

УДК 537.874

DOI10.24412/2413-7383-2024-4-113-125

В. Н. Павлыш¹, А. С. Чупахин²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58

² Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение
«Шахтёрский колледж кино и телевидения имени А.А. Ханжонкова»
286211, г. Шахтёрск, ул. Суворова, 46

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

V. N. Pavlysh¹,
A. S. Chupakhin²,

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Donetsk National Technical University"
283001, Donetsk, Artyoma str., 58

² Shakhtyorsk college of the cinema and television after A.A. Khanzhonkova
286211, Shakhtersk, Suvorova str., 46

COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF PROTECTION AGAINST ELECTROMAGNETIC FIELDS DEPENDING ON THE PARAMETERS OF SHIELDING MATERIALS

В статье представлен вычислительный алгоритм, реализованный в среде MATLAB, который на основании анализа электромагнитных и физических параметров материалов позволяет определить показатели их эффективности по экранированию электромагнитных полей в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Исследовано четыре варианта отечественных материалов: два ферромагнитных металлических сплава с высокой магнитной проницаемостью (79НМ и 50Н), аморфный сплав (АМАГ-170) и один проводник (медь марки М00К). Рассмотрено поведение материалов в различных условиях (плоских волн, электрических и магнитных волн в ближней зоне).

Ключевые слова: алгоритм, электромагнитные волны, экранирование, эффективность, материал.

The article presents a computational algorithm implemented in the MATLAB environment, which, based on the analysis of electromagnetic and physical parameters of materials, allows determining their efficiency indicators for shielding electromagnetic fields in the frequency range from 50 Hz to 100 kHz. Four variants of domestic materials were studied: two ferromagnetic metal alloys with high magnetic permeability (79NM and 50N), an amorphous alloy (AMAG-170) and one conductor (copper grade M00K). The behavior of materials under various conditions (plane waves, electric and magnetic waves in the near zone) is considered.

Key words: algorithm, electromagnetic waves, screening, efficiency, material.

Введение

Экранирование оборудования от электромагнитных помех (ЭМП) – это одно из действенных средств обеспечения надежной работы аудиовизуальных систем в киноконцертных комплексах. Электромагнитные помехи могут существенно влиять на качество передачи сигнала, вызывая сбои в работе чувствительного оборудования, что критически важно для мультимедийных и информационных систем [1], [2].

Актуальность. Для решения задачи экранирования применяются материалы с различными свойствами, что вызывает необходимость оценки их эффективности. Результаты исследований рабочей группы SC-05-05, сформированной Обществом инженеров-акустиков (AES) по разработке стандартов ЭМС для профессионального звукового оборудования [3], а также материалы публикаций [4-8], в которых рассматриваются методы анализа и применения экранирующих материалов, представляют базу для дальнейших исследований проблемы. В этой связи тема работы является актуальной.

Цель работы - обоснование вычислительного алгоритма для анализа эффективности экранирования корпусов чувствительного оборудования киноконцертных комплексов от ЭМП с применением отечественных материалов.

Методология расчета. Структурная схема алгоритма, иллюстрирующая процесс анализа эффективности экранирования с применением различных материалов, приведена на рис.1. Алгоритм использует выражение (1) для расчета A - потерь на поглощение (*Absorption Loss*), выражение (2) для расчета R - потерь на отражение (*Reflection Loss*), выражение (3) для расчета B - потерь на многократные отражения (*Multiple Reflection Loss*). Общая эффективность экранирования SE (*Shielding Effectiveness*) определяется как сумма трёх компонентов, согласно (4).

$$A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) [dB], \quad (1)$$

где t – толщина экрана, δ – глубина проникновения электромагнитной волны, которая зависит от частоты и параметров материала, $\log(e)$ – натуральный логарифм.

$$R = C + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left(\frac{1}{f^n r^m} \right) [dB], \quad (2)$$

где σ_r – удельная электропроводность материала, μ_r – относительная магнитная проницаемость материала, f – частота электромагнитной волны, n , m – показатели степени, зависящие от материала и условий распространения волны, C – константа, связанная с параметрами системы (табл. 1).

Таблица 1 – Константы для выражения (2)

Тип поля	C	n	m
Электрическое поле	322	3	2
Плоская волна	168	1	0
Магнитное поле	14,6	-1	-2

$$B = 20 \log \left(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \right) [dB]. \quad (3)$$

где t – толщина экрана, δ – глубина проникновения электромагнитной волны, которая зависит от частоты и параметров материала.

$$SE = A + R + B [dB], \quad (4)$$

Результаты анализа для каждого исследуемого материала можно разделить на три основные группы.

Группа 1 включает результаты анализа эффективности экранирования для плоских волн и представляет собой функцию эффективности экранирования в зависимости от частоты для 3 вариантов толщины экрана (t_1 , t_2 и t_3). Это позволяет оценить, как выбор толщины материала экрана влияет на конечную эффективность экранирования.

Группа 2 включает результаты исследования эффективности экранирования электромагнитных полей, источниками сильного тока и низкого напряжения, находящимися в ближнем поле (магнитные поля). В этой группе анализ проводится для фиксированной толщины экрана (t). Также рассматриваются два варианта расстояния от источника помех (r_1 и r_2), что позволяет оценить влияние расстояния на эффективность экранирования.

Группа 3 аналогична группе 2, но учитывает электромагнитные поля, создаваемые источниками высокого напряжения и низкого тока (электрические поля).

Таким образом, алгоритм обеспечивает комплексное представление эффективности экранирования для различных типов волн и условий воздействия.

