

Труды МАИ. 2023. № 133
Trudy MAI, 2023, no. 133

Научная статья
УДК 621.396.949

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177665>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ФЮЗЕЛЯЖА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рустам Рафкатович Гайнутдинов

Казанский национальный исследовательский технический университет, КНИТУ –
КАИ им. А.Н. Туполева,

Казань, Россия

emc-kai@mail.ru

Аннотация. В данной работе проводятся экспериментальные исследования электромагнитных характеристик образца композитного материала. Предложен экспериментальный стенд для исследования электромагнитных характеристик композитного материала. Композитный материал представлен слоистым стеклопластиковым материалом. Средний слой рассматриваемого композитного материала выполнен из пластиковой пористой структуры с внедренными металлическими лентами. Основное назначение работы - это обеспечение требуемых электромагнитных характеристик фюзеляжа летательного аппарата. Получены результаты экспериментальных исследований электромагнитных характеристик образца композитного материала. Эффективность экранирования образца композиционного материала имеет достаточно низкие значения. При этом

электромагнитные поля в основном проходят исследуемый образец композитного материала без заметного ослабления. Эффективность экранирования образца на разных частотах неравномерна, что обусловлено конструкцией композиционного материала и резонансными эффектами. Для улучшения электромагнитных характеристик исследуемого образца материала следует рекомендовать один из наружных слоев выполнить с применением углеродных волокон, что должно повысить эффективность экранирования без увеличения коэффициента отражения.

Ключевые слова: композитный материал, исследование, экспериментальный стенд, эффективность экранирования

Финансирование: данная работа выполнена согласно Соглашения № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ по теме «Повышение эффективности и надежности элементов оборудования, создание новых nano - и полимерных композиционных материалов для энергетических и транспортных систем».

Для цитирования: Гайнутдинов Р.Р. Исследование эффективности экранирования композитного материала для фюзеляжа летательного аппарата // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177665>

Original article

THE SHIELDING EFFICIENCY STUDY OF COMPOSITE MATERIAL FOR AN AIRCRAFT FUSELAGE

Rustam R. Gaynutdinov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, KNRTU-KAI,
Kazan, Russia

emc-kai@mail.ru

Abstract. Currently, composite materials are used in almost all sectors of society. Composite materials are most widely used in the development of aircraft systems, including unmanned aerial vehicles. The use of composite materials, on the one hand, improves the weight and size characteristics of objects, but on the other hand, worsens the electromagnetic ones. Thus, the trends in the use of composite materials, for example, in the construction of aircraft fuselages, are negative from the point of view of ensuring their electromagnetic compatibility. The use of composite materials worsens electromagnetic characteristics, which is due to their low and frequency-dependent electrical conductivity. Due to their low electrical conductivity and anisotropy, composite materials have low shielding efficiency. The lack of proper shielding eliminates the first line of protection of on-board equipment from external electromagnetic influences and intra-system interactions. In this work, experimental studies of the electromagnetic characteristics of a composite material sample are carried out. An experimental stand is proposed for studying the electromagnetic characteristics of a composite material. The composite material is a layered fiberglass material. The middle layer of the composite material in question is made of a plastic porous structure with embedded metal strips. The results of experimental studies of the electromagnetic characteristics of a composite material sample were obtained. The shielding efficiency of a composite material sample is quite low. In this case, the electromagnetic fields generally pass through the test sample of the composite

material without noticeable attenuation. The effectiveness of sample shielding at different frequencies is uneven, which is due to the design of the composite material and resonance effects. To improve the electromagnetic characteristics of the material sample under study, it should be recommended that one of the outer layers be made using carbon fibers, which should increase the shielding efficiency without increasing the reflection coefficient.

Keywords: composite material, research, experimental stand, shielding efficiency

Funding: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-03-2023-032 of 16.01.2023).

For citation: Gaynutdinov R.R. The shielding efficiency study of composite material for an aircraft fuselage. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177665>

1. Введение

В настоящее время композитные материалы применяются практически во всех отраслях жизнедеятельности общества. Так наиболее широкое применение композитных материалов наблюдается в авиации, ракетно-космической технике, судостроении и машиностроении. Развитие данных отраслей техники привело к широкому применению композитных материалов и потребовало новых направлений развития технологии их производства. Так развитие технологий производства композитных материалов постоянно способствует повышению их качества и расширению сферы их применения. Так современные композитные материалы легче

и прочнее лучших металлических (алюминиевых и титановых) сплавов, и их применение позволяет снизить вес изделия (самолета, ракеты, космического корабля) и, соответственно, сократить расход топлива [1-6].

