

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>
УДК 537.871.3Оригинальная статья**С. С. Грабчиков^{1*}, Е. А. Грабчикова¹, А. П. Драпезо², Т. И. Зубарь¹, М. И. Панасюк¹,
О. Д. Канафьев¹, А. В. Лосев², А. В. Труханов¹, В. М. Федосюк¹**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**ПРОБЛЕМА ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ.
ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ**

Аннотация. Рассмотрена проблема воздействия низкочастотных электромагнитных полей (ЭМП), генерируемых электротранспортными средствами (ЭТС) и бытовыми приборами, на организм человека. Приведены данные по влиянию ЭМП на здоровье человека и нормативных документов, устанавливающих требования по электромагнитной безопасности. В качестве перспективного метода решения данной проблемы рассмотрен способ электромагнитного экранирования, представлены материалы для реализации данного метода. Экспериментально измерены уровни электромагнитного излучения ряда ЭТС и бытовых электрических приборов. Расчетным методом проведена оценка эффективности электромагнитного экранирования материалов на основе однослойных покрытий сплавов $Ni_{80}Fe_{20}$, многослойных пленочных структур $Ni_{80}Fe_{20}/Cu$ и аморфных металлических сплавов АМАГ172. Показано, что электромагнитные экраны на основе данных материалов значительно снижают уровни воздействия ЭМП ЭТС и бытовых электроприборов на человека, что позволяет приблизиться к установленным гигиеническим нормативам и обеспечить требования нормативных документов по предельно допустимым уровням воздействия ЭМП.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, низкочастотные электромагнитные поля, электротранспортные средства, электрические приборы, электромагнитная безопасность

Благодарности: работа выполнена в рамках подпрограммы 7 «Развитие электротранспорта» Государственной программы «Научное развитие технологий и техника» на 2021–2025 годы.

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук В. М. Федосюк.

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@ifftp.bas-net.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, старший 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; *Панасюк Мария Игоревна* – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0003-0730-2100>. E-mail: maria.panasiuk.99@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; *Труханов Алексей Валентинович* – док-

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

тор физико-математических наук, заместитель генерального директора Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>. E-mail: trukhanov@physics.by; Федосюк Валерий Михайлович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, генеральный директор Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: fedosyuk@physics.by

Вклад авторов: *Грабчиков Сергей Степанович* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, анализ и обобщение литературных данных, планирование исследований по изучению способов электромагнитного экранирования, обобщение и интерпретация результатов исследования, формулировка выводов; *Грабчикова Елена Александровна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, обобщение и интерпретация результатов исследования, применение математических методов для анализа данных, отслеживание воспроизводимости результатов; *Драпезо Александр Петрович* – создание модели исследования, планирование исследований по изучению эффективности экранирования различных материалов, проведение инструментальных исследований уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием; *Зубарь Татьяна Игоревна* – разработка дизайна экспериментального исследования, сбор и систематизация данных; пробоподготовка образцов на основе однослойных покрытий сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, многослойных пленочных структур $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$; *Панасюк Мария Игоревна* – синтез образцов на основе однослойных покрытий сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом; *Канафьев Олег Дмитриевич* – сбор данных литературы, анализ и обобщение данных литературы, проведение инструментальных исследований уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием электромобилей; *Лосев Алексей Владимирович* – применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, проведение инструментальных исследований уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием электромобилей и уровней магнитной составляющей индукции низкочастотного электромагнитного поля бытовых электроприборов; *Труханов Алексей Валентинович* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, обобщение и интерпретация результатов исследования; *Федосюк Валерий Михайлович* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, создание модели исследования.

Для цитирования: Проблема защиты человека от воздействия низкочастотных электромагнитных полей в современном обществе. Возможные пути ее решения / С. С. Грабчиков [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 114–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>

Поступила в редакцию: 31.01.2024

Доработанный вариант: 23.05.2024

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Sergey S. Grabchikov^{1*}, Elena A. Grabchikova¹, Alexander P. Drapezo², Tatiana I. Zubar¹, Maria I. Panasyuk¹,
Oleg D. Kanafyev¹, Alexey V. Losev², Alexey V. Trukhanov¹, Valery M. Fedosyuk¹

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

²Vist Group Sensor Scientific and Technical Center LLC,
2B, office 204, Innovatorskaya Str., 220053, Minsk, Republic of Belarus

THE PROBLEM OF PROTECTING A PERSON FROM THE EFFECTS OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS IN MODERN SOCIETY. POSSIBLE WAYS TO SOLVE IT

Abstract. The paper considers the problem of the impact of low-frequency electromagnetic fields (EMF) generated by electric vehicles (EV) and household appliances on humans in modern society. The data on the effect of EMF on human health and regulatory documents establishing requirements for electromagnetic safety are presented. The method of electromagnetic shielding and materials for the implementation of this method are considered as a promising method for solving the problem. The levels of electromagnetic radiation from a number of EV and household electrical appliances have been experimentally measured. The efficiency of electromagnetic shielding of materials based on single-layer coatings of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys, multilayer film structures $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ and amorphous metal alloys AMAG172 has been estimated using a computational method. It is shown that electromagnetic screens based on these materials significantly reduce the levels of exposure to EMF of EV and household electrical appliances on humans, which allows us to approach the hygienic standards recommended by doctors and meet the requirements of regulatory documents on remote control.

Keywords: electromagnetic shielding, low-frequency electromagnetic fields, electric vehicles, electrical appliances, electromagnetic safety

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

Conflict of interest: the author's team includes a member of the Editorial Board Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Physics and Mathematics) Valery M. Fedosyuk.

Information about the authors: *Sergey S. Grabchikov** – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: gss@ifftp.bas-net.by; *Elena A. Grabchikova* – Senior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: grabchikova_e@bk.ru; *Alexander P. Drapezo* – Director at Vist Group Sensor Scientific and Technical Center LLC. E-mail: vgs-05@mail.ru; *Tatiana I. Zubar* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>. E-mail: fix.tatyana@gmail.com; *Maria I. Panasyuk* – Junior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. <https://orcid.org/0000-0003-0730-2100>. E-mail: maria.panasiuk.99@gmail.com; *Oleg D. Kanafyev* – Junior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: Olegkan96@mail.ru; *Alexey V. Losev* – Engineer at Vist Group Sensor Scientific and Technical Center LLC. E-mail: vgs-05@mail.ru; *Alexey V. Trukhanov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Deputy Director General at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>. E-mail: trukhanov@physics.by; *Valery M. Fedosyuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director General at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: fedosyuk@physics.by

