УДК 677.02 : 621.315.4
DOI 10.47367/0021-3497_2026_3_153

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОГО СЫРЬЕВОГО СОСТАВА*

FORECASTING PERFORMANCE INDICATORS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING USING TEXTILE MATERIALS OF VARIOUS RAW MATERIAL COMPOSITIONS*

Е.Г. ЗАМОСТОЦКИЙ[1,2], Д.Б. РЫКЛИН[1], Н.Ю. ВИСЛОБОКОВ[2]

Y.G. ZAMASTOTSKIY[1,2], D.B. RYKLIN[1], N.Yu. VISLOBOKOV[2]

([1]Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь, [2]Международный университет "МИТСО", Республика Беларусь)

([1]Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus, [2]International University "MITSO", Republic of Belarus)

E-mail: Evgen_Zam@tut.by

Целью работы являлось теоретико-экспериментальное обоснование подходов к прогнозированию эффективности экранирования электромагнитного излучения с применением текстильных материалов различного сырье-

* Статья подготовлена по материалам доклада международной научно-технической конференции "Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)", которая состоялась 18-19 ноября 2025 года в учреждении образования "Витебский государственный технологический университет" (Республика Беларусь).

вого состава для проектирования новых видов экранов. Проверка возможности использования классической электроди-намической модели металлической сетки осуществлялась применительно к трем образцам тканей, изготовленным из нитей, содержащих различные виды электропроводящих компонентов (стальные волокна или медную микропроволоку) и полученных разными способами. Для оценки экранирующих характеристик данных текстильных материалов использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения, работающий по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отражающей волн в диапазоне частот 2…17 ГГц.

Установлено, что результаты теоретических расчетов эффективности экранирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Наблюдаемые расхождения могут быть объяснены особенностями структуры нитей, способствующими возникновению контактов металлических компонентов основы и утка, которые влияют на формирование экранирующей сетки. Результаты работы подтверждают перспективность использования предложенного подхода для проектирования текстильных материалов с заданными экранирующими свойствами. Для повышения точности прогноза при практическом решении задач проектирования экранирующих текстильных материалов целесообразно введение поправочных коэффициентов, учитывающих структуру нити, содержащей электропроводящий компонент, а также вид переплетения ткани.

The aim of this work was the theoretical and experimental substantiation of approaches to predicting the electromagnetic radiation shielding efficiency of textile materials with different raw material compositions for the design of new types of shield. The feasibility of using the classical electrodynamic model of a metal grid was tested using three fabric samples made from yarns containing different types of conductive components (steel fibers or copper microwire) and produced using different methods. A panoramic transmission and reflection coefficient meter operating on the principle of separate isolation and direct detection of incident and reflective waves in the frequency range of 2–17 GHz was used to evaluate the shielding characteristics of these textile materials. It was found that the results of theoretical shielding efficiency calculations are reasonably consistent with experimental data. The observed deviations can be explained by the structural features of the yarns which influence the formation of contacts between the metal components of the warp and weft which influence the obtaining of the shielding grid. The results of the study confirm the potential of the proposed approach for designing textile materials with specified shielding properties. To improve the accuracy of the forecast in the practical solution of problems of designing shielding textile materials, it is advisable to introduce correction factors that take into account the structure of the yarns containing the electrically conductive component, as well as the type of weave of the fabric.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, экранирующие ткани, прогнозирование, математическое моделирование.

Keywords: electromagnetic radiation, shielding fabric, forecasting, mathematical modeling, conductive fabrics.

Современный уровень развития электроники, телекоммуникаций и энергетики сопровождается повсеместным увеличением интенсивности электромагнитных полей (ЭМП). В связи с этим наблюдается растущий спрос на эффективные средства защиты как технических средств, так и человека. Жесткие металлические экраны, традиционно используемые для этих целей, зачастую не подходят для ситуаций, требующих от применяемых материалов гибкости, воздухопроницаемости и малого веса. В этой связи текстильные материалы с электропроводящими свойствами, а также современные полимерные композиты становятся ключевым решением для создания защитной одежды, экранирующих перегородок, элементов гибкой электроники и спецодежды [1, 2]. Такая спецодежда используется для защиты обслуживающего персонала подстанций с различным напряжением, а также для экранирования от электромагнитных волн различных бытовых приборов [3].

Разработка новых экранирующих текстильных материалов сопряжена с необходимостью трудоемкого и затратного экспериментального подбора сырьевого состава и структур переплетения. В связи с этим задача прогнозирования эффективности экранирования на этапе проектирования материала приобретает первостепенное значение [4].

Целью данной работы является теоретико-экспериментальное обоснование подходов к прогнозированию показателей эффективности экранирования электромагнитного излучения с применением текстильных материалов различного сырьевого состава для использования при проектировании новых видов экранов.

В настоящее время сформировалось несколько принципиально различных подходов к решению этой задачи, каждый из которых обладает своими преимуществами, областью применения и ограничениями.

