

[Электронный ресурс]/URL: <https://doi.org/10.1177/02683555211003522-534-p>.

3. Шустов Ю.С. Основы текстильного материаловедения. Москва. ООО «Совьяж Бево» 2007. - 210 с.
4. Yermatov R., Mirzaxmedov A., Khankhadjaeva N. Research of physical-mechanical properties of compression stockings 58-я Международная научно-техническая конференция преподавателей и студентов, посвященная 60-летию УО «ВГТУ» г. Витебск, «Витебский государственный технологический университет» 16-17 апреля 2025 года 55-60-р.
5. Spenser D.J., Knitting Technology: A Comprehensive Handbook and Practical Guide 3 rd. ed.; Woodhead Publishing Limited, England and Technomic, USA, 2001, 386 p.
6. Yermatov R., Komolidinova F., Mukhtarova N., Khankhadjaeva N. Technological capabilities of knitting machines and compression hosiery // International Multidisciplinary Research in Academic Science (IMRAS) Volume. 7, Issue 10, October (2024) p.13-18 <https://doi.org/10.5281/zenodo.13957891>

© Ерматов Р.Б., Мамашоев Ф.Ф., Ханхаджаева Н.Р., 2026

УДК 677.017:621.3.049.77

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАКЕТОВ ИЗ ТКАНЕЙ РАЗНОЙ СТРУКТУРЫ СО СТАЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

DEPENDENCE OF THE ELECTROMAGNETIC SHIELDING EFFECTIVENESS ON THE USE OF PACKAGES OF FABRICS WITH DIFFERENT STRUCTURES CONTAINING STEEL FIBERS

**Замостоцкий Евгений Геннадьевич^{1,2}, Рыклин Дмитрий Борисович¹
Zamostotski Evgeniy Gennadievich^{1,2}, Ryklin Dmitry Borisovich¹**

¹ УО «Витебский государственный технологический университет», 210035, Республика Беларусь, Витебск, Московский пр., 72

¹ Vitebsk State Technological University, 210035, Republic of Belarus, Vitebsk, Moskovsky Ave., 72

² Витебский филиал УО ФПБ Международный университет «МИТСО», 210015, Республика Беларусь, Витебск, ул. М. Шагала, 8А

² Vitebsk Branch of the International University «MiTSO», 210015, Republic of Belarus, Vitebsk, M. Shagala St., 8A
(e-mail: evgenizam@gmail.com, ryklin-db@mail.ru)

Аннотация: В работе исследовано влияние расстояния между слоями в двухслойных текстильных пакетах, содержащих стальные волокна, на эффективность экранирования

электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне 0,7-3,0 ГГц. В качестве объектов исследования использованы ткань вафельного переплетения со сплошным содержанием стальных волокон Bekinox (образец 1) и две ткани саржевого переплетения с антистатической нитью, расположенной с шагом 10 мм (образцы 2 и 3). Сформированы пакеты с плотным прилеганием слоёв и с воздушной прослойкой толщиной 1 см с использованием синтетического утеплителя. Экспериментально установлено, что применение двух слоёв позволяет повысить эффективность экранирования на 8-10 дБ по сравнению с одиночным образцом 1. Введение воздушного зазора даёт дополнительный выигрыш 1-3 дБ и, что более важно, изменяет баланс механизмов экранирования: доля поглощения возрастает до 63-81%, а доля отражения снижается до 17-35%. Выявленные закономерности могут быть использованы при проектировании многослойных текстильных экранов с регулируемыми частотными характеристиками.

Abstract: The paper investigates the effect of the distance between layers in two-layer textile packages containing steel fibers on the electromagnetic shielding effectiveness in the frequency range of 0.7-3.0 GHz. The objects of study are a waffle weave fabric with continuous content of Bekinox steel fibers (sample 1) and two twill weave fabrics with an antistatic thread arranged at 10 mm intervals (samples 2 and 3). Packages with layers in close contact and with an air gap of 1 cm using a synthetic padding were formed. It was experimentally found that the use of two layers increases shielding effectiveness by 8-10 dB compared to a single layer (sample 1). The introduction of an air gap provides an additional gain of 1-3 dB and, more importantly, changes the shielding mechanism balance: the absorption fraction increases to 63-81%, while the reflection fraction decreases to 17-35%. The revealed patterns can be used in the design of multilayer textile screens with adjustable frequency characteristics.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, текстильные материалы, стальные волокна, многослойные пакеты, воздушная прослойка, вафельное переплетение, коэффициент передачи.