Contribution of the authors: *Sergey S. Grabchikov* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, analysis and generalization of literature data, planning of research on the study of electromagnetic shielding methods, generalization and interpretation of research results, formulation of conclusions; *Elena A. Grabchikova* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, generalization and interpretation of research results, application of mathematical methods for data analysis, tracking the reproducibility of results; *Alexander P. Drapezo* – creation of a research model, planning of studies on the effectiveness of shielding of various materials, conducting instrumental studies of the intensity levels of magnetic fields generated by electrical equipment; *Tatiana I. Zubar* – design development of an experimental study, data collection and systematization, preparation of samples based on single-layer $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys coatings, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ multilayer film structures; *Maria I. Panasyuk* – synthesis of samples based on single-layer $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys coatings, editing of the text of the manuscript, design of the manuscript, work with graphic material; *Oleg D. Kanafyev* – collection of literature data, analysis and generalization of literature data, carrying out instrumental studies of the intensity levels of magnetic fields generated by electric equipment of electric vehicles; *Alexey V. Losev* – application of statistical and mathematical methods to analyze the results of the study, conducting instrumental studies of the intensity levels of magnetic fields generated by electric equipment of electric vehicles and the levels of the magnetic component of induction of the low-frequency electromagnetic field of household electrical appliances; *Alexey V. Trukhanov* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, generalization and interpretation of research results; *Valery M. Fedosyuk* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, creation of a research model.

For citation: 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. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = 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>

Received: 31.01.2024

Modified: 23.05.2024

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. В последние годы в результате бурного развития и расширенного применения электротехнической, радиоэлектронной, информационной, транспортной и бытовой техники в сфере жизнедеятельности людей значительно повысился уровень низкочастотных электромагнитных полей (ЭМП), ухудшилась электромагнитная экология человека [1, 2]. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рассматривает проблему негативного воздействия ЭМП на экологию человека как приоритетную для мирового сообщества¹ и определяет электромагнитный смог как одну из четырех главных составляющих при загрязнении окружающей среды (химические вещества, механические загрязнители, изменение физических характеристик, биологические загрязнители). Согласно международной классификации, волны ЭМП по частотам разделяются на крайне низкие (3–30 Гц), сверхнизкие (30–300 Гц), инфранизкие (300–3000 Гц),

¹ The International EMF Project // World Health Organization. URL: <https://www.who.int/initiatives/the-international-emf-project> (date of application: 22.11.2023).

очень низкие (3000–30 000 Гц) и низкие (30 000–300 000 Гц). Для удобства, назовем рассмотренные в статье ЭМП частотой от 10 до 10 000 Гц низкочастотными ЭМП (НЧ ЭМП).

Среди актуальных тенденций развития современного общества, связанных с проблемой электромагнитной экологии, можно выделить переход на электротранспортные системы передвижения и интенсификацию потребления электрической энергии в жилом фонде. Во многих развитых странах реализуются национальные программы развития электрического транспорта (ЭТС). Однако активное использование данных транспортных средств обуславливает значительное повышение уровня интенсивности электромагнитного окружения людей, а следовательно, и электромагнитной загрязненности. Еще одним примером быстрого развития электротехнических технологий и вместе с тем возрастания воздействия ЭМП на человека может служить сфера жилищного строительства, в которой происходит переход на системы насыщенного и интенсивного потребления электрической энергии в жилом фонде – так называемые умный дом и электродом.

В связи с этим разработка методов контроля электромагнитной обстановки, создание материалов и технологий, обеспечивающих снижение уровней НЧ ЭМП, формирование электромагнитной среды обитания человека, соответствующей медицинским нормативным документам, являются актуальными направлениями исследований.

Обзор проблемы электромагнитной экологии человека. В России, Беларуси, США, Японии и других странах нет стандартов, устанавливающих допустимые уровни НЧ ЭМП для электромобилей. Максимально допустимые уровни воздействия НЧ ЭМП, рекомендованные Международной комиссией по защите от неионизирующих излучений (ICNRP), варьируются от 200 мкТл для частоты 40 Гц, до 100 мкТл для 800 Гц и до 20 мкТл для 3 кГц [3]. Вместе с тем многочисленные рецензируемые лабораторные исследования выявили биологические эффекты от ограниченного воздействия НЧ ЭМП. Исследования показали, что рекомендации по уровням ЭМП, установленные ICNRP, неадекватны для защиты здоровья человека. Более 230 экспертов по ЭМП подписали Международное обращение ученых по ЭМП, в котором призывают ВОЗ установить более строгие рекомендации по НЧ ЭМП [4].

Государственные нормативные документы, устанавливающие требования по безопасности среды обитания человека в условиях воздействия ЭМП промышленной частоты 50 Гц и постоянного магнитного поля, декларируют достаточно жесткие требования. В нормативных документах Республики Беларусь и Российской Федерации¹ установлены предельно допустимые уровни (ПДУ) воздействия на человека переменных ЭМП промышленной частоты 50 Гц – для магнитной составляющей ЭМП значения индукции (напряженности) не должны превышать 5 мкТл (4,0 А/м). В «Гигиенических нормативах и требованиях к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»² определены требования для значений ПДУ изменений постоянного МП (ПМП) среды обитания человека. Значения ПДУ изменений индукции ПМП составляют не более 1,5 раз относительно магнитного поля Земли (МПЗ).

Медиками рекомендован гигиенический норматив уровня НЧ ЭМП для среды обитания человека не более 0,2 мкТл. Как известно [5], внешние НЧ ЭМП индуцируют в организме человека электрические поля и токи, которые оказывают воздействие на нервы, мышцы и вызывают изменение возбудимости нервных клеток в центральной нервной системе. Согласно исследованиям [6], постоянное нахождение человека в условиях НЧ ЭМП с индукцией 0,2÷6 мкТл является фактором риска возникновения сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, астении,

¹ 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/postanovlenie_SM_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).

² 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»...

ослабления иммунитета и репродуктивных свойств. Авторы [7] выявили связь между воздействием НЧ ЭМП и развитием у человека различных клинических заболеваний (онкологические заболевания, генотоксичность, нейродегенеративные заболевания, бесплодие, врожденные дефекты и др.).

Экспериментальные данные отечественных и зарубежных исследователей свидетельствуют о высокой биологической активности электромагнитных полей в широком частотном диапазоне [8–10]. При этом уровень НЧ ЭМП, генерируемых электромобилями, в $10\div 100$ раз превосходит рекомендованный медиками гигиенический норматив НЧ ЭМП – 0,2 мкТл [8]. Данные различных исследователей значительно расходятся, что, по-видимому, связано с различиями в конструкциях электромобилей, мощностях их двигателей и материалах корпуса. Согласно данным [9], в гибридных электромобилях в диапазоне частот 5–2000 Гц генерируются магнитные поля с индукцией до 3,5 мкТл, при зарядке батареи уровни полей достигают 6,5 мкТл. Исследования гибридного автомобиля «Крайслер» в диапазоне частот $0\div 50$ кГц показали [10], что в зоне задних колес, где расположена батарея, при силе тока 200 А значения индукции ЭМП достигали 120 мкТл, а пространственные градиенты доходили до 100 мкТл/м. Данные работы [7] свидетельствуют о том, что максимальный уровень ЭМП, встречающихся в электромобилях, составляет 140 мкТл и основная часть магнитной энергии концентрируется в диапазоне частот 0,001–10 Гц. Наиболее интенсивные электромагнитные поля регистрировались во время ускорения и торможения ЭТС. В [11] исследовали генерируемые в электромобилях НЧ ЭМП в режимах разгона и зарядки батареи. Испытывали электромобили следующих марок: BMW 13, Nissan Leaf, Tesla Model 85S и Volkswagen e-ur. Показано, что в зависимости от типа машины и зоны измерений при разгоне значения ЭМП варьировались от 43,3 до 103 мкТл; а при зарядке батареи в зависимости от величины тока значения поля изменялись от 30,1 до 116,5 мкТл.