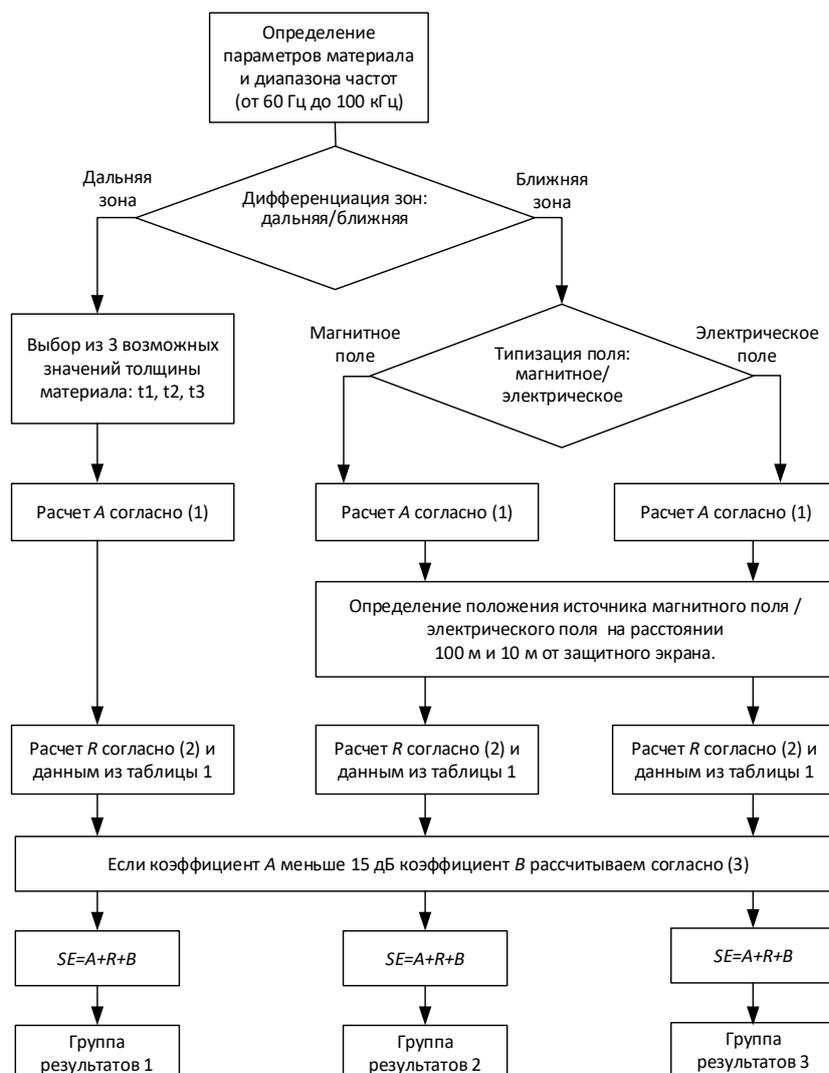


Рисунок 1 – Алгоритм процесса анализа эффективности экранирования

Выбор материалов. При выборе материала, используемого для экранирования, необходимо учитывать два параметра: магнитную проницаемость и электропроводность. Проводники, например такие как медь - доступный вариант в качестве экранирующего материала для требуемого ослабления помех за счет явления отражения (R). С другой стороны, существуют сплавы, которые благодаря своей высокой магнитной проницаемости эффективно ослабляют излучение за счет поглощения.

Для исследования выбраны четыре материала с разными электромагнитными свойствами: *М00К*, *79НМ*, *50Н*, *АМАГ-170*.

Сплавы железа и никеля обладают запоминающимися магнитными свойствами, например сплав *79НМ* состоит из 79% никеля и примерно 21% железа, а сплав *50Н* состоит из 50% никеля, примерно 49% железа, а также меди, марганца и кремния. Оба представляют собой железоникелевые сплавы с высокими значениями магнитной проницаемости. Альтернатива представленным железоникелевым сплавам - аморфный сплав *АМАГ-170* на основе 80 % железа с добавлением кремния и бора. *АМАГ-170* имеет лучшие магнитные свойства, чем *79НМ* и *50Н*, однако сплав имеет ниже значение удельной электропроводности σ_r .

Технические параметры и характеристики исследуемых материалов, в частности, доступны: для *М00К* в ГОСТ 859-2014 [9], для *79НМ*, *50Н* в ГОСТ 10994-74 [10], для *АМАГ-170* в технических условиях [11].

Зависимость относительной магнитной проницаемости от частоты представлены на рис. 2. Результаты получены в приложении MATLAB, где на основании информации, доступной из технической документации исследуемых материалов аппроксимированы значения относительной магнитной проницаемости с максимальной погрешностью в 5%.