Keywords: electromagnetic shielding, textile materials, steel fibers, multilayer packages, air gap, waffle weave, transmission coefficient.

Современный этап развития радиоэлектроники, систем беспроводной связи и радиолокации характеризуется значительным увеличением плотности электромагнитного излучения (ЭМИ) в окружающей среде [1, 2]. Это обуславливает актуальность разработки эффективных средств защиты человека и оборудования от неблагоприятного воздействия электромагнитных полей [3].

Текстильные материалы с электропроводящими компонентами (металлические волокна, микропроволока, металлизированные покрытия) являются перспективной основой для создания гибких, лёгких и эргономичных экранирующих изделий [4, 5]. В работах [6, 7] показано, что эффективность экранирования текстильных материалов зависит от типа проводящего компонента, его содержания, а также от структуры материала. Установлено, что тканые структуры с плотной проводящей сеткой обеспечивают более высокую эффективность экранирования по сравнению с трикотажными [8].

Одним из направлений повышения эффективности экранирования является использование многослойных пакетов материалов. Однако, как отмечается в статье [9], эффективность двухслойного экрана не является простой суммой эффективностей отдельных слоёв из-за сложных процессов многократного переотражения волн между слоями. В работе [10] было

показано, что при плотном прилегании слоёв вклад внешнего слоя может быть незначительным, и высказана гипотеза о том, что введение диэлектрической (воздушной) прослойки между слоями может изменить характер взаимодействия волн и повысить общую эффективность экранирования.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка влияния наличия воздушной прослойки между слоями текстильных материалов, содержащих стальные волокна, на эффективность экранирования ЭМИ в диапазоне частот 0,7-3,0 ГГц.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Получение экспериментальных образцов тканей с различной структурой и содержанием стальных волокон.

2. Формирование двухслойных пакетов с плотным прилеганием слоёв и с воздушной прослойкой толщиной 1 см.

3. Определение влияния состава и структуры тканей и пакетов из них на эффективность экранирования ЭМИ в диапазоне 0,7-3,0 ГГц и разработка рекомендаций по проектированию многослойных экранов.

В качестве объектов исследования использованы три образца тканей, характеристики которых представлены в таблице 1.

Выбор образца 1 (ткань вафельного переплетения) в качестве подкладки обусловлен его рельефной трёхмерной поверхностью, которая создаёт развитую проводящую сетку с множеством контактных точек между нитями основы и утка и способствует эффективному экранированию ЭМИ [8]. Верх пакета (образцы 2 и 3) выбран с учётом того, что данные ткани имеют готовую водоотталкивающую и маслоотталкивающую отделку и могут дополнительно влиять на эффективность экранирования за счёт содержания антистатических нитей.

Таблица 1 – Характеристики экспериментальных образцов тканей

Обозначение	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Переплетение ткани	Вафельное	Саржевое	Саржевое
Артикул	—	14C5-KB PROtect P270	17c20-KB
Состав	Антистатическая нить – 100%	Антистатическая нить по основе и утку через 1 см. Состав без учёта антистатической нити: хлопок – 42%, ПЭ – 58%	Антистатическая нить по основе и утку через 1 см. Состав без учёта антистатической нити: хлопок – 100%
Содержание стальных волокон, г/м ²	21	1,6	1,6
Поверхностная плотность, г/м ²	205	271	171
Размер ячейки, образованной антистатическими нитями	0,4×0,4 мм	10×10 мм	10×10 мм

Примечание: содержание стальных волокон в образцах 2 и 3 рассчитано исходя из линейной плотности антистатической нити (20 текс×2), содержания стали (10%) и плотности и расположения нитей (10 нитей на 10 см по основе и утку).