Энергопотребление в электро- и умных домах значительно возрастает по сравнению со стандартными жилыми домами. Так, согласно данным государственного предприятия «Институт жилища – НИПТИС имени С. С. Атаева» (г. Минск, Беларусь), установленная мощность, необходимая для электропитания подобных зданий, в среднем увеличивается в 5 раз. Такое увеличение электрических мощностей потребления требует нового подхода для создания нормальной электромагнитной обстановки, обеспечения ПДУ ЭМП согласно требованиям нормативных документов.

В жилом помещении предельно допустимый уровень магнитного поля частотой 50 Гц не должен превышать 5 мкТл. На практике по ряду объективных причин данное требование в основном не соблюдается и не контролируется. В нормативно-технической документации на электробытовые приборы (ОТТ, ОТУ, ГОСТ и др.), несмотря на наличие ПДУ ЭМП, вышеуказанное требование в основном отсутствует и, следовательно, никто не проверяет его выполнение ни в процессе разработки, ни в процессе производства. Анализируя применяемые сегодня решения электропотребления в электродомах (например, отопление жилых помещений с помощью электрических конвекторов), очевидно, что без применения специальных расчетных, конструктивных и технологических методов обеспечить ПДУ к ЭМП частотой 50 Гц практически невозможно.

Решение данной проблемы должно включать в себя полный цикл работ, в который входят проектирование силовых цепей питания, использование конструктивных решений (специальная силовая проводка, защитные экраны, оптимальное пространственное размещение), проведение измерений ЭМП в типовых жилых помещениях и, при необходимости, создание систем электромагнитной защиты.

Таким образом, существует проблема электромагнитной безопасности человека, есть стандарты для среды обитания человека, но нет установленных стандартов по допустимым уровням НЧ ЭМП для электромобилей. В связи с этим отсутствуют единый подход и понимание проблемы обеспечения электромагнитной безопасности человека среди медиков, пользователей и производителей ЭТС. Поэтому очевидно, что для обеспечения электромагнитной безопасности пользователей ЭТС необходимо вести поиск разумных и недорогих способов контроля уровня НЧ ЭМП, снижения напряженности НЧ ЭМП, создаваемых электрооборудованием ЭТС и электрическими приборами в жилых помещениях.

Как известно [1], магнитная составляющая ЭМП обладает гораздо более высокой проникающей способностью, чем электрическая, и защита от нее представляет очень сложную задачу. Основным и наиболее эффективным способом защиты от ЭМП является экранирование. На практике для экранирования магнитной составляющей ЭМП используют широкий ряд материалов на основе электротехнической стали, сплавов пермаллой и пермендюр, аморфных и нанокристаллических материалов [12]. В ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению» накоплен большой опыт по экранированию переменных ЭМП с применением многослойных пленочных экранов (МПЭ) [13].

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования электромагнитного излучения ЭТС и бытовых электрических приборов, выполнены расчеты эффективности электромагнитного экранирования материалов на основе МПЭ и аморфных сплавов, перспективных для обеспечения электромагнитной безопасности человека.

Методики расчетов и эксперимента. Количественная оценка эффективности экранирования (Э) различных материалов проводилась по результатам расчетов отношений индукции (напряженности) магнитного поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана $B(H)$ и при наличии его $B_1(H_1)$:

$$\mathcal{E} = B/B_1 = (H/H_1). \quad (1)$$

Контроль уровня воздействия ЭМП и измерения индукции постоянного и переменного магнитного поля выполнены с помощью микротесламетра, разработанного и изготовленного в ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор». Прибор содержит двухканальные измерительные зонды с концентраторами магнитного поля и элементами Холла, позволяет производить измерения в диапазонах индукции $0 \pm 2,0$ мТл и частоты 0–40 кГц с чувствительностью не менее 5 нТл и нелинейностью менее 1 %. Калибровка измерительных зондов проведена на установке – источнике трехкомпонентного постоянного магнитного поля, поверенной во Всероссийском НИИ метрологии имени Д. И. Менделеева (г. Санкт-Петербург, Россия). Измерения выполнены в двух взаимно перпендикулярных ориентациях чувствительных элементов относительно источника ЭМП по каналам x и y . Контроль третьей координаты z определялся поворотом измерительного зонда на 90° . На спектрах канал x – красный цвет; канал y – желтый цвет. Ряд измерений выполнен в режиме фильтрации МПЗ (синий канал y – с фильтрацией МПЗ, черный канал x – с фильтрацией МПЗ).

Электромагнитные излучения ЭТС измерены на автомобилях следующих моделей: Tesla Model 3 Long Range, Renault Zoe и Geely геометрия А в различных местах – в зонах переднего и заднего пассажиров, возле порта зарядного кабеля. Использовались следующие режимы эксплуатации: разгон со старта; прерывистое движение разгон-торможение; равномерное движение; зарядка батареи в зоне порта зарядного кабеля. Измерения уровней НЧ ЭМП бытовых электрических приборов – конвектора Ballu ВЕР/Е-2000, электрической плиты Electrolux ЕКС954508Х, СВЧ-печи LG MW25R35GIS и отопительного котла Zerten SE-3 – выполнены в диапазоне частот 49–51 Гц.

Для расчетов эффективности экранирования (Э) использовали программное обеспечение (ПО) Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 (femm4.2), которое позволяет определять параметры и строить картины топологий ЭМП. Расчеты выполнены в диапазонах значений $H = 10\text{--}500$ А/м и частоты $f = 10\text{--}1000$ Гц на плоских однослойных экранах сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и МПЭ, содержащих магнитные слои из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и немагнитные медные слои, и для аморфных сплавов АМАГ172 в исходном и отожженном ($T = 300$ °С; $t = 2$ ч) состояниях. Толщина аморфной ленты – 25 мкм. Размер образцов составлял 120×120 мм; общая толщина (d) – 400 мкм; толщина парциальных слоев $d_{\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}} = 40$ и 100 мкм, $d_{\text{Cu}} = 10$ мкм. Значение электрической проводимости сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (σ) = $12 \cdot 10^6$ См/м. В качестве исходных данных ПО femm4.2 также использовали результаты экспериментальных измерений магнитных свойств материалов – коэрцитивной силы (H_c), максимальной магнитной проницаемости (μ_{max}) и начальной кривой намагничивания. Измерения магнитных свойств выполнены методом баллистического гальванометра [14] на замкнутых цилиндрических образцах высотой 30 мм, внешним диаметром 45 мм и внутренним диаметром 25 мм. Намагничивающая обмотка формировалась проводом $\varnothing 0,1$ мм в количестве 100 витков, измерительная обмотка – проводом $\varnothing 0,08$ мм в количестве 200 витков.

