

3. Electrospun nanofibers in functional sensing systems / S. Ramakrishna, K. Fujihara, W.-E. Teo, T.-C. Lim, Z. Ma // *Materials Today*. 2023. Vol. 64. P. 203–218.
4. Tsareva A. D., Shtol V. S., Klinov D. V., Ivanov D. A. Electrospinning for Biomedical Applications: An Overview of Material Fabrication Techniques // *Surfaces*. 2025. Vol. 8, no. 1, Art. 7.
5. Effects of solvent and electrospinning parameters on the piezoelectric properties of PVDF membranes / Q. Wang, M. Li, X. Zhou, J. Chen, D. Liu // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 225–233.
6. MoS₂/PAN nanofibers for electrochemical detection of β -blockers / Q. Wang, J. Zhao, X. Lin, Y. Chen // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2023. Vol. 379. P. 133261.
7. Иванова Е. В., Федорова Н. В., Павлова Л. Г. Электроспиннинг растворов альгината натрия и полиэтиленоксида для биомедицинских мембран // *Полимерные материалы*. 2021. Т. 43, № 6. С. 52–59.
8. Overview of Electrospinning for Tissue Engineering Applications / M. Z. A. Zulkifli [et al.] // *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 11. P. 2418.
9. Electrospun PAN nanofiber membranes for copper ion removal from wastewater / J. Li, H. Zhang, M. Chen, L. Wang // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 3. P. 105–113.
10. Sodium alginate/polyethylene oxide electrospun nanofibers for lead ion adsorption / L. Wu, P. Zhao, Y. Liu, J. Sun // *Carbohydrate Polymers*. 2022. Vol. 278. P. 118879.
11. Кузнецов И. В., Головина О. А. Мембраны из хитозана и крахмала для очистки сточных вод методом электроспиннинга // *Вестник Казанского технологического университета*. 2021. Т. 24, № 7. С. 45–51.
12. Zhang X., Liu P., Wang Q. PLA/cellulose nanofiber composite filters for PM2.5 removal // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 442. P. 141252.
13. Chitosan/PVA nanofibers embedded with gold nanoparticles for glucose sensing / J. Zhang, H. Liu, Y. Chen, T. Wang // *Carbohydrate Polymers*. 2022. Vol. 289. P. 119342.
14. Electrospun PLA/PANI composite nanofibers for flexible sweat sensors / H. Lee, S. Park, J. Kim, J. Kang // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023. Vol. 15, no. 4. P. 5123–5134.
15. Газовые сенсоры на основе нанофибр ZnO/Pd, полученных методом электроспиннинга / В. Н. Платонов, А. П. Кузнецов, М. А. Иванова, Е. С. Гаврилова // *Sensors*. 2020. Т. 20, № 15. С. 4302–4311.
16. Гибкие сенсоры на основе PCL/Graphene нанофибр / Е. Н. Сидорова, А. А. Мельников, И. П. Королев, Т. Ю. Смирнова // *Журнал наноматериалов и технологий*. 2023. Т. 11, № 3. С. 55–63.
17. Electrospun Nanofibers and Their Application as Sensors for Healthcare / Y.-S. Zhao, J. Huang, X. Yang [et al.] // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025. Vol. 13. P. 1533367.

УДК 677.014.8:537.533.3

Е. Г. Замостоцкий^{1,2}, Д. Б. Рыклин²

¹ Витебский филиал Международного университета «МИТСО»
evgen_zam@tut.by

² Витебский государственный технологический университет
ryklin-db@mail.ru

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ РАЗЛИЧНОГО ВИДА

В статье представлены результаты исследования экранирующих свойств текстильных материалов с электропроводящими компонентами (стальные волокна, медная микро-

провода) и их двухслойных комбинаций в диапазоне частот 0,7...3,0 ГГц. Установлено, что материалы со стальными волокнами и медными нитями демонстрируют существенную эффективность экранирования электромагнитного излучения (до 14...16 дБ). При этом снижение процентного содержания стальных волокон в составе ткани приводит к снижению эффективности экранирования. Формирование двухслойных пакетов приводит к увеличению абсолютного значения коэффициента передачи.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование; текстильные материалы; спецодежда; стальные волокна; медная микропровода; двухслойные пакеты; коэффициент передачи.

