

Reducing the Magnetic Field Level of Single-Circuit Overhead Power Lines in Multi-Storey Buildings by Means of Active and Passive Shielding

Kuznetsov B.I.¹, Kutsenko A.S.², Nikitina T.B.³, Bovdui I.V.¹, Chunikhin K.V.¹,
Voloshko O.V.¹

¹Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine

³Educational scientific professional pedagogical Institute of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Abstract. The purpose of the work is a theoretical and experimental study of the effectiveness of combined shielding, including active and passive shielding using a continuous screen, of the magnetic field generated by single-circuit power lines with a triangular arrangement of wires inside multi-storey buildings. To achieve this goal, the structure of the combined screen has been determined, which consists of a double-circuit active and a U-shaped solid passive part, and is characterized by increased efficiency in reducing the level of the industrial frequency magnetic field. Designing a combined screen comes down to solving a minimax vector optimization problem, in which the vector objective function is calculated based on solutions to Maxwell's equations in a quasi-stationary approximation using the COMSOL Multiphysics software package. The most important results are the values of the coordinates of the spatial location of two compensation windings, the magnitude of currents and their phases in these windings of the active shielding system, as well as the parameters of the U-shaped continuous passive screen, which made it possible to increase the efficiency of shielding the magnetic field generated by single-circuit lines, calculated during the design of the combined screen. power transmission with a triangular arrangement of wires inside multi-storey buildings. The significance of the results obtained is that practical recommendations are given for the reasonable choice of the spatial arrangement of two shielding windings of a robust active shielding system and the parameters of a U-shaped continuous passive shield of combined shielding of the magnetic field generated by single-circuit overhead power lines inside multi-storey buildings.

Keywords: single-circuit overhead power lines, magnetic field, combined shielding, theoretical and experimental studies.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.3-63.01>

UDC: 621.3.013

Reducerea nivelului câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene cu un singur circuit în clădirile cu mai multe etaje prin ecranare activă și pasivă

¹Cuznețov B.I., ²Cuțenco A.S., ³Nikitina T.B., ¹Bovdui I.V., ¹Ciunihin K.V., ¹Voloșco E.V.

¹ Institutul de Probleme de Inginerie Mecanică A.N. Podgorny Academia Națională de Științe din Ucraina,

² Universitatea Națională Tehnică „KhPI”, Harkiv, Ucraina

³ Institutul Pedagogic Profesional Educațional și Științific al Universității Naționale din Harkov V.N. Karazin, Harkiv, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este un studiu teoretic și experimental al eficacității ecranării combinate, incluzând ecranarea activă și pasivă cu ajutorul unui ecran continuu a câmpului magnetic generat de liniile electrice cu un singur circuit cu o dispoziție triunghiulară a firelor în interiorul clădirilor cu mai multe etaje. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost determinată structura ecranului combinat, care constă dintr-un circuit dublu activ și piesă pasivă solidă în formă de U și se caracterizează printr-o eficiență crescută în reducerea nivelului câmpului magnetic de frecvență industrială. Proiectarea unui ecran combinat se reduce la rezolvarea unei probleme de optimizare vectorială minimax, în care funcția obiectiv vectorială este calculată pe baza soluțiilor ecuațiilor lui Maxwell într-o aproximare cvasi-staționară folosind pachetul software COMSOL Multiphysics. Cele mai importante rezultate sunt valorile coordonatelor locației spațiale a două înfășurări de compensare, mărimea curenților și fazele acestora în aceste înfășurări ale sistemului de ecranare activ, precum și parametrii ecranului pasiv continuu în formă de U, care a făcut posibilă creșterea eficienței de ecranare a câmpului magnetic generat de liniile cu un singur circuit, calculată în timpul proiectării ecranului combinat de transmisie a puterii cu un

aranjament triunghiular de fire în interiorul clădirilor cu mai multe etaje. Semnificația rezultatelor obținute este aceea că sunt date recomandări practice pentru alegerea rezonabilă a aranjamentului spațial a două înfășurări de ecranare a unui sistem de ecranare activ robust și a parametrilor unui ecran pasiv continuu în formă de U.

Cuvinte-cheie: linii electrice aeriene cu un singur circuit, câmp magnetic, ecranare combinată, studii teoretice și experimentale.

Снижение уровня магнитного поля одноцепных воздушных линий электропередачи в многоэтажных домах средствами активного и пассивного экранирования

Кузнецов Б.И.¹, Куценко А.С.², Никитина Т.Б.³, Бовдуй И.В.¹, Чунихин К.В.¹, Волошко Е.В.¹

¹Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

² Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина

³ Учебно-научный профессионально-педагогический институт Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование с помощью сплошного экрана, магнитного поля, генерируемого одноцепными линиями электропередачи с треугольным расположением проводов внутри многоэтажных домов. Для достижения поставленной цели определена структура комбинированного экрана, который состоит из двухконтурной активной и П-образной сплошной пассивной части, и характеризуется повышенной эффективностью снижения уровня магнитного поля промышленной частоты. Проектирование комбинированного экрана сводится к решению задачи минимаксной векторной оптимизации, в которой векторная целевая функция вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics. Решение задачи минимаксной векторной оптимизации вычисляется на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. В ходе проектирования комбинированного экрана вычислены координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также величины токов и их фаз в обмотках системы активного экранирования, а также параметры П-образного сплошного пассивного экрана. Наиболее важными результатами являются рассчитанные, в ходе проектирования комбинированного экрана, значения координат пространственного расположения двух компенсационных обмоток, величины токов и их фаз в этих обмотках системы активного экранирования, а также параметры П-образного сплошного пассивного экрана, позволившие повысить эффективность экранирования магнитного поля, генерируемого одноцепными линиями электропередачи с треугольным расположением проводов внутри многоэтажных домов. Значимость полученных результатов состоит в том, что приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения двух экранирующих обмоток робастной системы активного экранирования и параметров П-образного сплошного пассивного экрана комбинированного экранирования магнитного поля, генерируемого одноцепными воздушными линиями электропередачи внутри многоэтажных домов. Показана возможность снижения уровня индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм.

