

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-105-117>

УДК 537.871.3



Оригинальная статья

С. С. Грабчиков^{1*}, Е. А. Грабчикова¹, А. П. Драпезо², Т. И. Зубарь^{1*},
О. Д. Канафьев¹, А. В. Лосев², А. В. Михайлов³, Г. А. Русецкий¹

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь

²ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор»,
ул. Новаторская, 2Б, офис 204, 220053, Минск, Республика Беларусь

³Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ, НАВЕДЕННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Аннотация. Рассмотрена проблема электромагнитной экологии, ее актуальность для электротранспортных средств. Проведено исследование эффективности электромагнитного экранирования новыми материалами – многослойными структурами градиентного и симметричного типа. Определены уровни электромагнитных полей, генерируемых экспериментальным электродвигателем в различных режимах эксплуатации. Выполнена оценка эффективности электромагнитного экранирования однослойными сплавами ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, АМАГ172) и сформированных на их основе многослойных структур АМАГ172/Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{80}$ и $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ /Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Показано, что электромагнитные экраны на основе данных материалов значительно снижают уровни воздействия низкочастотных электромагнитных полей на человека, что позволяет приблизиться к рекомендованным медиками гигиеническим нормативам, обеспечить требования электромагнитной совместимости для нормального функционирования различных электронных блоков и компонентов электромобилей.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, низкочастотные электромагнитные поля, электромагнитная совместимость, электротранспортные средства, многослойные структуры, электромагнитная безопасность

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы, подпрограмма 7 «Развитие электротранспорта».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Грабчиков Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, e-mail: gss@physics.by; Грабчикова Елена Александровна – старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, e-mail: grabchikova_e@bk.ru; Драпезо Александр Петрович – директор ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор», e-mail: vgs-05@mail.ru; Зубарь Татьяна Игоревна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>, e-mail: fix.tatyana@gmail.com; Канафьев Олег Дмитриевич – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, e-mail: Olegkan96@mail.ru; Лосев Алексей Владимирович – инженер ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор», e-mail: vgs-05@mail.ru; Михайлов Андрей Владимирович – заведующий отраслевой лабораторией по исследованиям, проектированию и испытаниям электромобилей и базовых компонентов электропривода научно-инжинирингового центра «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин» Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси, e-mail: amikhailau@oim.by; Русецкий Григорий Александрович – научный сотрудник лаборатории теории твердого тела Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, <https://orcid.org/0000-0002-8485-1093> e-mail: rusetsky@physics.by

Вклад авторов: Грабчиков Сергей Степанович – разработка, планирование и проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов; Грабчикова Елена Александровна – анализ проблемы электромагнитной экологии, ее актуальности для электротранспортных средств; Драпезо Александр Петрович – подготовка и проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов; Зубарь Татьяна Игоревна – планирование и изготовление экспериментальных образцов, исследование магнитных и электродинамических параметров; Канафьев Олег Дмитриевич – изготовление экспериментальных образцов, проведение испытаний экранирующих конструкций, анализ полученных результатов; Лосев Алексей Владимирович – подготовка и проведение эксперимен-

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

тальных ісследований, обработка и анализ полученных результатов; *Михайлов Андрей Владимирович* – разработка, планирование и проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов; *Русецкий Григорий Александрович* – обработка и верификация экспериментальных данных.

Для цитирования: Разработка материалов электромагнитной защиты и исследование уровней электромагнитных помех, наведенных электродвигателем / С. С. Грабчиков, Е. А. Грабчикова, А. П. Драпезо [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 105–117. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-105-117>

Поступила в редакцию: 15.07.2025

Доработанный вариант: 20.05.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

**Sergey S. Grabchikov^{1*}, Elena A. Grabchikova¹, Alexander P. Drapezo², Tatiana I. Zubar^{1*},
Oleg D. Kanafyev¹, Alexey V. Losev², Andrey V. Mikhailov³, Grigory A. Rusetskiy¹**

¹State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus,
19, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus

²LLC “Scientific and Technical Center Vist Group Sensor”,

2B, office 204, Novatorskaya St., 220053, Minsk, Republic of Belarus

³United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
12, Akademicheskaya St., 220072, Minsk, Republic of Belarus

THE DEVELOPMENT OF MATERIALS FOR ELECTROMAGNETIC PROTECTION AND THE INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE LEVELS GENERATED BY THE ELECTRIC MOTOR

Abstract. The problem of electromagnetic ecology and its relevance for electric vehicles are considered. The effectiveness of electromagnetic shielding of new materials – multilayer structures of gradient and symmetrical type – has been studied, and the levels of electromagnetic fields generated by the engine of an experimental electric vehicle in various operating modes have been determined. The effectiveness of electromagnetic shielding of single-layer alloys ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, ANMSM172) and multilayer structures ANMSM172/Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{80}$ and $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ /Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ formed on their basis has been experimentally evaluated. It has been shown that electromagnetic screens based on these materials significantly reduce the levels of low-frequency electromagnetic radiation exposure to humans, which allows us to approach the hygiene standards recommended by doctors and ensure electromagnetic compatibility requirements for the normal functioning of various electronic components and components of electric vehicles.

Keywords: electromagnetic shielding, low-frequency electromagnetic fields, electromagnetic compatibility, electric vehicles, multilayer structures, electromagnetic safety

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the State Program “High-tech technologies and equipment” for 2021–2025, Subprogram 7 “Development of electric transport”.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Sergey S. Grabchikov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: gss@physics.by; *Elena A. Grabchikova* – Senior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: grabchikova_e@bk.ru; *Alexander P. Drapezo* – Director at LLC “Scientific and Technical Center Vist Group Sensor”, e-mail: vgs-05@mail.ru; *Tatiana I. Zubar* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>, e-mail: fix.tatyana@gmail.com; *Oleg D. Kanafyev* – Junior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: Olegkan96@mail.ru; *Alexey V. Losev* – Engineer at LLC “Scientific and Technical Center Vist Group Sensor”, e-mail: vgs-05@mail.ru; *Andrey V. Mikhailov* – Head of the Branch Laboratory for Research, Design and Testing of Electric Vehicles and Basic Electric Drive Components of the Scientific and Engineering Center “Electromechanical and Hybrid Power Plants of Mobile Vehicles” at United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: amikhailau@oim.by; *Grigory A. Rusetskiy* – Research Fellow of the Laboratory of Solid State Theory at State Scientific and Practical Center of Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-8485-1093>, e-mail: rusetky@physics.by

Contribution of the authors: *Sergey S. Grabchikov* – the development, planning, and conducting experimental research, analysis of the results obtained; *Elena A. Grabchikova* – the analysis of the problem of electromagnetic ecology and its relevance for electric vehicles; *Alexander P. Drapezo* – the preparation and conduct of experimental research, analysis of the obtained results; *Tatiana I. Zubar* – the planning and production of experimental samples, investigation of magnetic and electrodynamic parameters; *Oleg D. Kanafyev* – the production of experimental samples, testing of shielding structures, analysis of the obtained results; *Alexey V. Losev* – the preparation and conduct of experimental studies, processing and analysis of the obtained results.

ned results; Andrey V. Mikhailov – the development, planning, and conducting experimental research, analysis of the obtained results; Grigory A. Rusetsky – feedback and verification of experimental data.