При рассмотрении классификации и анализе подходов к прогнозированию эффективности экранирования на сегодняшний день можно выделить три основных класса:

1. Применение эмпирико-статистических моделей на основе текстильных параметров. Данный подход основан на установлении математических зависимостей экранирующих свойств материала от их параметров, таких как поверхностная плотность ткани, плотность нитей по основе и утку, диаметр пряжи, тип переплетения и процентное содержание проводящего компонента. Так, на основе регрессионного анализа экспериментальных данных в работах [4, 5] приводятся эмпирические зависимости экранирующих свойств тканей, защищающих от воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ).

В работе [4] приведена зависимость коэффициента прохождения ЭМИ от размера ячейки между нитями, содержащими медную проволоку, представленная на рис. 1.

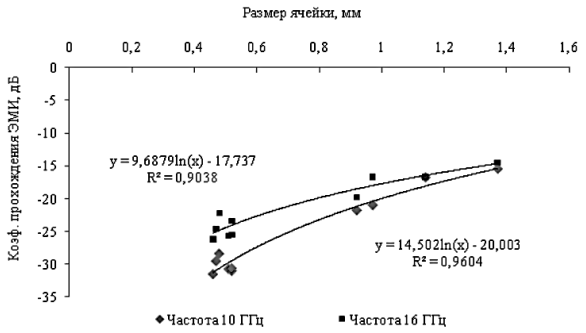


Рис. 1

На графиках коэффициент прохождения имеет отрицательное значение, так как он соответствует результатам расчетов по следующей формуле:

$$Э_{дБ} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right), \qquad (1)$$

где $Э_{дБ}$ – коэффициент прохождения, дБ; P – мощность излучения после экрана, Вт; P_0 – мощность излучения до экрана, Вт.

В работе [5] осуществлен анализ аналогичной зависимости эффективности экранирования металлической сетки от безразмерного параметра a/λ (рис. 2: a – расстояние между осями проволок; 2r – диаметр проволоки; λ – длина волны падающего излучения; B – коэффициент передачи, дБ).

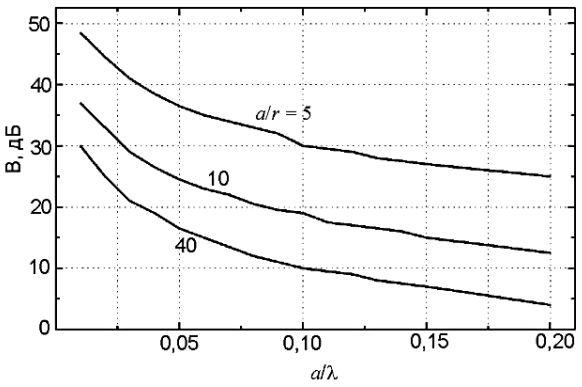


Рис. 2

Положительные значения коэффициента передачи в данном случае основаны на том, что при его расчетах использована формула:

$$B = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_0}{P}\right). \qquad (2)$$

На представленных кривых рис. 2 наблюдается резкое снижение эффективности экранирования при критическом значении $a/\lambda \approx 0{,}5$. Эта точка соответствует условию, когда длина волны излучения становится приблизительно равной удвоенному размеру ячейки сетки ($\lambda \approx 2a$). При дальнейшем уменьшении длины волны ($\lambda < 2a$) экранирующие свойства структуры значительно ухудшаются, так как электромагнитная волна получает возможность эффективно проникать через отверстия сетки. Данная универсальная зависимость "размер ячейки – длина волны" служит важным физическим ориентиром и наглядным инструментом для предварительного выбора геометрических параметров сетки при проектировании экранов под заданный частотный диапазон.

Главным достоинством подхода, основанного на применении эмпирико-статистических моделей, является то, что в данном случае они учитывают некоторые технологические параметры структуры текстильных материалов. К недостаткам данного подхода относится существенная зависимость от конкретного набора экспериментальных данных и низкая способность прогнозирования за пределами исследованного диапазона частот. Кроме того, данный тип моделей не учитывает физические механизмы экранирования (доли отражения и поглощения излучения).

2. Электродинамические модели, основанные на теории длинных линий и граничных условиях. Для теоретического описания процессов экранирования в работе [8] применяется классический подход, основанный на строгом решении уравнений Максвелла для слоистых сред. В его основе лежит рассмотрение экранирующего материала как однородной или слоистой среды с заданными комплексными диэлектрической (ε) и магнитной (μ) проницаемостями.

Примером реализации данного физического подхода является исследование экранирующей эффективности металлической сетки на сапфировой подложке, проведенное в работе [9], в которой показано, что расчеты по электродинамической модели удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными в широком диапазоне частот (от 300 МГц до 18 ГГц), подтверждая применимость подхода для комбинированных структур "диэлектрик-сетка-диэлектрик". Достоинства данного подхода – это способность прогнозировать частотную зависимость эффективности экранирования и учитывать взаимодействия экранирующего слоя с диэлектрической подложкой. Основными недостатками подхода являются высокая сложность расчетов, необходимость точного знания электрофизических параметров всех компонентов материала, плохая применимость для неоднородных сетчатых структур без введения значительных упрощений.