Ключевые слова: одноцепные воздушные линии электропередачи, магнитное поле, комбинированное экранирование, теоретические и экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

В существующей жилой застройке, довольно часто многоэтажные дома расположены рядом с одноцепными линиями электропередачи с «треугольным» расположением подвеса проводов. В качестве примера, на рис. 1 показано расположение многоэтажного жилого дома в непосредственной близости от линии электропередачи. По результатам проведенных измерений, уровень низкочастотного магнитного поля промышленной частоты (МП), генерируемого такими линиями электропередачи в жилых помещениях многоэтажных домов, может многократно превышать безопасный для проживания уровень

магнитного поля [1]–[5]. Такая ситуация характерна для жилых домов старой постройки, в промышленно развитых странах. Поэтому, принятые уровни МП для безопасного проживания населения в жилых домах старой постройки, как правило, выше чем принятые уровни МП для безопасного проживания населения в домах новой постройки.

В связи с постоянным удорожанием земельных участков, новые жилые дома часто строят в непосредственной близости от воздушных ЛЭП с нарушением строительных норм в плане требований расстояний отведенных защитных зон от опор ЛЭП.



Рис. 1. Расположение многоэтажного жилого дома в непосредственной близости от ЛЭП.¹

В качестве примера на рис. 2 показано расположение жилого дома новой постройки в непосредственной близости от опоры ЛЭП.

Уровень МП в таких жилых домах новой постройки существенно превышает безопасный для проживания уровень магнитного поля для жилых домов новой застройки.

Многочисленные медико-биологические исследования показали, что длительное воздействие МП может привести к росту уровня заболеваний со злокачественными новообразованиями в различных органах и системах человека, приводить к изменениям в гематологических параметрах крови, влиять на биоэлектрическую деятельность головного мозга, на репродуктивную, центральную и нервно-сосудистую системы.

Также следует отметить, что данные явления чаще наблюдаются у детей в возрасте до 12 лет, чем у пациентов в более зрелом возрасте.

Реконструкция воздушных линий с заменой их кабельными линиями, или же перенос ЛЭП на безопасное расстояние, дорогостоящее мероприятие, а во многих случаях, в условиях плотной жилой застройки, является невозможным. Одним из экономически наиболее обоснованных подходов дальнейшей эксплуатации таких жилых домов старой и новой постройки является снижение уров-

ня МП средствами электромагнитного экранирования.



Рис. 2. Расположение жилого дома новой постройки в непосредственной близости от опоры ЛЭП.²

Наиболее простыми средствами электромагнитного экранирования является пассивное экранирование с использованием сплошных, или контурных, пассивных экранов. Причем, технологически наиболее просто реализовать сплошные пассивные экраны. Однако, эффективность пассивных систем экранирования бывает недостаточной для снижения уровня исходного МП до допустимых уровней.

Второй подход для нормализации уровня МП внутри жилых помещений – использование систем активного экранирования (САЭ), которые позволяют обеспечить необходимый уровень снижения исходного магнитного поля внутри жилых домов при практически любом внешнем уровне МП, а также расположении источников МП. Однако, для работы САЭ необходимо иметь источник электрической энергии, а сама САЭ представляет собой довольно сложную систему автоматического управления, в которой используются датчики магнитного поля, вычислительные устройства, усилители электрических сигналов и, собственно, компенсационные обмотки, в которых генерируется компенсирующее магнитное поле, направленное противоположно исходному МП [6]–[8].

Для экранирования МП в многоэтажных жилых домах большой протяженности экономически целесообразно использовать ком-

бинированное экранирование, в котором одновременно используется как активное, так и пассивное экранирование [9].

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование с помощью сплошного экрана, МП генерируемого в многоэтажных домах одноцепными линиями электропередачи с трехфазным расположением проводов.

I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Введем вектор X искомых параметров задачи проектирования комбинированного экрана, компонентами которого являются искомые параметры активного экрана, включающего координаты пространственного расположения и геометрические размеры компенсационных обмоток, а также токи и фазы в компенсационных обмотках, и искомые параметры пассивного экрана (включающие пространственное расположение, геометрические размеры, толщину и материал сплошного пассивного экрана) [10]–[12].

Введем вектор параметров исходных неопределенностей δ задачи проектирования комбинированного экранирования [13]–[16], включающего САЭ и сплошной пассивный экран, компонентами которого являются неопределенности значения токов и фаз в проводах ЛЭП, а также другие параметры неопределенностей комбинированного активного и пассивного экранирования, которые, во-первых, изначально известны неточно, и, во-вторых, могут изменяться в процессе эксплуатации системы [17]–[20].

Тогда для заданных значений вектора искомых параметров X и вектора параметров неопределенности δ , для задачи проектирования электромагнитного экрана может быть вычислено, на основании закона Био-Савара, эффективное значение $B_R(X, \delta, P_i)$ магнитной индукции в точке P_i пространства экранирования с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics.

Тогда задача проектирования комбинированного экрана сводится к вычислению решения векторной минимаксной задачи оптимизации [21]–[24]

$$B_R(X, \delta) = \langle B_R(X, \delta, P_i) \rangle. \quad (1)$$

Компонентами векторной целевой функции $B_R(X, \delta)$ являются эффективные значения индукции результирующего магнитного поля $B_R(X, \delta, P_i)$ во всех рассматриваемых точках P_i пространства экранирования.

В этой векторной минимаксной задаче оптимизации для задачи проектирования комбинированного экрана необходимо найти минимум вектора целевой функции (1) по вектору искомых параметров X , и максимум этой же целевой функции по вектору параметров неопределенности δ , что является стандартным подходом при синтезе робастных систем для наихудшего случая.

II. МЕТОД РЕШЕНИЯ

В последнее время все более популярными для решения задач оптимизации становятся метаэвристические методы на основе технологии группового интеллекта. В этих методах используется множество решений на каждой итерации и выполняется стохастический поиск, поэтому они могут найти решение в любом месте во всем пространстве поиска, и способны преодолевать проблемы локальных оптимумов. Высокая скорость сходимости алгоритмов оптимизации роя частиц для разработки многокритериального алгоритма оптимизации имеет преимущества с точки зрения лучшего исследования и использования, так как данный алгоритм обеспечивает возможность глобального поиска.