For citation: Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Drapezo A. P., Zubar T. I., Kanafyev O. D., Losev A. V., Mikhailov A. V., Rusetsky G. A. The development of materials for electromagnetic protection and the investigation of electromagnetic interference levels generated by the electric motor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 105–117 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-105-117>

Received: 15.07.2025

Modified: 20.05.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Повсеместное внедрение в повседневную жизнь людей и активная эксплуатация сложного электротехнического оборудования, современных информационных систем, скоростного транспорта и разнообразных бытовых приборов привели к резкому изменению физических характеристик среды обитания. Главным следствием этого процесса стало существенное возрастание интенсивности низкочастотных электромагнитных полей (НЧ ЭМП), что крайне негативно отразилось на электромагнитной экологии человека [1–3]. Масштабы данной проблемы уже вышли на глобальный уровень. Сегодня Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) официально признала устранение вредного влияния искусственных излучений на биосферу одной из самых критических и приоритетных задач, стоящих перед мировым сообществом. Эксперты ВОЗ ввели в обиход термин «электромагнитный смог» и включили его в четверку наиболее опасных факторов, вызывающих катастрофическое загрязнение окружающей среды и угрожающих здоровью населения планеты [4].

В настоящее время во многих странах происходит интенсивный переход на электротранспортные системы передвижения, реализуются национальные программы развития электрических транспортных средств (ЭТС). Однако эксплуатация данных транспортных средств приводит к повышению уровня интенсивности электромагнитного окружения людей, электромагнитной загрязненности. В связи с этим актуальными являются направления исследований, связанные с разработкой методов контроля электромагнитной обстановки, созданием материалов и технологий, обеспечивающих снижение уровня НЧ ЭМП и безопасную электромагнитную обстановку среды обитания человека.

Развитие ЭТС происходит в направлении расширенного применения бортовых электронных систем и специализированных программных комплексов, минимизации их габаритов, увеличения количества и плотности компоновки. Отсутствие электромагнитной совместимости бортовых электронных систем электромобилей может вызвать системный сбой работы и привести к потере функций управления транспортным средством, угрозе безопасности его водителя и пассажиров. В работе [5] установлена типичная зависимость: чем сложнее электрооборудование, тем сложнее обеспечение параметров ЭМС.

Несмотря на важность проблемы, в открытой печати отсутствуют исследования электромагнитной обстановки в электротранспортных средствах. Задачи экранирования при анализе разделяют, как правило, на экранирование электрических, магнитных и переменных ЭМП. Наиболее сложным случаем защиты является экранирование магнитоэлектростатического и низкочастотного электромагнитных полей [6]. Это связано с тем, что в низкочастотной области и для постоянных магнитных полей основную роль играет магнитная составляющая ЭМП, которая обладает гораздо более высокой проникающей способностью, чем электрическая составляющая [1]. Для экранирования постоянных и переменных ЭМП обычно используют магнитомягкие материалы (электротехническая сталь, пермаллой, суперпермаллой, аморфные и нанокристаллические металлические сплавы). В области электромагнитной защиты сейчас развивается новое направление, связанное со сложными экранирующими системами – многослойными, составными, композиционными и др. (пат. РФ № 2646439 «Многослойный электромагнитный экран» от 06.03.2018; пат. РФ № 2306635 «Составной комбинированный магнитный экран» от 20.09.2007; пат. США № 7358447 «Electromagnetic interference shields for electronic devices» от 11.03.2004; пат. РФ № 2474890 «Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения» от 10.02.2013 и др.).

В настоящей работе исследованы уровни НЧ ЭМП, генерируемых электродвигателем, разработанным в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, рассмотрены новые материалы электромагнитной защиты – многослойные структуры градиентного ($\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) и симметричного ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) типов, проведена оценка их эффективности экранирования.

Обеспечение электромагнитной безопасности: актуальность поиска решения проблемы и разработки нормативных документов. В современной индустрии транспортного машиностроения стремительный переход к электрической мобильности обострил проблему обеспечения электромагнитной безопасности и экологии внутренней среды автотранспортных средств. Актуальность данной проблемы обусловлена отсутствием гармонизированной нормативно-правовой базы и существенными противоречиями между международными рекомендациями и национальными санитарно-гигиеническими стандартами.

Сегодня в таких технологически развитых странах, как Российская Федерация, Республика Беларусь, США и Япония, отсутствуют профильные государственные стандарты, регламентирующие предельно допустимые уровни низкочастотных электромагнитных полей непосредственно внутри салонов электромобилей. В качестве базовых ориентиров международное сообщество зачастую использует рекомендации Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (International Commission on Non-Ionizing Radiation – ICNIRP)¹. Согласно данным рекомендациям, максимально допустимые уровни воздействия магнитной индукции в низкочастотном диапазоне имеют частотно-зависимый характер и составляют до 200 мкТл на частоте 40 Гц, до 100 мкТл – на частоте 800 Гц и до 20 мкТл – на частоте 3 кГц [7].

Тем не менее текущие пороговые значения международной комиссии подвергаются жесткой критике со стороны профильного научного сообщества. Многочисленные рецензируемые лабораторные и эпидемиологические исследования указывают на то, что данные рекомендации учитывают преимущественно кратковременные термические и острые стимуляционные эффекты, игнорируя долгосрочные биологические последствия нетепловой интенсивности. В связи с этим более 230 независимых экспертов в области биоэлектромагнетизма подписали международное обращение к Всемирной организации здравоохранения с требованием пересмотра нормативов в сторону их существенного ужесточения.

Национальные нормативно-правовые акты стран – участниц Евразийского экономического союза, в частности Республики Беларусь и Российской Федерации, регламентирующие безопасность среды обитания человека, базируются на превентивном подходе и демонстрируют значительно более жесткие требования к промышленной частоте 50 Гц и постоянным магнитным полям². Санитарные нормы и правила устанавливают жесткий порог для магнитной составляющей электромагнитного поля промышленной частоты. Значение магнитной индукции в местах длительного пребывания человека не должно превышать 5 мкТл, что эквивалентно напряженности поля порядка 4,0 А/м и является в десятки раз более строгим ограничением по сравнению с международными лимитами для близких частот.

