976. doi: 10.1007/s11182-013-9909-7.
9. Korovin, E.Yu., Puhalskiy, S.O. & Balashov, M.V. (2020) *Programma polucheniya i obrabotki dannykh s vektornykh analizatorov cepej serii PNA pri izmerenii elektromagnitnykh harakteristik kompozitsionnykh materialov. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM RU 2020666888, 17.12.2020. Zayavka № 2020666026 ot 08.12.2020* [A program for obtaining and processing data from vector network analyzers of the PNA series when measuring the electromagnetic characteristics of composite materials. Certificate of registration of the computer program RU 2020666888, 12.17.2020. Application No. 2020666026 dated 12.08.2020.].
10. Chalapat, K., Sarvala, K., Li, J. & Paroanu, G.S. (2009) Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 57. pp. 2257–2269.

#### Информация об авторах:

**Качалов Александр Сергеевич** – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kachalov.96@inbox.ru

**Масунов Владимир Владимирович** – студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: masunovvv@mail.ru

**Павлова Александра Андреевна** – старший преподаватель, младший научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sandy.surname@gmail.com

**Коровин Евгений Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: korovin\_ey@mail.tsu.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

#### Information about the authors:

**Kachalov Aleksandr S.**, postgraduate student, junior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kachalov.96@inbox.ru

**Masunov Vladimir V.**, student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: masunovvv@mail.ru

**Pavlova Alexandra A.**, senior lecturer, junior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sandy.surname@gmail.com

**Korovin Evgeny Yu.**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: korovin\_ey@mail.tsu.ru

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 8.11.2023; одобрена после рецензирования 28.11.2023; принята к публикации 12.12.2023*

*The article was submitted 8.11.2023; approved after reviewing 28.11.2023; accepted for publication 12.12.2023*