В настоящее время получили широкое распространение несколько бионических популяционных метаэвристических поведенческих алгоритмов, среди которых «муравьиный» (Ant Colony Optimization), «пчелиный» (Bee Colony Optimization), «кукушки» (Cuckoo Search Algorithm), «светлячков» (Glowworm Swam Optimization), «обезьяний» (Monkey Search Algorithm), «бактерий» (Bacterial Optimization) и др. Особое место среди них принадлежит алгоритму оптимизации «роем частиц» (Particle Swarm Optimization – PSO), что обусловлено возможностью его применения для эффективно-го решения широкого круга задач оптимизации [25]–[27].

В стандартном алгоритме оптимизации роем частиц, скорость частицы i роя j изменяется по линейным законам, в которых движение роя частиц описывается следующими выражениями [24]–[25]

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) &= c_1 r_{1j}(t) \dots \\ \dots [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t) \dots, & \quad (2) \\ \dots [y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \end{aligned}$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (3)$$

где положение $x_{ij}(t)$ и скорость $v_{ij}(t)$ частицы i роя j ; c_1 и c_2 – положительные константы, определяющие веса когнитивной и социальной составляющих скорости движения частицы; $r_{1j}(t)$ и $r_{2j}(t)$ – случайные числа из диапазона $[0,1]$, определяющие стохастическую составляющую компоненты скорости частицы. Здесь $y_{ij}(t)$ и y_j^* – наилучшие локальные – lbest и глобальные – gbest позиции этой частицы i находят соответственно только одна частица i , и все частицы i , этого роя j .

В заключение, заметим, что алгоритм вычисления скорости частиц (2) при минимизации по переменной X параметров системы электромагнитного экранирования и максимизации по переменной δ параметров неопределенностей проектируемой системы по одной и той же векторной целевой функции (1) описываются одним и тем же выражением (2). Различие состоит лишь в том, что при вычислении переменной X для минимизации целевой функции (1) – наилучшие локальные – lbest $y_{ij}(t)$ и глобальные – gbest y_j^* положения частицы i , которые находятся соответственно только одной частицей i , и всеми частицами i , роя j считаются позиции, при которых целевая функция принимает минимальные значения. А при вычислении переменной δ для максимизации этой же векторной целевой функции (1) наилучшими локальными – lbest $y_{ij}(t)$ и глобальными – gbest y_j^* положения частицы i считаются такие положения, при которых эта же целевая функция принимает максимальные значения [28]–[30]. Такой выбор наилучших положений частиц соответствует движению частиц в направлении антиградиента при минимизации целевой функции по переменным X и, соответственно, движению частиц в направлении градиента при максимизации целевой функции по переменным δ .

³ Appendix 1

соответствует движению частиц в направлении антиградиента при минимизации целевой функции по переменным X и, соответственно, движению частиц в направлении градиента при максимизации целевой функции по переменным δ .

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим результаты моделирования эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование с помощью сплошного экрана, МП генерируемого внутри многоэтажного дома одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов. На рис. 3 показана расчетная схема расположения проводов такой одно цепной линии электропередачи и многоэтажного дома, в котором необходимо экранировать магнитное поле.

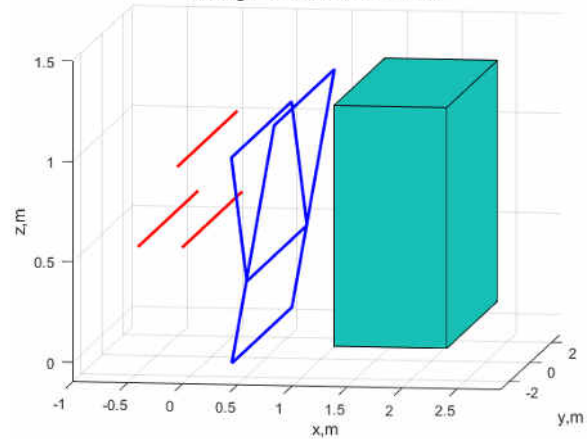


Рис. 3. Расчетная схема расположения проводов одноцепной ЛЭП и многоэтажного дома.³

В ходе проектирования комбинированного экрана для снижения уровня магнитного поля внутри рассматриваемого жилого многоэтажного дома, вычислены координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также токи и фазы в этих обмотках активного экрана, а также параметры П-образного сплошного пассивного экрана. На рис. 3 показано также пространственное расположение двух компенсационных обмоток, определенное в ходе проектирования комбинированного экрана.

На рис. 4 показано распределение исходного МП. При этом уровень индукции МП в пространстве экранирования изменяется от 2,2 мкТл до 0,8 мкТл, что существенно превышает безопасный для проживания уровень МП.

На рис. 5 показано распределение результирующего МП при работе только пассивного экрана.

На рис. 6 показано распределение результирующего МП при работе только САЭ экрана.