Экспериментальные и расчетные результаты. Экспериментально полученные изображения петли гистерезиса и начальной кривой намагничивания сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 100 мкм представлены на рис. 1. Также получены значения параметров $H_c = 36$ А/м и $\mu_{\text{max}} = 18\,000$.

Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 в исходном состоянии представлены на рис. 2. Значения $H_c = 0,5$ А/м; $\mu_{\text{max}} = 72\,000$ и $\sigma = 2,3 \cdot 10^6$ См/м.

Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 после отжига представлены на рис. 3. Значения $H_c = 0,55$ А/м и $\mu_{\text{max}} = 126\,000$.

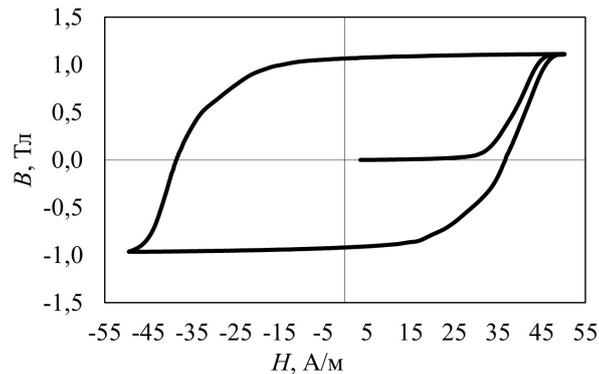


Рис. 1. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$

Fig. 1. Initial magnetization curve and hysteresis loop of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloy

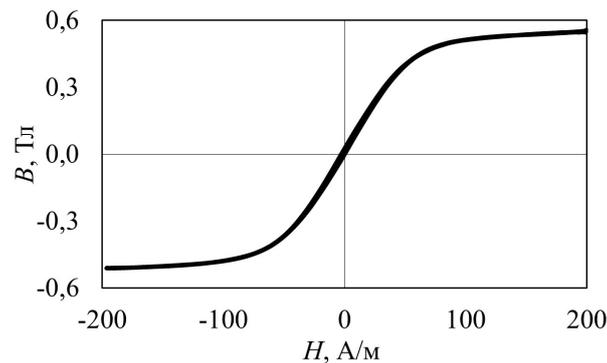


Рис. 2. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 в исходном состоянии

Fig. 2. Initial magnetization curve and hysteresis loop of amorphous alloy AMAG172 in the initial state

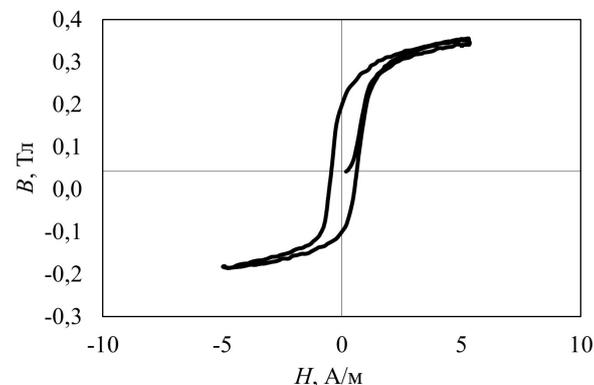


Рис. 3. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 после отжига

Fig. 3. Initial magnetization curve and hysteresis loop of amorphous alloy AMAG172 after annealing

Результаты измерений низкочастотного электромагнитного поля электротранспортных средств. Результаты измерений уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием электромобилей Tesla Model 3, Renault Zoe и Geely геометрия А, выполненных в диапазоне частот от 0 до 55 000 Гц, в различных зонах и режимах эксплуатации электромобилей, представлены на рис. 4, 5 и в таблице. Как уже упоминалось, в настоящее время нет единых установленных стандартов по допустимым уровням НЧ ЭМП для электромобилей. Поэтому в качестве ориентира будем использовать принятый для среды обитания человека стандарт ПДУ магнитной составляющей ЭМП частотой 50 Гц, равный 5 мкТл¹.

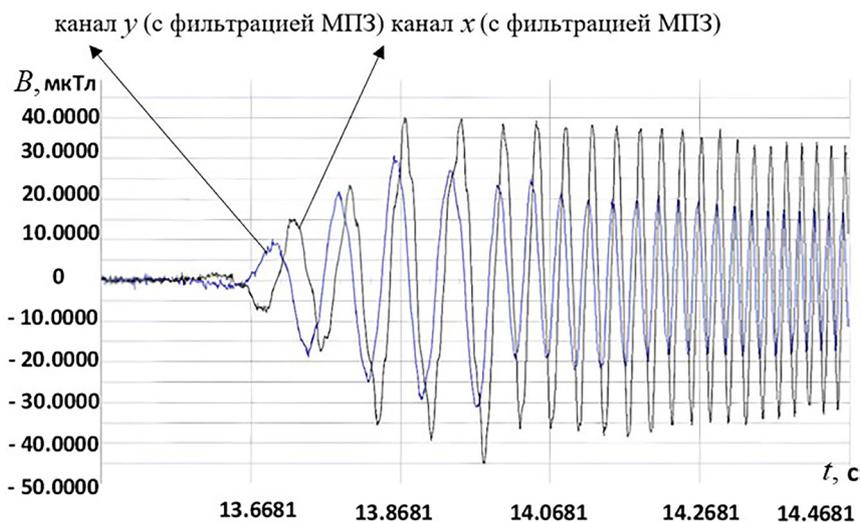


Рис. 4. Спектр низкочастотного электромагнитного поля электромобиля Tesla Model 3, измеренный в режиме фильтрации магнитного поля Земли. Режим движения «разгон со старта»

Fig. 4. The low-frequency electromagnetic field spectrum of the Tesla Model 3 electric car, measured in the Earth's magnetic field filtration mode. The driving mode is “acceleration from the start”

Значения магнитной составляющей индукции переменного электромагнитного поля и постоянного магнитного поля (мкТл), генерируемой оборудованием электромобиля в различных режимах эксплуатации
The values of the magnetic component of the induction of an alternating electromagnetic field and a permanent magnetic field (μT) generated by the equipment of an electric vehicle in various operating modes

Условия измерений	Tesla Model 3	Renault Zoe	Geely, геометрия А
Магнитная составляющая индукции электромагнитного поля, генерируемая электротранспортом в различных режимах движения, мкТл			
– разгон со старта	30–40	8–10	2–4
– прерывистое движение в режиме «разгон-торможение»	4–10	2–5	2–5
– равномерное движение	3–6	–	2–6
– зарядка батареи в зоне порта зарядного кабеля	–	5–16	–
– изменение индукции постоянного МП в режиме «прерывистое движение разгон-торможение»	330	–	280
Материал кузова	Железо/алюминий	Алюминий	Алюминий
Место измерений	Кресло задних пассажиров	Центр ног переднего пассажира	Центр ног переднего пассажира
Мощность электродвигателя, кВт	190	72	120

¹ 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.