3. Гибридные (полуэмпирические) подходы. Это направление сочетает в себе строгость физических моделей и практичность эмпирических корреляций. Суть подхода заключается в том, что за основу берется аналитическая электродинамическая модель, которая затем корректируется с помощью эмпирических коэффициентов, учитывающих специфику реальной текстильной структуры. Ярким примером является модель, представленная в работе [7]. В ней для прогнозирования эффективности экранирования ткани, содержащей волокна нержавеющей стали, используется концепция "эквивалентного металлического экрана".

Расчет начинается с классической электродинамической формулы для сплошного металлического слоя, толщина которого вычисляется из объема металла в ткани. Для учета неидеальности структуры в модель вводится поправочный коэффициент (ε), зависящий от типа переплетения и плотности ткани, значения которого определяются экспериментально. Такая модель показала высокую точность для конкретного класса материалов.

Другим примером является использование формулы для сплошной проводящей пленки с эффективным поверхностным сопротивлением, рассчитываемым из геометрии сетки [10]. Достоинством данного подхода является разумный баланс: учет физических основ экранирования при сохранении практической применимости за счет калибруемых коэффициентов. К недостаткам можно отнести необходимость проведения предварительных экспериментов для калибровки и то, что точность прогноза сильно зависит от правильности выбора и определения этих корректирующих параметров. Современные исследования подтверждают эффективность гибридных подходов [11], в том числе с применением методов машинного обучения [12].

Сравнительный анализ рассмотренных подходов систематизирован в табл. 1.

Таблица 1

Критерий	Эмпирико-статистические модели	Электродинамические модели	Полуэмпирические модели
Вид используемых моделей	Регрессионные, корреляционные	Аналитические, основанные на строгой физике	Феноменологические, параметрические
Физическое основание	Статистическая корреляция между параметрами структуры и измеренной эффективностью экранирования	Решение уравнений Максвелла для модели структуры	Эмпирические поправки к упрощенным теоретическим моделям
Учет текстильной структуры	Прямой, через геометрические параметры	Опосредованный, через эффективные материальные параметры (ε, μ, σ)	Частичный, через калибруемые коэффициенты
Точность прогноза	Высокая в узком диапазоне условий создания модели	Высокая при точном знании параметров модели	Высокая после калибровки в заданном диапазоне
Универсальность	Низкая (применима только к аналогам обучающей выборки)	Высокая (может быть применена к широкому классу материалов)	Умеренная (справедлива в области валидации модели)
Сложность реализации	Низкая (требует базы экспериментальных данных)	Высокая (требует глубоких знаний в электродинамике)	Умеренная (требует и данных, и упрощенной теории)
Учет частотной зависимости	Слабый, имплицитный (заложен в данных)	Прямой, фундаментальный (является результатом)	Частичный, через частотно-зависимые параметры

Таким образом, анализ существующих подходов позволяет сделать вывод о целесообразности применения для текстильных материалов именно электродинамических моделей, верифицируемых и уточняемых на основе экспериментальных данных с учетом их реальной структуры. В представленном исследовании для этой цели в качестве базовой взята классическая модель металлической сетки [8], точность которой для различных типов текстильных материалов проверена экспериментально, а наблюдаемые расхождения проанализированы для возможной последующей коррекции модели.

Для того чтобы количественно охарактеризовать эффективность (Э) экранирования поля электромагнитной волны, можно использовать следующее соотношение:

$$Э = \frac{P_0}{P}. \quad (3)$$

Введенный безразмерный коэффициент Э является количественной мерой эффективности экранирования.

Известно, что проникновение поля через отверстия металлической сетки преимущественно зависит от размеров отверстий, а диаметр проволоки при этом играет незначительную роль. При этом вполне допустимо рассматривать проникновение поля сквозь толщу проволок и через отверстия сетки независимо друг от друга, считая в первом случае экран замкнутым, а во втором – тонкостенным из идеального проводника. Тогда для оценки результирующей эффективности экрана из сетки можно использовать следующую формулу из монографии [8]:

$$Э = \frac{Э_з \cdot Э_{отв}}{Э_з + Э_{отв}}, \qquad (4)$$

где $Э_З$ – эффективность замкнутого экрана, а $Э_{ОТВ}$ – эффективность экрана из идеального проводника, также определяемые как отношение мощностей излучения.

В этом случае при определении эффективности экранов из металлической сетки с квадратной ячейкой будем считать, что фронт волны излучения падает на экран под прямым углом, соответственно вектор напряженности электромагнитного поля (Е) будет параллелен одной группе проволок сетки и перпендикулярен другой. Влияние проволок сетки, параллельных вектору напряженности, в таком случае будет пренебрежимо мало, в связи с чем при проведении исследований им можно пренебречь [8].