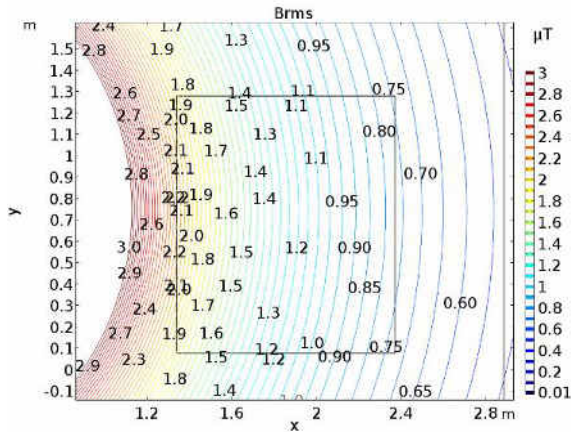


Рис. 4. Распределение исходного МП. ⁴

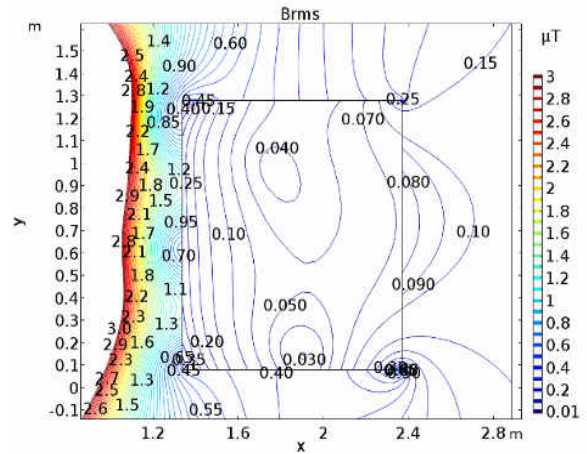


Рис.7. Распределение результирующего МП при работе комбинированного экрана, включающего активный и Π-образный пассивный экран. ⁷

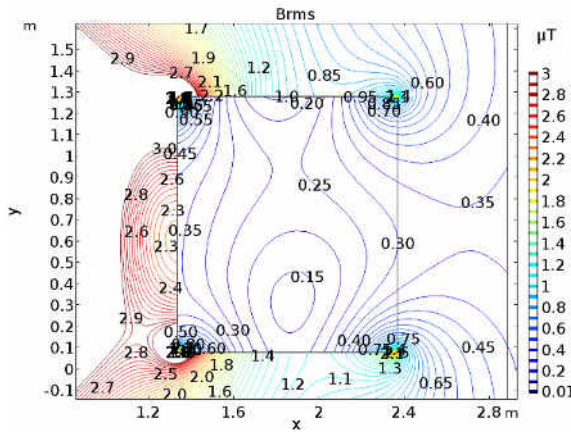


Рис. 5. Распределение результирующего МП при работе только пассивного экрана. ⁵

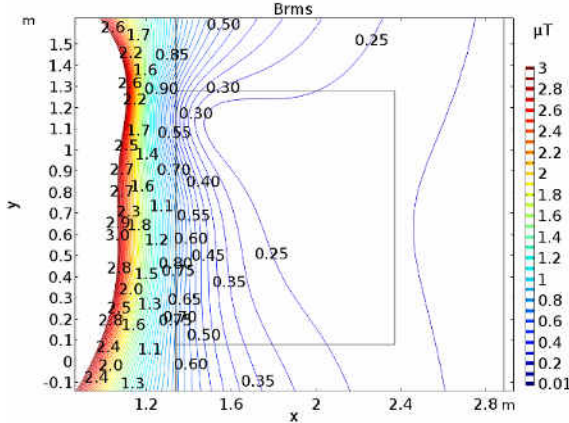


Рис. 6. Распределение результирующего МП при работе только САЭ. ⁶

^{4,5,6,7,8} Appendix 1

На рис. 7 показано распределение результирующего МП при работе комбинированного экрана, включающего активный и Π-образный пассивный экран.

Рассмотрим теперь полученные в результате моделирования пространственно временных характеристик (ПВХ) МП. На рис. 8 показана ПВХ исходного МП а), МП, генерируемого двумя компенсирующими обмотками б) и результирующего МП в).

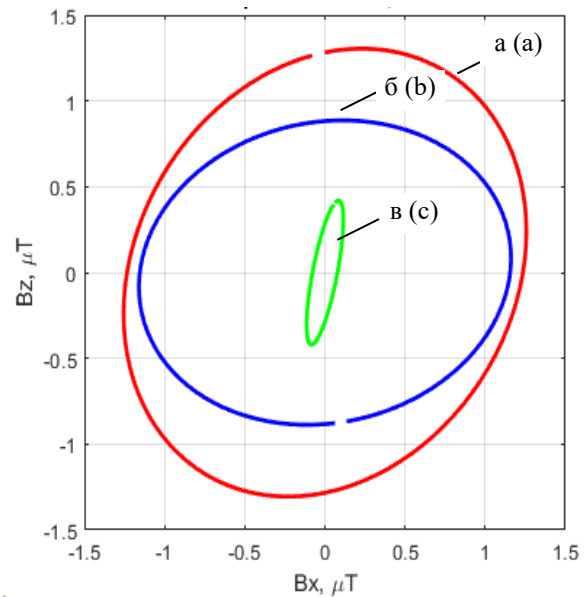


Рис. 8. Пространственно временные характеристики исходного МП а), магнитного поля, генерируемого двумя компенсирующими обмотками б) и результирующего МП в). ⁸

На рис. 9 показана ПВХ результирующего МП при работе только первой компенсирующей обмотки САЭ.

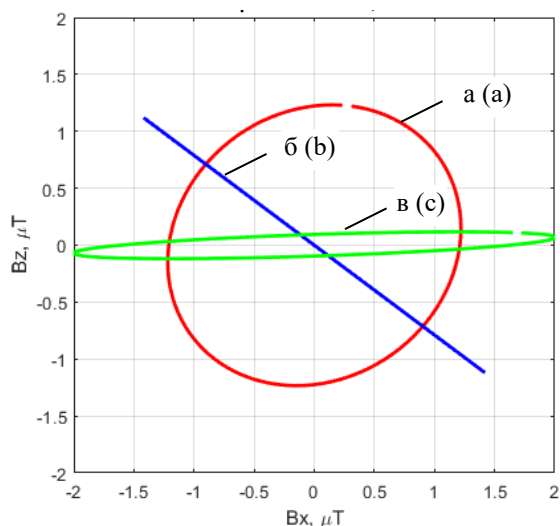


Рис. 9. ПВХ результирующего МП при работе только первой компенсирующей обмотки САЭ.⁹

На рис. 10 показана ПВХ результирующего МП при работе только второй компенсирующей обмотки САЭ.

