

Hybrid Active and Passive Cable Contour Shielding of Magnetic Fields of Double-Circuit Overhead Power Lines

Kuznetsov B.I.¹, Kutsenko A.S.², Nikitina T.B.³, Bovdui I.V.⁴, Chunikhin K.V.⁵,
Voloshko O.V.⁶

^{1,4,5,6} Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine

³ Educational scientific professional pedagogical Institute Ukrainian Engineering Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine

Abstract. The purpose of the work is to design a hybrid screen designed to reduce the level of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines, to increase the efficiency of shielding the original magnetic field in residential buildings, to the level of sanitary standards and to reduce the sensitivity of the system to changes in system parameters. To achieve this goal, the structure of a hybrid screen was determined, consisting of a double contour active and a cable contour passive part. The developed hybrid screen is characterized by increased efficiency in reducing the magnetic field of industrial frequency. Designing a hybrid screen comes down to solving a minimax vector optimization problem, in which the vector objective function is calculated based on solution to Maxwell's equations in a quasi-stationary approximation using the COMSOL Multiphysics software package. The solution to the minimax vector optimization problem is calculated based on multi-particle swarm optimization algorithms from Pareto-optimal solutions taking into account binary preference relations. During the design of the hybrid screen, the coordinates of the spatial location of the two compensation windings, as well as the magnitude of the currents and its phases in the windings of the active screen, were calculated. The important results are theoretical and experimental studies on the effectiveness of the designed hybrid magnetic field shield generated by double-circuit overhead power lines. The significance of the results obtained lies in the fact that practical recommendations are given for a reasonable choice of the spatial arrangement of two shielding windings of a robust system of hybrid shielding of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines.

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

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.02>

UDC: 621.3.013

Ecranarea hibridă activă și pasivă a câmpului magnetic prin utilizarea cablului realizat sub formă de circuit al liniilor electrice aeriene cu două lanțuri

Kuznețov B.I.¹, Kuțenko A.S.², Nikitiņa T.B.³, Bovdui I.V.⁴, Ciunihin K.V.⁵, Voloșco E.V.⁶

^{1,4,5,6} Institutul de Probleme de Inginerie Mecanică numit după. A. N. Podgorny Academia Națională de Științe a Ucrainei, Harkov, Ucraina

² Universitatea Națională Tehnică „HPI”, Harkov, Ucraina

³ Institutul Pedagogic Profesional Educațional și Științific al Academiei Ucrainene de Inginerie și Pedagogică, Harkov, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este proiectarea unui ecran hibrid menit să reducă nivelul câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu lanț dublu, să crească eficiența ecranării câmpului magnetic inițial în clădirile de locuit, până la nivelul sanitar în conformitate cu standarde și pentru reducerea sensibilității sistemului la modificările parametrilor. Pentru atingerea acestui obiectiv a fost determinată structura unui ecran hibrid, format dintr-o parte activă cu dublu contur și o parte pasivă cu contur cablu. Ecranul hibrid elaborat se caracterizează printr-o eficiență crescută în reducerea câmpului magnetic al frecvenței industriale. Proiectarea unui ecran hibrid se reduce la rezolvarea unei probleme de optimizare vectorială minimax, în care funcția obiectiv vectorială este calculată pe baza soluției ecuațiilor lui Maxwell într-o aproximare cvasi-staționară folosind pachetul software COMSOL Multiphysics. Soluția problemei de optimizare a vectorului minimax este calculată pe baza algoritmilor de optimizare a roiului multiparticule din soluții Pareto-optime ținând cont de relațiile de preferință binare. În timpul proiectării ecranului hibrid, au fost calculate coordonatele locației spațiale a celor două

înfășurări de compensare, precum și magnitudinea curenților și fazele acestuia în înfășurările ecranului activ. Rezultatele importante sunt studii teoretice și experimentale privind eficacitatea scutului hibrid de câmp magnetic proiectat generat de liniile electrice aeriene cu dublu circuit. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că se dau recomandări practice pentru o alegere rezonabilă a dispunerii spațiale a două înfășurări de ecranare a unui sistem robust de ecranare hibridă a câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu dublu circuit.

Cuvinte-cheie: linii electrice aeriene cu două circuite, câmp magnetic, ecranare hibridă, studii teoretice și experimentale.

Гибридное активное и пассивное тросовое контурное экранирование магнитного поля двухцепных воздушных линий электропередачи

Кузнецов Б.И.¹, Куценко А.С.², Никитина Т.Б.³, Бовдуй И.В.⁴, Чунихин К.В.⁵, Волошко Е.В.⁶

^{1,4,5,6} Институт 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 Украинской инженерно-педагогической академии, Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является проектирование гибридного экрана предназначенного для снижения уровня магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными линиями электропередачи, для повышения эффективности экранирования исходного магнитного поля в жилых домах, до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Для достижения поставленной цели, определена структура гибридного экрана, состоящего из двухконтурной активной и тросовой контурной пассивной части. Разработанный гибридный экран характеризуется повышенной эффективностью снижения магнитного поля промышленной частоты. Проектирование гибридного экрана сводится к решению задачи минимаксной векторной оптимизации, в которой векторная целевая функция вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении с помощью 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 гибридного экрана вычислены координаты пространственного расположения двух компенсационных обмотки, а также величины токов и его фаз в обмотках активного экрана. Наиболее важными результатами являются теоретические и экспериментальные исследования эффективности спроектированного гибридного экрана магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными линиями электропередачи. Значимость полученных результатов состоит в том, что приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения двух экранирующих обмоток робастной системы гибридного экранирования магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными линиями электропередачи. Показана возможность снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм.

Ключевые слова: двухцепные воздушные линии электропередачи, магнитное поле, гибридное экранирование, теоретические и экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле промышленной частоты (МП) на уровень которого следует обратить внимание, генерируется, в основном, воздушными линиями электропередач, а также подземными электрическими кабелями, подстанциями среднего и низкого напряжения и распределительными электросистемами зданий.

Для электроснабжения современных городов наиболее часто применяют двухцепные линии электропередачи (ЛЭП), данные ЛЭП достаточно часто расположены в непосредственной близости от жилых домов, как это показано на рис. 1.

Поэтому, в современных городах двух-

цепные ЛЭП являются основным источником техногенного электромагнитного поля промышленной частоты.