Наибольшее распространение композитные материалы получают при разработке конструкций авиационных комплексов, в том числе, и беспилотных летательных аппаратов. Применение композитных материалов, в первую очередь, направлено на уменьшение массы летательных аппаратов, увеличения полезной нагрузки, экономичности, расширения функциональности применения. Уменьшение массы и увеличение полезной нагрузки летательных, в первую очередь, достигается использованием в конструкции фюзеляжей композитных материалов.

Композиционный материал это искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с чёткой границей раздела между ними [6-8]. Следует отметить, что композитные материалы характеризуют по следующим основным признакам:

- материалу матрицы и армирующих элементов;
- геометрии компонентов;
- структуре и расположению компонентов;
- методу получения.

Композитный материал в отличие от изотропных материалов (материал с постоянной удельной проводимостью во всех пространственных направлениях) характеризуется выраженной анизотропностью, когда электропроводность материала не постоянна во всех пространственных направлениях.

Применение композитных материалов с одной стороны улучшает массогабаритные характеристики объектов, но с другой ухудшает электромагнитные. Так тенденции применения композитных материалов, например, в конструкции фюзеляжей летательных аппаратов являются негативными с точки зрения обеспечения их электромагнитной совместимости. Применение композитных материалов ухудшает электромагнитные характеристики, что обусловлено их низкой и частотно-зависимой электрической проводимостью. Ввиду низкой электрической проводимости и анизотропности композитные материалы обладают низкой эффективностью экранирования. Отсутствие должного экранирования нивелирует первый рубеж защиты бортового оборудования от внешних электромагнитных воздействий и внутрисистемных взаимодействий. При этом отсутствует возможность использования фюзеляжа летательного аппарата для обеспечения металлизации бортового оборудования [10- 13].

Эффективность экранирования является основным показателем качества экрана, характеризующим его способность снижать уровень электромагнитной энергии, как воздействующей на рецептор, так и исходящей от излучающего источника [14, 15].

Цель данной работы является исследование электромагнитных характеристик образца композитного материала.

Основными электромагнитными характеристиками материала являются: коэффициент прохождения волны через лист (S_{21}); коэффициент отражения от листа (S_{11}); коэффициент поглощения (S_{31}); эффективность экранирования материала.

Оценку этих величин можно проводить для случая нормального падения электромагнитной волны.

Эффективность электромагнитного экранирования степень ослабления, обеспечиваемая экраном, зависит от трех механизмов. Первый - это отражение электромагнитной волны от экранирующего барьера. Второй - поглощение волны по мере ее прохождения через композиционный барьер (экран). Третий - многократные отражения электромагнитной волны внутри экрана от границ раздела сред «композиционный материал - воздух» и «воздух - композиционный материал» [16].

При нормальном падении плоской электромагнитной волны с амплитудой E_1 на неограниченный плоский образец материала, электромагнитная волна отражается от границы раздела двух сред E_2 и проникает сквозь материал E_3 (рис. 1).

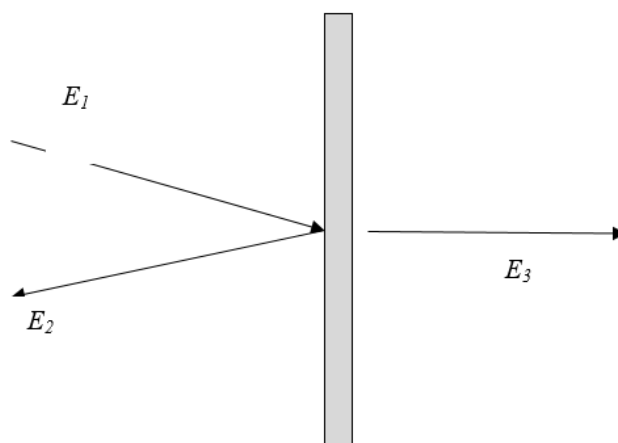


Рис. 1. Поведение электромагнитной волны на границах разделов двух сред

Если толщина слоя материала значительно меньше длины волны, связь значений амплитуд отраженной и прошедшей волн можно определить из матричных представлений, используя эквивалентную схему в виде четырехполюсника с сосредоточенной нагрузкой.

