

Comparison of the Combined Shielding Effectiveness Based on Experimental Studies of Overhead Power Lines Magnetic Field 3D Model

Bovdai I.V.

Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kharkiv, Ukraine

Abstract. The aim of the work is an experimental study of the efficiency of combined shielding of the magnetic field generated by transmission lines (HVPL) with single-circuit and triangular arrangement of wires and double-circuit transmission lines with a "Barrel" type of wire arrangement using an active shielding system and passive shields made in the form of solid, or multi-loop, shields. To achieve this goal, the structure of combined shields was determined, which consist of a double-loop active shield and solid, or multi-loop, shields. The developed combined shields provide increased efficiency in reducing the level of industrial frequency (MF) magnetic field. Designing combined shields is reduced to solving vector games in which the cost vector of the game is calculated based on solutions to Maxwell's equations in a quasi-stationary approximation using the COMSOL Multiphysics software package. The solution to these vector games is calculated based on the "particle swarm" optimization algorithms from Pareto-optimal solutions, taking into account binary preference relations. The most important results are the calculated values of the spatial arrangement coordinates of two compensation windings of the active shielding system, and the values of currents and phases in these windings, as well as the parameters of solid and multi-loop passive screens, which made it possible to increase the efficiency of MF shielding inside residential buildings, from that generated by single-circuit HVPL with triangular wire arrangement and double-circuit HVPL with the "Barrel" type conductor arrangement. The significance of the obtained results is that practical recommendations are given for the justified choice of the spatial arrangement of two shielding windings of the robust active shielding system, as well as the parameters of solid and multi-loop passive screens for combined shielding systems of MF generated inside residential buildings by single-circuit HVPL with triangular wire arrangement and double-circuit HVPL with the "Barrel" type conductor arrangement. The possibility of reducing the induction level of the initial MF to the level of sanitary standards is shown.

Keywords: overhead power lines, magnetic field, combined shielding, experimental studies.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.2-66.05>

UDC: 621.3.013

Compararea eficacității ecranării combinate pe baza studiilor experimentale ale unui model 3D al câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene

Bovdai I.V.

Institutul de Mașini și Sisteme Energetice numit după. UN. Academia Națională de Științe din Podgorny din Ucraina, Harkov, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a studia experimental eficacitatea ecranării combinate a câmpului magnetic generat de liniile electrice cu un singur circuit cu un aranjament triunghiular de fire și linii electrice cu dublu circuit cu un aranjament de fire de tip „Barrel”, folosind un sistem de ecranare activ și ecrane pasive realizate sub formă de ecrane continue sau multicircuite. Pentru a atinge acest scop, a fost determinată structura ecranelor combinate, care constau dintr-un ecran activ și continuu cu dublu circuit sau multicircuit. Ecranele combinate dezvoltate oferă o eficiență sporită în reducerea nivelului câmpului magnetic al frecvenței industriale (MF). Proiectarea ecranelor combinate se reduce la rezolvarea jocurilor vectoriale, în care vectorul cost al jocului este calculat pe baza soluțiilor ecuațiilor lui Maxwell într-o aproximare cvasi-staționară folosind pachetul software COMSOL Multiphysics. Soluțiile acestor jocuri vectoriale sunt calculate pe baza algoritmilor de optimizare multiparticule din soluții Pareto-optime ținând cont de relațiile de preferințe binare. Cele mai importante rezultate sunt valorile calculate ale coordonatelor locației spațiale ale celor două înfășurări de compensare ale sistemului de ecranare activ și mărimile curenților și fazelor din aceste înfășurări, precum și parametrii ecranelor pasive solide și multi-circuite, care au făcut posibilă creșterea eficienței ecranării MF în interiorul clădirilor rezidențiale, prin circuite triunghiulare și linii electrice duble MF folosiți liniile electrice cu un aranjament de conductor de curent de tip „Baril”. Semnificația rezultatelor obținute este că se oferă recomandări practice pentru alegerea rezonabilă a aranjamentului spațial a două înfășurări de ecranare a unui sistem de ecranare activ robust, precum și parametrii ecranelor pasive solide și multi-circuite pentru sistemele de ecranare combinată de MF

generate în interiorul clădirilor rezidențiale prin linii electrice triunghiulare cu un singur circuit și linii electrice cu circuit dublu. aranjarea firelor. S-a demonstrat posibilitatea reducerii nivelului de inducție a MP initial la nivelul standardelor sanitare.

Cuvinte-cheie: linii electrice aeriene, câmp magnetic, ecranare combinată, studii experimentale.

Сравнение эффективности комбинированного экранирования на основе экспериментальных исследований 3D модели магнитного поля воздушных линий электропередачи

Бовдуй И.В.