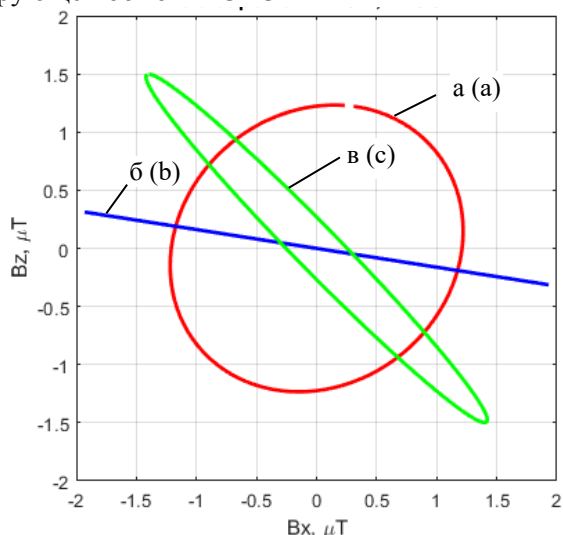


Рис. 10. ПВХ результирующего МП при работе только второй компенсирующей обмотки САЭ.¹⁰

IV. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментальных исследований эффективности системы комбинированного экранирования МП, генерируемого внутри многоэтажных домов одноцепными ЛЭП с треугольным расположением проводов (макет которой показан на рис. 11), включающей активное и пассивное экранирование с помощью сплошного экрана, разработана экспериментальная установка.



Рис. 11. Макет экспериментальной установки одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов.¹¹

На рис. 12 показаны две компенсирующие обмотки САЭ макета экспериментальной установки.



Рис. 12. Две компенсирующие обмотки САЭ макета экспериментальной установки.¹²

На рис. 13 показан макет пассивного П-образного экрана экспериментальной установки.



Рис. 13. Пассивный П-образный экран макета экспериментальной установки.¹³

На рис. 14 показан блок управления САЭ макета экспериментальной установки.



Рис.14. Блок управления САЭ макета экспериментальной установки.¹⁴

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование с помощью сплошного экрана, МП генерируемого внутри многоэтажных домов одноцепными ЛЭП с треугольным расположением проводов. На рис. 15 показаны экспериментально измеренные распределения исходного МП и результирующего МП при работе только пассивного сплошного П-образного экрана.

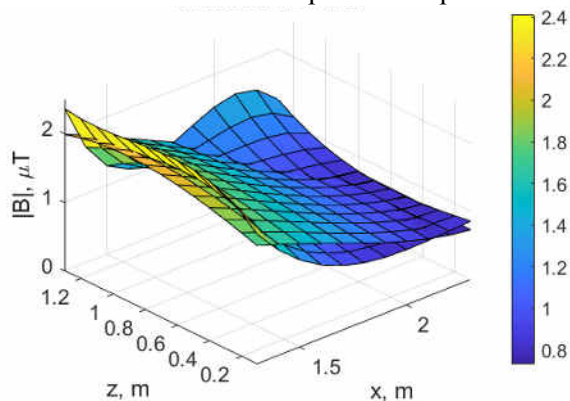


Рис. 15. Экспериментально измеренные распределения исходного МП и результирующего МП при работе только одного пассивного сплошного П-образного экрана.¹⁵

На рис. 16 показаны экспериментально измеренное распределение фактора эффективности экранирования исходного МП при работе только пассивного сплошного П-образного экрана. Максимальное значение фактора эффективности экранирования (ФЭЭ) исходного МП при работе пассивного сплошного П-образного экрана составляет 1.25.

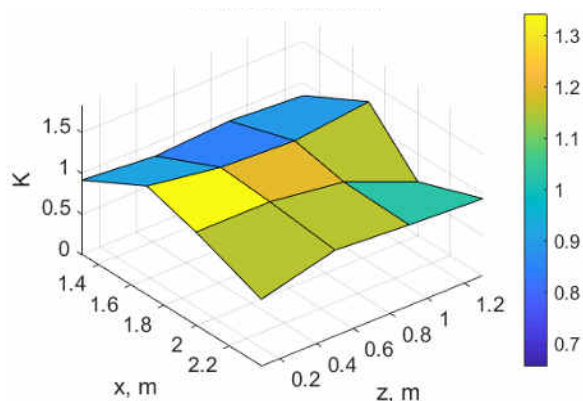


Рис. 16. Экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного МП при работе пассивного сплошного П-образного экрана.¹⁶

На рис. 17 показаны экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе только САЭ.

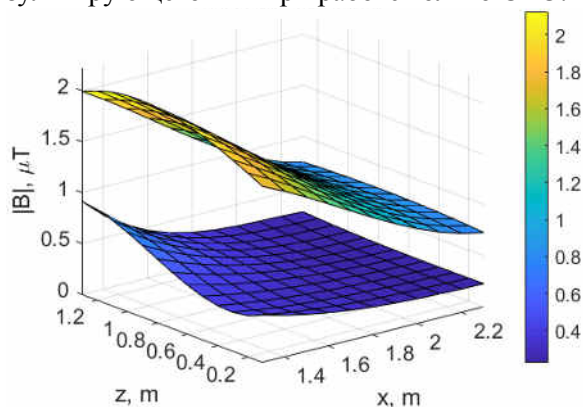


Рис. 17. Экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе только САЭ.¹⁷

На рис. 18 показаны экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного магнитного поля при работе только САЭ. Максимальное значение ФЭЭ исходного МП при работе только САЭ составляет 4,5.

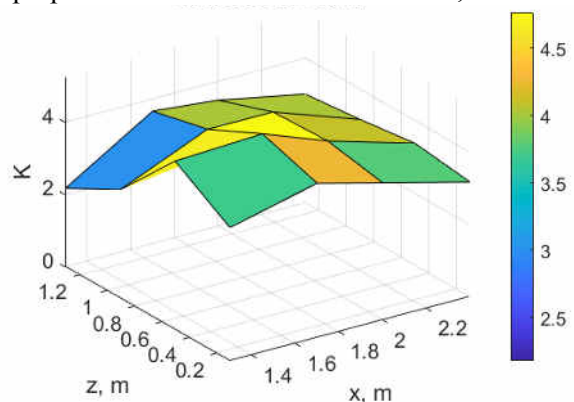


Рис. 18. Экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного магнитного поля при работе только САЭ.¹⁸

^{14,15,16,17,18} Appendix 1

На рис. 19 показаны экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе комбинированного активного и пассивного сплошного П-образного экрана.