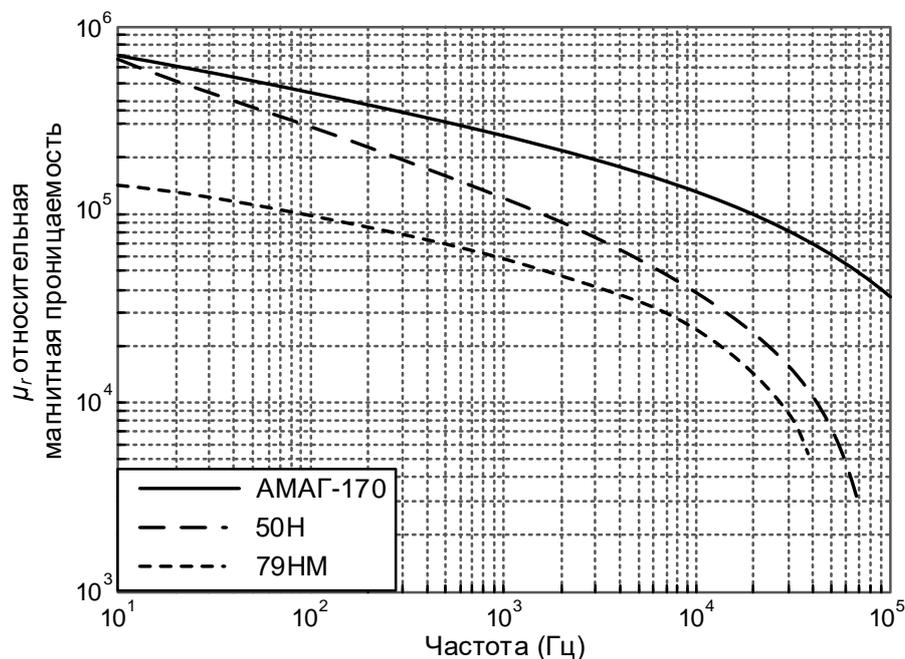


Рисунок 2 – Магнитная проницаемость материалов в зависимости от частоты

Скин-эффект при выборе толщины. Выбор толщины t_1 , t_2 и t_3 не должен быть произвольным, так как необходимо учитывать значение глубины скин-слоя (δ). Толщины экрана, превышающей δ , достаточно, чтобы гарантировать поглощение помех не менее чем на 63% от их первоначального значения [12].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} [м] \quad (5)$$

Согласно выражению (5), значение δ уменьшается по мере увеличения частоты, поэтому обеспечение требуемой толщины для поглощения помех на частоте 50 Гц обеспечивает удовлетворительные характеристики в области ВЧ. В табл. 2 показаны значения δ для четырех материалов на частоте 50 Гц.

Таблица 2 – Основные параметры исследуемых материалов

Материал	σ_r , См/мм	μ_r	δ , мм
79HM	0,035	см. рисунок 2	0,0011
50H	0,026	см. рисунок 2	0,0018
M00K	0,999	1	65,01
АМАГ-170	0,015	См. рисунок 2	0,0013

Результаты моделирования

Эффективность экранирования в дальней зоне. Согласно алгоритму (рис. 1), после определения значений σ и μ и дифференциации на дальнюю и ближнюю зону, следующим этапом будет выбор толщины экранирующего слоя для защиты от ЭМП в дальней зоне. Для расчетов выбраны следующие значения толщины материала: $t_1 = 0,15$ мм, $t_2 = 0,2$ мм, $t_3 = 0,25$ мм. t_1 , t_2 и t_3 должны быть больше значения δ исследуемых материалов для частот выше 50 Гц, что позволяет гарантировать минимальные значения поглощения.

Материалы толщиной $t_1 = 0,15$ мм. Используя уравнение (1) оценено затухание сигнала из-за явления поглощения (A). На рис. 3 показан процесс поглощения плоской волны материалами толщиной $t_1 = 0,15$ мм.

Для обеспечения требуемого значения коэффициента поглощения A предпочтительнее использование магнитных металлических сплавов. Магнитные материалы более эффективны при явлении поглощения, в то время как *M00K* не позволяет обеспечить затухание более чем на 10 дБ в рассматриваемых условиях. В основе механизма экранирования проводников лежит явление отражения, где коэффициент R не зависит от толщины материалов.

Также замечено, что поглощение постепенно увеличивается с увеличением частоты. Факт, который можно вывести из выражения (5) и (6).

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) [dB]. \quad (6)$$

На рис. 4 показан процесс затухания плоской волны за счет явления отражения (R) для материалов при толщине $t_1 = 0,15$ мм.

Соотношение электропроводности σ_r и относительной проницаемости μ_r напрямую влияет на степень затухания при отражении. Следовательно, материалы с высокими значениями относительной проницаемости менее эффективны при отражении, среди исследуемых материалов.

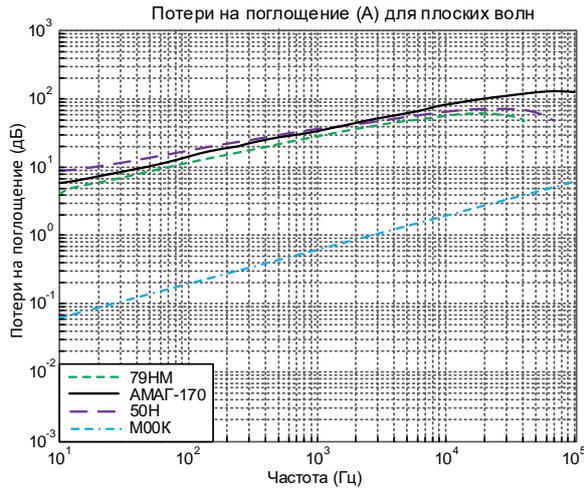


Рисунок 3 – Затухание плоских волн из-за явления поглощения A ($t_1 = 0,15\text{мм}$)

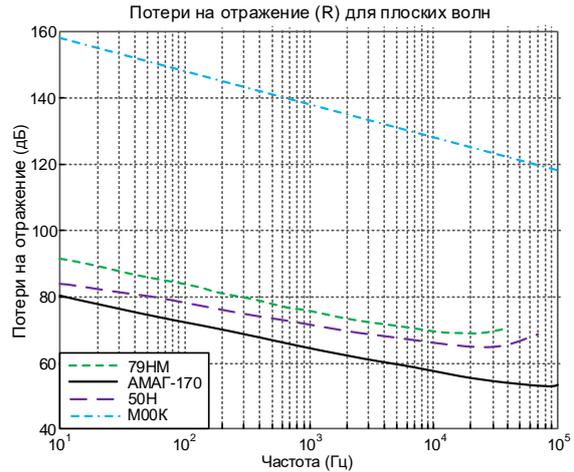


Рисунок 4 – Затухание плоских волн из-за явления отражения R ($t_1 = 0,15\text{мм}$)

Сумму поглощения и отражения ($A+R$) можно увидеть на рис. 5. Установлено, что магнитные материалы: *79НМ*, *50Н* и *АМАГ-170* менее эффективны по сравнению с другими материалами на частотах ниже 10 кГц. Несмотря на то, что магнитные материалы имеют лучшие показатели при поглощении (рис. 3), медь *М00К* превосходит их благодаря значительному затуханию в результате отражения (рис. 4).