Эффект длительного воздействия магнитного поля промышленной частоты проявляется для населения в увеличении заболеваемости раковыми заболеваниями [1]–[5].

В мировой практике наблюдается тенденция к ужесточению стандартов в отношении уровня магнитных полей промышленной частоты с целью защиты жителей, живущих вблизи этих источников.

Обычно, для нормализации уровня МП требуется ослабление уровня исходного магнитного поля в от двух до четырех раз, по отношению к исходному МП [6].

Одним из традиционных способов ослабления исходного магнитного поля является экранирование объекта обмотками активного экрана [7]–[10]. Эти обмотки используют внешние источники питания для создания дополнительного магнитного поля, противодействующее исходному МП. В результате суперпозиции исходного и дополнительного МП, величина результирующего поля эффективно уменьшается.

Несмотря на свою эффективность, система с активными обмотками более сложна, по сравнению с пассивными экранами. Система включает в себя датчики магнитного поля, дорогостоящее оборудование, такое как источники питания, систему мониторинга в реальном времени для регулировки подаваемых токов и обеспечения выходных требуемых уровней магнитного поля. Данная дополнительная сложность делает активные экраны более дорогим решением по сравнению с пассивными методами экранирования МП.



Рис. 1. Многоэтажный жилой дом, расположенный вблизи двухцепной ЛЭП.¹

Пассивные контуры [9], с другой стороны, предназначены для подавления исходного магнитного поля вихревыми токами до того, как оно достигнет области экранирования. Вихревые токи, индуцированные внутри экранирующей системы, генерируют противоположное магнитное поле, которое ослабляет первоначальное поле. Пассивные контуры имеют более низкую эффективность экранирования, но их можно использовать вместе с активными контурами для повышения общей эффективности экранирования [9]. Наиболее простым в конструктивном исполнении является пассивный тросовый контурный экран, расположенный по краям дома. В работе предлагается подход к гибриднему экранированию, который предполагает интеграцию пассивного тросового контурного

экрана в систему активного

Цель работы – определить эффективность гибридного подхода к экранированию, сочетающего в себе обмотки активного экрана и пассивный тросовый контурный экран для ослабления магнитного поля, создаваемого двухцепной воздушной линией в многоэтажном жилом доме.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Зададим амплитуду A_k и фазу φ_k токов промышленной частоты ω в двухцепных воздушных линиях. Поскольку ток изменяется гармонически с частотой $\omega = 50 \text{ Гц}$, выразим токи в этих линиях в комплексной форме:

$$i_k(t) = A_k \exp j(\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

где комплексная амплитуда тока имеет следующий вид

$$\dot{I}_k = A_k \exp j\varphi_k.$$

Для оценки воздействия на окружающую среду МП, создаваемого двухцепными ВЛ, рассчитаем магнитный поток по закону Био-Савара для элементарного тока [6]–[10]:

$$d\dot{\mathbf{B}}_k(Q) = \frac{\mu_0 \dot{I}_k}{4\pi R^3} (d\mathbf{l}_l \times \mathbf{R}_l) \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{B}}_k(Q) = \frac{\mu_0 \dot{I}_k}{4\pi} \int_L \frac{(d\mathbf{l}_l \times \mathbf{R}_l)}{R^3}. \quad (3)$$

Вектор \mathbf{R}_l направлен от элементарного отрезка $d\mathbf{l}_l$ с током \dot{I}_k к точке наблюдения Q , μ_0 – проницаемость вакуума.

Следовательно, комплексная амплитуда вектора магнитного поля k -й линии равна:

$$\dot{\mathbf{B}}_k(Q) = \frac{\mu_0 \dot{I}_k}{4\pi} \int_L \frac{(d\mathbf{l}_l \times \mathbf{R}_l)}{R^3}. \quad (4)$$

Эта формула обычно используется при расчете магнитного поля воздушных линий электропередачи.

Введем вектор δ параметров неопределенности для задачи проектирования гибридного экранирования [11]–[14]. Его составляющими являются неточные знания токов и фаз в проводах ЛЭП, а также других параметров гибридной системы экранирования.

¹ Appendix 1

Эти параметры известны неточно и могут меняться в процессе работы системы [15]–[18].

Вектор магнитного поля $\dot{\mathbf{B}}_L(Q, \delta)$, создаваемого всеми проводами ЛЭП $\dot{\mathbf{B}}_k(Q, \delta)$ в точке Q экранируемой зоны, рассчитывается по принципу суперпозиции:

$$\dot{\mathbf{B}}_L(Q, \delta) = \sum_k \dot{\mathbf{B}}_k(Q, \delta)$$

Начальные координаты активных контуров, а также амплитуды A_{ak} и фазы φ_{ak} токов в компенсационных обмотках определяются вектором \mathbf{X}_a [13]. Комплексная амплитуда тока в проводах активной обмотки задавалась в следующем виде:

$$\dot{I}_{ak} = A_{ak} \exp j\varphi_{ak}. \quad (5)$$

Вектор магнитного поля $\dot{\mathbf{B}}_a(Q, \mathbf{X}_a)$, создаваемого всеми активными проводами контура $\dot{\mathbf{B}}_{ak}(Q, \mathbf{X}_a)$ в точке Q экранирующей области, также можно рассчитать с использованием принципа суперпозиции:

$$\dot{\mathbf{B}}_a(Q, \mathbf{X}_a) = \sum_k \dot{\mathbf{B}}_{ak}(Q, \mathbf{X}_a). \quad (6)$$

Результирующий вектор МП $\dot{\mathbf{B}}_{Ra}(Q, \mathbf{X}_a, \delta)$ рассчитывается как сумма МП, создаваемого ЛЭП и только обмотками активных контуров:

$$\dot{\mathbf{B}}_{Ra}(Q, \mathbf{X}_a, \delta) = \dot{\mathbf{B}}_L(Q, \delta) + \dot{\mathbf{B}}_a(Q, \mathbf{X}_a). \quad (7)$$

Зададим вектор \mathbf{X}_p , включающий координаты, диаметр и материал провода экрана сетки. Важно отметить, что значения вектора \mathbf{X}_p фиксированы и не будут подвергаться никаким изменениям в процессе оптимизации. Полагая заданными значения вектора \mathbf{X}_p и $\dot{\mathbf{B}}_{Ra}(Q, \mathbf{X}_a, \delta)$, мы обратимся к полуаналитической модели экранированного МП с использованием «сетчатого» экрана от воздушной линии согласно [10]–[12]. Рассчитаем ток $\dot{I}_{pl}(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta)$ в комплексной форме, наводимый в контуре экрана, используя приведенные выше работы.