Кроме того, учтем, что диаметр D проволоки и характерный размер ячеек сетки "a" должны быть значительно меньше длины волны λ ЭМИ. Для всех образцов тканей, полученных полностью из антистатических нитей, содержащих электропроводящие компоненты, которые далее будут исследованы в данной работе, средний размер ячейки "a" составляет 0,43…0,5 мм, а диаметр проволоки D имеет еще меньшее значение.

Полученные при расчетах значения $a/\lambda_{min} \ll 1$ и $D/\lambda_{min} \ll 1$ подтверждают, что геометрические параметры сетки значительно меньше минимальной длины волны в рабочем диапазоне, что является необходимым условием применимости выбранной электродинамической модели. Поскольку влияние поверхностного эффекта незначительно, эффективность экрана из сетки будет соответствовать эффективности сплошного экрана из того же металла той же толщины, что и эквивалентный слой металла, определяемый из условия равенства проводимостей. Это эквивалентно предположению, что ток, приходящийся на единицу длины экрана, одинаков в обоих случаях. Однако с повышением частоты ЭМИ заметно возрастет роль индуктивного сопротивления, обусловленного магнитным полем внутри металла, в связи с чем эффективность сетчатого экрана на высоких частотах будет снижаться по сравнению со сплошным экраном той же толщины, так как индуктивное сопротивление препятствует протеканию тока.

Соответственно, эффективность экрана из металлической сетки, понимаемая как соотношение напряженностей электромагнитного поля излучения до прохождения экрана и после него, может быть определена по следующей формуле, выведенной на основе известных из электродинамики формул, а также волнового уравнения для поля электромагнитной волны излучения в [8]:

$$Э = \frac{\lambda}{2a\left|\ln\left(\frac{2a}{D}\right) - 1{,}2 + \left(\frac{\lambda \cdot R}{120\pi}\right)(\alpha(u) + i\beta(u))\right|}, \qquad (5)$$

где λ – длина волны излучения, м; a – размер ячеек сетки, м; D – диаметр проволоки сетки, м; R – удельное сопротивление проволоки сетки без изоляции, Ом·м; i – мнимая единица.

Параметры α и β могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\alpha = 0.5\frac{u \cdot [ber(u) \cdot ber`(u) + bei(u) \cdot bei`(u)]`}{[ber`(u)]^2 + [bei`(u)]^2}, \quad 6)$$

$$\beta = 0.5\frac{u \cdot [ber(u) + bei(u)]`}{[ber`(u)]^2 + [bei`(u)]^2}, \qquad (7)$$

где ber(u) и bei(u) – соответственно действительная и мнимая части функции Бесселя от аргумента u; ber`(u) и bei`(u) – про-

изводная от действительной и мнимой части функции Бесселя соответственно.

При этом безразмерный параметр u может быть вычислен по следующей формуле:

$$u = \frac{D}{A}\sqrt{0{,}5f}. \qquad (8)$$

При проведении расчетов принимались следующие значения параметра А:

- для меди А = $6{,}6\times10^{-2}$ м·Гц$^{-1/2}$;
- для стали А = $1{,}6\times10^{-2}$ м·Гц$^{-1/2}$ [9].

Так как в большинстве публикаций уровень ослабления интенсивности или мощности излучения электромагнитного поля после прохождения экрана из металлической сетки экспериментально измеряется в процентах или децибелах, то для сравнения расчетных результатов с экспериментальными необходимо перейти от безразмерной величины Э к вышеуказанным характеристикам.

Для сопоставления расчетных данных с экспериментальными безразмерная эффективность экранирования Э пересчитывалась в коэффициент передачи в децибелах (дБ) аналогично расчету по формуле (2). Снижение мощности электромагнитного излучения за счет использования экранирующей ткани в процентах рассчитывалось по формуле:

$$Э_{\%} = (1 - 1/Э) \cdot 100\%. \qquad (9)$$

Для проверки данных моделей эффективности экранирования электромагнитного излучения текстильных материалов и сравнения их с экспериментальными было выработано 3 образца ткани из различных электропроводящих нитей, характеристики которых представлены в табл. 2.

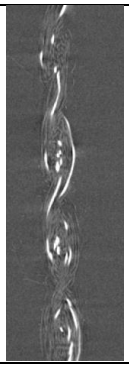
Вариант пряжи 1 произведен из смеси полиэфирных и стальных волокон по кардной системе прядения хлопка [6].

Комбинированная электропроводящая нить из хлопка и медной микропроволоки (вариант 2) выработана на пневмомеханической прядильной машине по технологии, описанной в работе [13]. Суть способа ее получения заключается в индивидуальной подаче компонентов в прядильную камеру. Медная микропроволока подавалась через осевой канал ротора прядильной камеры, а хлопковая лента по обычной технологии в зону дискретизации. В итоге вырабатывалась электропроводящая нить линейной плотности 40 текс.