Выбор ткани вафельного переплетения (образец 1) в качестве подкладки пакета обусловлен его рельефной трёхмерной поверхностью, которая создаёт развитую проводящую сетку с множеством контактных точек между нитями основы и утка и способствует эффективному экранированию ЭМИ [8]. Верх пакета (образцы 2 и 3) выбран с учётом того, что они имеют специальные отделки и могут дополнительно влиять на эффективность экранирования за счёт содержания антистатических нитей. Образец 2 благодаря маслостойкой отделке препятствует проникновению воды и жировых, масляных жидкостей, сохраняя при этом воздухо- (паро-) проницаемость. Образец 3 имеет огнезащитную отделку, которая препятствует быстрому возгоранию и распространению пламени, являясь дополнительной защитой в специальной одежде от кратковременного воздействия огня. Характеристики образцов тканей представлены в таблице 1.

На основе образцов были сформированы двухслойные пакеты:

- пакет $2+1$ (образец 2 + образец 1) и пакет $3+1$ (образец 3 + образец 1) – слои плотно прилегают друг к другу;
- пакет $2+S+1$ (образец 2 + синтепон + образец 1) и пакет $3+S+1$ (образец 3 + синтепон + образец 1).

Между слоями помещён слой синтетического утеплителя (полиэфирный синтепон) плотностью 100 г/м^2 и толщиной около 1 см. Выбор синтепона обусловлен его диэлектрическими свойствами (не влияет на экранирование) и способностью создавать стабильный воздушный зазор.

Измерения экранирующих характеристик проводились с использованием панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающего в комплекте с антеннами П6 23М в диапазоне частот 0,7-3,0 ГГц. Прибор работает по принципу отдельного выделения и детектирования уровней падающей и отражённой волн. Измерения на каждой частоте проводились трёхкратно с последующим усреднением. Калибровка прибора выполнялась перед каждой серией измерений. Оцениваемым параметром являлся коэффициент передачи S_{21} (дБ), в логарифмической форме характеризующий долю энергии, прошедшей через образец.

В результате испытаний получены частотные зависимости коэффициентов передачи для исследуемых образцов и пакетов в диапазоне 0,7-3,0 ГГц. На рисунке 1 представлены характеристики однослойных образцов 1 и 2, а также двухслойного пакета $2+1$ с плотным прилеганием слоёв. На рисунке 2 приведены аналогичные данные для образцов 1 и 3 и пакетов $3+1$ и $3+S+1$.

В результате анализа зависимостей, приведенных на рисунках 1 и 2, можно отметить, что однослойные образцы 2 и 3, в которых антистатическая нить расположена с шагом 10 мм по основе и по утку, демонстрируют невысокую эффективность экранирования. Коэффициент передачи для них составляет в среднем $-7...-8$ дБ, что соответствует ослаблению ЭМИ примерно на 75%. Такой результат объясняется разреженной структурой

проводящей сетки: размер ячейки (10×10 мм) сопоставим с длиной волны в нижней части исследуемого диапазона (428 мм), что приводит к значительному прохождению излучения. В верхней части диапазона (при 3 ГГц длина волны 100 мм) структура становится более эффективной.