Имея рассчитанные токи $\dot{I}_{pl}(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta)$ в контуре экрана, и параметры, заданные век-

тором \mathbf{X}_p , мы можем использовать закон Био-Савара для расчета МП $\dot{\mathbf{B}}_p(Q, \mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta)$ экрана. Результирующее МП гибридной экранирующей системы будет определяться аналогично формуле (7):

$$\dot{\mathbf{B}}_R(Q, \mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta) = \dot{\mathbf{B}}_L(Q, \delta) + \dot{\mathbf{B}}_{ak}(Q, \mathbf{X}_a) + \dot{\mathbf{B}}_p(Q, \mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta). \quad (8)$$

II. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Введем вектор \mathbf{X} искомым параметров задачи проектирования гибридного экранирования, состоящей из векторов \mathbf{X}_a и \mathbf{X}_p [16]–[18].

Примем начальные значения векторов \mathbf{X} и δ , тогда среднеквадратичное значение результирующего магнитного поля $\frac{1}{\sqrt{2}} |\dot{\mathbf{B}}_R(Q_i, \mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta)|$ в точке Q_i внутри области экранирования представляется как $B_{rms}(\mathbf{X}, \delta, Q_i)$. Задача проектирования гибридного экранирования сводится к вычислению на определение решения векторной игры [19]–[21]

$$B_{rms}(\mathbf{X}, \delta) = \langle B_{rms}(\mathbf{X}, \delta, Q_i) \rangle. \quad (9)$$

Чтобы решить эту векторную игру, необходимо найти минимум вектора выигрыша игры (9) по вектору \mathbf{X} , а максимум необходимо найти по вектору δ .

При этом необходимо учитывать ограничения на вектор \mathbf{X} , которые описывают искомые параметры гибридной системы экранирования в виде векторного неравенства и, возможно, векторного равенства

$$G(\mathbf{X}) \leq G_{\max}, \quad H(\mathbf{X}) = 0. \quad (10)$$

Следует отметить, что компоненты векторной игры (9) и векторных ограничений (10) являются нелинейными функциями вектора искомым параметров.

Заметим, что решение игры (9) с ограничениями (10) является решением геометрических обратных задач магнитостатики [29]–[32]. В ходе решения отыскиваются, в частности, геометрические размеры и пространственное расположение компенсационных обмоток системы активного экранирования. Прямой задачей является, в частности, закон

Био-Савара (3), когда по известным геометрическим параметрам расположения элементарного участка с заданным значением тока на основе причинно-следственной связи определяется индукция МП в заданной точке, генерируемого этим элементарным участком тока. При решении обратной задачи магнито-статистики решается обратная задача определения параметров тока и геометрических параметров компенсационной обмотки для генерирования заданного компенсирующего поля, направленного противоположно исходному МП, генерируемое ЛЭП в рассматриваемой точке пространства экранирования.

III. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим подход к решению сформулированной задачи. Помимо критериев и ограничений векторной оптимизации, точное решение задачи многокритериальной оптимизации требует задания бинарных отношений предпочтения среди локальных решений [22]–[26]. Этот формальный подход основан на создании пространства оптимальных Парето решений. Подход существенно сужает диапазон возможных оптимальных решений первичной задачи многокритериальной оптимизации, уменьшая нагрузку для того кто принимает решения, по поиску идеального решения.

Чтобы найти локальный минимум в данном пространстве, обычно требуется несколько крайностей, при этом присутствуют как локальные минимумы, так и максимумы. Поэтому для решения этой задачи рекомендуется использовать алгоритмы стохастической многоагентной оптимизации.

Рассмотрим алгоритм поиска множества оптимальных Парето решений задач многокритериального нелинейного программирования на основе стохастической многоагентной оптимизации [27]–[28]. В настоящее время многие алгоритмы оптимизации роя частиц (PSO) разработаны на основе концепции коллективного разума роя частиц, например алгоритмы gbest PSO и lbest PSO [19]–[21]. Использование методов стохастической многоагентной оптимизации для решения многокритериальных задач сопряжено с определенными трудностями, и в настоящее время эта область находится в стадии интенсивного развития. Для решения исходной многокритериальной задачи нелинейного программирования с ограничениями мы предлагаем построить алгоритм стохастической много-

агентной оптимизации, использующий набор роев частиц. Число роев частиц равно числу компонент векторного критерия оптимизации.

Скорости частиц в алгоритме оптимизации роя частиц изменяются по линейным законам. В последнее время для повышения скорости поиска глобального решения стали использовать нелинейные алгоритмы стохастической многоагентной оптимизации [23]. Они включают в себя выражение движения частиц i роя j с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) = & w_j v_{ij}(t) + \dots \\ & \dots + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) * \dots \\ & \dots * [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \dots \quad (11) \\ & \dots + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) * \dots \\ & \dots * [y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \end{aligned}$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (12)$$

где $x_{ij}(t)$ и $v_{ij}(t)$ – положение и скорость частицы i роя j ; c_1 и c_2 – положительные константы, определяющие веса когнитивной и социальной составляющих скорости движения частиц; $r_{1j}(t)$ и $r_{2j}(t)$ представляют собой случайные числа от 0 до 1, используемые для определения стохастической составляющей скорости частицы.

Здесь $y_{ij}(t), y_j^*$ – лучшие локально-лучшие и глобально-лучшие положения частицы находятся соответственно только одной частицей i и всеми частицами i роя j . Использование коэффициента инерции w_j позволяет повысить качество процесса оптимизации.

Функция Хевисайда H используется как функция переключения движения частицы в соответствии с локальным $y_{ij}(t)$ и глобальным $y_j^*(t)$ оптимумам. Когнитивные p_{1j} и социальные p_{2j} компоненты скорости движения частиц переключаются на основе локального и глобального оптимума. Параметры переключения определяются случайными числами $\varepsilon_{1j}(t)$ и $\varepsilon_{2j}(t)$. Если $p_{1j} < \varepsilon_{1j}(t)$ и $p_{2j} < \varepsilon_{2j}(t)$, то скорость частицы i в рое j остается неизменной на шаге t и частица.

движется в том же направлении, что и на предыдущем шаге оптимизации.