В свою очередь гигиенические нормативы в отношении постоянных магнитных полей строго ограничивают техногенные изменения геомагнитного фона, допуская гипогеомагнитное ослабление или локальное усиление поля в жилой и производственной среде не более чем в 1,5 раза относительно естественного магнитного поля Земли, принимаемого за базовый уровень в 60 мкТл. Таким образом, в отрасли формируется выраженный научно-технический парадокс, когда силовые электроустановки, тяговые инверторы, аккумуляторные батареи и системы рекуперации электр-

¹ Руководства МКЗНИ по ограничению воздействия переменных электрических, магнитных и электромагнитных полей (до 300 ГГц) / Междунар. комиссия по защите от неионизирующего излучения. URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPEMFgdRus.pdf>

² О специфических санитарно-эпидемиологических требованиях к содержанию и эксплуатации объектов, являющихся источниками неионизирующего излучения: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 4 июня 2019 г. № 360. URL: https://minzdrav.gov.by/upload/dadvfiles/law/постановление_СМ_4%20июня%202019%20г.%20№%20360.pdf (дата обращения: 22.11.2023) ; Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: постановление Главного Государственного санитарного врача РФ, 28 янв. 2021 г., № 2 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 22.11.2023).

тромабилей генерируют в салоне сложные широкополосные низкочастотные поля. Эти излучения по своей интенсивности могут кратно превышать жесткие национальные стандарты для жилой среды, но формально укладываются в рамки устаревших международных нормативов. Данное обстоятельство обуславливает острую необходимость проведения комплексных электромагнитных измерений на борту электрического транспорта, разработки специализированных методов инженерного экранирования и создания целевой национальной нормативной базы.

Экспериментальные данные отечественных и зарубежных исследователей по уровням ЭМП, генерируемых в электромобилях, расходятся, что, по-видимому, связано с различиями в конструкции электромобилей, мощности их двигателей и материала корпуса [8–12]. Уровни сверхнизкочастотных магнитных полей в электромобилях и рельсовом транспорте варьируются от долей до сотен мкТл, не превышая стандарты ICNIRP, но пиковые значения при разгоне/торможении могут влиять на физическое состояние водителей и пассажиров ЭТС [8; 10; 11]. Основными источниками излучения выступают тяговые батареи и инверторы, создающие наиболее интенсивные поля у пола, а не у головы пассажиров [10]. В качестве мер защиты используются пассивное экранирование (пермаллой) и активные контуры компенсации, однако первые критикуются за массу, а вторые – за сложность конструкции, при этом длительное воздействие полей может нести риски для репродуктивной функции [9]. Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что в диапазоне частот 0–50 кГц генерируемый электромобилями уровень НЧ ЭМП составляет от единиц до сотен мкТл и основная часть магнитной энергии концентрируется в диапазоне частот 0,001–10 Гц. Согласно данным [4], основными факторами, которые определяют уровень ЭМП, генерируемого электрооборудованием транспортных средств, являются мощность электродвигателя, компоновка электрооборудования, материалы кузова и других элементов ЭТС.

Современные исследования в области медицины и магнитобиологии доказывают, что естественные электромагнитные поля выступают в качестве фундаментального экологического и биотропного фактора, оказывающего непрерывное воздействие на живые организмы [13]. Для минимизации рисков и сохранения здоровья населения профильными медицинскими ведомствами рекомендован гигиенический норматив уровня магнитной индукции НЧ ЭМП в жилой среде, составляющий 0,2 мкТл¹. Превышение этого порога критично, поскольку внешние НЧ ЭМП индуцируют во внутренних средах человеческого организма вторичные электрические поля и токи. Данные наведенные токи напрямую воздействуют на мышечные ткани, периферическую нервную систему и вызывают деполяризацию мембран, что приводит к патологическому изменению уровня возбудимости нейронов центральной нервной системы [14]. Согласно долгосрочным клиническим наблюдениям [15], систематическое и продолжительное пребывание человека в зонах с индукцией переменных магнитных полей в диапазоне от 0,2 до 6 мкТл является доказанной причиной возникновения опасных соматических нарушений. Данный уровень излучения провоцирует развитие онкологических процессов, дисфункцию сердечно-сосудистой системы, астенический синдром, а также выраженное угнетение иммунного статуса и угнетение репродуктивной функции организма. В связи с этим в индустрии транспортного машиностроения возникает острая необходимость разработки эффективных инженерных решений. Для обеспечения регламентированной электромагнитной безопасности водителей и пассажиров требуется оперативный поиск и внедрение экономически доступных методов непрерывного мониторинга параметров ЭМП транспортных систем, а также создание комплексных систем экранирования и защиты пользователей.

В качестве сравнения уровней электромагнитных полей и их влияния на человека можно рассмотреть такой феномен, как магнитные бури. Магнитные бури возникают в результате выброса плазменных потоков на Солнце и мощных возмущений магнитосферы Земли. Сформировалось мнение о зависимости самочувствия людей от магнитных бурь. События геомагнитной активности характеризуются локальными К-индексами [16]. Например, для зоны г. Москва значениям К-индексов 5–6 уровней (характеризуются как магнитная буря) соответствует амплитуда

¹ Как защититься от электромагнитного излучения. URL: <https://www.asutpp.ru/kak-zaschititsya-ot-elektromagnitnogo-izlucheniya.html> (дата обращения: 15.05.2024).

магнитной индукции 70–200 нТл, для 7–9 уровней (сильная магнитная буря) – 200–550 нТл. Отметим, что данные значения магнитной индукции НЧ ЭМП существенно ниже, чем рассмотренные выше уровни ЭМП, генерируемые оборудованием ЭТС [17].

Методика проведения эксперимента. Объектом испытаний исследования стал синхронный электродвигатель, который располагается в передней части подкапотного пространства. Мощность электродвигателя составляет 40 кВт с возможностью 30-секундной перегрузки до 80 кВт. Корпус двигателя изготовлен из алюминия толщиной 1,5 мм. После выхода двигателя на определенные режимы нагрузки (42 и 50 кВт) измерения спектров ЭМП, генерируемых электродвигателем, проводились в зоне силового кабеля питания электродвигателя (зона А), а также в двух точках на поверхности боковой алюминиевой конструкции электродвигателя – в центральной зоне боковой поверхности электродвигателя (зона В), и в верхней точке боковой поверхности – между краем конструкции и корпусом электродвигателя (зона С).

В качестве основы для экспериментальных образцов электромагнитных экранов использовалась плоская конструкция корпуса электродвигателя, расположенная перпендикулярно оси вращения вала двигателя. Максимальный размер конструкции составил 340×220 мм. Для испытаний были изготовлены четыре экспериментальных образца экранирующих конструкций:

I образец – Al;

II образец – Al с двусторонним покрытием из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 120 мкм ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$);

3) III образец – Al с двусторонним покрытием из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 120 мкм и слоем аморфного металлического сплава АМАГ172 толщиной 25 мкм ($\text{АМАГ172}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$);

IV образец – Al с двусторонним покрытием на основе многослойной структуры, состоящей из 120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, 5 мкм Cu и 120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$).