Институт энергетических машин и систем им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины
Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является экспериментальное исследование эффективности комбинированного экранирования магнитного поля, генерируемого одноцепными ЛЭП с треугольным расположением проводов и двухцепными ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка», с помощью системы активного экранирования и пассивных экранов, выполненных в виде сплошных, или многоконтурных, экранов. Для достижения поставленной цели определена структура комбинированных экранов, которые состоят из двухконтурной активной и сплошных, или многоконтурных, экранов. Разработанные комбинированные экраны обеспечивают повышенную эффективность снижения уровня магнитного поля промышленной частоты (МП). Проектирование комбинированных экранов сводится к решению векторных игр, в которых вектор стоимости игры вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics. Решение этих векторных игр вычисляются на основе алгоритмов оптимизации «мультироме частиц» из Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. Наиболее важными результатами являются рассчитанные значения координат пространственного расположения двух компенсационных обмоток системы активного экранирования, и величины токов и фазы в этих обмотках, а также параметры сплошных и многоконтурных пассивных экранов, что позволило повысить эффективность экранирования МП внутри жилых домов, от генерируемого одноцепными ЛЭП МП с треугольным расположением проводов и двухцепными ЛЭП с расположением токопроводов типа «Бочка». Значимость полученных результатов состоит в том, что приведены практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения двух экранирующих обмоток робастной системы активного экранирования, а также параметров сплошных и многоконтурных пассивных экранов для систем комбинированного экранирования МП, генерируемого внутри жилых домов одноцепными ЛЭП с треугольным расположением проводов и двухцепными ЛЭП с расположением проводов типа «бочка». Показана возможность снижения уровня индукции исходного МП до уровня санитарных норм.

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

ВВЕДЕНИЕ

Длительное воздействие на население достаточно слабых уровней магнитного поля промышленной частоты (МП) приводит к повышению уровня онкологических заболеваний у населения, проживающего в жилых домах вблизи ЛЭП [1]–[6]. Поэтому, создание методов и средств нормализации уровня электромагнитного поля в существующих жилых массивах рядом с ЛЭП без выселения населения, или вывода из эксплуатации существующих электрических сетей, определяет экономическую и социальную значимость таких исследований. В связи с этим, в ряде стран интенсивно разрабатываются методы снижения уровня МП до безопасного уровня для проживания в существующих жилых домах, расположенных рядом с ЛЭП [7]–[8].

В работе [9] рассмотрены вопросы синтеза систем комбинированного экранирования магнитного поля в двумерной постановке. При этом рассчитывается при проектирова-

нии экранирование в «центральной сечении» жилых домов. Однако, при экранировании МП необходимо уменьшать уровень индукции магнитного поля до безопасного уровня во всем объеме жилых строений. Это обуславливает постановку и решение задачи синтеза комбинированных экранов в трехмерной постановке.

Целью работы является экспериментальное исследование эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование МП с помощью сплошного, или многоконтурного, экранов, которое генерируется одноцепными ЛЭП с треугольным расположением проводов и двухцепными ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка».

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрим геометрическую прямую проблему квазимагнитостатики магнитного поля промышленной частоты. Геометрическая

прямая проблема заключается в вычислении магнитного поля в любой точке пространства для заданных источников магнитного поля [10]–[12].

Теоретической основой расчета магнитного поля, генерируемого ЛЭП в однородной среде, является так называемое квазистатическое приближение системы уравнений Максвелла [6]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ и $\mathbf{B}$ – векторы напряженности и индукции магнитного поля; $\mathbf{j}$ – вектор плотности постороннего тока, задаваемого внешними источниками и отличный от нуля только в ограниченной области, занятой проводниками.

При этом предполагается, что рассматриваемое пространство, в котором необходимо экранировать исходное магнитное поле с помощью системы активного экранирования (САЭ), свободно от токопроводящих и ферромагнитных сред и не содержит источников магнитного поля. Жилые дома и бытовые сооружения практически не экранируют магнитное поле промышленной частоты, в отличие от электрического поля, где такое снижение отмечается.

Тогда, рассматривая область вне проводников с током, можно принять, что плотность тока равна нулю ($\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0$) и, таким образом, поле потенциально:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= -\operatorname{grad} U_m, \\ H_x &= -\frac{\partial U_m}{\partial x}; \quad H_y = -\frac{\partial U_m}{\partial y}; \\ H_z &= -\frac{\partial U_m}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

где U_m – скалярный магнитный потенциал.

Часто для упрощения математической модели высоковольтных линий электропередачи провода фаз принимают в форме бесконечно длинных и тонких прямолинейных проводников, что позволяет использовать двухмерную модель магнитного поля, содержащую два пространственных компонента вдоль осей OX , OY и не зависящую от координаты OZ , вдоль которой расположены проводники ЛЭП.