Отдельные рои используются для решения задач оптимизации скалярных критериев $B(X, P_j)$, которые являются компонентами векторного критерия оптимизации. Чтобы получить глобальное решение исходной многокритериальной задачи, отдельные рои обмениваются информацией при поиске оптимальных решений локальных критериев

Одновременно информация о глобальном оптимуме, полученном частицами одного роя, используется для расчета скорости движения частиц другого роя для выявления всех потенциальных Парето-оптимальных решений.

Для этого на каждом шаге t движения частиц i роя j используются функции преимуществ локальных решений, полученных всеми роями. Решение $X_j^*(t)$, полученное при оптимизации целевой функции $B(X(t), P_j)$ с помощью роя j , лучше, чем решение $X_k^*(t)$, полученное при оптимизации целевой функции $B(X(t), P_k)$ с помощью роя k , т.е. $X_j^*(t) > X_k^*(t)$ если выполняется условие

$$\max_{i=1,m} B(P_i, X_j^*(t)) < \max_{i=1,m} B(P_i, X_k^*(t)). \quad (13)$$

При этом в качестве глобального оптимального решения $X_k^*(t)$ роя k используется глобальное решение $X_j^*(t)$, полученное роём j , которое лучше по отношению к глобальному решению $X_k^*(t)$ роя k на основе соотношения предпочтений (13).

В этом подходе применяется основная концепция последовательного сужения области компромиссов. Все оптимальные по Парето решения, которые невозможно выбрать на основе имеющейся информации о предпочтениях, последовательно удаляются из исходного множества возможных решений с использованием информации об относительной важности локальных решений. Удаление производится до тех пор, пока не будет достигнуто глобально оптимальное решение. Благодаря такому подходу ни одно потенциально оптимальное решение не будет удалено

на каждом этапе сужения.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 показаны двухцепная ЛЭП и многоэтажный жилой дом. Для этого дома проектируется гибридная система экранирования, которая уменьшает создаваемое в этом случае МП. Проведем моделирование в двумерной постановке, учитывающей параметры ЛЭП и размеры многоэтажного жилого дома. ЛЭП (рис. 2) характеризуются следующими параметрами:

– среднеквадратичное значение тока в проводнике ЛЭП $I_{rms}=700$ А;

– координаты подвеса проводников для фазы А: $A_{1x}=-7$ м, $A_{1y}=5$ м, $A_{2x}=-1$ м, $A_{2y}=5$ м, $A_{2\phi}=0$ м; для фазы В: $B_{1x}=-8$ м, $B_{1y}=10$ м, $B_{2x}=0$ м, $B_{2y}=10$ м; для фазы С: $C_{1x}=-6$ м, $C_{1y}=15$ м, $C_{2x}=-2$ м, $C_{2y}=15$ м;

– угол сдвига фазы: $A_\phi=0$ рад.; $B_\phi=2\pi/3$ рад.; $C_\phi=-2\pi/3$ рад.

Жилой дом расположен по координатам – нижний левый угол ($x_0 = 15$ м, $y_0 = 0.9$ м) и имеет размеры – ширина 11.52 м, высота 13.44 м. Для установки защитного экрана по углам здания используются алюминиевые провода сечением 50 мм².

Распределение магнитного поля неэкранированной воздушной линии показано на рис. 2. Видно, что магнитное поле в жилой зоне на порядок превышает контрольный уровень 0,5 мкТл.

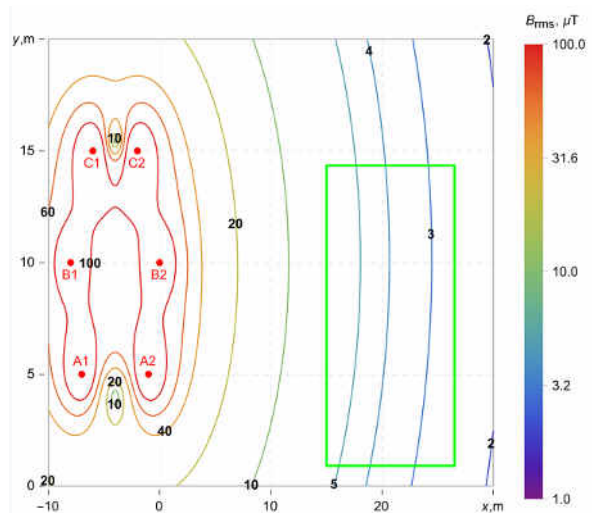


Рис. 2. Распределение среднеквадратического значения индукции магнитного поля ЛЭП вблизи жилого дома.²

Если используется только пассивный тросовый контурный экран (рис. 3), ослабление магнитного поля в среднем составляет око-

до 1.13. Это снижение незначительно

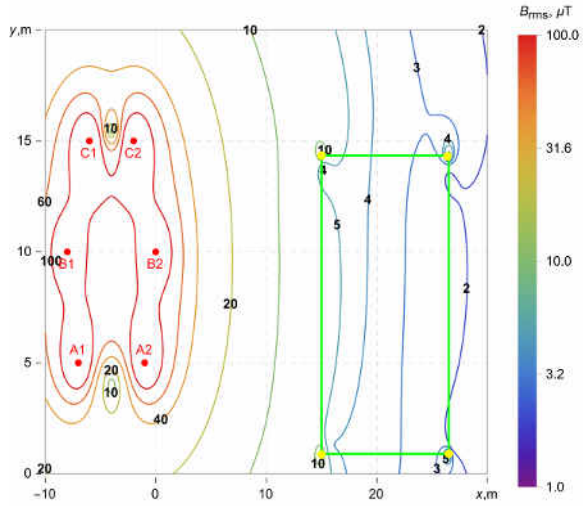


Рис. 3. Распределение средневладратического значения индукции магнитного поля при использовании только пассивного тросового контурного экрана.³

фазы.