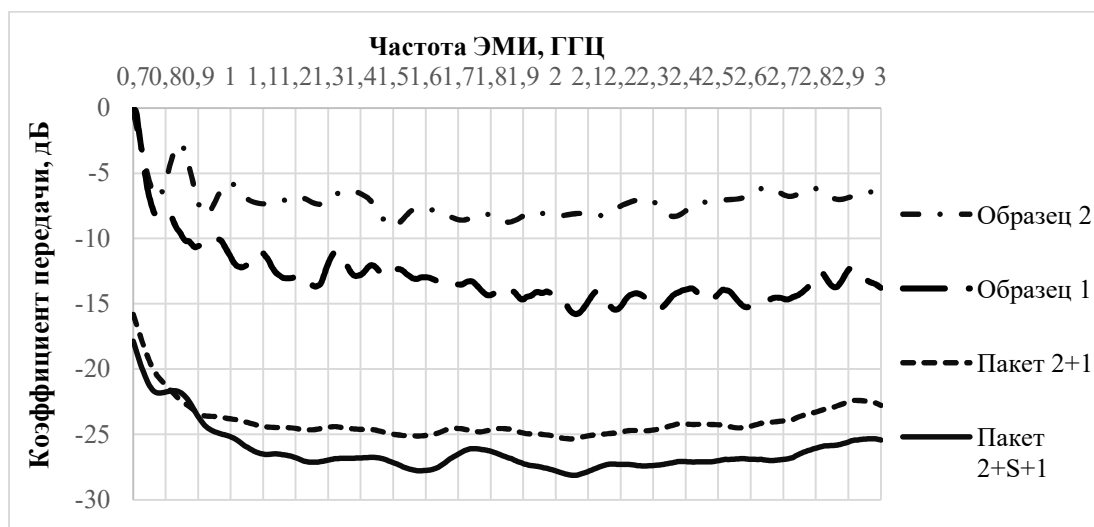


Рисунок 1 – Частотные зависимости коэффициента передачи S_{21} для образцов 1, 2 и их пакетов

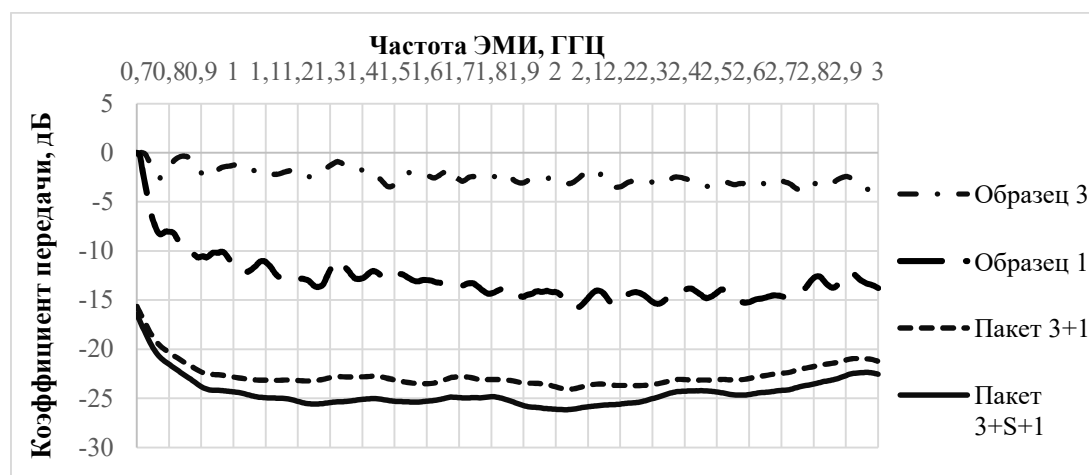


Рисунок 2 – Частотные зависимости коэффициента передачи S_{21} для образцов 1, 3 и их пакетов

Образец 1 (ткань вафельного переплетения) показывает существенно более высокую эффективность. Благодаря сплошной проводящей сетке с размером ячейки около 0,4 мм коэффициент передачи составляет от $-14 \dots -16$ дБ и ослабление будет 96-98%. Максимальная эффективность наблюдается в области 1,5-2,5 ГГц, что согласуется с данными, полученными ранее в работе [9].

При формировании двухслойных пакетов с плотным прилеганием слоёв (2+1 и 3+1) наблюдается значительное улучшение экранирования по сравнению с одиночным образцом 1. Коэффициент передачи для пакетов достигает значений $-22 \dots -25$ дБ, что на 8-10 дБ лучше, чем у образца 1. Это свидетельствует о том, что внешний слой (образцы 2 и 3) вносит

существенный вклад в общее ослабление даже при плотном контакте.

Введение воздушной прослойки с помощью синтепона (пакеты $2+S+I$ и $3+S+I$) приводит к дополнительному снижению коэффициента передачи, особенно в области частот 1,1-2,7 ГГц. Для пакета $2+S+I$ значения S_{21} достигают $-24...-27$ дБ, что на 1-3 дБ лучше, чем у пакета $2+I$. Хотя прирост эффективности невелик, анализ механизмов экранирования показывает, что наличие зазора изменяет баланс между отражением и поглощением: доля поглощения возрастает, а отражения снижается. Поскольку слой синтепона не оказывает влияния на ослабление ЭМИ, наблюдаемый эффект связан с увеличением расстояния между проводящими слоями, что снижает переотражение и позволяет каждому слою работать более независимо.

Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими положениями, изложенными в работе [9]. Согласно теории экранирования, эффективность многослойного экрана определяется не только свойствами материалов, но и расстоянием между слоями. В исследуемом диапазоне частот 0,7-3,0 ГГц длина волны составляет от 428 до 100 мм, что значительно превышает толщину воздушной прослойки (10 мм). Следовательно, эффект от введения зазора не связан с резонансными явлениями (например, с условием четверти длины волны, которое для частоты 7,5 ГГц соответствовало бы 10 мм). Увеличение расстояния между слоями снижает степень их электромагнитного взаимодействия, благодаря чему каждый из слоёв работает более автономно, что и приводит к росту общей эффективности экранирования.

1. Экспериментально подтверждено, что двухслойные пакеты с плотным прилеганием слоёв ($2+I$, $3+I$) обеспечивают значительное повышение эффективности экранирования по сравнению с одиночным слоем (образец 1): ослабление возрастает на 8-10 дБ, достигая $-22...-25$ дБ.

2. Введение воздушной прослойки толщиной 1 см между слоями позволяет дополнительно улучшить экранирование в среднем на 3 дБ, что делает экран более эффективным с точки зрения снижения вторичного облучения.

3. Наилучшие результаты достигнуты для пакета, в котором в качестве внешнего слоя используется ткань саржевого переплетения с антистатической нитью (образец 2), а в качестве внутреннего – ткань вафельного переплетения со сплошным содержанием стальных волокон (образец 1) при наличии между ними воздушного зазора 1 см. Пакеты с образцом 3 с огнезащитной отделкой показывают несколько меньшую эффективность, что может быть связано как с меньшей поверхностной плотностью, так и с влиянием типа отделки на диэлектрические свойства.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании многослойных текстильных экранов для защиты от ЭМИ в заданном частотном диапазоне. Рекомендуется предусматривать возможность создания воздушных зазоров между экранирующими слоями для повышения эффективности, а также учитывать влияние специальных отделок (водо-

маслоотталкивающей, огнезащитной) на итоговые характеристики изделия.

Список литературы

1. Hong Y., et al. Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications. – New York : Springer, 2021. – 320 p.
2. Jia L.-C., et al. Smart Textiles for EMI Shielding // Advanced Functional Materials. – 2019. – Vol. 29, No. 12. – P. 1806493.
3. Sankaran S., et al. A comprehensive review on electromagnetic shielding prospects of polymer composites // Journal of Industrial Textiles. – 2018. – Vol. 48, No. 1. – P. 153-178.
4. Рыклин Д.Б., Дубровская О.А. Оценка экранирующих свойств тканей, защищающих от воздействия электромагнитного излучения // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2022. – № 2 (43). – С. 53-63.
5. Kumar A., Lee Y., Kim S. Recent advances in flexible and lightweight electromagnetic shielding composites for textile applications // Composites Part B: Engineering. – 2024. – Vol. 271. – P. 111156.
6. Chen Z., et al. High-frequency electromagnetic shielding properties of metallic fiber-based textiles // Textile Research Journal. – 2023. – Vol. 93, No. 5-6. – P. 1234–1245.
7. Костин П.А., Замостоцкий Е.Г., Рассохина И.М. Защитные свойства трикотажных полотен из комбинированной электропроводящей пряжи // Химические волокна. – 2022. – № 1. – С. 34-37.
8. Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование. – Москва : Интеллект, 2010. – 120 с.
9. Дубровская О.А., Рыклин Д.Б., Саванович С.Э., Зайцев В.В. Оценка эффективности использования двухслойных тканей для экранирования электромагнитного излучения // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2023. – № 3 (46). – С. 18-27.
10. Рыклин Д.Б., Дубровская О.А., Кветковский Д.И., Саванович С.Э. Влияние количества слоёв ткани на экранирующие свойства электромагнитных текстильных экранов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 5 (401). – С. 49-55.

© Замостоцкий Е.Г., Рыклин Д.Б., 2026