Однако, в рассматриваемой задаче вертикальные участки управляемых обмоток системы активного экранирования создают существенные составляющие проекции вектора

напряженности магнитного поля по координате OZ , что обуславливает применение трехмерной модели магнитного поля. Такая модель, кроме того, позволяет также учесть составляющую вектора напряженности магнитного поля по координате OZ , создаваемую проводами ЛЭП за счет их провисания между опорами ЛЭП.

При расчете магнитного поля тока квазистатическое приближение системы уравнений Максвелла эквивалентно закону Био–Савара, который может быть записан в виде:

$$\mathbf{B}(P) = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi} \int_L \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}]}{R^3}, \quad (3)$$

где $\mathbf{B}(P)$ – индукция МП в точке наблюдения P ; $d\mathbf{l}$ – элемент контура L с током I_m ; $\mathbf{R}$ – вектор, направленный от элемента контура $d\mathbf{l}$ в точку наблюдения P .

Куб модуля вектора $\mathbf{R}$ равен:

$$\mathbf{R} = \sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z^2}, \quad \mathbf{R}^3 = (x_P^2 + y_P^2 + z^2)^{3/2}. \quad (4)$$

Рассмотрим подход к построению математической модели магнитного поля в заданном пространстве, основанный на представлении токопроводов ЛЭП, а также управляющих обмоток магнитных исполнительных органов в виде набора элементарных участков токопроводов. Такой подход позволяет рассчитывать магнитное поле токопроводов практически любой формы, отличной от идеальных прямых линий, прямоугольников, цепей и т.д., а также, в частности, учитывать провисание токопроводов ЛЭП между опорами.

Рассмотрим один из подходов построения такой математической модели магнитного поля на основе закона Био–Савара–Лапласа, создаваемого токопроводом с током I достаточно сложной конструкции.

Представим токопровод в виде элементарных отрезков достаточно малой длины. Обозначим C_i координаты середины отрезка. Определим вектор $\mathbf{B}$ индукции магнитного поля в точке P с координатами (x, y, z) , создаваемого этим элементарным отрезком, расположенным в точке C_i . Представим элементарный отрезок токопровода с учетом направления тока и расположение самого отрезка в ортогональной системе координат в виде ортов a_x, a_y, a_z .

Определим компоненты разложения век-

тора элементарного отрезка токопровода в ортогональной системе координат как разность координат конца и начала рассматриваемого отрезка в следующем виде:

$$(x_{i+1} - x_i), (y_{i+1} - y_i), (z_{i+1} - z_i).$$

Определим компоненты разложения вектора ΔL_i элементарного отрезка токопровода в ортогональной системе координат как разность координат конца и начала рассматриваемого отрезка в следующем виде:

$$\Delta L_i = (x_{i+1} - x_i) a_x + (y_{i+1} - y_i) a_y + (z_{i+1} - z_i) a_z.$$

Введем вектор R_i , начало которого находится в центре рассматриваемого элементарного отрезка токопровода, а конец находится в точке $P(x, y, z)$, в которой необходимо определить вектор индукции магнитного поля, создаваемого элементарным отрезком токопровода, в следующем виде

$$R_i = P - C_i = (x, y, z) - \dots - \left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}, \frac{y_{i+1} + y_i}{2}, \frac{z_{i+1} + z_i}{2} \right).$$

Тогда вектор $B(x, y, z)$ суммарной индукции магнитного поля в рассматриваемой точке $P(x, y, z)$, создаваемый n элементарными отрезками токопровода с током I , может быть определен на основании закона Био–Савара–Лапласа в следующем виде [6]

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i \times R_i}{|R_i|^3}, \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, а векторное произведение векторов $\Delta L_i \times R_i$ равно вектору со следующими компонентами

$$\Delta L_i \times R_i = (\Delta L_{iy} R_{iz} - \Delta L_{iz} R_{iy}), (\Delta L_{iz} R_{ix} - \Delta L_{ix} R_{iz}), (\Delta L_{ix} R_{iy} - \Delta L_{iy} R_{ix}).$$

Здесь введены обозначения ΔL_{ix} и R_{ix} и компонент разложения векторов ΔL_i и R_i и по оси OX и аналогично по осям OY и OZ . Куб модуля вектора $|R_i|^3$ определяется выражением

$$|R_i|^3 = \left(\sqrt{R_{ix}^2 + R_{iy}^2 + R_{iz}^2} \right)^3.$$

Рассмотрим решение геометрической прямой проблемы для проводов ЛЭП – построение математической модели исходного магнитного поля, генерируемого линией электропередачи. Положение проводов ЛЭП изначально известно, зададим токи в проводах ЛЭП в виде синусоидальных зависимостей мгновенных значений. Задаем амплитуды A_i и фазы φ_i токов промышленной частоты ω проводов ЛЭП. Зададим токи проводов в линиях электропередачи в комплексной форме

$$I_i(t) = A_i \exp j(\omega t + \varphi_i) \quad (6)$$

Тогда на основании полученного соотношения (5) может быть вычислена индукция $B_o(P, I_o(t), t)$ выходного магнитного поля в точке P_i , создаваемая токами $I_l(t)$ в токопроводах l ЛЭП в следующем виде

$$B_o(P, I_o(t), t) = \sum_{l=1}^L B_{ol}(P, I_l(t)). \quad (7)$$

Здесь введен вектор $I_o(t)$ токов ЛЭП, компонентами которого являются токи $I_l(t)$ в токопроводах l ЛЭП.