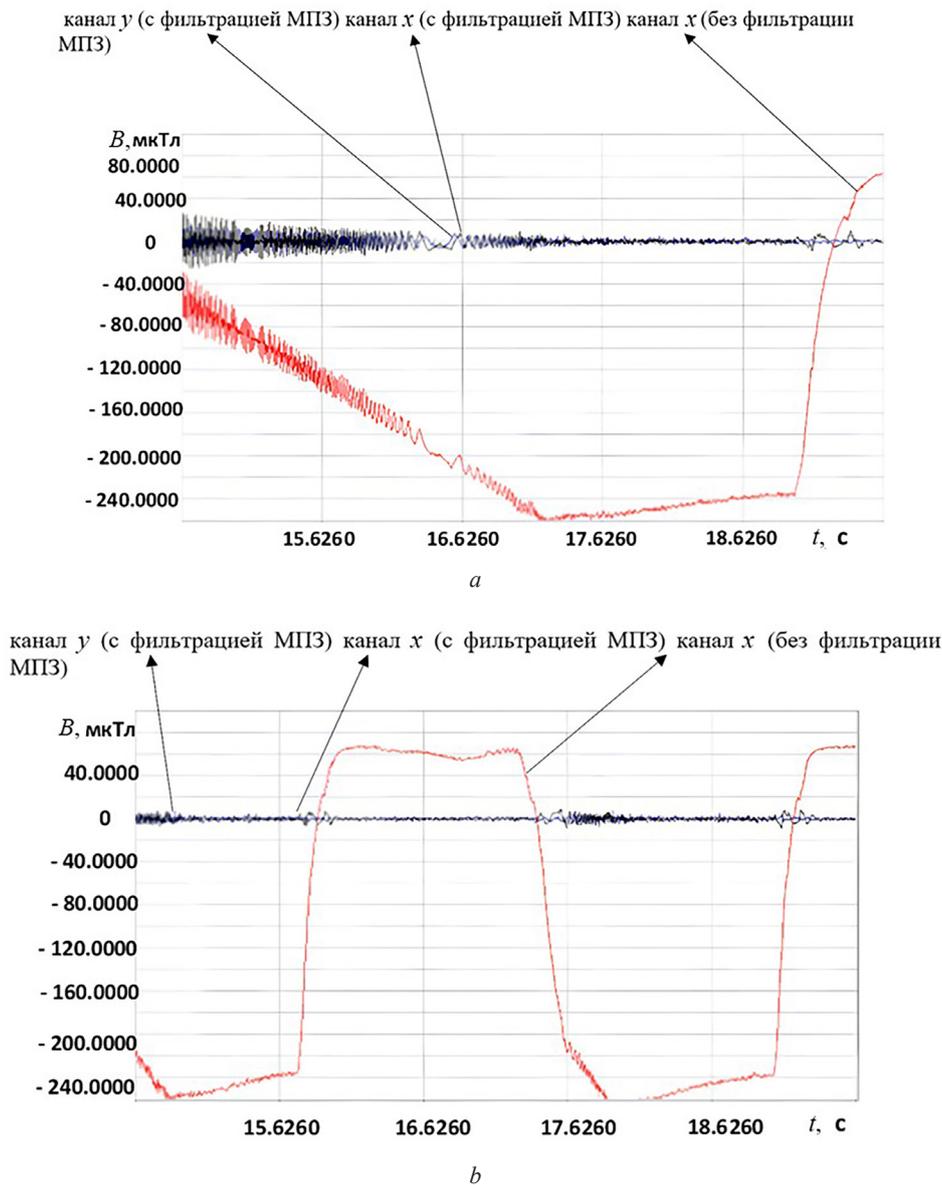


Рис. 5. Изменение постоянного магнитного поля автомобиля Tesla Model 3.
Режим движения «прерывистое движение разгон-торможение»: *a* – участок разгона,
b – участок торможения. Измерения в режимах с фильтрацией магнитного поля Земли – синий, черный;
без фильтрации магнитного поля Земли – красный

Fig. 5. Change in the permanent magnetic field of the Tesla Model 3 electric car.
Driving mode “intermittent acceleration-braking movement”:
a – the acceleration section, *b* – the braking section. Measurements with the Earth’s magnetic
field filtering are blue, black; without the Earth’s magnetic field filtering – red

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее значительное превышение ПДУ магнитного поля зафиксировано в автомобиле Tesla Model 3 с максимальной мощностью электродвигателя 190 кВт в режимах «разгон со старта» (в 6–8 раз);
- в режиме «зарядка батареи» в зоне порта зарядного кабеля автомобиля Renault Zoe превышение ПДУ достигало 3 раз;
- в режиме «прерывистое движение разгон-торможение» наблюдалась инверсия знака напряженности постоянного магнитного поля, изменения напряженности МП составляли 280 мкТл (Geele, геометрия А – 120 кВт) и 330 мкТл (Tesla Model 3 – 190 кВт), то есть изменения относительно значений напряженности магнитного поля Земли составляли 4,5 и 5 раз соответственно;

– наиболее высокий уровень защиты водителя и пассажиров обеспечивается в электромобилях, кузов которых выполнен из магнитного материала (железо), электродвигатель расположен в подкапотном пространстве и силовые кабели размещены в защитных коробах. Замена магнитного материала кузова на алюминий повышает уровень напряженности ЭМП в салоне электрокара. Важное значение также имеет расстояние, на котором расположен источник ЭМП от пользователя электротранспортного средства.

Таким образом, основными факторами, определяющими уровни генерируемого НЧ ЭМП электрооборудованием ЭТС, являются мощность электродвигателя, компоновка электрооборудования, материалы кузова и других элементов электротранспорта.