Для измерения спектров НЧ ЭМП использовали анализатор, включавший: измерительный зонд; четырехканальный (синхронный) модуль сигма-дельта АЦП LTR24; блок источников питания и ноутбук. Измерения составляющих индукции магнитного поля (B_x , B_y и B_z) проводились в диапазоне частот от 1 до 55 000 Гц в трех взаимно перпендикулярных ориентациях чувствительных элементов зонда относительно источника ЭМП по каналам – «х», «у» и «z» с частотой опроса 57 000 кГц по каждому каналу. Лучшая визуализация измеряемых сигналов достигалась за счет фильтрации измеряемых ЭМП по частоте от значений ≥ 1 Гц. Данная опция позволяет исключить влияние постоянного магнитного поля. Все приведенные в статье спектры электромагнитного поля имеют одинаковый шаг по осям абсцисс (время с шагом 0,05 с) и ординат (магнитная индукция с шагом 20 мкТл).

Значения результирующей амплитуды составляющих B_x , B_y и B_z оценивались из выражения

$$B_{xyz} = \left(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Уровень эффективности экранирования (Э) рассчитывался по формуле

$$\mathcal{E} = B_{xyz}^0 / B_{xyz}, \quad (2)$$

где B_{xyz}^0 – значение результирующей магнитной индукции при установке I образца; B_{xyz} – значение результирующей магнитной индукции при установке II, III и IV образцов.

Значения B_{xyz}^0 для алюминиевой конструкции (образец I) в зоне В выбраны в качестве реперных точек, поскольку они определяют уровни помехонесущих полей, генерируемых серийным электродвигателем. При нагрузках 42 и 50 кВт значения B_{xyz}^0 в зоне В составляли 351,9 и 753,9 мкТл соответственно.

Расчет помехонесущих ЭМП выполнен в предположении, что источник переменного магнитного поля может быть представлен в виде точечного магнитного диполя. Если для дальней зоны магнитное поле диполя убывает пропорционально кубу расстояния от центра диполя [1], то магнитная индукция на расстоянии r от боковой поверхности экранирующей конструкции может быть оценена по формуле

$$B(r) = B_0 \left(\frac{A/2}{A/2 + r} \right)^3, \quad (3)$$

где B_0 – значение магнитной индукции на поверхности экранирующей конструкции; $A/2$ – расстояние от центра магнитного диполя до поверхности экранирующей конструкции. Для нашего случая $A = 0,32$ м. Упрощая выражение (3), получим:

$$B = B_0 \left(\frac{A}{A + 2r} \right)^3. \quad (4)$$

Оценка эффективности экранирования однослойных и многослойных структур. Исследования эффективности экранирования материалов, используемых в составе экспериментальной экранирующей конструкции, выполнены на образцах электролитически осажденных сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 100 мкм, аморфных металлических сплавов АМАГ172 состава $\text{Co}_{72}\text{Fe}_5\text{Ni}_{11}\text{Si}_9\text{Mn}_1\text{Cr}_2$ толщиной 25 мкм, составных многослойных структурах $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. При формировании экранов $\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ в качестве подложек применялись цилиндрические заготовки алюминия диаметром 45 мм, длиной 200 мм и толщиной 1 мм. При формировании экранов $\text{Al}/\text{АМАГ172}$ лента аморфного сплава АМАГ172 наклеивались внахлест на алюминиевые цилиндрические подложки диаметром 30 мм, длиной 200 мм и толщиной 1 мм. Для оптимизации магнитных свойств аморфная лента отжигалась в вакууме при температуре 300 °С в течение 30 мин.

Оценка эффективности экранирования ($\mathcal{E}$) цилиндрических образцов проводилась по результатам расчетов и измерений отношения напряженностей (индукций) магнитного поля в защищаемой области пространства без экрана $H(B)$ и при наличии его $H_1(B_1)$ [1]:

$$\mathcal{E} = \frac{B}{B_1} = \frac{H}{H_1}. \quad (5)$$

Результаты экспериментальных исследований эффективности экранирования однослойных образцов АМАГ172; $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и многослойных экранов $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ от напряженности постоянного магнитного поля приведены на рис. 1.

В однослойных образцах наблюдались характерные зависимости $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ с максимальными значениями эффективности экранирования ($\mathcal{E}_{\max}$), равными 25÷27 дБ для АМАГ172 в области 140÷180 А/м и 31 дБ для $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ в области 800÷1000 А/м. В многослойных экранах $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ значения $\mathcal{E}_{\max}$ достигали 80÷82 дБ в области 900÷1000 А/м. Полученные данные позволили сделать вывод о том, что в многослойных структурах градиентного типа $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ имеет место эффект значительного усиления эффективности экранирования по сравнению с однослойными образцами.

Полученный результат имеет важное практическое значение, поскольку позволяет, используя комбинации известных материалов, создавать высокоэффективные экранирующие системы магнитостатических и НЧ ЭМП. Измерения эффективности экспериментальных

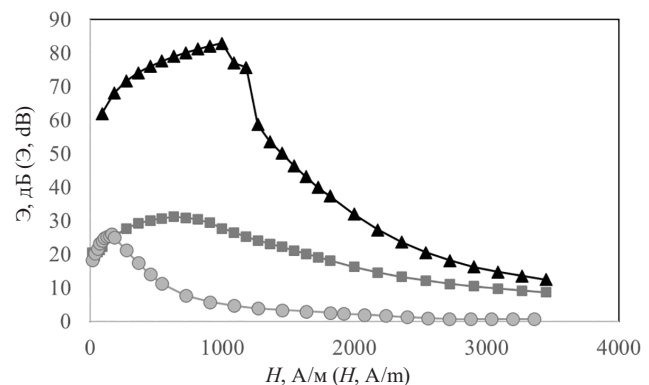


Рис. 1. Экспериментальные зависимости эффективности экранирования сплавов АМАГ172 (●) и $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (■) и многослойной структуры $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (▲) от напряженности магнитного поля. Толщина слоя: АМАГ172 – 25 мкм, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – 100 мкм

Fig. 1. Experimental dependencies of the shielding effectiveness of ANMSM172 (●) and $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (■) alloys and the $\text{Al}/\text{ANMSM172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ multilayer structure on the magnetic field strength. Layer thickness: ANMSM172 – 25 μm, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – 100 μm

образцов экранирующих конструкций не проводились, поскольку геометрическая форма образцов не соответствует установленным требованиям методик измерения магнитных характеристик [16] и расчетов электродинамических параметров [17].