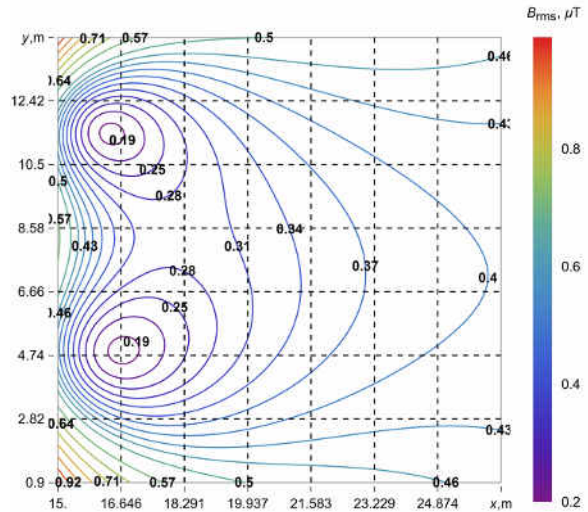


Рис. 5. Детальное распределение средневладратического значения индукции магнитного поля внутри жилой зоны при использовании только активного экрана.⁵

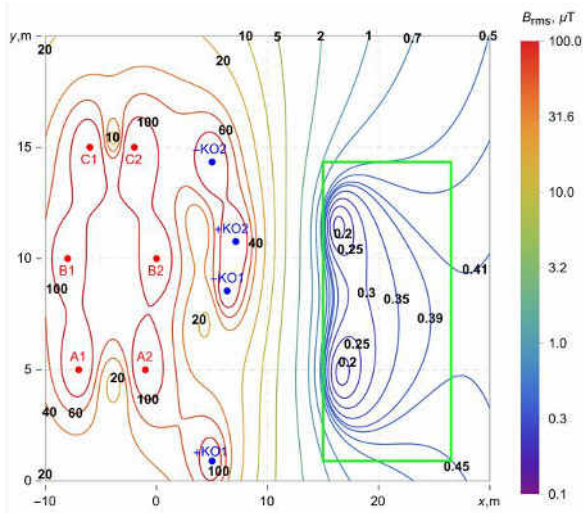


Рис. 4. Распределение средневладратического значения индукции магнитного поля при использовании только активного экрана.⁴

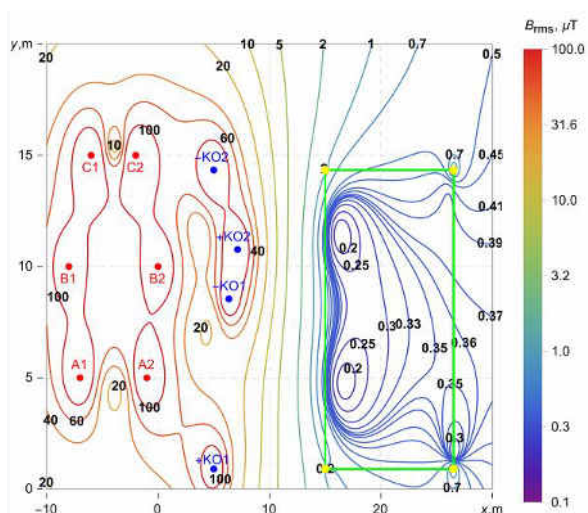


Рис.6. Распределение средневладратического значения индукции магнитного поля при использовании гибридной системы экранирования.⁶

из-за неоптимальных параметров пассивного тросового контурного экрана.

Активные контуры оптимизированы с параметрами первой обмотки, состоящими из $X_{1s}= 5 \text{ м}$, $Y_{1s}= 0.9 \text{ м}$, $X_{1e}= 6.36 \text{ м}$, $Y_{1e}= 8.55 \text{ м}$, $I_{K01}= 468.5 \text{ А}$, и $\varphi_{K01}= 3.53 \text{ рад.}$, а параметры второй обмотки включают $X_{2s}= 7.14 \text{ м}$, $Y_{2s}= 10.77 \text{ м}$, $X_{2e}= 5 \text{ м}$, $Y_{2e}= 14.34 \text{ м}$, $I_{K02}= 700 \text{ А}$, и $\varphi_{K02}= 3.8 \text{ рад.}$

В этом случае X_{1s} , Y_{1s} , X_{1e} , Y_{1e} , X_{2s} , Y_{2s} , и X_{2e} представляют собой координаты положений обмотки. Тогда как I_{K01} и I_{K02} представляют собой действующие значения тока в обмотке, а φ_{K01} и φ_{K02} представляют соответствующие

Использование только активных контуров при оптимизации их параметров на основе фиксированных параметров пассивного тросового контурного экрана приводит к заметному ослаблению магнитного поля примерно в 11.5 раз (рис. 4, 5).

При использовании гибридной системы экранирования (рис. 6, 7) ослабление магнитного поля в среднем составляет около 12.4 раз. Результаты подтверждают эффективность подхода гибридного экранирования для ослабления МП, создаваемого двухцепными воздушными линиями в многоэтажном жилом доме.

Предложенный подход был признан эффективным, поскольку магнитное поле не превышало уровень МП в 0.5 мкТл в 95 % объеме жилого помещения.

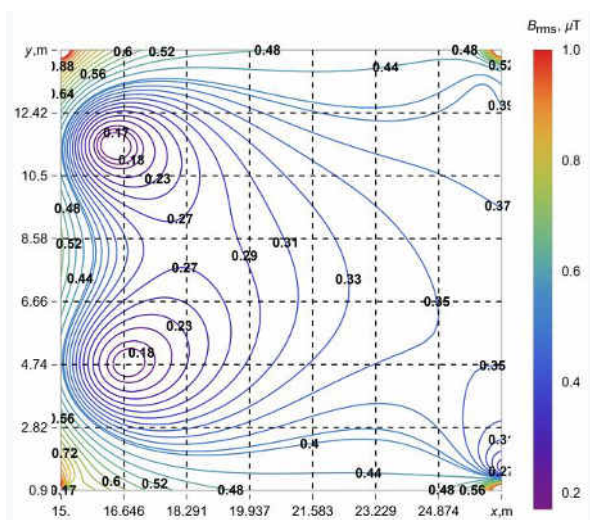


Рис. 7. Детальное распределение средневладратического значения индукции магнитного поля внутри жилой зоны при использовании гибридной системы экранирования.⁷

V. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментальных исследований эффективности системы комбинированного экранирования МП, генерируемого внутри многоэтажных домов двухцепными линиями электропередачи с расположением проводов типа «бочка» (макет которой показан на рис. 8), включающей активное и пассивное экранирование с помощью контурного экрана, разработана экспериментальная установка.



Рис. 8. Двухцепная линия электропередачи с расположением проводов типа «бочка» макета экспериментальной установки.⁸

На рис. 9 показаны две компенсирующие обмотки САЭ макета экспериментальной установки.



Рис. 9. Две компенсирующие обмотки активного экрана макета экспериментальной установки.⁹

На рис. 10 показан макет пассивного контурного экрана экспериментальной установки.