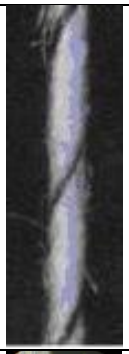
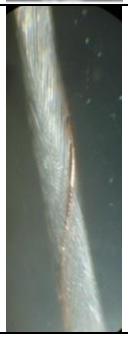
Комбинированная электропроводящая нить из полиэфирной комплексной нити и медной микропроволоки (вариант 3) вырабатывалась с применением двух переходов тростильно-крутильных машин [13].

В табл. 2 приведены фотографии выработанных электропроводящих нитей. Для более явного визуального эффекта фотография смешанной пряжи получена с использованием микро- и нанофокусной исследовательской рентгеновской системы для компьютерной томографии General Electric V|tome|X S 240 (Германия).

Таблица 2

№ варианта нити	Название	Линейная плотность, текс	Состав пряжи/нити	Оборудование для получения нити, пряжи	Изображение нити/пряжи
1	Смешанная пряжа	20 текс × 2	90 % полиэфирных волокон и 10 % стальных волокон Bekinox	Кольцевая прядильная машина	

Окончание табл. 2

2	Комбинированная нить	42	40% хлопок, 60 % медная микропроволока диаметром 0,05 мм	Пневмомеханическая прядильная машина	
3	Комбинированная нить	50	65%, полиэфирные комплексные нити, 35% медная микропроволока диаметром 0,05 мм	Тростильно-крутильная машина	

В табл. 3 приведены характеристики выработанных тканей. Поскольку выбранная модель описывает экранирование ЭМИ решеткой с квадратными ячейками, а структура реальных тканей имеет отличную от квадрата геометрию, то для проведения расчетов был введен эквивалентный размер ячейки. Он рассчитывался для каждого переплетения как среднее арифметическое значений шага нитей по основе и утку. Этот усредненный параметр "а" позволил использовать электродинамическую модель для количественной оценки экранирующего эффекта исследованных образцов.

Таблица 3

Название	Вид используемой пряжи/нити в основе и в утке	Переплетение ткани	Плотность ткани по основе/по утку, нит./10 см	Размер ячейки по основе/по утку, мм	Средний размер ячейки а, мм
Образец 1	Смешанная пряжа 1	Вафельное	130/310	0,77/0,32	0,5
Образец 2	Комбинированная нить 2	Полотняное	230/210	0,43/0,46	0,45
Образец 3	Комбинированная нить 3	Саржевое	250/210	0,40/0,46	0,43

Для оценки экранирующих характеристик данных текстильных материалов использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18, состоящий из блока обработки измерительных сигналов и блока генератора качающейся частоты (ГКЧ), работающий по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отражающей волн. Излучение и прием электромагнитных волн обеспечивались с помощью антенн П6 23М в диапазоне частот 2…17 ГГц. Измерения параметров на каждой из частот проводились троекратно. Для задания начальных параметров измерений (диапазона частот, вида измеряемого параметра) и систематизации их результатов использовалось специальное программное обеспечение. В процессе измерений на каждой из частот указанного диапазона генерировались ЭМИ с уровнем, определенным на этапе калибровки, после чего снимались показания измерителя мощности.

В результате испытаний опытных образцов текстильных материалов получены зависимости коэффициентов передачи от частоты ЭМИ в диапазоне 2…17 ГГц (рис. 1…3).

Анализ экспериментальных результатов показал, что значения коэффициента пере-

дачи (рис. 3) образца 1 в частотном диапазоне от 2 до 17 ГГц составили в среднем 25,7 дБ, что соответствует эффективности экранирования 99,73 %.

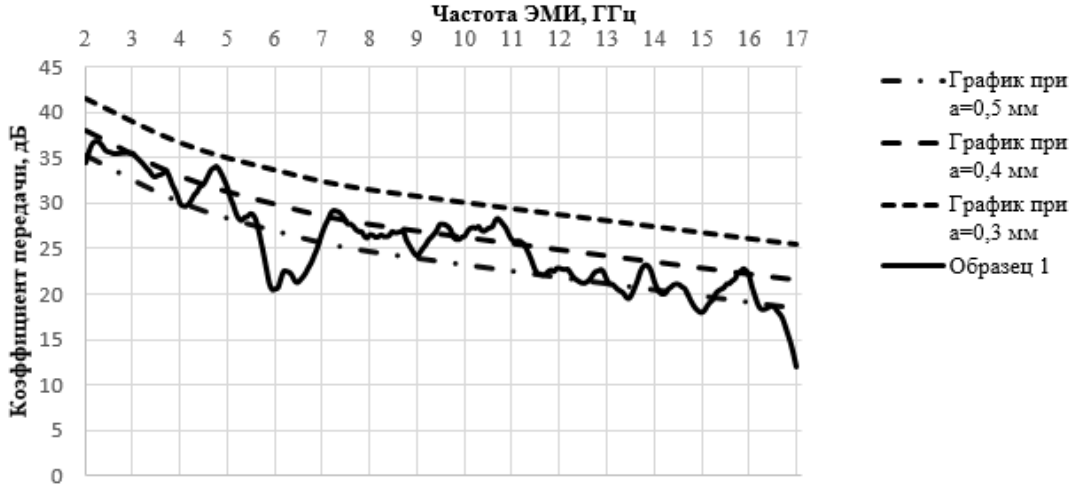


Рис. 3

Анализируя графики, представленные на рис. 3, можно отметить, что экспериментальные данные демонстрируют высокую степень соответствия результатам расчетов, произведенных при среднем значении а = 0,5 мм. Это свидетельствует о применимости модели для материалов на основе смешанной пряжи со стальными волокнами.