Используя данный подход можно определить коэффициенты отражения (S_{11}), прохождения (S_{21}) и поглощения (S_{31}) по измеренным значениям амплитуды падающей электромагнитной волны [16]:

$$S_{21} = E_2/E_1 \quad (1)$$

$$S_{11} = 1 - S_{21} \quad (2)$$

$$S_3 S_{31} = 2(|S_{21}| - |S_{21}|^2) \quad (3)$$

Эффективность экранирования образца композитного материала определяется из выражения:

$$SE = 20\log(E_3/E_1) \quad (4)$$

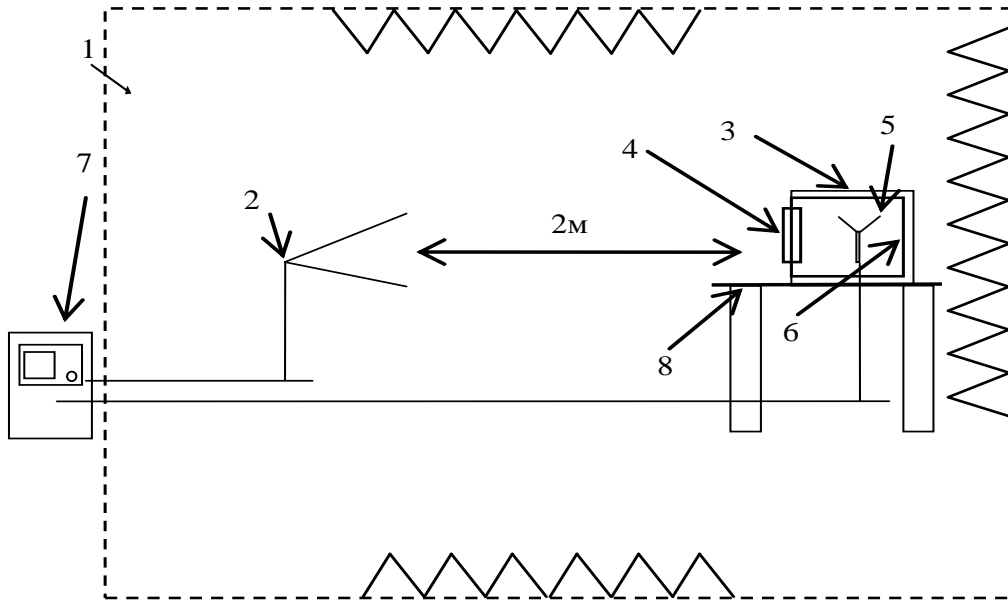
2. Экспериментальный стенд

Для проведения исследований электромагнитных характеристик композиционного материала разработан специализированный экспериментальный стенд в составе безэховой экранированной камеры. Схема экспериментального стенда и его фотографии изображены на рис. 2. Перечень измерительного оборудования, входящего в состав экспериментального стенда следующий:

- 1 - безэховая экранированная камера;
- 2 - антенна рупорная R&S HL907;
- 3 - специализированный экранированный бокс, изнутри обшитый радиопоглощающим материалом;
- 4 - композиционный материал;
- 5 - датчик напряженности электрического поля НО-6105;
- 6 - радиопоглощающий материал (феррит);
- 7 - стойка измерительная CEMS130 (в составе: измерительный приемник ESR7,

усилитель мощности ВВА100, усилитель мощности ВВА150, измеритель мощности NRP2, датчики NRP-Z9, генератор SMB100А, устройство коммутации сигналов OSP120);

8 - стол лабораторный деревянный.



а)



б)



в)

Рис. 2. Экспериментальный стенд: а – схема экспериментального стенда; б и в – фотографии стенда

Для автоматизации процесса измерений применяется программное обеспечение R&S EMC 32.

Измерения проводятся в следующей последовательности:

1. В специализированный экранированный бокс, изнутри обшитый радиопоглощающим материалом, устанавливается датчик электромагнитного поля.

При этом передняя стенка с образцом композиционного материала отсутствует.

2. Оборудование включается и на вход антенны последовательно подается гармонический сигнал мощностью 20 Вт фиксированной частоты с шагом 5 МГц (диапазон исследуемых частот от 1 ГГц до 6 ГГц).

3. Датчиком поля измеряется напряженность электрического поля падающей волны на каждой частоте исследуемого диапазона, все значения фиксируются и строится график зависимости.

4. В специализированный бокс монтируется передняя крышка с образцом

исследуемого материала.

5. В дальнейшем пункты 2 - 3 повторяются для определения прошедшего сквозь материал электромагнитного поля.

6. Далее рассчитываются значения коэффициентов. Таким образом, в работе разработан экспериментальный стенд для исследования электромагнитных характеристик композитного материала.

3. Результаты исследований

При проведении исследований на вход антенны подавался сигнал с постоянной мощностью во всем частотном диапазоне с уровнем в 20 Вт. Мощность контролировалась датчиком.

Зависимость уровня напряженности электрического поля (падающая электромагнитная волна) в зависимости от частоты, представлена на рис. 3. Измерения выполнялись датчиком НО-610 внутри экранированного бокса без композитного материала.