Рис. 5 не отражает реальный процесс затухания, т.к. необходимо добавить третий член — поправочный коэффициент многократного отражения B . На рис. 6 представлены значения поправочного коэффициента B для исследуемых материалов. Установлено, что материалы с высокой магнитной проницаемостью меньше подвержены влиянию эффекта многократных отражений, поскольку их основным механизмом экранирования является затухание, основанное на явлении поглощения. Эффект многократного отражения B будет негативно сказываться на общей эффективности экранирования SE для материалов защита, которых основана на явлении отражения.

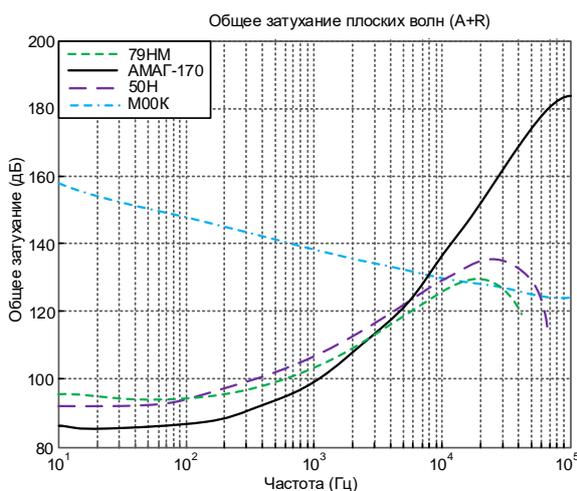


Рисунок 5 – Сумма затухания и отражения $A + R$ ($t_1 = 0,15\text{мм}$).

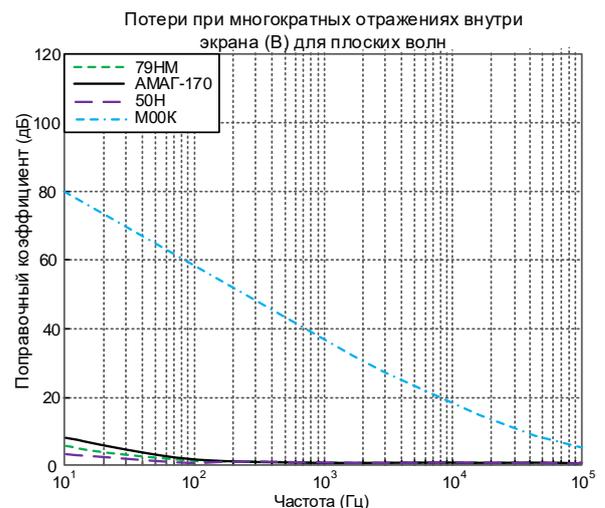


Рисунок 6 – Поправочный коэффициент при многократных отражениях B ($t_1 = 0,15\text{мм}$).

После включения в уравнение коэффициента B можно оценить общую эффективность экранирования, определяемую согласно (4) и показанную на рис. 7. $M00K$ по-прежнему эффективен в определенных диапазонах частот, однако магнитные материалы существенно превосходят по эффективности $M00K$, особенно на частотах выше 1 кГц.

$АМАГ-170$ имеет самые высокие значения магнитной проницаемости среди трех исследуемых магнитных материалов (рис. 2), однако у него самая низкая эффективность экранирования SE в диапазоне от 50 Гц до 1 кГц. Это связано с тем, что электропроводность данного материала, хотя и ниже по сравнению с медью, все же существенно влияет на электромагнитное экранирование. В частности, значения электропроводности $АМАГ-170$ – самые низкие среди трех рассматриваемых магнитных материалов.

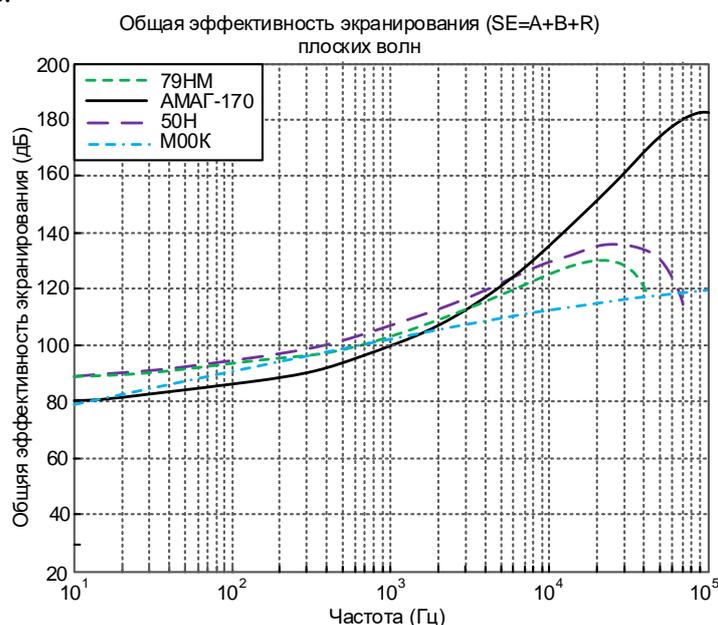


Рисунок 7 – Общая эффективность экранирования SE ($t_1 = 0,15$ мм)

Материалы толщиной $t = 0,2$ мм. На рис. 8 показана эффективность экранирования SE для плоских волн четырех исследуемых материалов с толщиной $t_2 = 0,2$ мм.

Поглощение (A) прямо пропорционально толщине материала, что можно проверить с помощью выражения (6). Коэффициент отражения (R) не меняется с увеличением толщины экранирующего материала, однако поправочный коэффициент B становится меньше с увеличением толщины. Коэффициент B уменьшается, поскольку материал с большей толщиной обеспечивает поглощение падающей электромагнитной волны перед повторным отражением на второй границе среды.