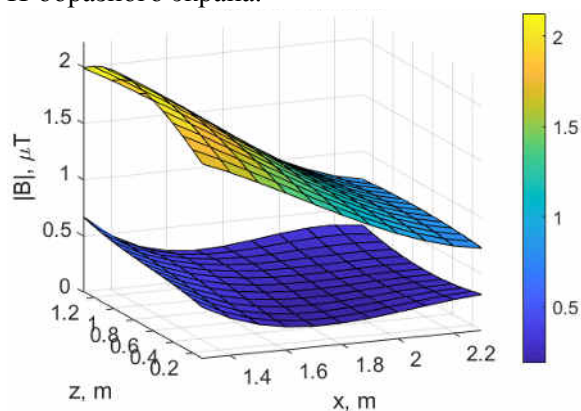


Рис. 19. Экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе комбинированного экрана.¹⁹

На рис. 20 показаны экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного МП при работе при работе комбинированного экрана, с САЭ и пассивным сплошным П-образным экраном. Максимальное значение ФЭЭ исходного МП при работе при работе комбинированного экрана составляет 6,5.

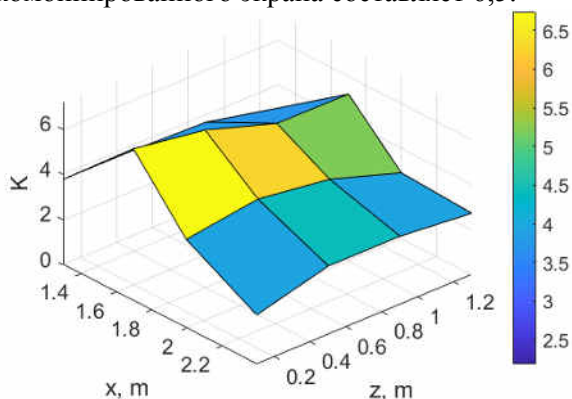


Рис. 20. Экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного МП при работе комбинированного экрана.²⁰

Таким образом, величина ФЭЭ исходного МП при работе комбинированного экрана составляет 6,5, в то время как величина ФЭЭ исходного МП при работе только активного экрана составляет 4,5, а величина ФЭЭ исходного МП при работе только пассивного сплошного П-образного экрана составляет 1,25.

Рассмотрим экспериментально измеренные ПВХ МП. На рис. 21 показана экспериментально измеренная ПВХ исходного МП.

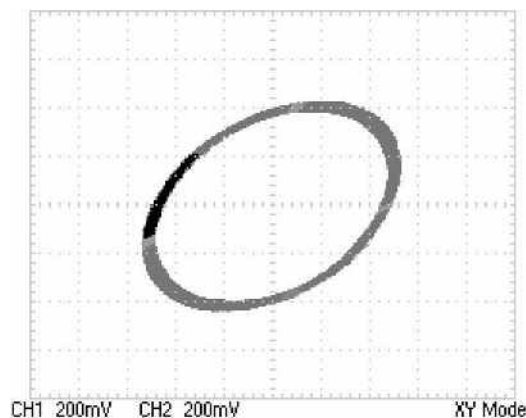


Рис. 21. Экспериментально измеренная ПВХ исходного МП.²¹

На рис. 22 показана экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при работе только первой компенсирующей обмотки САЭ.

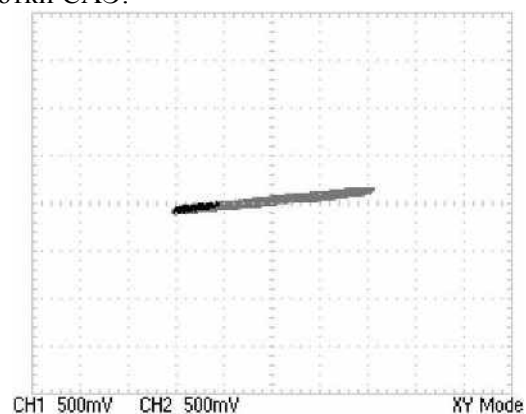


Рис. 22. Экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при работе только первой компенсирующей обмотки САЭ.²²

На рис. 23 показана экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при работе только второй компенсирующей обмотки САЭ.

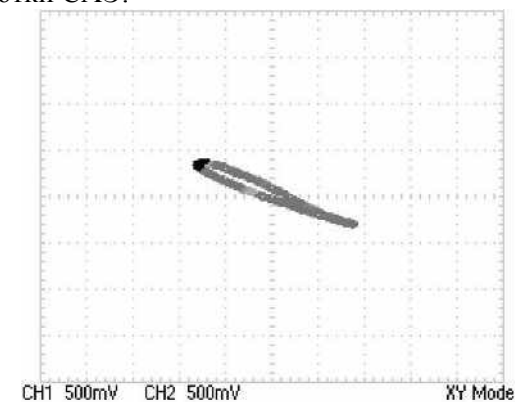


Рис. 23. Экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при работе только второй компенсирующей обмотки САЭ.²³

На рис. 24 показана экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при одновременной работе первой и второй компенсирующих обмоток САЭ.

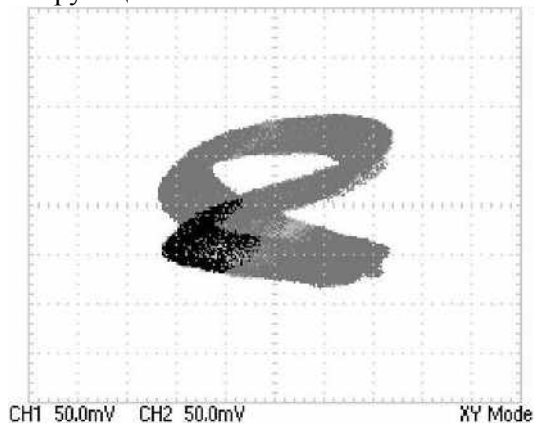


Рис. 24. Экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при одновременной работе первой и второй компенсирующих обмоток САЭ.²⁴

Основное преимущество применения комбинированного экранирования заключается в том, что с его помощью можно снизить уровень исходного МП на значительно большей площади экранирующего пространства по сравнению с использованием только активного экрана.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование с помощью сплошного экрана, МП генерируемого внутри многоэтажных домов одноцепными линиями электропередачи с треугольным расположением проводов.