$$I_o(t) = \{I_l(t)\}.$$

Заметим, что при вычислении результирующего магнитного поля ЛЭП по формуле (7) для 3D моделирования необходимо учитывать реальное провисание проводов ЛЭП, а количество элементарных участков проводников ЛЭП на концах учитываемых участков проводов ЛЭП необходимо определять из требуемой точности вычисления индукции результирующего МП, генерируемого всеми проводами ЛЭП в рассматриваемой точке пространства экранирования.

Рассмотрим решение форвард проблемы для вычисления магнитного поля, генерируемого компенсационными обмотками в точках пространства экранирования. Зададим, пока неизвестные, координаты расположения компенсационных обмоток системы активного экранирования в виде вектора X_a исходных геометрических значений размеров компенсирующих обмоток активной защиты, а также

амплитуды A_{ai} и фазы φ_{ai} токов в компенсирующих обмотках [10]–[11]. Зададим токи в проводах компенсирующих обмоток в комплексной форме

$$I_{ai}(t) = A_{ai} \exp j(\omega t + \varphi_{wi}) \quad (8)$$

Тогда на основании (8) аналогично (7) может быть вычислена индукция $\mathbf{B}_y(P_i, \mathbf{I}_y(t), t)$ магнитного поля в точке P_i , создаваемая токами управляющих обмоток магнитных исполнительных органов в точке в момент времени t в следующем виде.

$$\mathbf{B}_y(P_i, \mathbf{I}_y(t), t) = \sum_{m=1}^M \mathbf{B}_{ym}(P_i, I_{ym}(t), t), \quad (9)$$

здесь введен вектор $\mathbf{I}_y(t)$ токов в управляющих обмотках, компонентами которого являются токи $I_l(t)$ в m обмотках.

$$\mathbf{I}_y(t) = \{I_{ym}(t)\}.$$

Заметим, что при вычислении результирующего магнитного поля, генерируемого всеми проводами компенсирующих обмоток, по формуле (9) для 3D моделирования необходимо учитывать не только реальные размеры горизонтальных частей компенсирующих обмоток, но также и реальную длину компенсирующих обмоток, т.к. именно вблизи концов горизонтальных участков компенсирующих обмоток наблюдается наибольшее изменение уровня индукции магнитного поля, генерируемого компенсационными обмотками.

Естественно, что при 3D моделировании в формуле (9) необходимо учитывать вертикальные части компенсирующих обмоток, т.к. именно эти вертикальные части генерируют основную долю индукции магнитного поля.

Тогда, на основании принципа суперпозиции, результирующий вектор $\mathbf{B}(P_i, \mathbf{I}_o(t), \mathbf{I}_y(t), t)$ индукции магнитного поля в точке P_i , создаваемой токами $\mathbf{I}_o(t)$ проводов ЛЭП и токами управляющих обмоток равен сумме векторов $\mathbf{B}_o(P_i, \mathbf{I}_o(t), t)$ и $\mathbf{B}_y(P_i, \mathbf{I}_y(t), t)$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(P_i, \mathbf{I}_o(t), \mathbf{I}_y(t), t) &= \mathbf{B}_o(P_i, \mathbf{I}_o(t), t) + \dots \\ &\dots + \mathbf{B}_y(P_i, \mathbf{I}_y(t), t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{B}_{Ra}(Q_i, \mathbf{X}_a, \delta, t) = \mathbf{B}_L(Q_i, \delta, t) + \mathbf{B}_a(Q_i, \mathbf{X}_a, t)$$

Рассмотрим решение форвард проблемы для многоконтурного пассивного экрана – построение математической модели магнитного поля, создаваемого этим многоконтурным пассивным экраном [6]. При этом мгновенные значения вектора магнитной индукции результирующего магнитного поля, генерируемого всеми токопроводами ЛЭП и всеми проводами компенсационных обмоток системы активного экранирования в любой точке пространства экранирования, считаются заданными, и вычисляется по формуле (10).