Результаты измерения уровней генерируемого электродвигателем низкочастотного электромагнитного поля. Алюминий является наиболее широко используемым материалом для изготовления корпусов электродвигателей. Это обусловлено ценным комплексом его физико-технических характеристик, технологичностью процесса изготовления и невысокой стоимостью. Однако с точки зрения электромагнитной защиты и обеспечения ЭМС алюминий неэффективен, поскольку не обеспечивает эффективного экранирования магнитной составляющей НЧ ЭМП.

Измерения составляющих индукции магнитного поля за конструкционной защитой из алюминия (I образец) в центральной области (зона В) показали (рис. 2), что при нагруженной мощности электродвигателя 42 кВт значение результирующей магнитной индукции составило $B_{xyz}^0 = 351,9$ мкТл, при 50 кВт – $B_{xyz}^0 = 753,9$ мкТл. Следует отметить, что при смещении в верхнюю точку экранирующей конструкции (зона С) уровень помехонесущих ЭМП значительно увеличивается. При значениях мощностях нагрузки 42 и 50 кВт значения B_{xyz}^0 составляют 483,7 и 1040,0 мкТл соответственно. Более высокие уровни помехонесущих полей в зоне С, чем в центральной зоне В, связаны с процессами затекания магнитного потока в краевые области экранирующей конструкции.

Уровень электромагнитной помехи вблизи силового кабеля (зона А) при нагрузке электродвигателя мощностью 42 кВт составил 40,2 мкТл, при нагрузке 50 кВт – 71,6 мкТл.

Данные значения индукции переменного ЭМП, генерируемые электродвигателем, достаточно высоки и могут оказывать негативное влияние как на функционирование электрооборудования, так и электромагнитную безопасность пользователей. Несомненно, при удалении от источника уровни помехонесущих полей снижаются, поэтому для каждого месторасположения рецептора и материала электромагнитного экрана уровни ЭМП необходимо оценивать отдельно.

Рассмотрим экспериментально полученные результаты по влиянию дополнительных многослойных структур (образцы II, III и IV) на эффективность экспериментальных экранирующих конструкций, по сравнению со стандартной алюминиевой защитой (образец I).

Спектр ЭМП, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции $Ni_{80}Fe_{20}/Al/Ni_{80}Fe_{20}$ (II образец, зона В) при нагрузке 42 кВт представлен на рис. 3. Уровень результирующего сигнала составляет $B_{xyz} = 108,2$ мкТл, что в 3,26 раза ниже, чем для экспериментального образца I.

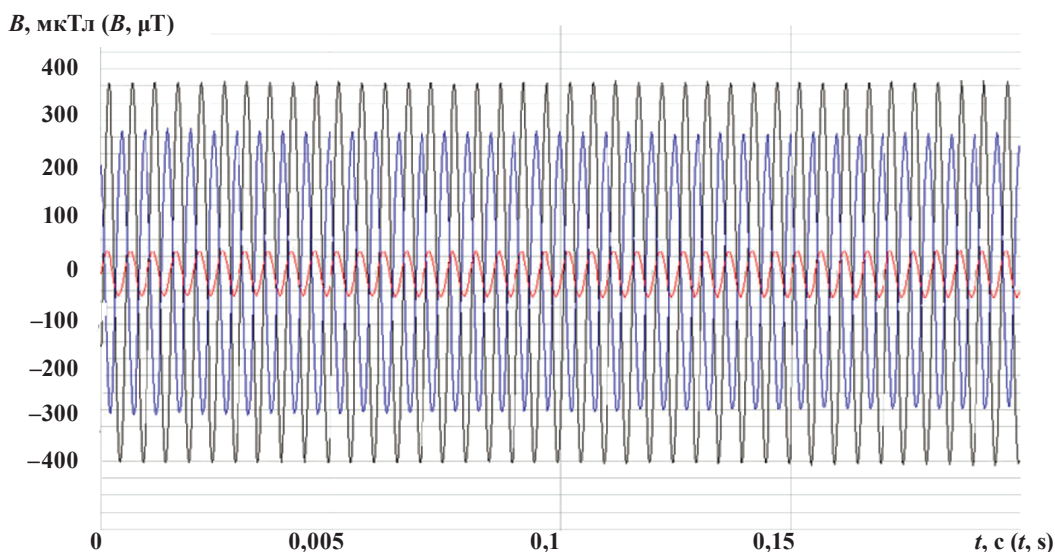


Рис. 2. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центре поверхности экранирующей конструкции из алюминия $d = 1,5$ мм. Зона В. Нагрузка 42 кВт (образец I)

Fig. 2. Electromagnetic field spectrum generated at the center of the surface of a $d = 1.5$ mm aluminum shielding structure – zone В. Load 42 kW (sample I)

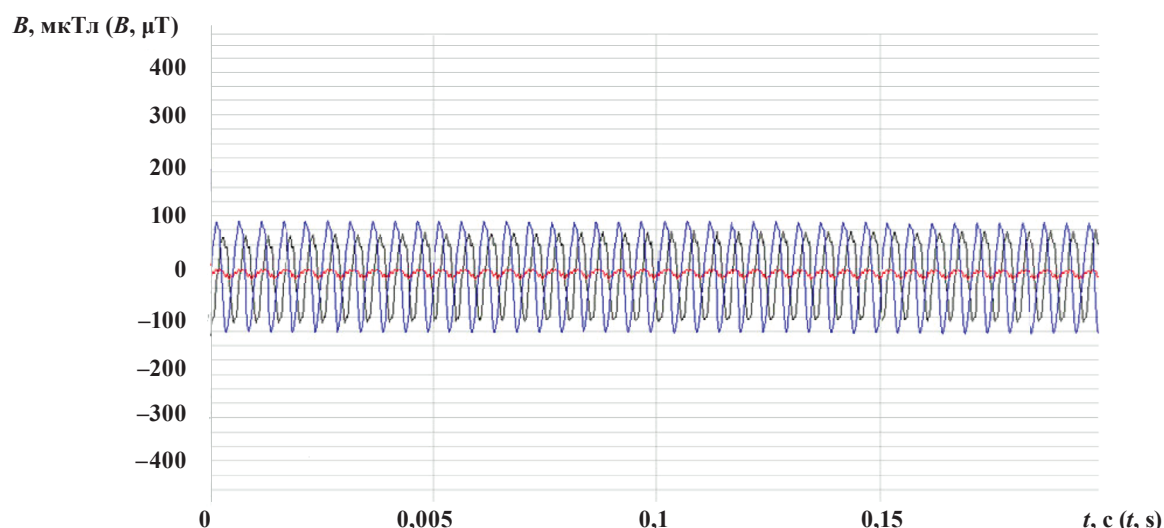


Рис. 3. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центре поверхности экранирующей конструкции $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – зона В. Нагрузка 42 кВт (образец II)

Fig. 3. Electromagnetic field spectrum generated at the center of the surface of the $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ shielding structure – zone B. Load 42 kW (sample II)