При этом имеют место отклонения фактических данных от расчетных как в большую, так и меньшую сторону на величину до 8 дБ. Указанные расхождения могут быть связаны с неравномерностью распределения стальных волокон по длине антистатической пряжи, а также их пространственным распределением по ее сучению, в результате чего между волокнами возникают дополнительные эффекты, не учитываемые теоретической моделью.

Значения коэффициента передачи образца 2 в частотном диапазоне от 2 до 17 ГГц составили в среднем 24,7 дБ (рис. 4), что соответствует эффективности экранирования 99,66 %.

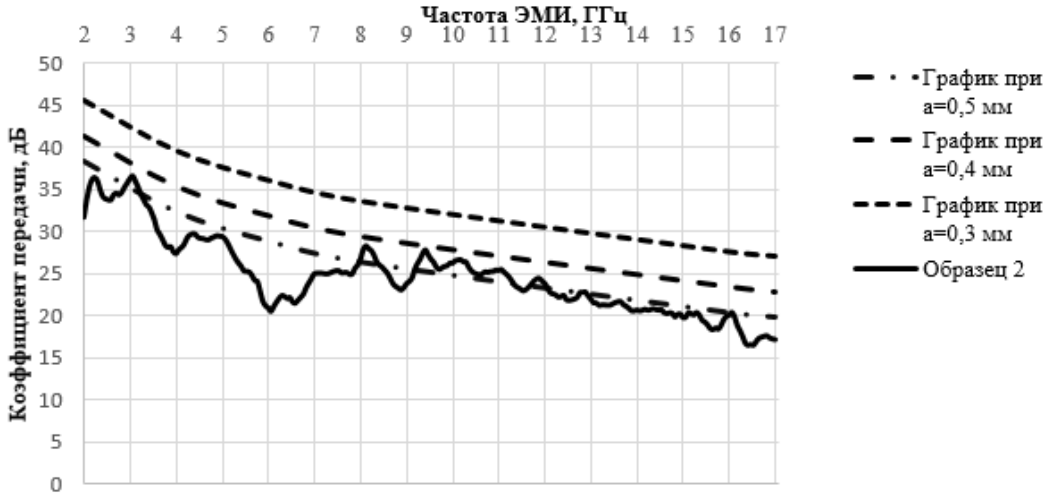


Рис. 4

Для данного образца в диапазоне ЭМИ от 8 до 17 ГГц наблюдается совпадение экспериментальных данных с расчетной кривой, построенной для экранирующей сетки с размером ячейки а=0,5 мм, то есть приблизительно на 10 % более разреженной по сравнению с исследованной тканью. Незначительное снижение эффективности экра-

нирования по сравнению с расчетными значениями может объясняться тем, что в местах пересечений нитей основы и утка возникновение контактов между участками медной микропроволоки не гарантировано. Как можно увидеть на изображении данной нити, представленном в табл. 2, микропроволока по винтовой линии огибает волокнистую составляющую, из-за чего в месте пересечения может оказаться на противоположной от зоны контакта стороне. В большей степени этот фактор проявляется в диапазоне частот ЭМИ от 2 до 8 ГГц.

Значения коэффициента передачи образца 3 в частотном диапазоне от 2 до 17 ГГц составили в среднем 22,8 дБ (рис. 5), то есть эффективность экранирования составляет 99,48%.