Y. G. Zamastotskiy^{1,2}, D.B. Ryklin²

¹ Vitebsk Branch of International University "MITSO"

² Vitebsk State Technological University

SHIELDING OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY TEXTILE MATERIALS WITH METALLIC COMPONENTS OF VARIOUS TYPES

The article presents the results of a study of the shielding properties of textile materials with electrically conductive components (steel fibers, copper microwire) and their two-layer combinations in the frequency range of 0,7...3,0 GHz. It has been established that materials with steel fibers and copper threads demonstrate significant shielding effectiveness (up to 14...16 dB), while fabric with an antistatic thread containing the same steel fibers but in a small amount does not provide the necessary protection. The formation of two-layer packages leads to an increase in shielding effectiveness.

Keywords: electromagnetic shielding; textile materials; special clothing; steel fibers; copper microwire; two-layer packages; transmission coefficient.

Интенсификация использования источников электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ- и КВЧ-диапазонов повышает требования к безопасности персонала и актуализирует разработку эффективных средств индивидуальной защиты (СИЗ) [1]. Современные стандарты регламентируют, что защитные материалы должны обеспечивать коэффициент экранирования не менее 20 дБ (что соответствует ослаблению мощности поля на 99 %) в широком диапазоне от 30 кГц до 60 ГГц [2]. Текстильные материалы с электропроводящими элементами являются перспективной основой для создания спецодежды, сочетая защитные и эргономические свойства [3, 4]. Однако эффективность однослойного текстильного экрана часто недостаточна. Одним из ключевых решений является создание многослойных экранирующих систем, однако их эффективность не является аддитивной из-за сложных процессов многократного переотражения волн между слоями [5]. Целью настоящей работы является экспериментальная оценка экранирующих свойств текстильных материалов с различными проводящими компонентами и их двухслойных комбинаций.

В качестве объектов исследования были использованы три текстильных образца, характеристики которых представлены в таблице.

На основе образцов были сформированы два двухслойных пакета: «1 + 2» и «1 + 3». Измерения экранирующих характеристик проводились путем определения коэффициента передачи S_{21} (в децибелах) в диапазоне 0,7–3,0 ГГц.

Результаты испытаний однослойных материалов (рис. 1) показывают зависимость эффективности экранирования электромагнитного излучения от типа проводящего компонента.

Характеристики экспериментальных текстильных образцов

Номер образца	Описание материала
1	Ткань арт. 17с20-КВ-ТО производства ОАО «Моготекс» для специальной одежды. Антистатическая нить (стальное волокно – 10 %, полиэфирное волокно – 90 %). Поверхностная плотность – 171 г/м ²
2	Трикотаж переплетения интерлок из смешанной пряжи 20 текс×2 нить (стальное волокно – 10 %, полиэфирное волокно – 90 %). Поверхностная плотность – 215 г/м ²
3	Ткань полотняного переплетения из комбинированных нитей (хлопок – 40 %, медная микропроволока диаметром 0,05 мм – 60 %). Поверхностная плотность – 265 г/м ²

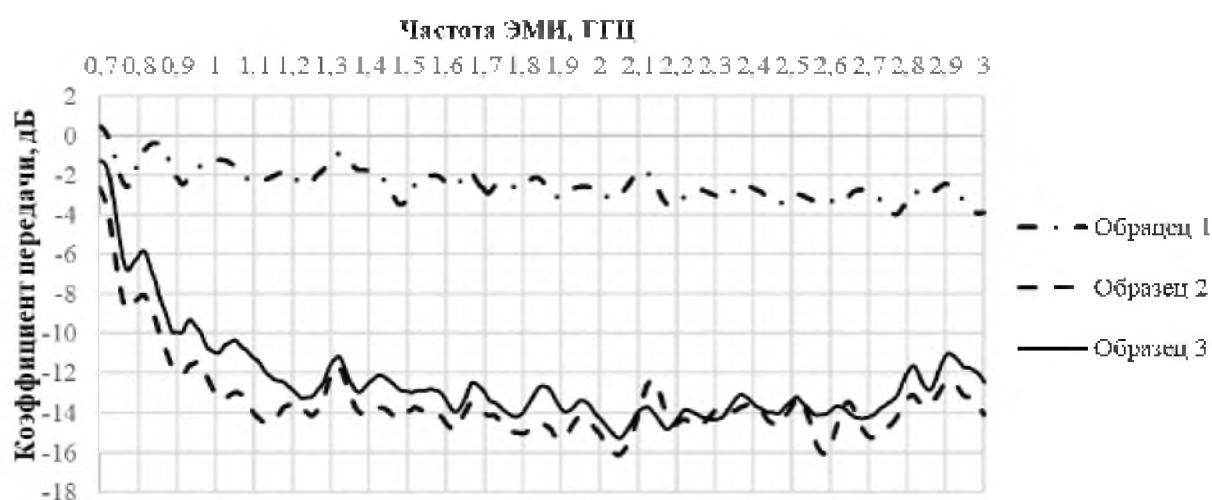


Рис. 1. Зависимость коэффициента передачи от частоты для исследуемых однослойных материалов