Увеличение эффективности магнитных материалов наблюдается на частотах выше 10 кГц, с пиками достигающими 226 дБ на частоте 100 кГц. Небольшая корректировка толщины магнитных материалов позволяет увеличить эффективность экранирования.

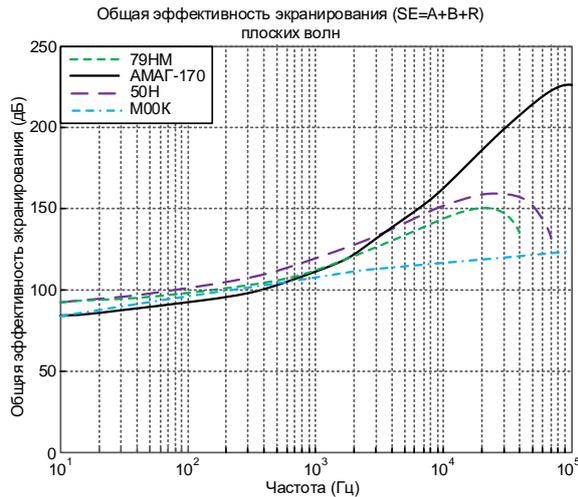


Рисунок 8 – Общая эффективность экранирования SE ($t_2 = 0,2$ мм)

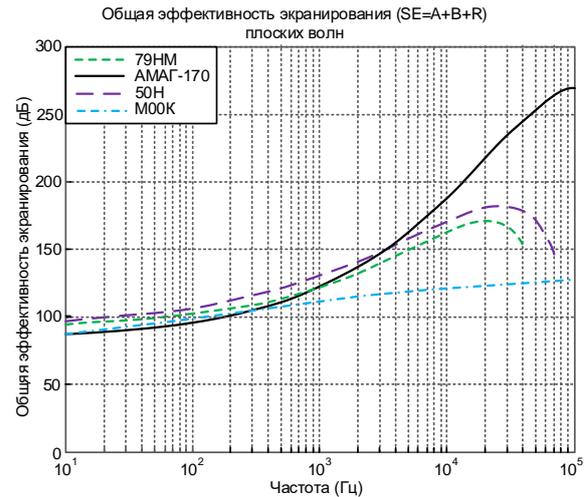


Рисунок 9 – Общая эффективность экранирования SE ($t_3 = 0,25$ мм)

Материалы толщиной $t = 0,25$ мм. Результаты оценки эффективности экранирования для материалов толщиной $t_3 = 0,25$ мм, представлены на рис. 9.

Увеличение толщины магнитных материалов улучшает эффективность экранирования на более высоких частотах. *АМАГ-170* толщиной 0,25 мм обеспечивает эффективность свыше 250 дБ на частотах выше 30 кГц. *79НМ* и *50Н* также демонстрируют эффективность свыше 150 дБ, но на высоких частотах наблюдается резкое падение из-за значений проницаемости (рис. 2). Медь марки *М00К* не демонстрирует значительных изменений в эффективности экранирования с увеличением толщины материала, хотя наблюдается небольшое улучшение благодаря уменьшению поправочного коэффициента B .

Эффективность экранирования в ближней зоне. Алгоритм представленный на рис. 1 учитывает, что в ближней зоне электромагнитное поле имеет ярко выраженный магнитный или электрический характер. Данная типизация необходима ввиду различий в поведении электрических и магнитных полей в ближней зоне. Согласно [13], ближняя зона обеспечивается на расстояниях, меньших $\lambda/2\pi$, где λ – длина волны для самой высокой частоты в рассматриваемом диапазоне. Для частоты 100 кГц длина волны составляет $\lambda = 3000$ м, таким образом, при $r < 447$ м можно утверждать, что мы находимся в ближней зоне.

Для анализа выбраны два расстояния от источников электрического и магнитного полей: $r_1 = 100$ м и $r_2 = 10$ м. Дальнейший анализ выполнен для материалов толщиной 0,15 мм.

Эффективность экранирования магнитных полей. В результате применения алгоритма для расчета эффективности экранирования при $r_1 = 100$ м получен график, который показан на рис. 10.

При сравнении трех компонентов общей эффективности экранирования для плоских волн и магнитного поля наблюдается отсутствие разницы в значениях коэффициента поглощения (A). Это свидетельствует о том, что процесс поглощения происходит одинаково как для плоских волн, так и для магнитных полей. Изменение коэффициента B незначительно: разница составляет менее 1 дБ. Коэффициент отражения R зафиксирован на порядок меньше для магнитных полей, что указывает на неэффективность затухания, основанного на явлении отражения, в качестве механизма экранирования.

Важно подчеркнуть, что влияние снижения значения коэффициента R более заметно на низких частотах. Для $M00K$ эффективность экранирования на частоте 100 Гц, при воздействии плоских волн достигает значения $SE_{100Гц} = 96,23$ дБ, для магнитных полей составляет $SE_{100Гц} = 17,38$ дБ, разница в эффективности экранирования составляет 81,93%. Это означает, что добиться эффективного экранирования магнитных полей труднее, чем плоских волн, особенно в области низких частот.

При расстоянии от источника магнитного поля $r_2 = 10$ м, можно наблюдать результаты, представленные на рис. 11.

Чем меньше становится расстояние между источником магнитного поля и защитным экраном, тем менее эффективным становится экранирование. Коэффициент отражения R становится все меньше по мере приближения источника помех, в то время как A поглощение не меняется, а материалы с низкой магнитной проницаемостью как медь $M00K$ становятся все менее эффективными при экранировании магнитных полей.