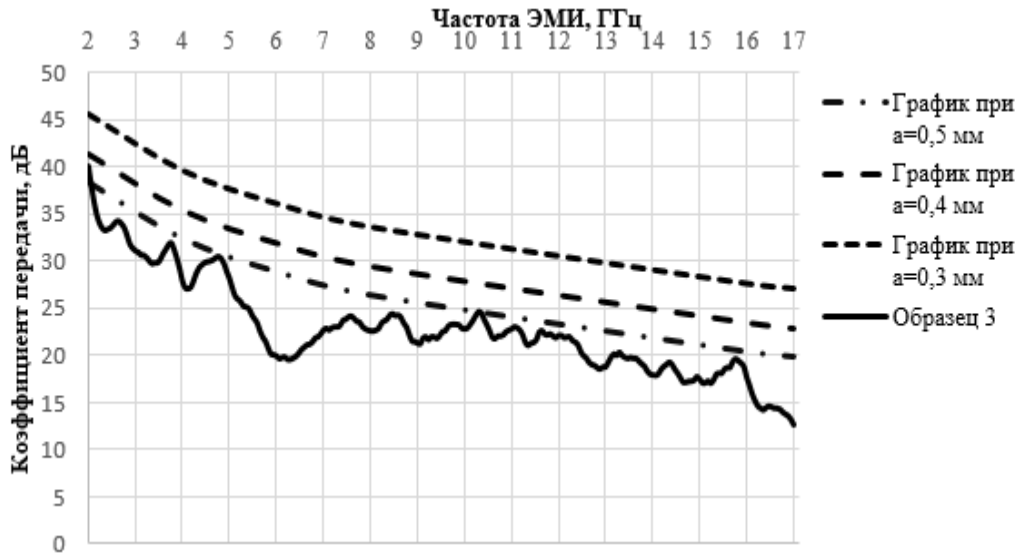


Рис. 5

Анализ частотной зависимости абсолютного значения коэффициента передачи для образца 3 (рис. 5) показывает, что фактические значения эффективности экранирования ниже, чем расчетные, построенные для сеток с размером ячейки 0,3…0,5 мм. Заметны только локальные приближения фактической кривой к расчетным, определенные для а = 0,5 мм, на некоторых частотах ЭМИ при соответствии общей тенденции. Данное отклонение значений объясняется не только той же причиной, что и расхождение данных, выявленное для образца 2, но и тем, что нить 3 характеризуется более высокой линейной плотностью по сравнению с нитью 2, что снижает вероятность возникновения контактов между участками микропроволоки в местах пересечения основы и утка. Кроме того, с учетом особенностей формирования нити на тростильно-крутильной машине даже выходящие на поверхность участки медной микропроволоки частично перекрываются филаментами полиэфирной нити, что препятствует созданию надежного контакта. Важным фактором является специфика саржевого переплетения, которое характеризуется меньшим количеством пересечений нитей основы и утка. В отличие от образцов 1 и 2, где распределение проводящих элементов более однородное (стальные волокна) или структура более плотная (полотняное переплетение), для материалов, подобных образцу 3, для повышения точности прогноза представляется целесообразным введение в модель структурного поправочного коэффициента. Этот коэффициент, калибруемый экспериментально для класса однородных материалов, мог бы учитывать вероятность электрического контакта в зонах переплетения.

Проведенное исследование подтвердило возможность эффективного прогнозирования экранирующих свойств текстильных материалов с электропроводящими компонентами на основе электродинамической модели металлической сетки. Установлено, что расчетные данные согласуются с экспе-

риментальными результатами для всех трех образцов тканей, полученных из различных типов электропроводящих нитей.

Сравнительный анализ показал, что наилучшее соответствие достигается при определенных геометрических параметрах сетки (размере ячейки 0,4…0,5 мм), что свидетельствует об адекватности выбранной математической модели. Наблюдаемые незначительные расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями объясняются структурными особенностями текстильных материалов, включая различную вариантность плотности электропроводящих элементов, эффекты перекрытия и контакта металлических компонентов в зонах переплетения нитей, а также специфику разных видов переплетений тканей.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения предложенного подхода для проектирования текстильных материалов с заданными экранирующими характеристиками, что позволяет сократить время и ресурсы на экспериментальные исследования. Дальнейшее развитие работы может быть направлено на уточнение модели с учетом более сложных структурных параметров текстильных материалов и расширение частотного диапазона исследований.

ВЫВОДЫ

1. Доказана принципиальная возможность использования электродинамической модели металлической сетки для прогнозирования эффективности экранирования текстильных материалов с электропроводящими компонентами в диапазоне частот 2…17 ГГц. Расчетные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами для всех исследуемых образцов.

2. Установлено, что точность прогноза зависит от типа проводящей нити и структуры ткани. Наилучшее соответствие достигается для материалов на основе смешанной пряжи со стальными волокнами (образец 1) и комбинированной нити с медной микропроволокой (образец 2). Для материалов на основе крученых комбинированных нитей (образец 3) наблюдаются систематические расхождения.

3. Выявлено, что основными факторами, влияющими на расхождения между моделью и экспериментом, являются распределение электропроводящих компонентов в нитях и структура тканей, произведенных из них. Указанные факторы влияют на вероятность возникновения контактов между участками электропроводящих компонентов в местах пересечений основы и утка.

4. Перспективным направлением для дальнейших исследований является разработка уточненной полуэмпирической модели на базе рассмотренной электродинамической. Введение структурного поправочного коэффициента, учитывающего структуру нитей, содержащих электропроводящие компоненты, и вид переплетения ткани, позволит повысить точность прогноза для сложных структур и задач практического проектирования экранирующих текстильных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Duran D., Kadoglu H.* Electromagnetic shielding characterization of conductive woven fabrics produced with silver-containing yarns // Textile Research Journal. 2014. Vol. 85(10). P. 1009…1021.

2. *Васильева В.В., Молоканова О.А., Цобкалло Е.С., Погребняков П.В.* Оценка физико-механических и эксплуатационных свойств композитных электропроводящих нитей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 1 (415). С. 275…279.