Образец 1 показывает низкую экранирующую способность на всем диапазоне частот (S_{21} от 0,5 до –4 дБ). Данный материал не может рассматриваться как эффективный экран самостоятельно.

Образец 2 обладает наиболее высокими экранирующими свойствами среди одиночных образцов. Эффективность быстро возрастает с частотой, достигая пиковых значений около –16 дБ в диапазоне 1,5...2,5 ГГц. Средний уровень экранирования составляет 10...14 дБ, что соответствует снижению мощности ЭМИ на 90...96 %. Установленное различие в эффективности экранирования по сравнению с образцом 1 вполне объяснимо существенно большим содержанием стальных волокон (21,5 г/м² вместо 0,8 г/м²).

Образец 3 также демонстрирует хорошую эффективность, хотя в среднем уступает образцу 2 на 1...3 дБ. Пиковые значения достигают –15 дБ (~ 96,8 % ослабления). Несмотря на то, что содержание меди в данном образце составляет 106 г/м², что существенно выше содержания стали в образце 2, а теоретически медные сетки должны обеспечивать несколько большее экранирование ЭМИ, данные образцы являются сопоставимыми по данному показателю.

Данный результат может быть объяснен некоторыми структурными и технологическими факторами. В трикотаже (образец 2) стальные волокна распределены в объеме полиэфирной пряжи. Благодаря миграции стальных во-

локон по сечению пряжи их значительная часть выходит на поверхность нити и трикотажного полотна, что способствует формированию множества токопроводящих контактов между элементами пряжи, что способствует эффективному отражению и рассеянию ЭМИ при использовании данного полотна.

В ткани с медной микропроволокой (образец 3) ситуация иная. Комбинированная электропроводящая нить вырабатывалась на пневмомеханической прядильной машине из хлопка и медной микропроволоки. В процессе формирования нити сердцевина из медной микропроволоки обкручивается хлопковыми волокнами. В результате хлопковые волокна частично перекрывают медную составляющую, закрывая проводник. Как следствие, уменьшается вероятность создания контакта между токопроводящими составляющими основы и утка.

Анализ результатов испытаний двухслойных пакетов материалов (рис. 2) выявил заметный рост эффективности, превышающий простое суммирование показателей отдельных слоев, при этом результаты для пакетов различались.