Зададим вектор $\mathbf{X}_p$ исходных значений геометрических размеров, толщины и материала контурного пассивного экрана. Затем для заданного вектора $\mathbf{B}_{Ra}(Q_i, \mathbf{X}_a, \delta, t)$, который учитывает результирующее МП, генерируемое ЛЭП и обмотками системы активного экранирования, значениям вектора геометрических размеров пассивного контурного экрана $\mathbf{X}_p$, рассчитывается магнитный поток $\Phi_l(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t)$ по следующей зависимости

$$\Phi_l(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t) = \int_S \mathbf{B}_{Ra}(\mathbf{X}_a, \delta, t) dS \quad (11)$$

Ток $I_{Pl}(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t)$ в комплексной форме, наводимый в пассивном контуре экрана, определяется по закону Ома в интегральной форме и закону Фарадея [6]:

$$I_{Pl}(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t) = -j\omega \Phi(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t) / \dots \dots / (R_l(\mathbf{X}_p) + j\omega L_l(\mathbf{X}_p)) \quad (12)$$

где $R_l(\mathbf{X}_p)$ – активное сопротивление пассивного контурного экрана, и $L_l(\mathbf{X}_p)$ – коэффициент самоиндукции экрана.

Тогда, для рассчитанных токов $I_{Pl}(\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t)$ в пассивном контурном экране [36]–[38] и их геометрических размеров, заданных вектором $\mathbf{X}_p$, на основе закона Био-Савара, вектор $\mathbf{B}_R(Q_i, \mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t)$ результирующего магнитного поля рассчитывается как сумма векторов $\mathbf{B}_L(Q_i, \delta, t)$, для МП генерируемого воздушными линиями электропередачи, и вектор $\mathbf{B}_a(Q_i, \mathbf{X}_a, t)$, создаваемый всеми проводами компенсационных обмоток активного экрана, а вектор $\mathbf{B}_p(Q_i, \mathbf{X}_a, \mathbf{X}_p, \delta, t)$, для МП создаваемого всеми петлями пассив-

ного экрана в точке Q_i , аналогично (9).

Тогда, вектор индукции результирующего магнитного поля, генерируемого всеми проводами ЛЭП, всеми компенсационными обмотками, и всеми контурами многоконтурного пассивного экрана, вычисляются в виде следующей суммы

$$\begin{aligned} B_R(Q_i, X_a, X_p, \delta, t) = & B_L(Q_i, \delta, t) + \dots \\ & \dots + B_a(Q_i, X_a, t) + B_p(Q_i, X_a, X_p, \delta, t) \end{aligned} \quad (13)$$

Рассмотрим *решение форвард проблемы для сплошного незамкнутого пассивного экрана*. При этом мгновенные значения вектора магнитной индукции результирующего магнитного поля, генерируемого ЛЭП и только обмотками системы активного экранирования в любой точке пространства экранирования считается заданным и вычисляется по формуле (10).

Рассмотрим вычисление магнитного поля в среде, содержащей токопроводы ЛЭП и компенсационных обмоток и сплошные электромагнитные экраны пассивного экранирования. При этом будем полагать, что среда, в которой находятся токопроводы и электромагнитный экран, не содержит ферромагнитных и проводящих элементов и поэтому относительную магнитную проницаемость внешней среды положим равной 1, а удельную проводимость 0.

Будем рассматривать установившиеся процессы, когда токи в проводах описываются синусоидальными зависимостями. Следовательно, распределение электромагнитного поля в системе можно описывать в терминах комплексных амплитуд. Вычисление магнитной индукции решалась в квазистационарном приближении, так как частота электрических токов, протекающих по токопроводах, равна промышленной. Диаметр токопроводов ЛЭП и компенсирующих обмоток намного меньше расстояния между ними, то можно рассматривать их как токовые нити. Поэтому распределение плотности тока, который по ним протекает, будем представлять в виде суммы дельта-функций. Таким образом, сформулированы и обоснованы допущения, которые приняты при построении физически корректной модели процесса электромагнитного экранирования магнитного поля протяженных токопроводов.

С учетом принятых допущений, для нахождения распределения МП воспользуем-

ся законом полного тока в интегральной форме, записанном в квазистационарном приближении в терминах комплексных амплитуд [6]:

$$\oint_l \dot{H} dl = \int_S \gamma \dot{E} ds + \int_S \dot{j}^{ext} ds \quad (14)$$

где $\dot{H}$, $\dot{E}$ – комплексные амплитуды векторов, соответственно, напряженности магнитного и электрического полей; $\dot{j}^{ext}$ – комплексная амплитуда вектора плотности тока токопроводов; γ – удельная электропроводность; l – контур, охватывающий поверхность интегрирования S .

Чтобы описать электромагнитный экран, необходимо задать его расположение относительно токопроводов, геометрические размеры, магнитную проницаемость μ и удельную электропроводность γ . Система токов токопроводов описывается частотой ω и вектором распределением плотности тока $\dot{j}^{ext}$.