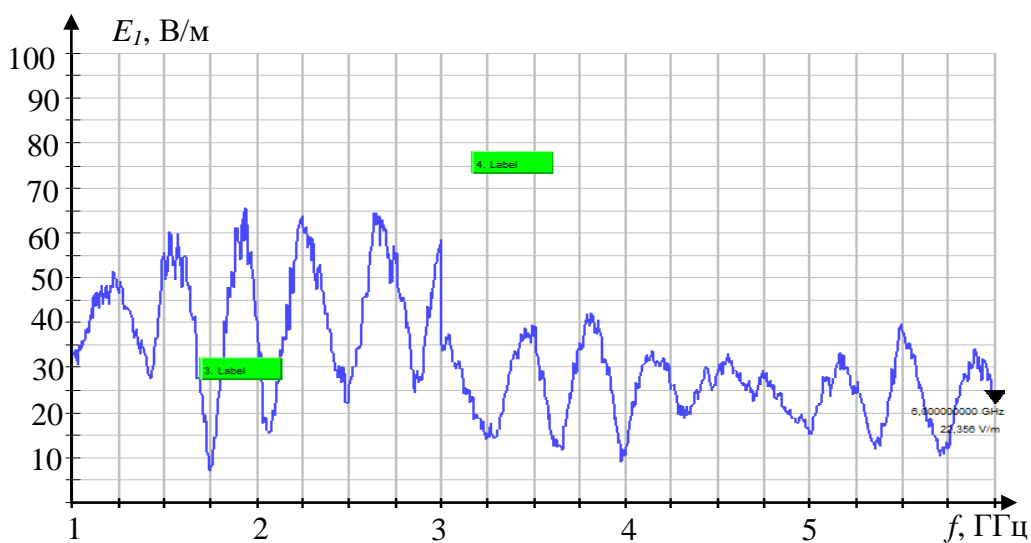


Рис. 3. Напряженность поля падающей электромагнитной волны E_1

Зависимость уровня напряженности электрического поля (прошедшая

электромагнитная волна) в зависимости от частоты, представлена на рис. 4. Измерения выполнялись датчиком НО-610 внутри экранированного бокса с закрытой крышкой из композитного материала.

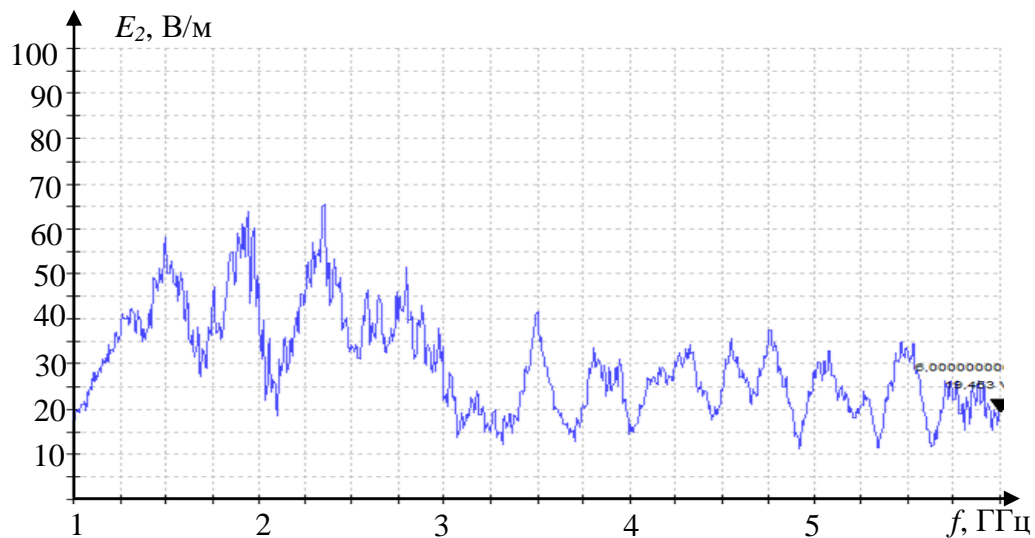


Рис. 4. Напряженность поля падающей электромагнитной волны E_2

Коэффициент прохождения (S_{21}) волны через лист композитного материала в зависимости от частоты, представлен на рис. 5.