2. Задача проектирования комбинированного экрана сведена к решению минимаксной задачи векторной оптимизации, в которой векторная целевая функция и ограничения вычисляется с помощью программных средств пакета COMSOL Multiphysics. Решение этой минимаксной векторной задачи оптимизации вычисляется на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтений решений локальных критериев.

3. В ходе проектирования комбинированного экрана для снижения уровня МП, генерируемого одноцепными воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением проводов внутри жилых много-

этажных домов, вычислены координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также токи и фазы в этих обмотках активного экрана, а также параметры П-образного сплошного пассивного экрана.

4. Основное преимущество применения комбинированного электромагнитного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной частей, заключается в снижении уровня индукции исходного МП в значительно большей области пространства экранирования по сравнению с применением только активного экрана.

5. Практическое применение комбинированного электромагнитного экрана позволяет снизить уровень магнитного поля, генерируемого одноцепными воздушными ЛЭП с треугольным расположением проводов внутри жилых многоэтажных домов до безопасного уровня для населения, проживающего вблизи таких ЛЭП.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Location of a multi-storey residential building in close proximity to power lines.

²Fig. 2. The location of a new residential building in close proximity to a power line support.

³Fig. 3. Design diagram for the arrangement of wires of a single-circuit power line and a multi-storey building.

⁴Fig. 4. Distribution of the initial magnetic field (MF).

⁵Fig. 5. Distribution of the resulting MF when only a passive screen is operating.

⁶Fig. 6. Distribution of the resulting MF when operating only the active shielding system (SAS).

⁷Fig. 7. Distribution of the resulting MF during operation of a combined screen, including an active and U-shaped passive screen.

⁸Fig. 8. The spatio-temporal characteristics of the initial MF a), the magnetic field generated by two compensating windings b) and the resulting MF c).

⁹Fig. 9. The spatio-temporal characteristics (STC) of the resulting MF when only the first compensating winding of the SAS is operating.

¹⁰Fig. 10. The STC of the resulting MF when only the second compensating winding of the SAS is operating.

¹¹Fig. 11. Model of an experimental installation of a single-circuit power line with a triangular arrangement of wires.

¹²Fig. 12. Two compensating windings of the SAS of the experimental setup model.

¹³Fig. 13. Passive U-shaped screen of the experimental setup layout.

¹⁴Fig. 14. The SAS control unit of the experimental setup model.

¹⁵Fig. 15. Experimentally measured distributions of the initial MF and the resulting MF when only one passive solid U-shaped screen is operating.

¹⁶Fig. 16. Experimentally measured shielding effectiveness factor (SEF) distribution of the initial MF during operation of a passive continuous U-shaped screen.

¹⁷Fig. 17. Experimentally measured distributions of the initial and resulting MF when operating only the SAS.

¹⁸Fig. 18. Experimentally measured SEF distribution of the initial magnetic field when operating only the SAS.

¹⁹Fig. 19. Experimentally measured distributions of the initial and resulting MF during operation of the combined screen.

²⁰Fig. 20. Experimentally measured distribution of the photoelectric energy of the initial MF during operation of the combined screen.

²¹Fig. 21. Experimentally measured STC of the original MF.

²²Fig. 22. Experimentally measured STC of the resulting MF when only the first compensating winding of the SAS is operating.

²³Fig. 23. Experimentally measured STC of the resulting MF when only the second compensating winding of the SAS is operating.

²⁴Fig. 24. Experimentally measured STC of the resulting MF during simultaneous operation of the first and second compensating windings of the SAS.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность к.т.н., старшему научному сотруднику Ткаченко А.О. отдела магнетизма технических объектов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины за помощь в выполнении расчетов по проектированию комбинированного электромагнитного экрана.

Авторы также выражают благодарность инженерам Соколу А.В. и Шевченко А.П. за творческий подход и смелость, проявленные при создании экспериментальной установки и проведении успешных испытаний лабораторного образца системы комбинированного экранирования.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

[1] *The World Health Organization, "The International EMF Project" / Radiation & Environmental Health Protection of the Human Environment World Health Organization // Geneva, Switzerland. – 1996. – 2 p. Available at: <http://www.who.int/emf/> (accessed 23.04.2024).*

[2] *Global Cancer Statistics: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36*

Cancers in 185 Countries. Enhanced Reader (2020) (accessed 28-04-2024).

- [3] *International Agency for Research on Cancer. IARC Classifies Radiofrequency Electromagnetic Fields as Possibly Carcinogenic to Humans; Press Release No 2008; International Agency for Research on Cancer: Lyon, France, 2011.*
- [4] *Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields), Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj> (accessed 23.04.2024).*
- [5] *IEEE Standards Coordinating Committee 28. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz. New York, NY, IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002 (IEEE Std C95.6-2002).*
- [6] Ghanim Thiab Hasan, Kamil Jadu Ali, Ali Hlal Mutlaq. The Influence of the Mixed Electric Line Poles on the Distribution of Magnetic Field. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*. Vol. 10, No. 2, June 2022, pp. 292–301. ISSN: 2089-3272, doi: 10.52549/ijeie.v10i2.3572 (accessed 23.04.2024).
- [7] Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, vol. 56, pp. 97–106. doi: <https://doi.org/10.3233/jae-172286> (accessed 23.04.2024).
- [8] Canova Aldo, Giaccone Luca. High performance magnetic shielding solution for elf sources. *24th International Conference On Electricity Distribution Glasgow, 12-15 June 2017*. Paper 1029. pp. 1–5.
- [9] Canova Aldo, Giaccone Luca, Cirimele Vincenzo. Active and passive shield for aerial power lines. *25th International Conference on Electricity Distribution*. Madrid, 3–6 June 2019. Paper n°1096, pp.1–5.
- [10] Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2–7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002 (accessed 23.04.2024).
- [11] Bravo-Rodríguez J., Del-Pino-López J., Cruz-Romero P.A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. *Energies*, 2019, vol.12, no.7, pp. 1332–1332. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071332>.
- [12] Canova A., del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF

- Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2354515>.
- [13] Rusanov A.V., Subotin V.N., Khoryev O.M. Effect of 3D shape of pump-turbine runner blade on flow characteristics in turbine mode. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 6-14. doi: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.04.006>.
- [14] Kostikov O.V, Zevin L.I., Krol H.H. The optimal correcting the power value of a nuclear power plant power unit reactor in the event of equipment failures. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 40-45. doi: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.040>.
- [15] Maksymenko-Sheiko K.V., Sheiko T.I., Lisin D.O. Mathematical and computer modeling of the forms of multi-zone fuel elements with plates. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 31-38. doi: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.04.032>.
- [16] Hontarovskiy P.P., Smetankina N.V, Ugrimov S.V. Computational studies of the thermal stress state of multilayer glazing with electric heating. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 14-21. doi: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.02.014>.
- [17] Popov, E. Tserne, S. Zhyla, V. Volosyuk, V. Pavlikov, and N. Ruzhentsev. “Invariant polarization signatures for recognition of hydrometeors by airborne weather radars,” in. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13956, 2023, Springer, Cham, pp. 1–14.
- [18] Sushchenko O. “Algorithms for Design of Robust Stabilization Systems,” in. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol.13375, 2022, Springer, Cham, pp. 198–213. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-10522-7_15.
- [19] Zhyla S., Volosyuk V., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Practical imaging algorithms in ultra-wideband radar systems using active aperture synthesis and stochastic probing signals,” in *Radioelectronic and computer systems*, vol. 105, issue 1, 2023, pp. 55–73. doi: [10.32620/reks.2023.1.05](https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.05) (accessed 23.04.2024).
- [20] Havrylenko O., Dergachov K., Pavlikov V., Zhyla S., Shmatko O. “Decision Support System Based on the ELECTRE Method,” in *Data Science and Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 295–304. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2211-4_26 (accessed 23.04.2024).
- [21] Solomentsev O. “Method of Optimal Threshold Calculation in Case of Radio Equipment Maintenance,” in *Data Science and Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 69–79. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2211-4_6 (accessed 23.04.2024).
- [22] Shmatko O., Volosyuk V., Zhyla S., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E. “Synthesis of the optimal algorithm and structure of contactless optical device for estimating the parameters of statistically uneven surfaces,” in *Radioelectronic and computer systems*, issue. 4, 2021, pp. 199–213. doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4.16> (accessed 23.04.2024).
- [23] Volosyuk V., Zhyla S., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Optimal Method for Polarization Selection of Stationary Objects Against the Background of the Earth’s Surface,” in *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 68, issue. 1, 2022, pp. 83–89. doi: <https://doi.org/10.24425/ijet.2022.139852> (accessed 23.04.2024).
- [24] Ruzhentsev N., Zhyla S., Pavlikov V., Volosyuk V., Tserne E., Popov A.. “Radio-Heat Contrasts of UAVs and Their Weather Variability at 12 GHz, 20 GHz, 34 GHz, and 94 GHz Frequencies,” in *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, vol.20, issue 2, 2022, pp. 163–173. doi: <https://doi.org/10.37936/ectieec.2022202.246878> (accessed 23.04.2024).
- [25] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam University Press, 2010. 174 p.
- [26] Ray T., Liew K.M. A swarm metaphor for multi-objective design optimization. *Engineering Optimization*, 2002, vol. 34, no. 2, pp. 141–153. doi: [10.1080/03052150210915](https://doi.org/10.1080/03052150210915) (accessed 23.04.2024).
- [27] Xiaohui Hu., Eberhart R.C., Yuhui Shi. Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization. *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS’03* (Cat. No. 03EX706). doi: <https://doi.org/10.1109/sis.2003.1202267>.
- [28] Dergachov K., Havrylenko O., Pavlikov V., Popov A., Zhyla S. “GPS Usage Analysis for Angular Orientation Practical Tasks Solving,” *2022 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications*. Science and Technology, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 1–6.
- [29] Zhyla S., Volosyuk V., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Statistical synthesis of aerospace radars structure with optimal spatio-temporal signal processing, extended observation area and high spatial resolution,” in *Radioelectronic and computer systems*, issue. 1, 2022, pp. 178–194. doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.1.14>.

[30] Hashim F.A., Hussain K., Houssein E.H., Mabrouk M.S., and Al-Atabany W. Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied*

Intelligence, 2021, vol. 51, pp. 1531–1551. doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z> (accessed 23.04.2024).

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез электродинамических систем автоматического управления высокой точности, системы активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0002-1100-095X
E-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com



Куценко Александр Сергеевич
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез автоматизированных систем управления высокой точности.
ORCID: 0000-0001-6059-3694
E-mail: oleksandr.kutsenko@khp.edu.ua



Никитина Татьяна Борисовна
Учебно-научный профессионально-педагогический институт УИПА, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез систем автоматического управления повышенной точности.
ORCID: 0000-0002-0185-3078
E-mail: tatjana5555@gmail.com



Бовдуй Игорь Валентинович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, с.и., область научных интересов: синтез электромеханических систем автоматического управления высокой точности, синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0003-3508-9781
E-mail: ibovduj@gmail.com



Чунихин Константин Вадимович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, область научных интересов: моделирование электромагнитных процессов, синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0001-9822-5870
E-mail: kvchunikhin@gmail.com



Волошко Елена Владимировна
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, область научных интересов: синтез автоматизированных систем управления высокой точности.
ORCID: 0000-0002-6931-998X
E-mail: vinichenko.e.5@gmail.com