Результаты измерений низкочастотного электромагнитного поля электробытовых приборов. Как уже указывалось, измерения уровней магнитной составляющей индукции НЧ ЭМП в диапазоне частот 49–51 Гц выполнены на бытовых электроприборах: на конвекторе Ballu ВЕР/Е-2000; электрической плите Electrolux ЕКС954508Х; СВЧ-печи LG MW25R35GIS и отопительном котле Zerten SE-3. На рис. 6 приведен спектр НЧ ЭМП, излучаемый конвектором электрической мощностью 2,0 кВт на расстоянии 8–10 см. Максимальное значение индукции (B_{\max}) достигает 35 мкТл, красная зона – превышение ПДУ относительно нормативного акта¹. Установлено, что конфорка электрической плиты мощностью 1,7 кВт на расстоянии 8–10 см генерирует МП с $B_{\max} = 35$ мкТл; СВЧ-печь мощностью 1,15 кВт на расстоянии 8–10 см генерирует МП с $B_{\max} = 65$ мкТл. На рис. 7 приведен спектр НЧ ЭМП, излучаемый отопительным котлом мощностью 3,0 кВт на расстоянии 8–10 см, значения B_{\max} достигают 100 мкТл.

Анализ проблемы электромагнитной безопасности жилого фонда и измерения уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрическими бытовыми приборами и электрооборудованием, позволяет заключить следующее:

– уровни магнитной составляющей НЧ ЭМП, генерируемых бытовым электрооборудованием на расстоянии 8–10 см, значительно превышают ПДУ, установленные нормативными документами: конвектор мощностью 2,0 кВт – в 4–5 раз; электрическая плита мощностью 1,7 кВт – в 7–8 раз; СВЧ-печь мощностью 1,15 кВт – в 13–15 раз; отопительный котел мощностью 3,0 кВт – в 18–20 раз;

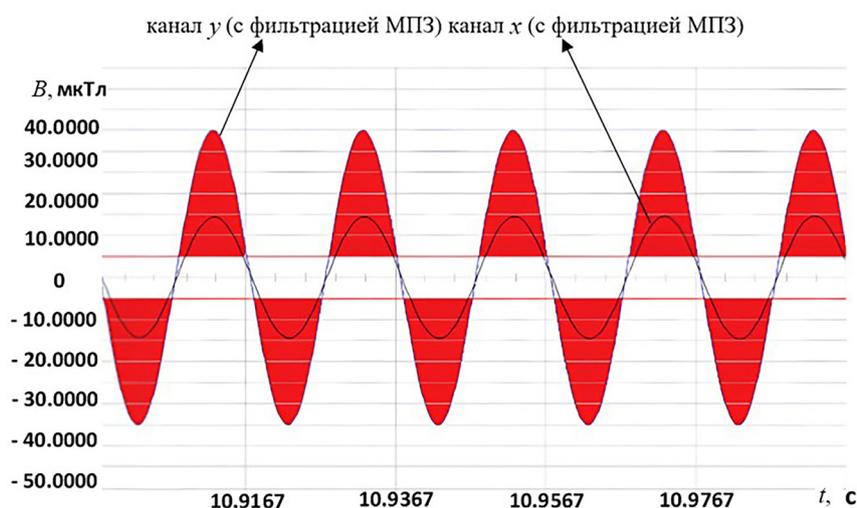


Рис. 6. Спектр низкочастотного электромагнитного поля, излучаемого конвектором мощностью 2,0 кВт на расстоянии 8–10 см; $B_{\max} = 35$ мкТл

Fig. 6. The spectrum of low-frequency electromagnetic field emitted by a 2.0 kW convector at a distance of 8–10 cm; $B_{\max} = 35 \mu\text{T}$

¹ 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.

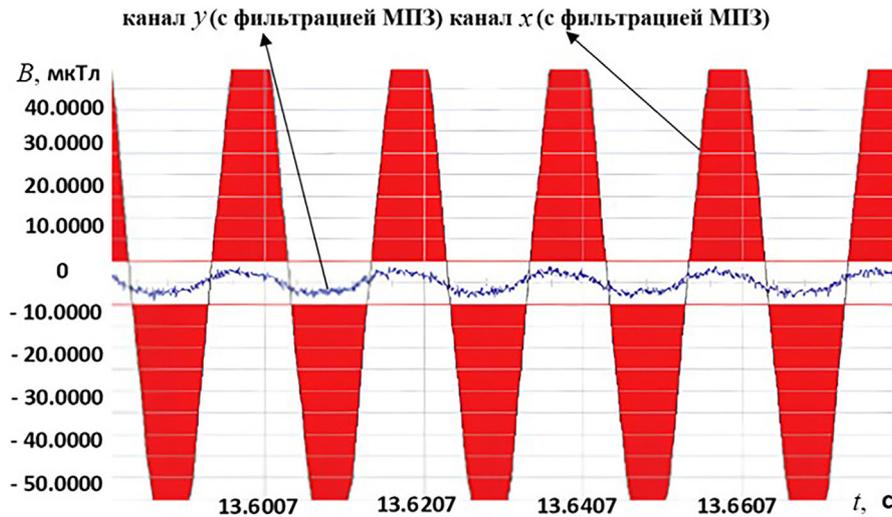


Рис. 7. Спектр низкочастотного электромагнитного поля, излучаемого отопительным котлом мощностью 3 кВт на расстоянии 8–10 см; $B_{\max} = 100$ мкТл

Fig. 7. The spectrum of low-frequency electromagnetic field emitted by a 3 kW heating boiler at a distance of 8–10 cm; $B_{\max} = 100$ μ T

– одним из перспективных технических решений является переход электропотребления жилых помещений на источники постоянного тока, поскольку нормативы ПДУ постоянного МП в 10–100 раз выше, чем нормативы ПДУ переменного ЭМП;

– необходимо отметить, что выполнение требований технического регламента уровней ЭМП промышленной частоты обязательно на стадии проектирования жилых домов, так как исправить ошибки проектирования в отношении электромагнитной безопасности при эксплуатации жилья практически невозможно;

– для обеспечения нормальной электромагнитной обстановки в жилых помещениях необходимо вести разработку методов и оборудования контроля за электромагнитной обстановкой, поиск разумных и недорогих способов снижения уровня воздействия НЧ ЭМП на человека.

Расчет эффективности экранирования магнитных материалов. Оценка эффективности электромагнитной защиты от НЧ ЭМП проведена на однослойных покрытиях сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, МПЭ системы $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ и аморфных лентах сплавов АМАГ172 в исходном и отожженном ($T = 300$ °С; $t = 2$ ч) состояниях. Толщина аморфной ленты 25 мкм. Как видно из данных, приведенных на рис. 8, эффективность экранирования однослойных экранов сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (см. рис. 8, а) и многослойных экранов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ (см. рис. 8, б) зависит от напряженности и частоты внешнего магнитного поля, общей и парциальной толщины МПЭ, внутреннего строения экранов. В интервале напряженностей ЭМП от 20 до 300 А/м значения эффективности экранирования практически не изменяются. Данная область магнитных полей соответствует основным уровням НЧ ЭМП, генерируемым электрооборудованием ЭТС и бытовыми электроприборами. Следует отметить, что тенденция поведения зависимостей $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ однослойных и многослойных структур от частоты существенно отлична: в первом случае с ростом частоты эффективность экранирования снижается, во втором – увеличивается.