Рассмотрим численные методы расчета магнитного поля при использовании электромагнитных экранов. Наибольшее распространение для численного исследования электромагнитного поля, и в частности квазистационарного магнитного поля, получили метод конечных разностей, или метод сеток, вариационные методы, метод конечных элементов и метод интегральных уравнений [13]–[16].

Численная процедура вычисления магнитного поля сводится к составлению и решению системы линейных уравнений. Способ составления этой системы, вид и размерность ее матрицы коэффициентов для перечисленных численных методов различны.

Метод конечных разностей основан на численном решении дифференциального уравнения, например уравнения в простейшем случае, путем замены входящих в него производных неизвестной функции выражениями, содержащими конечные разности. В настоящее время, для численного решения наиболее широкое распространение получил метод конечных элементов. При этом расчетная область разбивается на множество многоугольников, имеющих произвольный вид: в общем случае криволинейных, в простейшем – ячейки треугольные. Значения функции в узлах сетки являются искомыми, а в остальных точках вводится аппроксимация некоторой функцией [16].

На первом этапе вводятся входные параметры системы: геометрические размеры электромагнитного экрана, его физические характеристики μ и γ , величина и частота токов в токопроводах. Далее задается область, в которой необходимо вычислять распределение МП.

Такая математическая модель позволяет вычислять распределение магнитной индукции токопроводов при использовании тонкостенных электромагнитных экранов, состоящих из нескольких плоских или П-образных элементов, и определять их экранирующие свойства.

II. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Рассмотрим *геометрическую обратную проблему магнитостатики* для задачи проектирования комбинированного электромагнитного экрана, которая заключается в вычислении пространственного расположения и параметров источников магнитного поля для генерирования компенсирующего магнитного поля, направленного противоположно исходному магнитному полю. При этом исходное магнитное поле генерируется проводками ЛЭП, а компенсирующее магнитное поле одновременно генерируется компенсационными обмотками системы активного экранирования и пассивным экраном [11].

Введем вектор X искомым параметров задачи проектирования комбинированного экрана, компонентами которого являются вектор X_a значений геометрических размеров компенсационных обмоток, а также токи A_{wi} и фазы φ_{wi} в компенсационных обмотках: а также вектор X_p геометрических размеров, толщины и материала пассивного контурного экрана [17]–[20].

Тогда для заданных начальных значений вектора X искомым параметров и вектора δ параметров неопределенности задачи проектирования комбинированного экрана рассчитывается значение $B_R(X, \delta, P_i)$ эффективной величины индукции $B_R(Q_i, X_a, X_p, \delta, t)$ результирующего магнитного поля в точке Q_i экранирующего пространства, исходя из конечно-го система элементных расчетов *COMSOL Multiphysics* [13]–[16].

Тогда задача проектирования пассивного экрана сводится к вычислению решения векторной игры [21]–[24]

$$B_R(X, \delta) = \langle B_R(X, \delta, P_i) \rangle \quad (15)$$

Компонентами вектора $B_R(X, \delta, P_i)$ выигрыша игры являются эффективные значения индукции результирующего магнитного поля во всех рассматриваемых точках Q_i экранирующего пространства. В данной векторной игре необходимо найти минимум вектора игрового выигрыша (15) для вектора X , но максимум того же вектора для вектора δ .

При этом, естественно, необходимо учитывать ограничения [26]–[27] на вектор искомым параметров комбинированного экрана X , в виде векторного неравенства и, возможно, векторного равенства.

Заметим, что компоненты векторной игры (15) являются нелинейными функциями вектора искомым параметров и рассчитываются на основе системы конечных элементов *COMSOL Multiphysics* [29].

Рассмотрим *метод решения сформулированной задачи*. Для корректного решения задачи многокритериальной оптимизации, помимо векторного критерия оптимизации и ограничений, необходимо также иметь информацию о бинарных отношениях предпочтения локальных решений друг относительно друга [30]. В основе этого формального подхода лежит построение областей Парето-оптимальных решений. Такой подход позволяет существенно сузить круг возможных оптимальных решений исходной задачи многокритериальной оптимизации, и снизить трудоемкость вычислений, для лица, принимающего решения по выбору единственного варианта оптимального решения.

Задача поиска локального минимума в одной точке рассматриваемого пространства, как правило, является многоэкстремальной, содержащей локальные минимумы и максимумы, поэтому для ее решения целесообразно использовать алгоритмы стохастической многоагентной оптимизации. Рассмотрим алгоритм поиска множества Парето-оптимальных решений задач многокритериального нелинейного программирования на основе стохастической многоагентной оптимизации. На сегодняшний день разработано большое количество алгоритмов оптимизации роя частиц – алгоритмов PSO, основанных на идее коллективного разума «роя частиц», таких как алгоритмы gbest PSO и lbest PSO [27].