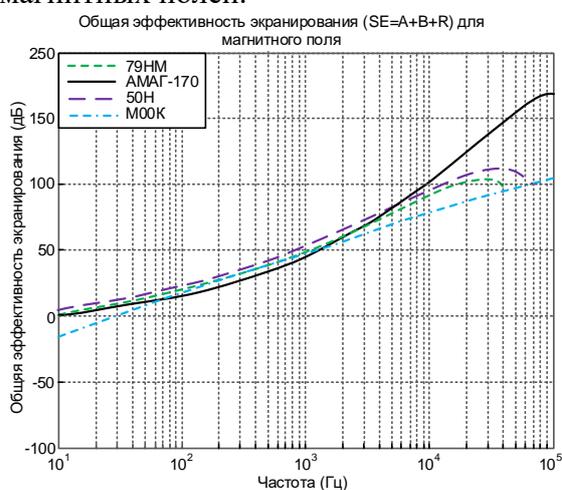


Рисунок 10 – Общая эффективность экранирования SE для магнитных полей (с источником на расстоянии 100 метров от экранирующего материала).

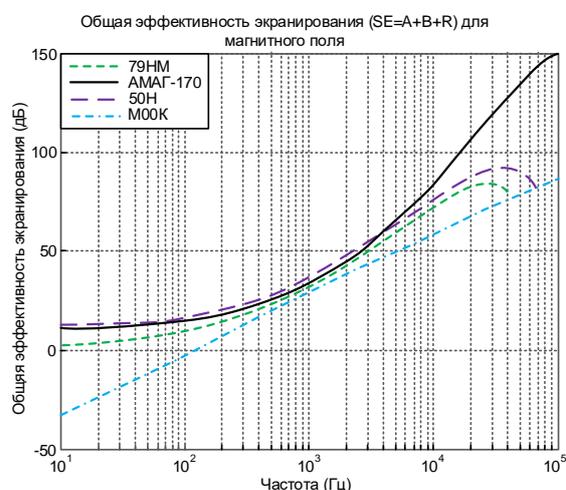


Рисунок 11 – Общая эффективность экранирования SE для магнитных полей (с источником на расстоянии 10 метров от экранирующего материала).

Эффективность экранирования электрических полей. Для оценки эффективности экранирования электрических полей при постоянной толщине экрана $t_1=0,15$ мм выбраны расстояния до источника ЭМП: $r_1=100$ м и $r_2=10$ м. Общая эффективность экранирования (SE) для источника помех на расстоянии $r_1=100$ м представлена на рис. 12.

Все материалы демонстрируют увеличение коэффициента отражения R , в частности, в области НЧ, где выполнить экранирование электрических полей становится проще, чем экранирование плоских волн. Однако эффективность экранирования SE становится все ниже с увеличением частоты, и данный факт также можно вывести с помощью выражения (2).

На рис. 13 показана общая эффективность экранирования для электрических полей при $r_2 = 10$ м.

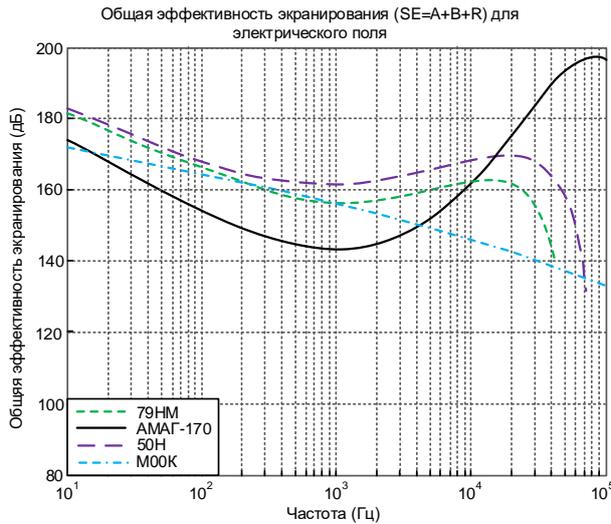


Рисунок 12 – Общая эффективность экранирования SE для электрических полей (с источником на расстоянии 100 м от экранирующего материала).

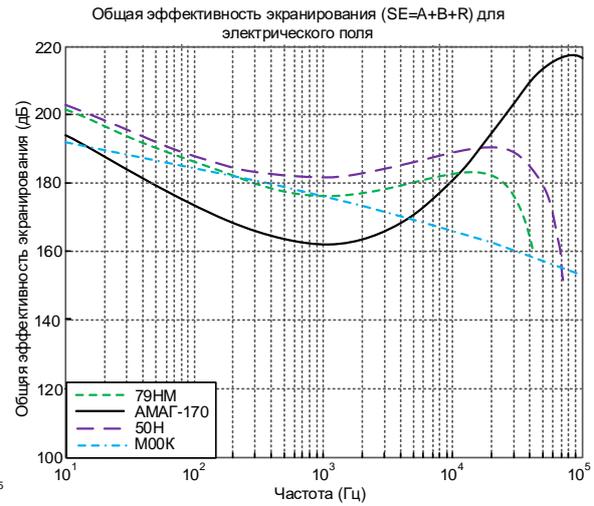


Рисунок 13 – Общая эффективность экранирования SE для электрических полей (с источником на расстоянии 10 м от экранирующего материала).

Экранирование магнитных полей становится более проблематичным с уменьшением расстояния r , а экранирование электрических полей напротив более эффективным. Общая эффективность экранирования электрических полей (SE) увеличивается примерно на 20 дБ для всех материалов при изменении расстояния от 100 до 10 метров.

При увеличении расстояния r эффективность экранирования электрических полей уменьшается, пока не достигает значений, аналогичных эффективности экранирования плоских волн. Рис. 14 наглядно демонстрирует различия в электромагнитном экранировании для каждого из упомянутых случаев.