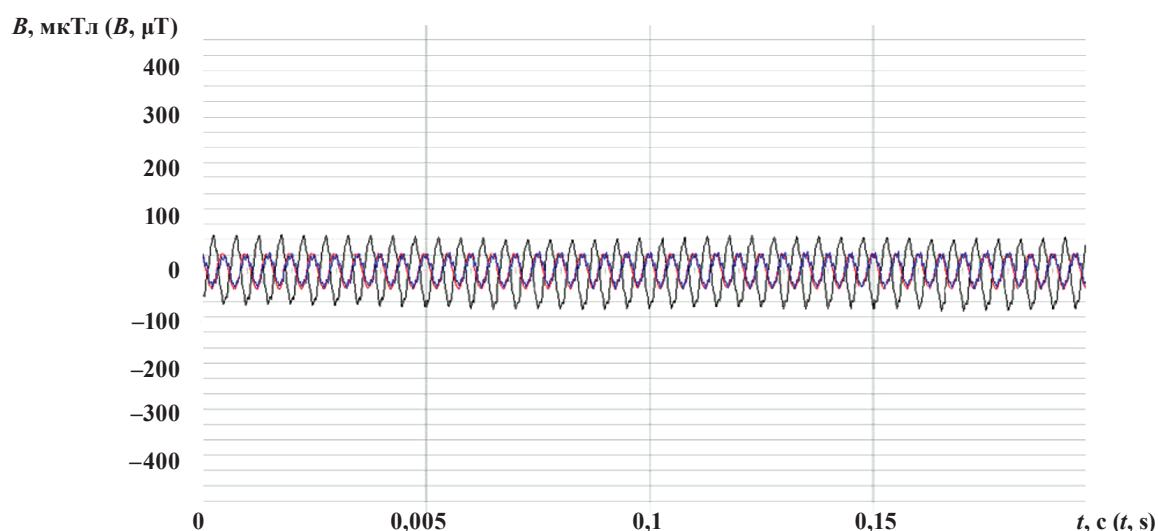


Рис. 4. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центре поверхности экранирующей конструкции АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – зона В. Нагрузка 42 кВт (образец III)

Fig. 4. Electromagnetic field spectrum generated at the center of the surface of the АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ shielding structure – zone B. Load 42 kW (sample III)

Спектр ЭМП, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (III образец, зона В) при нагрузке 42 кВт показан на рис. 4. Уровень результирующего сигнала составляет $B_{xyz} = 70,6$ мкТл, что в 4,95 раза ниже, чем для экспериментального образца I.

Спектр ЭМП, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (IV образец, зона В) при нагрузке 42 кВт представлен на рис. 5. Уровень результирующего сигнала составляет $B_{xyz} = 41,1$ мкТл, что в 8,56 раз ниже, чем для экспериментального образца I.

Обобщенные результаты значений составляющих компонент индукции магнитного поля, результирующей индукции магнитного поля и эффективности экранирования в центре поверхности экспериментальных образцов I, II, III и IV для зоны В при нагрузке 42 кВт представлены в табл. 1.

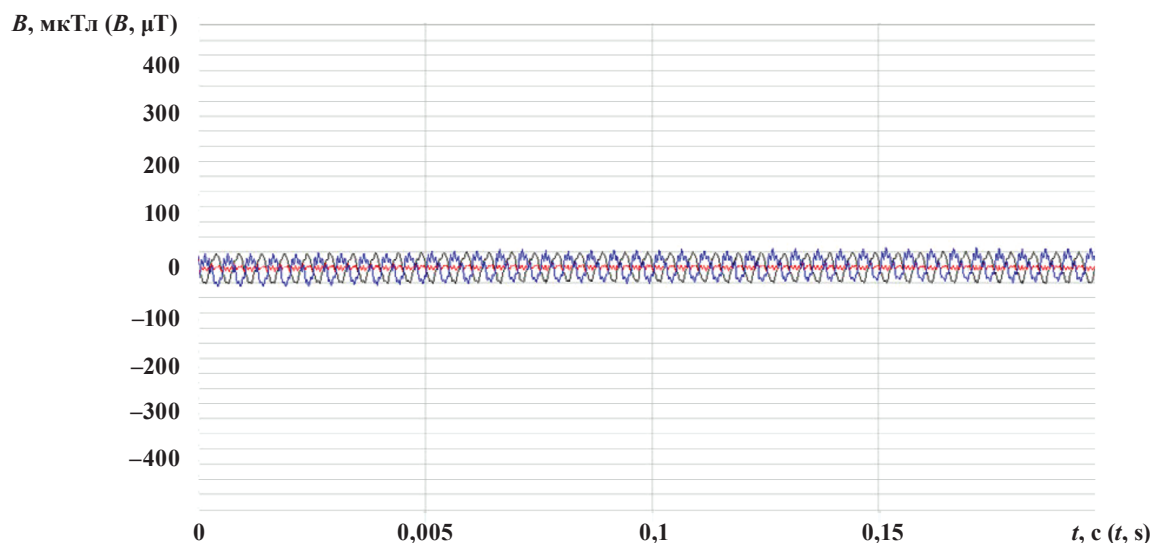


Рис. 5. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – зона В. Нагрузка 42 кВт (IV образец)

Fig. 5. Electromagnetic field spectrum generated at the central point of the $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ shielding structure – zone B. Load 42 kW (sample IV)

Т а б л и ц а 1. Значения составляющих компонент индукции магнитного поля (B_x , B_y и B_z), результирующей индукции магнитного поля (B_{xyz}) и эффективности экранирования ($\mathcal{E}$) в центре поверхности экранирующих конструкций различного типа (зона В)

T a b l e 1. Values of the magnetic field induction components (B_x , B_y , and B_z), the resultant magnetic field induction (B_{xyz}), and the shielding effectiveness ($\mathcal{E}$) at the center of the surface of various types of shielding structures (zone B)