Применение стохастических методов многоагентной оптимизации для решения много-

критериальных задач сегодня вызывает определенные трудности, но это направление продолжает интенсивно развиваться. Для решения исходной многокритериальной задачи нелинейного программирования с ограничениями, построим алгоритм стохастической многоагентной оптимизации на основе набора «роев частиц», количество которых равно числу компонент вектора критериев оптимизации [26].

В алгоритме оптимизации для «роя частиц», скорости «частиц» изменяются по линейным законам. С целью увеличения скорости поиска глобального решения, в последнее время получили распространение специальные нелинейные алгоритмы стохастической многоагентной оптимизации, в которых движение «роя частиц» описывается следующими выражениями

$$v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) * \dots * [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) * \dots * [y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \quad (16)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (17)$$

где $x_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ – положение и скорость «частицы» i , «роя» j .

III. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментальных исследований по определению эффективности экранирования магнитного поля, генерируемого воздушными ЛЭП с помощью комбинированных экранов разработаны лабораторные макеты ЛЭП.

На рис. 1 показан внешний вид макета двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка».



Рис. 1. Макет двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка». ¹

На рис. 2 показан внешний вид макета одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов.



Рис. 2. Макет одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов. ²

Провода ЛЭП питаются от индукционного регулятора.

На рис. 3 показан внешний вид двух компенсационных обмоток системы активного экранирования.



Рис. 3. Две компенсационные обмотки системы активного экранирования. ³

Для питания компенсационных обмоток используются усилители мощности, внешний вид которых показан на рис. 4.



Рис. 4. Усилители мощности для питания компенсационных обмоток, с контрольно-измерительной аппаратурой. ⁴

На рис.5 показан внешний вид системы управления САЭ.



Рис. 5. Система управления САЭ.⁵

Для измерения результирующего магнитного поля внутри пространства экранирования используется трехкоординатный магнитометр типа “TES 1394S triaxial ELF magnetic field meter”, внешний вид которого показан на рис. 6.



Рис. 6. Трехкоординатный магнитометр.⁶

Магнитометр измеряет компоненты вектора индукции магнитного поля с помощью трех ортогональных измерительных катушек, показанных на рис. 7.

Оси этих трех измерительных катушек ортогональны друг другу и образуют ортогональную систему координат для измерения магнитного поля.

Естественно, что в ходе измерения оси этих измерительных катушек необходимо устанавливать параллельно осям исходного магнитного поля.

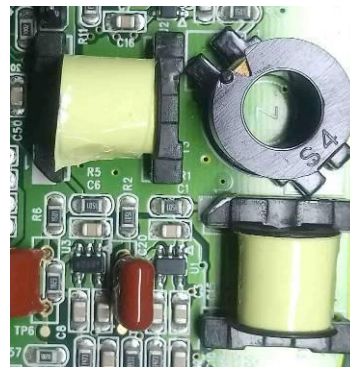


Рис. 7. Три измерительные катушки магнитометра (фрагмент платы прибора).⁷

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭКРАНОВ СО СПЛОШНЫМИ ПАССИВНЫМИ ЭКРАНАМИ

Рассмотрим экспериментальные исследования комбинированного экрана со сплошным пассивным П-образным экраном, у которого боковые поверхности пассивного экрана открыты. На рис. 8 показана лабораторная установка такого типа экрана.



Рис. 8. Сплошной пассивный П-образный экран.⁸

Внутри пассивного П-образного экрана установлены два сенсора магнитного поля, для реализации двух контуров замкнутого управления двумя компенсационными обмотками системы активного экранирования с обратными связями по результирующему магнитному полю. Оси этих сенсоров в процессе наладки контуров регулирования устанавливаются таким образом, чтобы измерить наибольшее значение индукции магнитного поля, генерируемой компенсационной обмоткой соответствующего канала. Такая установка осей сенсоров магнитного поля позволяет максимально уменьшить влияние каналов друг на друга при их совместной работе.

Внутри пассивного экрана также установлены еще два сенсора магнитного поля, оси которых параллельны координатным осям. Эти два сенсора используются в системе измерения пространственно-временной характеристики результирующего магнитного поля. Данная измерительная система используется для наладки контуров регулирования системы активного экранирования комбинированного экранирования магнитного поля.

Рассмотрим эффективность экранирования магнитного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка». В результате решения геометрической обратной задачи квазимагнитостатики, были вычислены координаты расположения двух компенсационных обмоток системы активного экранирования, а также токи и фазы в этих обмотках.

На рис. 9 показано распределение индукции исходного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка».