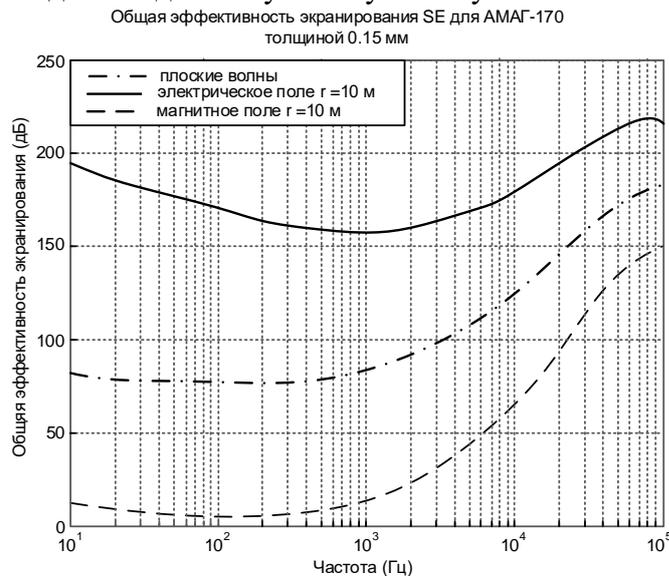


Рисунок 14 – Общая эффективность экранирования SE для АМАГ-170 толщиной $t_1 = 0,15$ мм для электрических, магнитных полей и плоских волн.

Выводы

Установлено, что при электромагнитном экранировании необходимо учитывать несколько факторов: тип и частоту ЭМП, толщину и электромагнитные свойства экранирующих материалов, а также расстояние между источником помех и областью, подлежащей экранированию.

Разработана структура и программная реализация алгоритма оценки эффективности экранирования с учётом характеристик используемых материалов.

Приведены результаты работы алгоритма по оценке эффективности применения ряда отечественных материалов, в их числе: ферромагнитные сплавы (79НМ и 50Н) и аморфный сплав (АМАГ-170), которые более эффективны для экранирования магнитных полей; материалы с высокой проводимостью и низкой проницаемостью, такие как М00К, которые более эффективны для экранирования электрических полей.

Показано, что магнитные материалы не менее эффективны, чем М00К при экранировании электрических полей, поскольку имеют низкие значения коэффициента многократного отражения и высокие значения коэффициента поглощения.

Разработанный алгоритм позволяет оценить эффективность различных материалов в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, что даёт основание рекомендовать применение его при проектировании надежных и устойчивых к электромагнитным воздействиям защитных конструкций.

Список литературы

1. Пилинский, В.В. Анализ допустимых регламентированных уровней эмиссии и чувствительности оборудования киноконцертного комплекса / В.В. Пилинский, А.С. Чупахин, В.Б. Швайченко, А.А. Довженко. *Технологии электромагнитной совместимости*. М.: ООО «Издательский дом «Технологии»». 2015. № 3 (54). С.18–25. ISSN 1729-2670.
2. Павлыш, В.Н. Задача управления параметрами технических элементов оборудования киноконцертных комплексов / В.Н. Павлыш, А.С. Чупахин. *материалы VII Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях» «СИТОНИ-2021»* (Донецк, 23 ноября 2021 г.) Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2021. С.57-67.
3. AES48-2019: AES standard on interconnections - Grounding and EMC practices - Shields of connectors in audio equipment containing active circuitry. New York: AES, 2019.
4. Garcia, M., & Lopez, R. (2020). Shielding Effectiveness of Novel Materials in Audio Equipment. *Materials Today: Proceedings*, 31, 333-339.
5. Zhang, H. (2020). Optimization of Shielding Solutions for Audio Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5598-5606.
6. Гришин Д. Конструкционные материалы для обеспечения электромагнитной совместимости радиоаппаратуры / Д. Гришин, И. Гусев. *Фотоника*. 2023. Т. 17. № 3. С. 210-217.
7. Комнатнов, М. Е. Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2024. Т. 27, № 4. С. 19–37
8. Иванов, А.А. Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи / А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019. № 2. С. 110-142.
9. ГОСТ 859-2014. Медь. Марки. Введ. 2015–07–01. М.: Стандартиформ, 2015. 9 с.
10. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки. Введ. 1975–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1974. 18 с.
11. ТУ 11-91 Яе0.021.180 ТУ Ленты аморфные из магнитомягких сплавов. Технические условия. – Введ. 1991–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 29 с.
12. Гримальский, О.В. Моделирование рассеивающих свойств многослойных материалов на основе приближенных двухсторонних граничных условий / О.В. Гримальский, Р.Я. Низкий. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2024. № 1 (407). С. 77-87.
13. Резинкина, М.М. Расчет электромагнитных полей в неоднородных средах для выбора защитных покрытий. *Электротехника и электромеханика*. 2019. № 5. С. 31-34.