Номер эксперимента (Number of a test)	Экспериментальный образец; состав конструкции; условия испытаний (Experimental sample; structure composition; test conditions)	B_x , мкТл (μT)	B_y , мкТл (μT)	B_z , мкТл (μT)	$(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)$, мкТл ² (μT^2)	B_{xyz} , мкТл (μT)	$\mathcal{E}$, разы (ratio)
1	Образец I; Al; $d = 1,5$ мм, $P = 50$ кВт Sample I; Al; $d = 1.5$ mm, $P = 50$ kW	600	220	400	568 400	753,9	1,0
2	Образец I; Al; $d = 1,5$ мм, $P = 42$ кВт Sample I; Al; $d = 1.5$ mm, $P = 42$ kW	280	30	210	123 400	351,9	1,0
3	Образец II; Al; $d = 1,5$ мм $(120 \text{ мкм } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$, $P = 42$ кВт Sample II; Al; $d = 1.5$ mm $(120 \text{ }\mu\text{m } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$, $P = 42$ kW	60	5	90	11 725	108,2	3,26
4	Образец III; Al; $d = 1,5$ мм; $(120 \text{ мкм } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times$ $\times 2 + 25 \text{ мкм } \text{АМАГ172}$, $P = 42$ кВт Sample III; Al; $d = 1.5$ mm; $(120 \text{ }\mu\text{m } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times$ $\times 2 + 25 \text{ }\mu\text{m } \text{ANMSM172}$, $P = 42$ kW	58	29	28	4 989	70,6	4,95
5	Образец IV; Al; $d = 1,5$ мм + $(120 \text{ мкм } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/5 \text{ мкм } \text{Cu}/120 \text{ мкм } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$, $P = 42$ кВт Sample IV; Al; $d = 1.5$ mm + $(120 \text{ }\mu\text{m } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/5 \text{ }\mu\text{m } \text{Cu}/120 \text{ }\mu\text{m } \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$; $P = 42$ kW	28	3	30	1 693	41,1	8,56

П р и м е ч а н и е: d – толщина экранирующей конструкции; P – нагрузка.

N o t e: d – thickness of the shielding structure; P – load.

Как видно из приведенных данных, при использовании алюминиевой конструкции с дополнительными экранами в последовательности II, III и IV образец уровень сигнала уменьшается в 3,26; 4,95 и 8,56 раза соответственно. В верхней точке алюминиевой конструкции (зона С) для аналогичной последовательности уровень сигнала уменьшается в 1,93; 2,18 и 2,2 раза соот-

ветственно. Более низкие значения эффективности экранирования в верхней точке, чем в центральной зоне В, связаны с процессами затекания магнитного потока в краевые области конструкции.

Наиболее высокий уровень электромагнитной защиты был достигнут при использовании алюминиевой конструкции с дополнительным экраном на основе многослойной структуры (120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ /5 мкм Cu /120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) $\times 2$ (образец IV). Данный результат связан с большей суммарной толщиной магнитных слоев образца IV (480 мкм – $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) по сравнению с суммарной толщиной магнитных слоев образца III (240 мкм – $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и 25 мкм – АМАГ172).

В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов ослабления модулей магнитной индукции при удалении от поверхности экранирующей конструкции для зоны В и различных образцов электромагнитных экранов.

Т а б л и ц а 2. Оценка коэффициентов ослабления и модулей магнитной индукции при удалении от поверхности экранирующей конструкции для зоны В на расстоянии r метров для различных вариантов электромагнитных экранов, выполненная по формуле (4)
 Table 2. Estimation of attenuation coefficients and magnetic induction moduli at a distance r in meters from the shielding structure surface for zone В, calculated by formula (4)

r , м (r , m)	B/B_0	B , мкТл образец I, 50 кВт (B , μT sample I, 50 kW)	B , мкТл образец I, 42 кВт (B , μT sample I, 42 kW)	B , мкТл образец II, 42 кВт (B , μT sample II, 42 kW)	B , мкТл образец III, 42 кВт (B , μT sample III, 42 kW)	B , мкТл образец IV, 42 кВт (B , μT sample IV, 42 kW)
0,0	1,0	753,9	351,9	108,2	70,6	41,1
0,1	0,233 045	175,693	82,00	25,2155	16,453	9,57815
0,2	0,0877915	66,186	30,8938	9,49 904	6,19 808	3,60 823
0,3	0,042 081	31,7249	14,8083	4,55 317	2,97 092	1,72 953
0,4	0,0233 236	17,5837	8,20 758	2,52 362	1,64 665	0,958 601
0,5	0,0142 472	10,7409	5,01 357	1,54 154	1,00 585	0,585 558
0,6	0,00933 081	7,03 449	3,28 351	1,00 959	0,658 755	0,383 496
0,7	0,00643 968	4,85 488	2,26 612	0,696 774	0,454 642	0,264 671
0,8	0,00462 963	3,49 028	1,62 917	0,500 926	0,326 852	0,190 278
0,9	0,00343 908	2,59 272	1,21 021	0,372 109	0,242 799	0,141 346
1,0	0,00262 413	1,97 833	0,923 433	0,283 931	0,185 264	0,107 852

Для примера, на расстоянии 0,1 м для образцов I, II, III и IV значения модуля магнитной индукции соответственно равнялись 82,0086; 25,2155; 16,453 и 9,57815 мкТл. При удалении на расстояние 0,5 м для образцов I, II, III и IV значения B соответственно составляли 5,01357; 1,54154; 1,00585; 0,585558 мкТл. Данные результаты позволяют оценить безопасные, с точки зрения обеспечения ЭМС, расстояния расположения электронных блоков ЭТС относительно электродвигателя при условии знания уровней электромагнитной устойчивости конкретных блоков.

Заключение. На основании измерений уровней индукции генерируемых экспериментальным электродвигателем переменных магнитных полей, выполненных в диапазоне частот от 1 до 55 000 Гц с применением различных экранирующих конструкций получены следующие результаты.

1. Используемые в электромобиле синхронный двигатель и токовые кабели при нагрузках 42 и 50 кВт являются источниками переменных магнитных полей, достигающих значений магнитной индукции 500÷1000 мкТл и 40÷70 мкТл соответственно.

2. Применение многослойных экранов симметричного ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) и градиентного (АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) типов позволяет повысить эффективность экранирующих конструкций на основе алюминия в 3,26; 8,56 и 4,95 раз (зона В) соответственно.

3. Формирование на многослойной структуре $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ дополнительного слоя толщиной 25 мкм аморфного сплава АМАГ172 увеличивает эффективность экранирования на 52 %, а нанесение двух дополнительных слоев $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ суммарной толщиной 240 мкм увеличивает эффективность на 263 %. Таким образом, существует несколько путей повышения эффективности

электромагнитного экранирования. Оптимальный выбор варианта решения определяется возможностями технологии, а также требованиями к массогабаритным параметрам и физико-техническим характеристикам конечного экрана.

4. Проведенная расчетным методом оценка уровней помехонесущих ЭМП, генерируемых двигателем электромобиля, показала, что на расстоянии 0,5 м значения B_{xyz} равнялись 5,0 мкТл (I образец), 1,5 мкТл (II образец); 1,0 мкТл (III образец) и 0,6 мкТл (IV образец). Данное расположение электронных блоков относительно электродвигателя можно считать безопасным с точки зрения обеспечения ЭМС.

Поскольку исследования уровней электромагнитных полей проводили в стационарном режиме в испытательном центре Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, то проверить характеристики ЭПМ различных режимах силового оборудования не представилось возможным. Для получения более полной картины об уровнях помехонесущих излучений ЭМП электрических транспортных средств необходимо осуществлять дополнительные испытания на полигоне при возможности полной нагрузки и различных режимах работы.