3. *Костин П.А., Замостоцкий Е.Г., Рассохина И.М.* Защитные свойства трикотажных полотен из комбинированной электропроводящей пряжи // Химические волокна. 2022. №1. С. 34…37.

4. *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.

5. *Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А.* Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн // ФИП. 2003. Т. 1, № 2. С. 161…173.

6. *Рыклин Д.Б., Дубровская О.А., Кветковский Д.И., Саванович С.Э.* Влияние количества слоев ткани на экранирующие свойства электромагнитных текстильных экранов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 5 (401). С. 49…55.

7. *Liu Z., Wang X.C., Zhou Z.* Computation of shielding effectiveness for electromagnetic shielding blended fabric // Przeglad Elektrotechniczny. 2013. Vol. 89, № 3a. P. 228…230.

8. *Шапиро Д.Н.* Электромагнитное экранирование. Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2010. 120 с.

9. *Jacoby K.T., Pieratt M.W., Halman J.I., Ramsey K.A.* Predicted and measured EMI shielding effectiveness of a metallic mesh coating on a sapphire window over a broad frequency range // Window and Dome Technologies and Materials XI, Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7302. P. 73020X.

10. *Balkis M., Kadoglu H.* Electromagnetic Shielding Effectiveness of Conductive Knitted Fabrics // Journal of Fashion Technology & Textile Engineering. 2015. S1:008.

11. *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.

12. *Wang C., Zhang X., Li H. et al.* Machine learning-assisted prediction of electromagnetic shielding effectiveness of multilayer textile materials // Journal of Industrial Textiles. 2023. Vol. 53. P. 1…18.

13. *Замостоцкий Е.Г., Скобова Н.В.* Исследование технологического процесса получения комбинированных электропроводящих нитей на крутильном оборудовании // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2007. № 2(13). С. 81…85.

R E F E R E N C E S

1. *Duran D., Kadoglu H.* Electromagnetic shielding characterization of conductive woven fabrics produced with silver-containing yarns // Textile Research Journal. 2014. Vol. 85(10). P. 1009…1021.

2. *Vasilyeva V.V., Molokanova O.A., Tsobkallo E.S., Pogrebnyakov P.V.* Evaluation of physical-mechanical and operational properties of composite electrically conductive threads // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2025. No. 1 (415). P. 275…279.

3. *Kostin P.A., Zamostotsky E.G., Rassokhina I.M.* Protective properties of knitted fabrics made from combined electrically conductive yarn // Chemical Fibers. 2022. No. 1. P. 34…37.

4. *Safonov P.E., Levakova N.M.* The choice of a functional structure and the study of the radiotechnical characteristics of fabrics for protection from electromagnetic radiation // Vestnik of Vitebsk State Technological University. 2023. № 1 (44). P. 36...48.

5. *Ostrovsky O.S., Odarenko E.N., Shmatko A.A.* Protective screens and absorbers of electromagnetic waves // Physical Surface Engineering. 2003. Vol. 1, No. 2. P. 161…173.

6. *Ryklin D.B., Dubrovskaya O.A., Kvetkovsky D.I., Savanovich S.E.* Effect of the number of fabric layers on the shielding properties of electromagnetic textile screens // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 5 (401). P. 49…55.

7. *Liu Z., Wang X.C., Zhou Z.* Computation of shielding effectiveness for electromagnetic shielding blended fabric // Przeglad Elektrotechniczny. 2013. Vol. 89, No. 3a. P. 228...230.

8. *Shapiro D.N.* Electromagnetic Shielding. Dolgoprudny: Publishing House "Intellect", 2010. 120 p.

9. *Jacobi K.T., Pieratt M.V., Halman J.I., Ramsey K.A.* Forecasting and measuring the effectiveness of electromagnetic interference protection of metal mesh coating on sapphire crystal in a wide frequency range // Window and dome technologies and materials XI, edition SPIE. 2009. Vol. 7302. P. 73020X.

10. *Balkis M., Kadoglou H.* Efficiency of electromagnetic shielding of conductive knitted fabrics // Journal of Fashion Technologies and Textile Engineering. 2015. S1:008.

11. *Kumar A., Lee Y., Kim S.* Recent advances in flexible and lightweight electromagnetic shielding composites for textile applications // Compo-sites Part B: Engineering. 2024. Vol. 271. P. 111156.

12. *Wang C., Zhang X., Li H. et al.* Machine learning-assisted prediction of electromagnetic shielding effectiveness of multilayer textile materials // Journal of Industrial Textiles. 2023. Vol. 53. P. 1…18.

13. *Zamostotsky E.G., Skobova N.V.* Research of the technological process of obtaining combined electrically conductive threads on twisting equipment // Vestnik of Vitebsk State Technological University. 2023. № 2 (13). P. 36...48.

Рекомендована организационным комитетом международной научно-технической конференции "Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)". Поступила 11.02.26.