Рис. 10. Пассивный контурный экран макета экспериментальной установки.¹⁰

На рис. 11 показан общий вид макета экспериментальной установки



Рис.11. Общий вид макета экспериментальной установки.¹¹

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование с помощью контурного экрана, МП генерируемого внутри многоэтажных домов двухцепными линиями электропередачи с расположением проводов типа «бочка». На рис. 12 показаны экспериментально измеренные распределения исходного МП и результирующего МП при работе только одного пассивного контурного экрана.

На рис. 13 показаны экспериментально измеренное распределение фактора эффективности экранирования исходного МП при работе только пассивного контурного экрана. Максимальное значение фактора эффективности экранирования (ФЭЭ) исходного МП при работе пассивного сплошного П-образного экрана составляет 1.25.

На рис. 14 показаны экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе только активного экрана.

На рис. 15 показаны экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного магнитного поля при работе только активного экрана. Максимальное значение ФЭЭ исходного МП при работе только САЭ составляет 5.

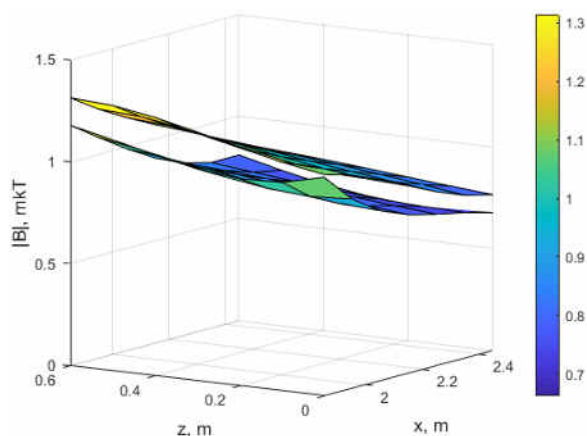


Рис. 12. Экспериментально измеренные распределения исходного МП и результирующего МП при работе только одного пассивного контурного экрана.

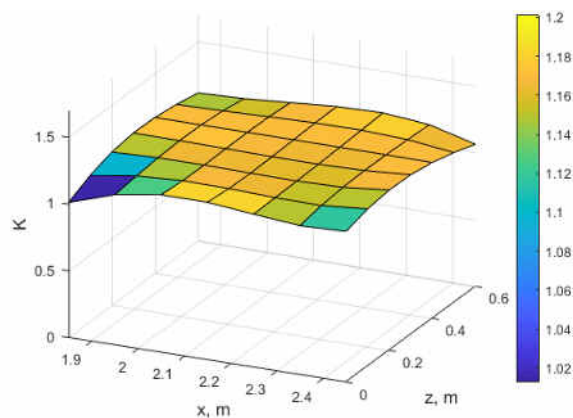


Рис. 13. Экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного МП при работе пассивного контурного экрана.

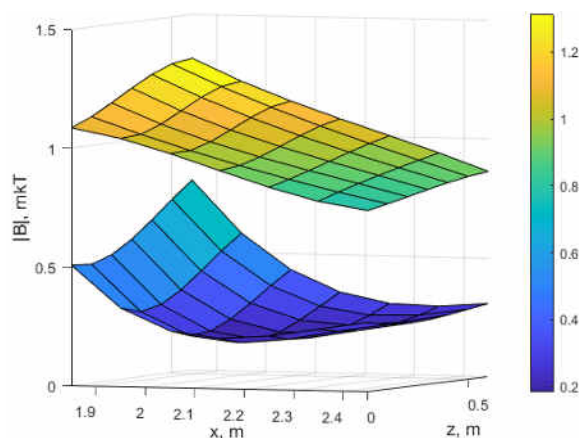


Рис. 14. Экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе только активного экрана.

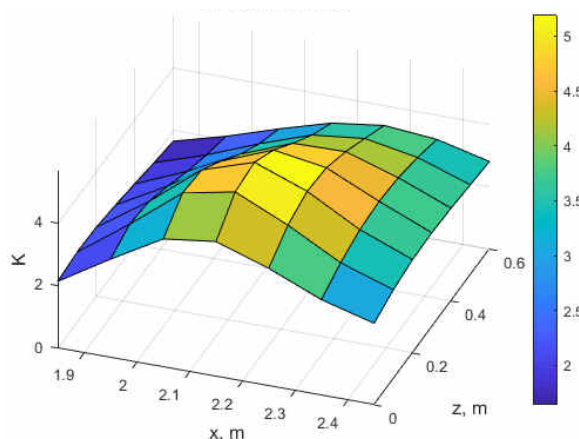


Рис. 15. Экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного магнитного поля при работе только активного экрана.

На рис. 16 показаны экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе комбинированного активного и пассивного контурного экрана.

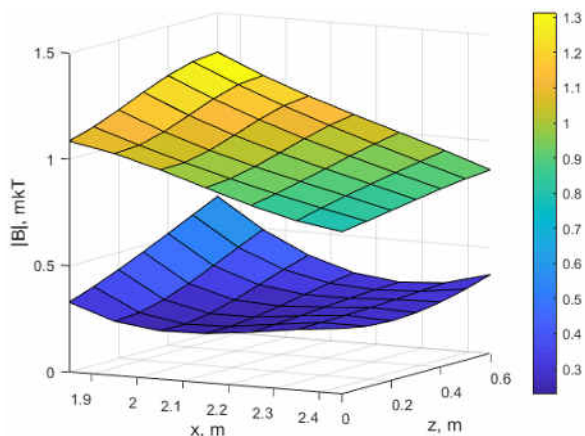


Рис. 16. Экспериментально измеренные распределения исходного и результирующего МП при работе комбинированного экрана. ¹⁶

На рис. 17 показаны экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного МП при работе при работе комбинированного экрана, с активным и пассивным контурным экраном. Максимальное значение ФЭЭ исходного МП при работе при работе комбинированного экрана составляет 4.5.