Список использованных источников

1. Кечиев, Л. Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов. – М.: Группа ИТД, 2010. – 470 с.
2. Здоровье человека и электромагнитное поле. Защита населения от ЭМП. – URL: <https://www.ecopole.ru/> (дата обращения: 13.03.2016).
3. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России / Ю. Г. Григорьев, О. А. Григорьев, В. С. Степанов, Ю. П. Пальцев; под ред. А. К. Демина. – М.: Изд-во Рос. Ассоциации обществ. здоровья, 1997. – 76 с.
4. Проблема защиты человека от воздействия низкочастотных электромагнитных полей в современном обществе. Возможные пути ее решения / С. С. Грабчиков, Е. А. Грабчикова, А. П. Драпезо [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 114–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>
5. Николаев, П. А. Электромагнитная совместимость автотранспортных средств / П. А. Николаев, Л. Н. Кечиев; под ред. Л. Н. Кечиева. – М.: Грифон, 2015. – 424 с.
6. Глонягин, Ю. В. Элементы теории и расчета магнитостатических полей ферромагнитных тел / Ю. В. Глонягин. – Л.: Судостроение, 1967. – 180 с.
7. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection // Health Physics. – 2010. – Vol. 99, № 6. – P. 818–836. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f06c86>.
8. Магнитные поля на электротранспорте и экология человека / Н. Г. Птицына, Дж. Виллорези, Ю. А. Копытенко, М. И. Тясто. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 120 с.
9. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats / W. Duan, C. Liu, H. Wu [et al.] // Bioelectromagnetics. – 2014. – Vol. 35. – P. 58–69. <https://doi.org/10.1002/bem.21816>
10. Halgamuge, M. N. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars / M. N. Halgamuge, C. D. Abeyrathne, P. Mendis // Radiation Protection Dosimetry. – 2010. – Vol. 141, № 3. – P. 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
11. Vedholm, K. Personal Exposure Resulting from Level Low Frequency Electromagnetic Fields in Automobiles: Abstract No. F-9 / K. Vedholm, Y. K. Hamnerius // Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, June 8–13, Bologna, Italy: Abstract book. – 1997. – Vol. 6. – P. 445.
12. Snyder, M. Magnetic Shielding for Electric Vehicles. Program Review / M. Snyder // Contract DAAE07-93-C-R107. – Army TACOM, Chrysler Corp., 1995. – 56 p. – URL: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>
13. Любимов, В. В. Электромагнитные поля, их биотропность и нормы экологической безопасности / В. В. Любимов, М. В. Рагульская // Успехи современной радиофизики. – 2004. – № 3. – С. 49–60.
14. Стожаров, А. Н. Медицинская экология: учеб. пособие / А. Н. Стожаров. – Минск: Выш. шк., 2007. – 368 с.
15. Основные факторы космической погоды. Мировой центр данных. – URL: <https://mirfakt.ru/osnovnye-factory-kosmicheskoi-pogody-mirovoi-centr-dannyh> (дата обращения: 15.05.2024).
16. Электрические и магнитные измерения / под ред. Е. Г. Шрамкова. – Л.: НКТП СССР, 1937. – 585 с.
17. Реутов, Ю. А. Классические магнитные экраны / Ю. А. Реутов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 72 с.

References

1. Kechiev L. N., Akbashev B. B., Stepanov P. V. *Shielding of Technical Facilities and Shielding Systems*. Moscow, Gruppya ITD Publ., 2010. 470 p. (in Russian).
2. *Human Health and Electromagnetic Fields. Protecting the Population from Electromagnetic Fields*. Available at: <https://www.ecopole.ru> (accessed 13 March 2016) (in Russian).

3. Grigor'ev Yu. G., Grigor'ev O. A., Stepanov V. S., Pal'tsev Yu. P. *Electromagnetic Pollution of the Environment and the Health of the Russian Population*. Moscow, Publ. House of the Russian Association of Public Health, 1997. 76 p. (in Russian).
4. Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Drapezo A. P., Zubar T. I., Panasyuk M. I., Kanafyev O. D., Losev A. V., Trukhanov A. V., Fedosyuk V. M. The problem of protecting a person from the effects of low-frequency electromagnetic fields in modern society. Possible ways to solve it. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 114–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>
5. Nikolaev P. A., Kechiev L. N. *Electromagnetic Compatibility of Motor Vehicles*. Moscow, Grifon Publ., 2015. 424 p. (in Russian).
6. Glonyagin Yu. V. *Elements of the Theory and Calculation of Magnetostatic Fields of Ferromagnetic Bodies*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1967. 180 p. (in Russian).
7. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99, no. 6, pp. 818–836. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f06c86>
8. Ptitsyna N. G., Villorezi Dzh., Kopytenko Yu. A., Tyasto M. I. *Magnetic Fields on Electric Vehicles and Human Ecology*. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2010. 120 p. (in Russian).
9. Duan W., Liu C., Wu H., Chen C., Zhang T., Gao P., Luo X. [et al.]. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats. *Bioelectromagnetics*, 2014, vol. 35, pp. 58–69. <https://doi.org/10.1002/bem.21816>
10. Halgamuge M. N., Abeyrathne C. D., Mendis P. Measurements performed in electric trains – Comparison with ICNIRP Limit and Laboratory Experiments. Measurements and Analysis of Electromagnetic Fields from Trams, Trains and Hybrid Cars. *Radiation Protection Dosimetry*, 2010, vol. 141, no. 3, pp. 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
11. Vedholm K., Hamnerius Y. K. Personal Exposure Resulting from Level Low Frequency Electromagnetic Fields in Automobiles. Abstract No. F-9. *Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, June 8–13, 1997*. Bologna, Italy, 1997, vol. 6, p. 445.
12. Snyder M. *Magnetic Shielding for Electric Vehicles. Program Review*. Contract DAAE07-93-C-R107. Army TACOM, Chrysler Corp., 1995. 56 p. Available at: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>
13. Lyubimov V. V., Ragul'skaya M. V. Electromagnetic Fields, Their Biotropism and Environmental Safety Standards. *Uspekhi sovremennoi radiofiziki* [Advances in Modern Radiophysics], 2004, no. 3, pp. 49–60 (in Russian).
14. Stozharov A. N. *Medical Ecology*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2007. 368 p. (in Russian).
15. *Main Factors of Space Weather*. World Data Center. Available at: <https://mirfakt.ru/osnovnye-factory-kosmicheskoi-pogody-mirovoi-centr-dannyh/> (accessed 15 May 2024) (in Russian).
16. Shramkov E. G. (ed.). *Electrical and Magnetic Measurements*. Leningrad, Publ. House of the NKTP of the USSR, 1937. 585 p. (in Russian).
17. Reutov Yu. A. *Classic Magnetic Screens*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 72 p. (in Russian).