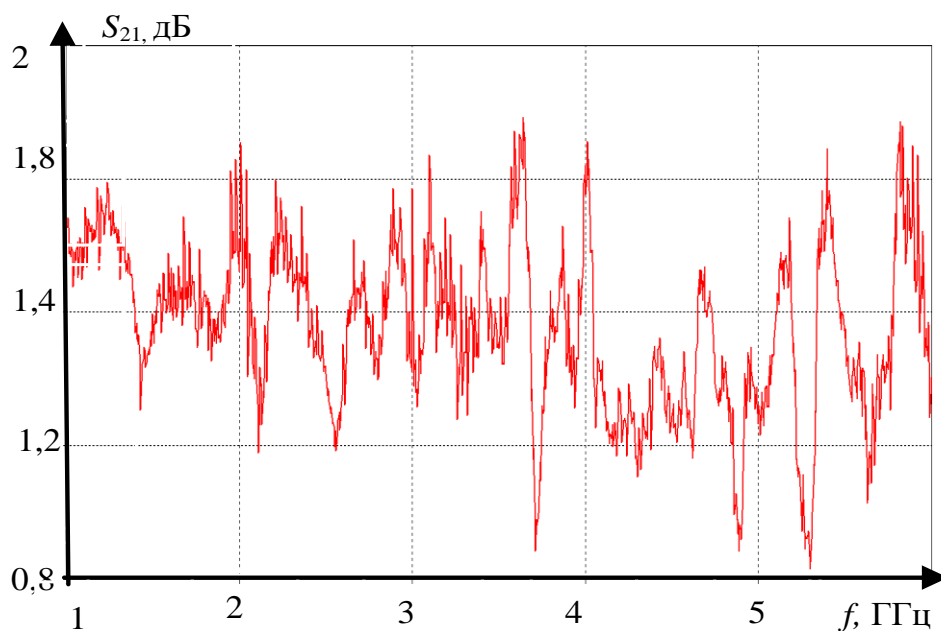


Рис. 5. Коэффициент прохождения волны через образец композитного материала

Коэффициент отражения (S_{11}) волны от листа композитного материала, в

зависимости от частоты представлен на рис.6.

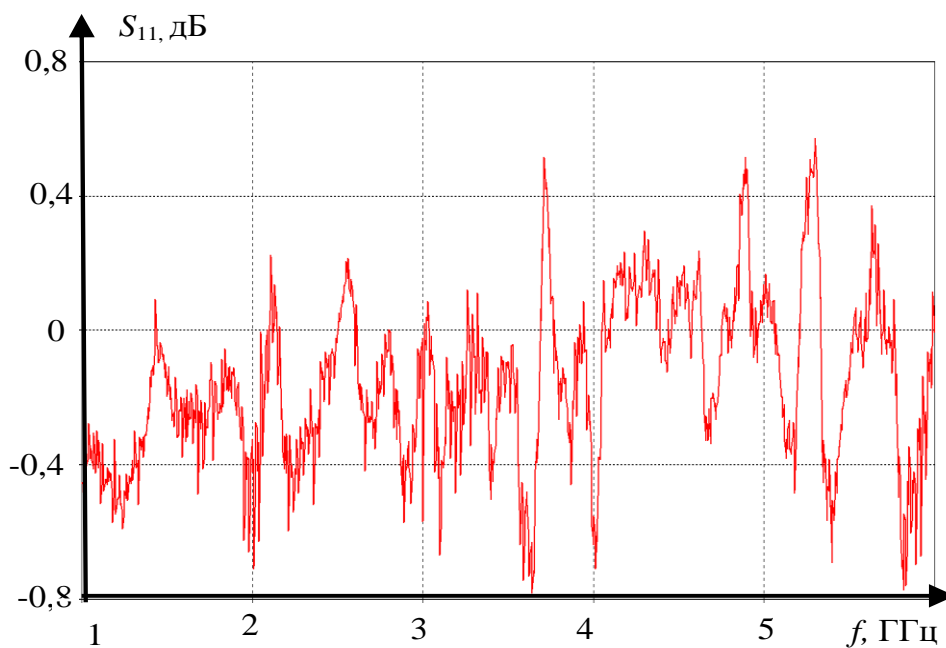


Рис. 6. Коэффициент отражения волны от образца композитного материала

Коэффициент поглощения (S_{31}) волны в образце композитного материала в зависимости от частоты представлен на рисунке 7.