References

1. Pilinsky, V.V. Analiz dopustimykh reglamentirovannykh urovnei emissii i chuvstvitel'nosti oborudovaniya kinokonzertnogo kompleksa / V.V. Pilinsky, A.S. Chupakhin, V.B. Shvaichenko, A.A. Dovzhenko // *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti*. – M.: OOO "Izdatel'skii dom "Tekhnologii". – 2015. – No 3 (54). – s.18–25. – ISSN 1729-2670.
2. Pavlysh, V.N. Zadacha upravleniya parametrami tekhnicheskikh elementov oborudovaniya kinokonzertnykh kompleksov / V.N. Pavlysh, A.S. Chupakhin // *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye informatsionnye tekhnologii v obrazovanii i nauchnykh issledovaniyakh" "SITONI-2021" (Donetsk, 23 noyabrya 2021 g.)* – Donetsk: Izd-vo DonNTU, 2021. – S.57-67.
3. Audio Engineering Society (AES). AES48-2019: AES standard on interconnections - Grounding and EMC practices - Shields of connectors in audio equipment containing active circuitry. New York: AES, 2019.
4. Garcia, M., & Lopez, R. (2020). Shielding Effectiveness of Novel Materials in Audio Equipment. *Materials Today: Proceedings*, 31, 333-339.
5. Zhang, H. (2020). Optimization of Shielding Solutions for Audio Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5598-5606.
6. Grishin D. Konstruktsionnye materialy dlya obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti radioapparatury / D. Grishin, I. Gusev // *Fotonika*. 2023. T. 17. № 3. S. 210-217.
7. Komnatnov, M. E. Modeli i metody vychisleniya i izmereniya effektivnosti ekraniruyushchikh materialov s ispol'zovaniem sdvoennykh i koaksial'nykh TEM-kamer // *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*. – 2024. – T. 27, № 4. – S. 19–37.
8. Ivanov, A.A. Obzor analiticheskikh modeley dlya otsenki effektivnosti ekraniruyushchikh metallurgicheskikh korpusov na osnove metoda ekvivalentnoy tsepi / A.A. Ivanov, M.E. Komnatnov // *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. - 2019. - № 2. - S. 110-142.
9. GOST 859-2014. Med'. Marki. – Vved. 2015–07–01. – M.: Standartinform, 2015. – 9 s.
10. GOST 10994-74. Splavy pretsizionnye. Marki. – Vved. 1975–01–01. – M.: Izd-vo standartov, 1974. –
11. TU 11-91 Ye0.021.180 TU Lenty amorfnye iz magnitomyagkikh splavov. Tekhnicheskie usloviya. – Vved. 1991–07–01. – M.: Izd-vo standartov, 1974. – 29 s.
12. Grimalskiy, O.V. Modelirovanie rasseivayushchikh svoystv mnogoslonykh materialov na osnove priblizhennykh dvukhstoronnykh granichnykh usloviy / O.V. Grimalskiy, R.Ya. Nizkiy // *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2024. № 1 (407). S. 77-87.
13. Rezinkina, M.M. Raschet elektromagnitnykh poley v neodnorodnykh sredakh dlya vybora zashchitnykh pokrytiy // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2019. № 5. S. 31-34.

RESUME

V. N. Pavlysh, A. S. Chupakhin

Computational algorithm for assessing the efficiency of protection against electromagnetic fields depending on the parameters of shielding materials

Shielding equipment from electromagnetic interference is one of the effective means of ensuring reliable operation of audiovisual systems in cinema and concert complexes. Electromagnetic interference can significantly affect the quality of signal transmission, causing failures in the operation of sensitive equipment, which is critically important for multimedia and information systems. To solve the shielding problem, materials with different properties are used, which necessitates an assessment of their effectiveness. In this regard, the topic of the work is relevant.

The purpose of the work - is to substantiate a computational algorithm for analyzing the efficiency of shielding the cases of sensitive equipment of cinema and concert complexes from electromagnetic interference using domestic materials.

The paper presents a computational algorithm implemented in the MATLAB environment, which, based on the analysis of electromagnetic and physical parameters of materials, allows determining their efficiency indicators for shielding electromagnetic fields in the frequency range from 50 Hz to 100 kHz. Four variants of domestic materials were studied: two ferromagnetic metal alloys with high magnetic permeability (*79NM* and *50N*), an amorphous alloy (*AMAG-170*) and one conductor (copper grade *M00K*).

The structure and software implementation of the algorithm for assessing the efficiency of shielding taking into account the characteristics of the materials used have

been developed. The behavior of materials with different thicknesses of the shielding layer under the influence of plane waves, electric and magnetic fields in the near zone has been analyzed.

The developed algorithm allows for a comprehensive assessment of the effectiveness of shielding materials under various conditions, which contributes to the creation of protective structures that are resistant to electromagnetic interference.

РЕЗЮМЕ

В. Н. Павлыш, А. С. Чупахин

Вычислительный алгоритм оценки эффективности защиты от электромагнитных полей в зависимости от параметров экранирующих материалов

Экранирование оборудования от электромагнитных помех — это одно из действенных средств обеспечения надежной работы аудиовизуальных систем в киноконцертных комплексах. Электромагнитные помехи могут существенно влиять на качество передачи сигнала, вызывая сбои в работе чувствительного оборудования, что критически важно для мультимедийных и информационных систем. Для решения задачи экранирования применяются материалы с различными свойствами, что вызывает необходимость оценки их эффективности. В этой связи тема работы актуальна.

Цель работы - обоснование вычислительного алгоритма для анализа эффективности экранирования корпусов чувствительного оборудования киноконцертных комплексов от ЭМП с применением отечественных материалов.

В работе представлен вычислительный алгоритм, реализованный в среде MATLAB, который на основании анализа электромагнитных и физических параметров материалов позволяет определить показатели их эффективности по экранированию электромагнитных полей в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Исследовано четыре варианта отечественных материалов: два ферромагнитных металлических сплава с высокой магнитной проницаемостью (*79НМ* и *50Н*), аморфный сплав (*АМАГ-170*) и один проводник (медь марки *М00К*).

Разработана структура и программная реализация алгоритма оценки эффективности экранирования с учётом характеристик используемых материалов. Выполнен анализ поведения материалов с различной толщиной экранирующего слоя в условиях воздействия плоских волн, электрических и магнитных полей в ближней зоне.

Разработанный алгоритм позволяет комплексно оценивать эффективность экранирующих материалов в различных условиях, что способствует созданию устойчивых к электромагнитным помехам защитных конструкций.

Павлыш Владимир Николаевич - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», *Область научных интересов*: математическое моделирование и управление процессами в сложных динамических системах +7(949)322-30-67, pavlysvn@mail.ru

Чупахин Александр Сергеевич - ГБПОУ ДНР «Шахтёрский колледж кино и телевидения имени А.А. Ханжонкова», *Область научных интересов*: Электромагнитная совместимость, силовая электроника, проектирование и конструирование радиоэлектронной аппаратуры, архитектурная акустика, +7(949)374-14-00, e4mail@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 31.10.2024.