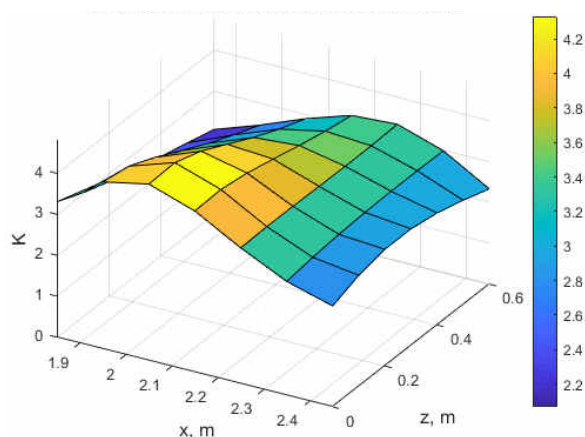


Рис. 17. Экспериментально измеренное распределение ФЭЭ исходного МП и при работе комбинированного экрана. ¹⁷

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 составля-

ет 1.25.

Рассмотрим экспериментально измеренные пространственно-временные характеристики (ПВХ) МП.

На рис. 18 показаны экспериментально измеренные выходные напряжения датчиков магнитного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях при измерении ПВХ исходного МП.

Как следует из этих осциллограмм, выходные напряжения датчиков магнитного поля смещены по фазе примерно на 180 градусов и имеют примерно одинаковые амплитуды.

На рис. 19 показана экспериментально измеренная ПВХ исходного МП.

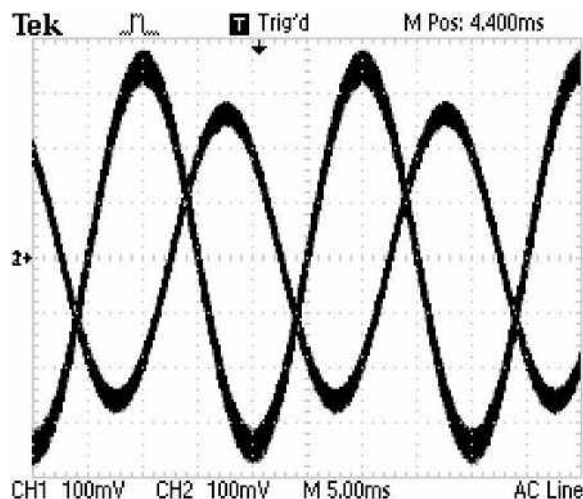


Рис. 18. Экспериментально измеренные выходные напряжения датчиков магнитного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях. ¹⁸

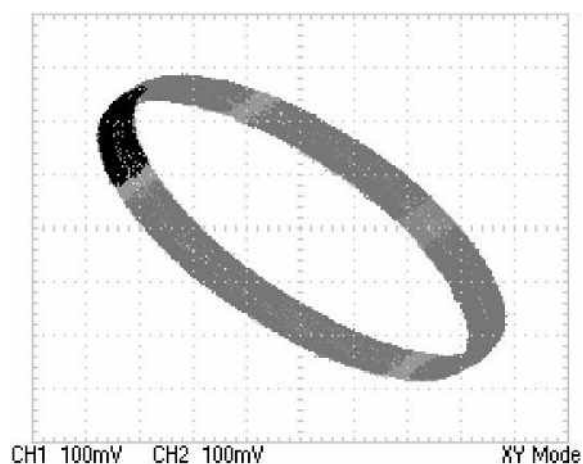


Рис. 19. Экспериментально измеренная ПВХ исходного МП. ¹⁹

На рис. 20 показана экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при работе комбинированного экрана, с активным и пассивным контурным экраном.

Как следует из этого рис. 20, при работе комбинированного экрана с активным и пассивным контурным экраном, площадь ПВХ становится существенно меньше площади ПВХ исходного МП, показанного на рис. 19. Что и определяет высокую эффективность экранирования исходного МП с помощью комбинированного экрана.

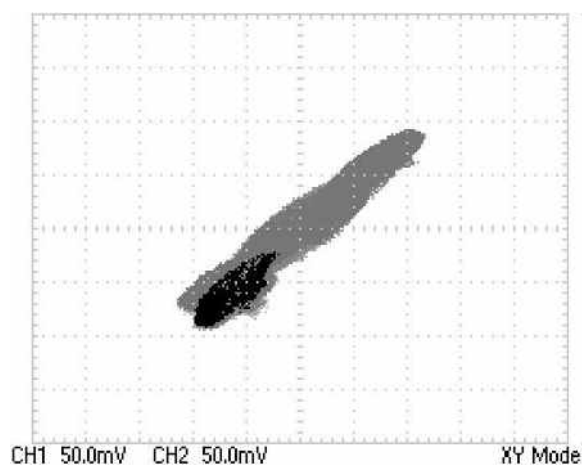


Рис. 20. Экспериментально измеренная ПВХ результирующего МП при работе комбинированного экрана, с активным и пассивным контурным экраном.²⁰

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 одного активного экрана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Данные исследования показывают возможность применения гибридного подхода к экранированию магнитных полей промышленной частоты, генерируемых двухцепными воздушными линиями в многоэтажных жилых домах. Результаты подчеркивают потенциал этого подхода в плане эффективного решения данной проблемы.

2. Результаты исследования показывают, что использование только пассивного тросового контурного экрана приводит к относительно небольшому ослаблению магнитного поля, из-за отсутствия оптимизации параметров данного типа экранов. Однако, оптимизация активных контуров, основанная на фик-

сированных параметрах пассивного тросового контурного экрана, приводит к заметному ослаблению магнитного поля. Комбинация активных контуров и пассивного тросового контурного экрана в гибридной системе экранирования, уменьшает уровень исходного магнитного поля примерно в 12.4 раза.

3. Это исследование продемонстрировало, что подход гибридного экранирования способен ослабить уровень магнитного поля до контрольного уровня в 0.5 мкТл для помещений в жилом доме, и при этом данное требование выполняется для 95 % объема жилого пространства. Данный результат подчеркивает практическую значимость подхода гибридного экранирования, предоставляя для жителей, живущих вблизи источников магнитных полей промышленной частоты практическое решение проблемы нормализации уровня магнитного поля ЛЭП до санитарного уровня МП.

4. Результаты этого исследования способствуют нашему пониманию уменьшения воздействия магнитного поля и предлагают практическое решение для реальных объектов. В будущем исследованиях планируется изучить оптимизацию процесса проектирования и изучить дополнительные гибридные комбинации методов защиты. Это позволит определить более эффективные варианты решений для уменьшения воздействия магнитных полей промышленной частоты.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Multi-storey residential building located near a double-circuit power line.

²Fig. 2. Distribution of the RMS of the MF induction of power lines near a residential building.