В случае квазистатических магнитных полей эффективность экранирования определяется механизмами шунтирования магнитного поля (замыкание силовых линий через материал с низким сопротивлением магнитному потоку), вытеснения переменного ЭМП магнитным полем вихревых токов (поверхностный эффект), а также вкладом отражения электромагнитной волны (ЭМВ) на границах раздела двух сред [1]. В области ЭМП ($f < 100$ Гц) основную роль играет механизм шунтирования, для частоты 10 Гц ход зависимостей $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ для однослойных и многослойных экранов практически одинаков, эффективность экранирования МПЭ на 5–7 % выше эффективности однослойных экранов. В данном интервале частот преобладающий механизм потерь энергии при прохождении электромагнитной волны через экран – шунтирование магнит-

ного поля материалом экрана, поэтому потери тем выше, чем выше магнитная проницаемость и площадь поперечного сечения материала экрана. Вклад поверхностного эффекта в потери энергии обычно рассматривают для частот выше 1–10 кГц, когда выполняется условие $\delta < d$, где δ – эквивалентная глубина проникновения ЭМВ в материал [1]. Согласно расчетам для сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ значения δ равны 0,38 и 0,12 мм для частот 100 и 1000 Гц соответственно. Поэтому для нашего случая в качестве основных вкладов в потери энергии следует рассматривать механизмы шунтирования и отражения на границах раздела. Вклад в потери энергии от эффекта отражения ЭМВ на границах раздела, так называемый эффект многослойности [10], начинает проявляться на частотах 1000 Гц и выше. С увеличением количества слоев МПЭ «эффект многослойности» возрастает. На частоте 1000 Гц значение \mathcal{E} многослойных пленочных экранов, содержащих 10 магнитных и 10 немагнитных слоев, в 5–6 раз выше \mathcal{E} однослойной структуры эквивалентной суммарной толщины (см. рис. 8). При этом с ростом частоты эффективность однослойных экранов уменьшается, а МПЭ – увеличивается.

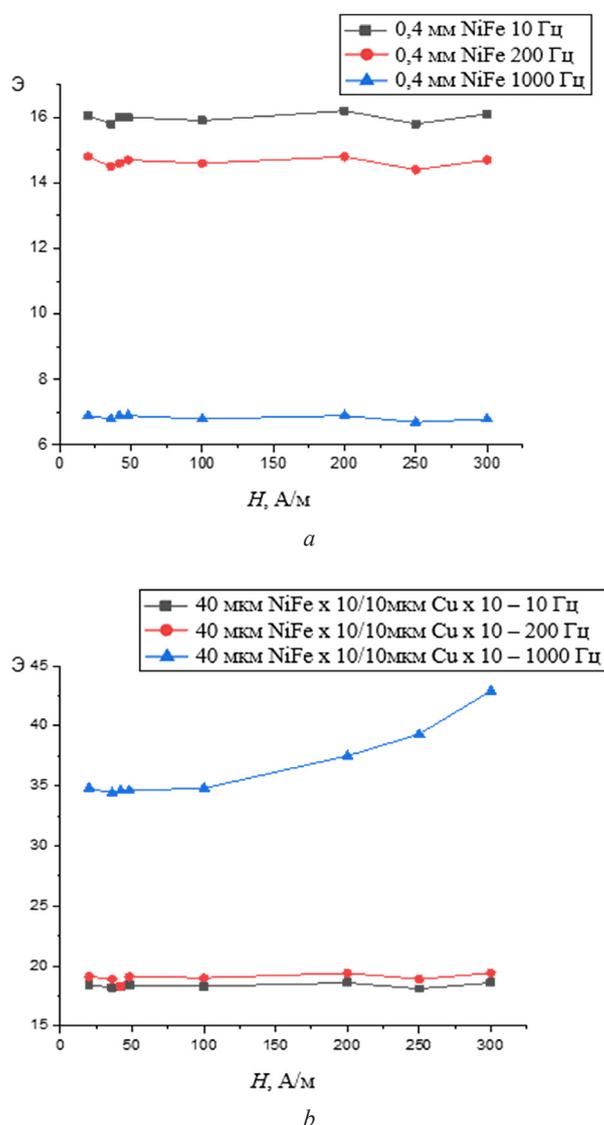


Рис. 8. Зависимости эффективности экранирования однослойных сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 0,4 мм (а) и многослойных пленочных экранов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ (b), содержащих 10 слоев $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 40 мкм и 10 слоев Cu по 10 мкм, от напряженности электромагнитного поля для частот 10, 200 и 1000 Гц
 Fig. 8. Dependencies of the screening efficiency of single-layer shields from $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys with a thickness of 0.4 mm (a) and multilayer $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ film screens (b) containing 10 layers of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ of 40 microns and 10 layers of Cu of 10 microns on the electromagnetic field intensity for frequencies 10, 200 and 1000 Hz

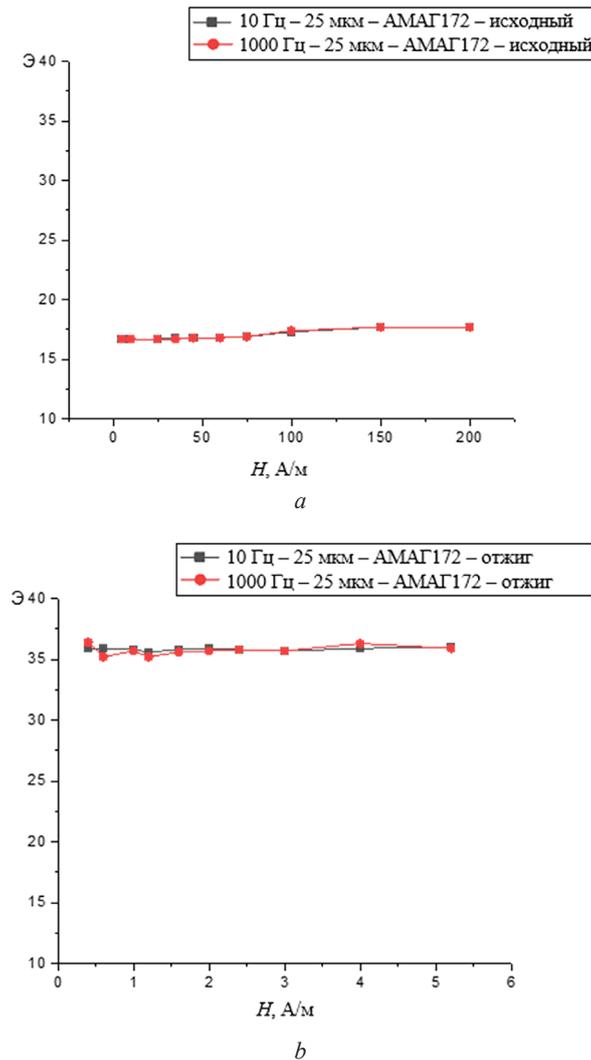


Рис. 9. Зависимости эффективности экранирования аморфных сплавов АМАГ172 в исходном состоянии (а) и после отжига (б) от напряженности электромагнитного поля для частот 10 и 1000 Гц

Fig. 9. Dependencies of screening efficiency of amorphous AMAG172 alloys in the initial state (a) and after annealing (b) on the electromagnetic field intensity for frequencies of 10 and 1000 Hz

На рис. 9 приведены зависимости эффективности электромагнитной защиты от напряженности и частоты ЭМП аморфных сплавов АМАГ172 в исходном (рис. 9, а) и отожженном (рис. 9, б) состояниях. Видно, что эффективность отожженных образцов значительно выше (3 раза), чем не отожженных, что связано с увеличением значений магнитной проницаемости в процессе термообработки. Следует также отметить, что в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц в аморфных сплавах АМАГ172 зависимость Э от частоты не наблюдалась.