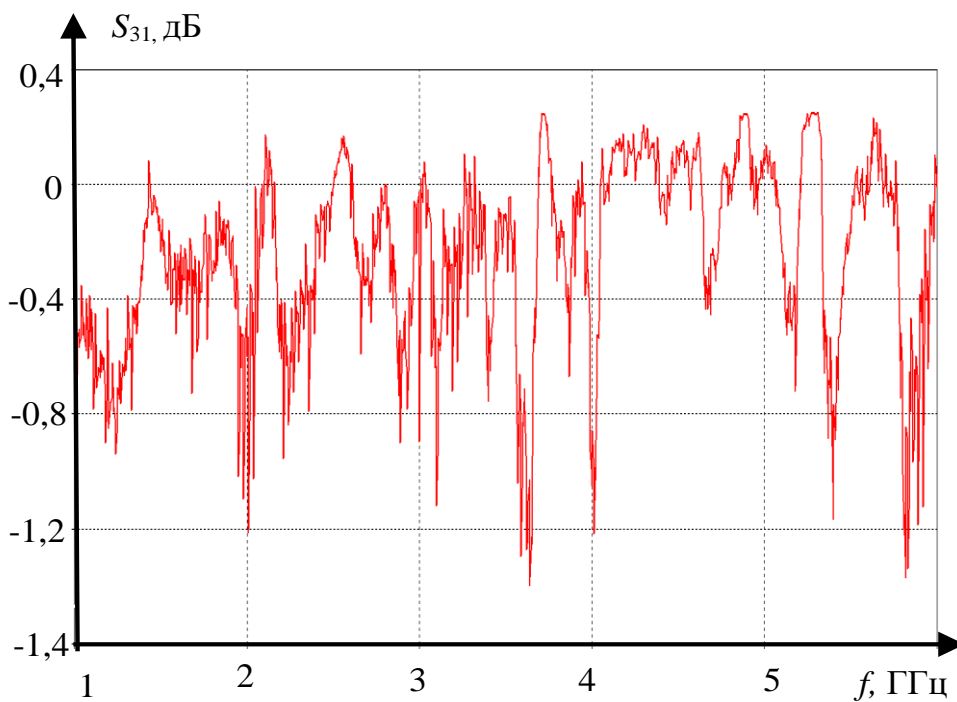


Рис. 7. Коэффициент поглощения волны в образце композитного материала

Эффективность экранирования композитного материала представлена на рис.

8. Эффективность экранирования образца композиционного материала имеет достаточно низкие значения. При этом электромагнитные поля в основном проходят исследуемый образец композитного материала без заметного ослабления. Для улучшения электромагнитных характеристик исследуемого образца материала можно предложить один из наружных слоев выполнить с применением углеродных волокон, что должно повысить эффективность экранирования без увеличения коэффициента отражения. Также целесообразно применять методы оптимизации при проектировании конструкции из композитного материала [17-20].

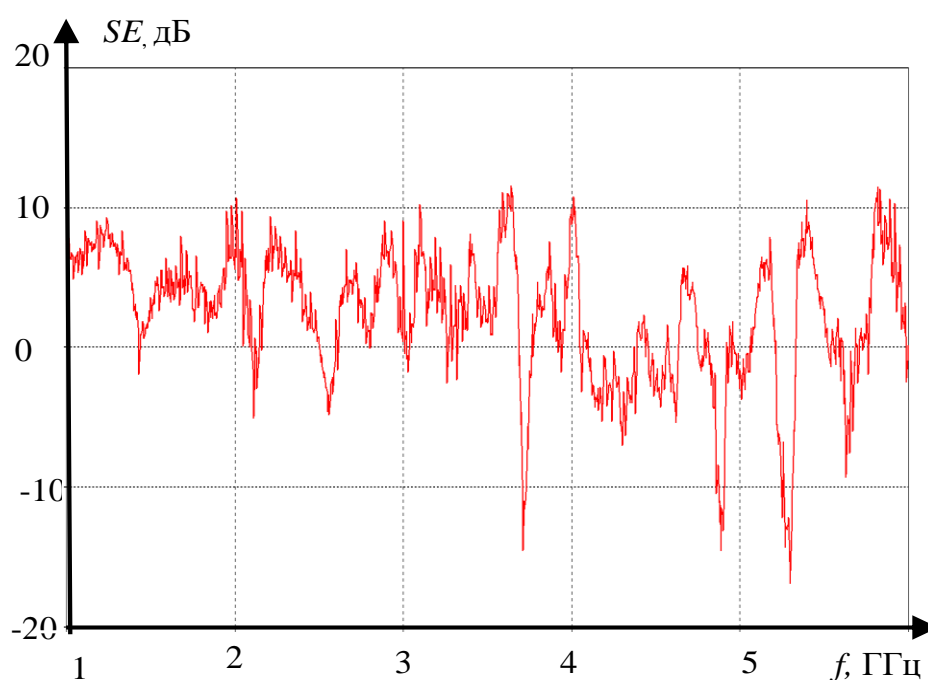


Рис. 8. Эффективность экранирования образца композитного материала

4. Выводы и заключение

По результатам работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработан экспериментальный стенд и получены результаты экспериментальных исследований электромагнитных характеристик образца композитного материала.