³Fig. 3. Distribution of the RMS of the MF induction when using only a passive cable contour screen.

⁴Fig. 4. Distribution of the RMS value of the MF induction when using only the active screen.

⁵Fig. 5. Detailed distribution of the RMS value of the MF induction inside a residential area when using only an active screen.

⁶Fig. 6. Distribution of the RMS of the MF induction when using a hybrid shielding system.

⁷Fig. 7. Detailed distribution of the RMS value of MF induction inside a residential area when using a hybrid shielding system.

⁸Fig. 8. Double-circuit power transmission line with a "barrel" wire arrangement of a mock-up of an experimental layout.

⁹Fig. 9. Two compensating windings of the active screen of the experimental setup prototype.

¹⁰Fig. 10. Passive contour screen of the experimental setup layout.

- ¹¹Fig. 11. General view of the experimental setup layout.
- ¹²Fig. 12. Experimentally measured distributions of the initial MF and the resulting MF when only one passive contour screen is operating.
- ¹³Fig. 13. Experimentally measured distribution of the shielding efficiency factor of the original MF when operating a passive contour shield.
- ¹⁴Fig. 14. Experimentally measured distributions of the initial and resulting MF when only the active screen is operating.
- ¹⁵Fig. 15. Experimentally measured distribution of the shielding efficiency factor of the initial MF when only the active shield is operating.
- ¹⁶Fig. 16. Experimentally measured distributions of the initial and resulting MF during operation of the combined screen.
- ¹⁷Fig. 17. Experimentally measured distribution of the shielding efficiency factor of the original MF and during operation of the combined shield.
- ¹⁸Fig. 18. Experimentally measured output voltages of MF sensors in the vertical and horizontal planes.
- ¹⁹Fig. 19. Experimentally measured spatiotemporal characteristics of the original MF.
- ²⁰Fig. 20. Experimentally measured spatio-temporal characteristics of the resulting MF when operating a combined screen, with an active and passive contour screen.

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 23.06.2023).*
- [2] *Global Cancer Statistics: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. Enhanced Reader (2020). (accessed 28-02-2023).*
- [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 23.06.2023).*
- [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 Jada 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 (IJEEI)*. Vol. 10, No. 2, June 2022, pp. 292–301. ISSN: 2089-3272, doi: <https://doi.org/10.52549/ijeei.v10i2.3572>.
- [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>.
- [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: <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20040002>.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.05>.
- [14] 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.
- [15] Solomentsev O. “Method of Optimal Threshold Calculation in Case of Radio Equipment Maintenance”

- nance,” 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.
- [16] 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>.
- [17] 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>.
- [18] 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/ecti-ec.2022202.246878>.
- [19] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam University Press, 2010. 174 p.
- [20] Ray T., Liew K.M. A swarm metaphor for multi-objective design optimization. *Engineering Optimization*, 2002, vol. 34, no. 2, pp. 141–153. doi: <https://doi.org/10.1080/03052150210915>.
- [21] 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>. (accessed 23.06.2023).
- [22] 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.
- [23] 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>.
- [24] Sushchenko O.A., Tunik A.A. “Robust optimization of the inertially stabilized platforms,” in *IEEE 2nd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Ukraine, Kyiv, 2012, pp. 101-105.
- [25] O.A. Sushchenko, “Robust control of platforms with instrumentation,” in *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Ukraine, Lviv, 2019.
- [26] O. Sushchenko, F. Yanovsky, O. Solomentsev, N. Kuzmenko, Y. Averyanova, M. Zaliskyi, I. Ostroumov and O. Shcherbyna, “Design of robust control system for inertially stabilized platforms of ground vehicles,” in *IEEE 19th International Conference on Smart Technologies (EUROCON)*, Ukraine, Lviv, 2021, pp. 6-10.
- [27] Gal’chenko V.Ya. Structural synthesis of attachable eddy-current probes with a given distribution of the probing field in the test zone / V.Ya. Gal’chenko, M.A. Vorob’ev // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2005. – vol. 41, Issue 1, pp. 29–33. doi: <https://doi.org/10.1007/s11181-005-0124-7>.
- [28] Halchenko V.Ya., Ostapushchenko D.L., Vorobyov M.A. Mathematical simulation of magnetization processes of arbitrarily shaped ferromagnetic test objects in fields of given spatial configurations. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2008. – vol. 44, Issue 9, pp. 589–600. doi: <https://doi.org/10.1134/S1061830908090015>.
- [29] 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>
- [30] 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>.
- [31] 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>.
- [32] 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>
- [33] Hashim F.A., Hussain K., Houssein E.H., Mabrouk M.S., and Al-Atabany W. Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algo-

rithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*, 2021, vol. 51, pp. 1531–1551.

doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>.

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович
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](mailto:kuznetsov.boris.i@gmail.com)



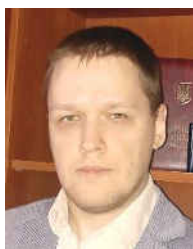
**Куценко Александр
Сергеевич**
доктор технических наук,
профессор, область науч-
ных интересов: синтез ав-
томатизированных систем
управления высокой точ-
ности.
ORCID: 0000-0001-6059-
3694
E-mail:
[oleksandr.kutsenko@
khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.kutsenko@khpi.edu.ua)



**Никитина Татьяна
Борисовна**
доктор технических наук,
профессор, область науч-
ных интересов: синтез
систем автоматического
управления повышенной
точности.
ORCID: 0000-0002-0185-
3078
E-mail: [tatjana5555@
gmail.com](mailto:tatjana5555@gmail.com)



**Бовдуй Игорь
Валентинович**
кандидат технических
наук, область научных
интересов: синтез
электромеханических
систем автоматического
управления высокой
точности. ORCID: 0000-
0003-3508-9781
E-mail: ibovduj@gmail.com



**Чунихин Константин
Вадимович,** кандидат
технических наук,
область научных интересов:
моделирование электромаг-
нитных процессов.
ORCID: 0000-0001-9822-
5870
E-mail: [kvchunikhin@
gmail.com](mailto:kvchunikhin@gmail.com)



**Волошко Елена
Владимировна**
кандидат технических
наук,
область научных
интересов: синтез
автоматизированных
систем управления
высокой точности.
ORCID: 0000-0002-6931-
998X
E-mail: [vinichenko.e.5@
gmail.com](mailto:vinichenko.e.5@gmail.com)