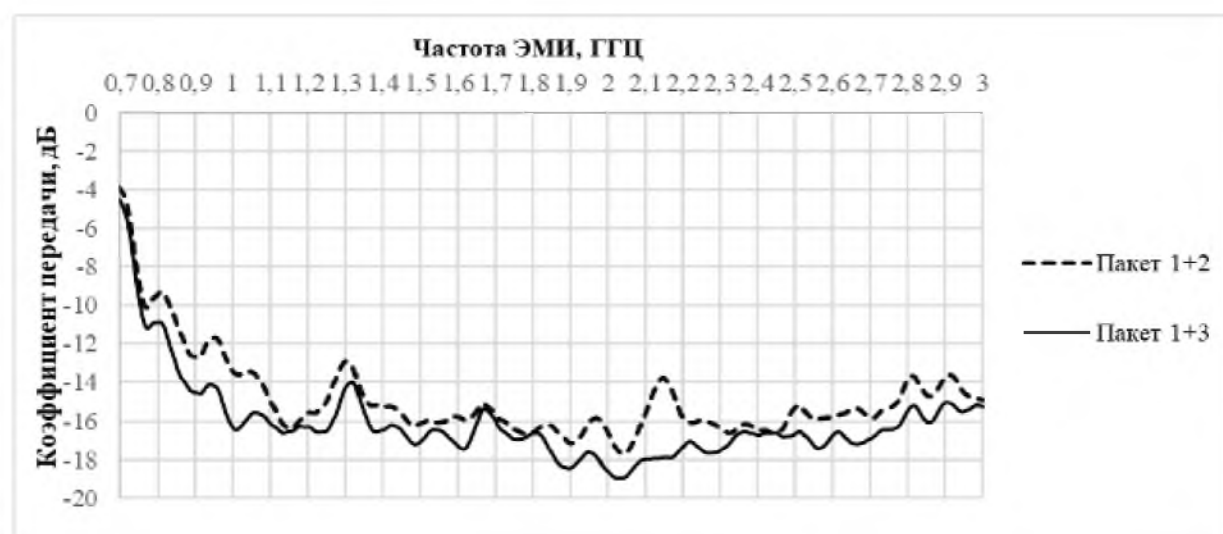


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи от частоты для двухслойных пакетов

Пакет 1 + 3 показал наивысшую экранирующую способность среди всех исследованных образцов и комбинаций. Его эффективность плавно возрастала в диапазоне 0,7...2,0 ГГц, достигнув пикового значения $-19,0$ дБ (ослабление 99,4 %) на частоте около 2,0 ГГц. В большей части исследуемого диапазона (примерно от 1,0 до 2,5 ГГц) ослабление для этого пакета стабильно превышало 15...18 дБ.

Пакет 1 + 2 также продемонстрировал усиление эффекта по сравнению с отдельными слоями, однако его максимальная эффективность была ниже и составила приблизительно -18 дБ. Средние значения ослабления для данного пакета находились в диапазоне 13...17 дБ.

Таким образом, наиболее перспективной для дальнейшего развития является комбинация 1 + 3, коэффициент экранирования которой вплотную приблизился к порогу в 20 дБ.

Полученные данные экспериментально подтверждают гипотезу, высказанную в работе [6], о том, что одним из вероятных способов повышения эффективности текстильных экранов является создание многослойных пакетов, что приводит к увеличению общей толщины экрана и массовой доли электро-

проводящих компонентов на единицу площади. Однако эффективность плотно прилегающих слоев может быть нестабильной из-за явлений интерференции и многократного переотражения внутри пакета [7]. В наших экспериментах это проявляется в виде негладких частотных характеристик, что особенно заметно на графиках для пакетов.

Заключение

1. Экспериментально подтверждено, что текстильные материалы со стальными волокнами и медной микропроволокой обладают значительным экранирующим эффектом (до 16 дБ).

2. Формирование двухслойных пакетов из исследованных материалов приводит к увеличению эффективности экранирования. Наиболее эффективной оказалась комбинация хлопчатобумажной ткани с антистатической нитью и ткани с медной микропроволокой (пакет 1 + 3), обеспечивающая максимальное ослабление до 19 дБ в диапазоне 2,0–2,1 ГГц. Комбинация со стальными волокнами (пакет 1 + 2) показала несколько меньший результат (до 18 дБ).

3. Для повышения эффективности экранирования ЭМИ в более широком диапазоне частот необходима дальнейшая оптимизация конструкции пакетов. На основании анализа литературных данных [5] можно рекомендовать введение диэлектрического промежуточного слоя между экранирующими полотнами. Это позволит минимизировать вредные резонансные явления, стабилизировать частотную характеристику, что, как следствие, приведет к повышению общей эффективности за счет независимой работы слоев.

Список источников

1. Сафонов П. Е., Левакова Н. М. Выбор рациональной структуры и изучение радиотехнических характеристик тканей для защиты от электромагнитного излучения // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2023. № 1(44). С. 36–48.
2. Харлов Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2007. 212 с.
3. Замостоцкий Е. Г., Бондарева Т. П. Разработка ткани с экранирующим эффектом и исследование ее свойств // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2013. № 2(25). С. 13–18.
4. Замостоцкий Е. Г., Костин П. А., Рассохина И. М. Защитные свойства трикотажных полотен из комбинированной электропроводящей пряжи // Химические волокна. 2022. № 1. С. 34–37.
5. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование : науч. издание. Долгопрудный : Интеллект, 2010. 120 с.
6. Влияние количества слоев ткани на экранирующие свойства электромагнитных текстильных экранов / Д. Б. Рыклин, О. А. Дубровская, Д. И. Кветковский, С. Э. Саванович // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 5(401). С. 49–55.
7. Оценка эффективности использования двухслойных тканей для экранирования электромагнитного излучения / О. А. Дубровская, Д. Б. Рыклин, С. Э. Саванович, В. В. Зайцев // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2023. № 3(46). С. 18–27.