2. Эффективность экранирования образца композиционного материала имеет достаточно низкие значения. При этом электромагнитные поля в основном проходят исследуемый образец композитного материала без заметного ослабления.

3. Эффективность экранирования образца на разных частотах неравномерна, что обусловлено конструкцией композиционного материала и резонансными эффектами.

4. Для улучшения электромагнитных характеристик исследуемого образца материала следует рекомендовать один из наружных слоев выполнить с применением углеродных волокон, что должно повысить эффективность экранирования без увеличения коэффициента отражения.

Список источников

1. Sarto M.S., Greco S., Tamburrano A. Shielding Effectiveness of Protective Metallic Wire Meshes: EM Modeling and Validation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, vol. 56, no. 3, pp. 615-621. DOI: [10.1109/TEMC.2013.2292715](https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2292715)

2. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Воздействие преднамеренных электромагнитных помех на бортовые кабели космических аппаратов // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=40836>

3. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Electromagnetic Interference Emission from Communication Lines of Onboard Equipment of an Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Communications Technology and Electronics, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 221-227. DOI: [10.1134/S1064226920020059](https://doi.org/10.1134/S1064226920020059)
4. Holloway C.L., Sarto M.S., Johansson M. Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 833-844. DOI: [10.1109/TEMC.2005.854101](https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.854101)
5. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС. - М.: Грифон, 2014. - 448 с.
6. Dawson J.F. et al. Shielding effectiveness of non-woven carbon fibre sheets: modelling the microstructure // Proceedings of the 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC, 23-25 May, 2016, pp. 1-6. DOI: [10.1109/AeroEMC.2016.7504575](https://doi.org/10.1109/AeroEMC.2016.7504575)
7. Kong H., Li G., Jin Z. et al. Polarization-independent metamaterial absorber for terahertz frequency // International Journal of Infrared, Millimeter Wave and Terahertz Waves, 2012, vol. 33, pp. 649-656. DOI: [10.1007/s10762-012-9906-x](https://doi.org/10.1007/s10762-012-9906-x)
8. Panaretos A.H., Balanis C.A., Birtcher C.R. Shielding Effectiveness and Statistical Analysis of Cylindrical Scale Fuselage Model // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, vol. 42, no. 2, pp. 361-366. DOI: [10.1109/TEMC.2005.847392](https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.847392)
9. Gardner C.L., Poissant Y.F.C. Measurement of the Shielding Properties of Composite Materials: Comparison of the Dual TEM and Noncontact Probe Methods // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, vol. 40, no. 4, pp. 364-369. DOI: [10.1109/15.736223](https://doi.org/10.1109/15.736223)

10. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=46938>
11. Gaynutdinov R., Chermoshentsev S. Study Radiation from Radio Transmitters Antennas Influence on the UAV Onboard Equipment // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-4. DOI: [10.1109/ICOECS46375.2019.8949988](https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949988)
12. Клыков А.В., Кириллов В.Ю. Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых сетей самолетов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30760>
13. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Emission of electromagnetic interference from communication lines of onboard equipment of an unmanned aerial vehicle // Journal of Communications Technology and Electronics, 2020, 65 (3), pp. 221-227. DOI: [10.1134/S1064226920020059](https://doi.org/10.1134/S1064226920020059)
14. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Metaelement Parameters Optimization for Creation Metamaterial with Given Electromagnetic Properties // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2021, pp. 775-779. DOI: [10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537325](https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537325)
15. Zhukov P.A., Kirillov V.Y., Tomilin M.M. Study of TPMV-1S radio absorbing material for use on spacecraft, 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics // Electrical and Power Engineering (REEPE), 2021, pp. 1-5. DOI: [10.1109/REEPE51337.2021.9388009](https://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388009)

16. Holloway C.L., Sarto M.S., Johansson M. Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 833-844. DOI: [10.1109/TEMC.2005.854101](https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.854101)
17. Кириллов В.Ю., Жегов Н.А. Исследование восприимчивости бортовых кабелей космического аппарата к электромагнитным помехам в СВЧ диапазоне // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34406>
18. Gaynutdinov R.R., Suzdaltsev I.V., Chermoshentsev S.F. Optimization Unmanned Aerial Vehicle Onboard Equipment Placement // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2020, pp. 1000-1004. DOI: [10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208172](https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208172)
19. Suzdaltsev I.V., Chermoshentsev S.F., Bogula N.Yu. Genetic algorithm for onboard equipment placement inside the unmanned aerial vehicle fuselage // 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, St. Petersburg, 2016. pp. 262-264. DOI: [10.1109/SCM.2016.7519748](https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519748)
20. Gaynutdinov R., Suzdaltsev I. Genetic Algorithm for Optimization Placement of Antennas on Aircraft // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: [10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681](https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681)