Заключение. Переход на интенсивное применение электрической энергии в транспортных средствах и жилом фонде значительно повышает уровень окружающих человека электромагнитных полей. Представленная в настоящей работе контрольно-измерительная аппаратура позволяет исследовать и контролировать топологию НЧ ЭМП в диапазонах индукции $0 \pm 2,0$ мТл и частоты 0–40 кГц, с чувствительностью не менее 5 нТл.

Измерены уровни магнитной составляющей НЧ ЭМП, генерируемой электромобилями и электробытовыми приборами. Показано, что значительное превышение ПДУ магнитного поля для электромобилей фиксируется в режимах «разгон со старта» (в 6–8 раз) и «разгон при движении» (в 5–6 раз). Основными факторами, определяющими уровни генерируемого НЧ ЭМП электрооборудованием ЭТС, являются мощность электродвигателя, компоновка электрооборудования, материалы кузова и других элементов ЭТС.

Определены уровни магнитной составляющей НЧ ЭМП, излучаемой бытовыми электроприборами в диапазоне частот 49–51 Гц. Установлено значительное превышение ПДУ относительно нормативов: конвектор мощностью 2,0 кВт превышает значения ПДУ в 4–5 раз; электрическая плита мощностью 1,7 кВт – в 7–8 раз; СВЧ-печь мощностью 1,15 кВт – в 13–15 раз; отопительный котел мощностью 3,0 кВт – в 18–20 раз.

Для обеспечения нормальной электромагнитной обстановки в жилых помещениях необходимо вести разработку методов и оборудования контроля электромагнитной обстановки, поиск разумных и недорогих способов снижения уровня воздействия НЧ ЭМП на человека.

Расчетным методом проведена оценка снижения уровня низкочастотного электромагнитного поля путем использования экранирующих материалов на основе многослойных пленочных экранов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ и аморфных сплавов АМАГ172. Показано, что МПЭ системы $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ и АМАГ172 перспективны для создания систем защиты от воздействия НЧ ЭМП. Электромагнитные экраны на основе данных материалов значительно снижают уровни воздействия НЧ ЭМП электротранспорта и бытовых электроприборов на человека, что позволяет приблизиться к рекомендованным медиками гигиеническим нормативам и обеспечить требования нормативных документов по ПДУ.

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. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России / Ю. Г. Григорьев [и др.]; под ред. А. К. Демина. – М.: Изд-во Рос. Ассоциации обществ. здоровья, 1997. – 76 с.
3. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection // Health Phys. – 2010. – Vol. 99, № 6. – P. 818–836. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f06c86>
4. Moskowitz, J. M. Effects of Exposure to Electromagnetic Fields: Thirty years of research [Electronic resource] / J. M. Moskowitz // Electromagnetic Radiation Safety. – Mode of access: <https://www.saferemr.com/2018/02/effects-of-exposure-to-electromagnetic.html>. – Date of access: 02.05.2023.
5. Стожаров, А. Н. Медицинская экология: учеб. пособие / А. Н. Стожаров. – Минск: Выш. шк., 2007. – 368 с.
6. Магнитные поля на электротранспорте и экология человека / Н. Г. Птицына [и др.]. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 120 с.
7. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats / W. Duan [et al.] // Bioelectromagnetics. – 2014. – Vol. 35. – P. 58–69. <https://doi.org/10.1002/bem.21816>
8. Halgamuge, M. N. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars / M. N. Halgamuge, C. D. Abeyrathne, P. Mendis // Radiat. Prot. Dosim. – 2010. – Vol. 141, № 3. – P. 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
9. 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.
10. Magnetic Shielding for Electric Vehicles: Program Rev. [Electronic resource] // Engineering Matters. – Mode of access: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>. – Date of access: 03.07.2023.
11. Electric Cars and Electromagnetic Interference With Cardiac Implantable Electronic Devices: A Cross-sectional Evaluation / C. Lennerz [et al.] // Ann. Intern. Med. – 2018. – Vol. 169, № 5. – P. 350–352. <https://doi.org/10.7326/m17-2930>
12. Мишин, Д. Д. Магнитные материалы / Д. Д. Мишин. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
13. Грабчиков, С. С. Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники / С. С. Грабчиков // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 7–14. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-7-14>
14. Шрамков, Е. Г. Электрические и магнитные измерения / Е. Г. Шрамков. – Л.: Из-во НКТП СССР, 1937. – 585 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. Grigor'ev Yu. G. *Electromagnetic Pollution of the Environment and the Health of the Russian Population*. Moscow, Publishing House of the Russian Association of Public Health, 1997. 76 p. (in Russian).
3. 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>

4. Moskowitz J. M. Effects of Exposure to Electromagnetic Fields: Thirty years of research. *Electromagnetic Radiation Safety*. 2024. Available at: <https://www.saferemr.com> (accessed 02 May 2023).
5. Stozharov A. N. *Medical Ecology*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2007. 368 p. (in Russian).
6. 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).
7. Duan W., Liu C., Wu H., Chen C., Zhang T., Gao P., Luo X., Yu Z., Zhou Z. 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>
8. 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>
9. 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.
10. *Magnetic Shielding for Electric Vehicles: Program Rev.* 16–17 May 1995. Available at: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf> (accessed 3 July 2023).
11. Lennerz C., O'Connor M., Horlbeck L., Michel J., Weigand S., Grebmer C., Blazek P. [et al.]. Electric cars and electromagnetic interference with cardiac implantable electronic devices: a cross-sectional evaluation. *Annals of Internal Medicine*, 2018, vol. 169, no. 5, pp. 350–352. <https://doi.org/10.7326/M17-2930>
12. Mishin D. D. *Magnetic Materials*. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1991. 384 p. (in Russian).
13. Grabchikov S. S. Materials of electromagnetic and radiation protection for electronic products. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 7–14 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-7-14>
14. Shramkov E. G. *Electric and Magnetic Measurements*. Leningrad, Publ. House of the NKTP of the USSR, 1937. 585 p. (in Russian).