References

1. Sarto M.S., Greco S., Tamburrano A. Shielding Effectiveness of Protective Metallic Wire Meshes: EM Modeling and Validation, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, vol. 56, no. 3, pp. 615-621. DOI: [10.1109/TEMC.2013.2292715](https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2292715)
2. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Trudy MAI*, 2013, no. 66. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=40836>
3. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Electromagnetic Interference Emission from Communication Lines of Onboard Equipment of an Unmanned Aerial Vehicle, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 221-227. DOI: [10.1134/S1064226920020059](https://doi.org/10.1134/S1064226920020059)
4. Holloway C.L., Sarto M.S., Johansson M. Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 833-844. DOI: [10.1109/TEMC.2005.854101](https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.854101)
5. Kechiev L.N., Balyuk N.V. *Zarubezhnye voennye standarty v oblasti EMS* (Foreign military standards in the field of EMC), Moscow, Grifon, 2014, 448 p.
6. Dawson J.F. et al. Shielding effectiveness of non-woven carbon fibre sheets: modelling the microstructure, *Proceedings of the 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC*, 23-25 May, 2016, pp. 1-6. DOI: [10.1109/AeroEMC.2016.7504575](https://doi.org/10.1109/AeroEMC.2016.7504575)
7. Kong H., Li G., Jin Z. et al. Polarization-independent metamaterial absorber for terahertz frequency, *International Journal of Infrared, Millimeter Wave and Terahertz Waves*, 2012, vol. 33, pp. 649-656. DOI: [10.1007/s10762-012-9906-x](https://doi.org/10.1007/s10762-012-9906-x)

8. Panaretos A.H., Balanis C.A., Birtcher C.R. Shielding Effectiveness and Statistical Analysis of Cylindrical Scale Fuselage Model, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 42, no. 2, pp. 361-366. DOI: [10.1109/TEMC.2005.847392](https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.847392)
9. Gardner C.L., Poissant Y.F.C. Measurement of the Shielding Properties of Composite Materials: Comparison of the Dual TEM and Noncontact Probe Methods, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1998, vol. 40, no. 4, pp. 364-369. DOI: [10.1109/15.736223](https://doi.org/10.1109/15.736223)
10. Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Nguen V.Kh. *Trudy MAI*, 2013, no. 71. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=46938>
11. Gaynutdinov R., Chermoshentsev S. Study Radiation from Radio Transmitters Antennas Influence on the UAV Onboard Equipment, *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019, pp. 1-4. DOI: [10.1109/ICOECS46375.2019.8949988](https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949988)
12. Klykov A.V., Kirillov V.Yu. *Trudy MAI*, 2012, no. 57. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30760>
13. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Emission of electromagnetic interference from communication lines of onboard equipment of an unmanned aerial vehicle, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, 65 (3), pp. 221-227. DOI: [10.1134/S1064226920020059](https://doi.org/10.1134/S1064226920020059)
14. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Metaelement Parameters Optimization for Creation Metamaterial with Given Electromagnetic Properties, *2021 International Russian*

- Automation Conference (RusAutoCon)*, 2021, pp. 775-779. DOI: [10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537325](https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537325)
15. Zhukov P.A., Kirillov V.Y., Tomilin M.M. Study of TPMV-1S radio absorbing material for use on spacecraft, 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, *Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 2021, pp. 1-5. DOI: [10.1109/REEPE51337.2021.9388009](https://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388009)
16. Holloway C.L., Sarto M.S., Johansson M. Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials with Equivalent-Layer Models, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 833-844. DOI: [10.1109/TEMC.2005.854101](https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.854101)
17. Kirillov V.Yu., Zhegov N.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 59. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34406>
18. Gaynutdinov R.R., Suzdaltsev I.V., Chermoshentsev S.F. Optimization Unmanned Aerial Vehicle Onboard Equipment Placement, 2020 *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2020, pp. 1000-1004. DOI: [10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208172](https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208172)
19. Suzdaltsev I.V., Chermoshentsev S.F., Bogula N.Yu. Genetic algorithm for onboard equipment placement inside the unmanned aerial vehicle fuselage, 2016 *XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*, St. Peterburg, 2016. pp. 262-264. DOI: [10.1109/SCM.2016.7519748](https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519748)
20. Gaynutdinov R., Suzdaltsev I. Genetic Algorithm for Optimization Placement of Antennas on Aircraft, 2019 *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: [10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681](https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681)

Статья поступила в редакцию 28.11.2023

Одобрена после рецензирования 29.11.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 28.11.2023; approved after reviewing on 29.11.2023;
accepted for publication on 25.12.2023