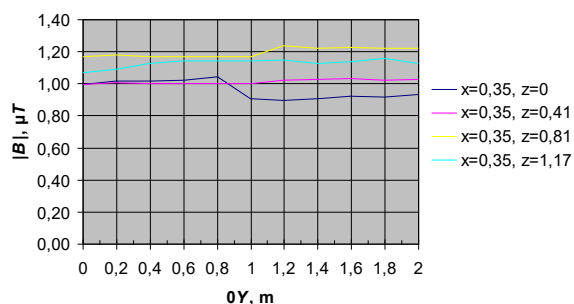


Рис. 9. Распределение индукции исходного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка». ⁹

На рис. 10 показано распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана.

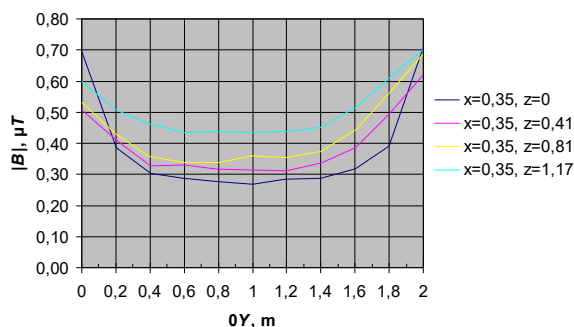


Рис. 10. Распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана. ¹⁰

Эффективность составляет 2÷3 единицы. Однако, по краям пассивного экрана

эффективность экранирования исходного магнитного поля существенно уменьшается.

Рассмотрим эффективность экранирования магнитного поля, генерируемого одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов. В результате решения геометрической обратной задачи квазимагнитостатики были вычислены координаты расположения двух компенсационных обмоток системы активного экранирования, а также токи и фазы в этих обмотках.

На рис. 11 показано распределение индукции исходного поля, генерируемого одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов.

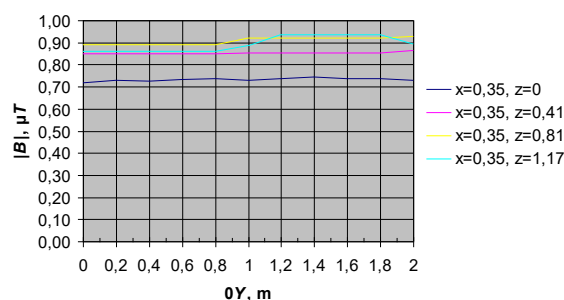


Рис. 11. Распределение индукции исходного поля, генерируемого одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов. ¹¹

На рис. 12 показано распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана.

Эффективность составляет 2÷3 единицы. Однако, по краям пассивного экрана эффективность экранирования исходного магнитного поля существенно уменьшается.

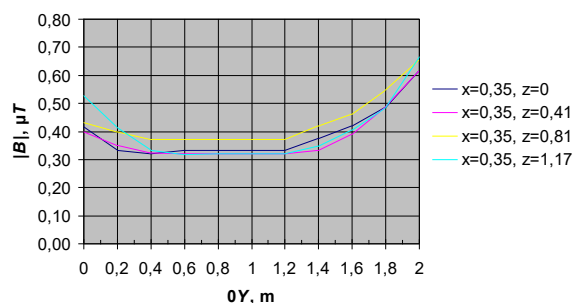


Рис. 12. Распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана. ¹²

Рассмотрим экспериментальные исследования комбинированного экрана, у которого боковые поверхности пассивного экрана закрыты алюминиевыми листами. На рис. 13 показана лабораторная установка такого экра-

на.



Рис. 13. Сплошной пассивный экран, у которого боковые поверхности пассивного экрана закрыты алюминиевыми листами.¹³

Рассмотрим эффективность экранирования магнитного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка». В результате решения геометрической обратной задачи квазимагнитостатики были вычислены координаты расположения двух компенсационных обмоток системы активного экранирования, а также токи и фазы в этих обмотках.

Естественно, что распределение индукции исходного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка» для этого экрана точно такое же, как и для сплошного П-образного экрана, которое показано на рис. 9.

На рис. 14 показано распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана.

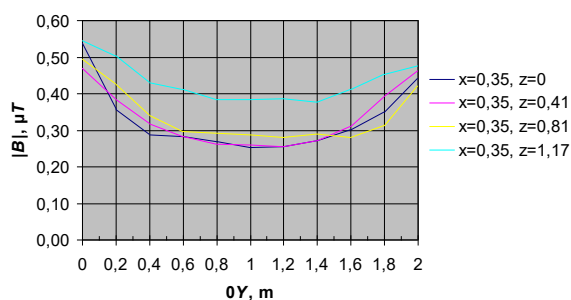


Рис. 14. Распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана.¹⁴

Эффективность экранирования по центру у этого экрана такая же, как и у экрана без боковых поверхностей и составляет $2 \div 3$ единицы. Однако по краям пассивного экрана эффективность экранирования исходного

магнитного поля уменьшается значительно меньше, чем у П-образного экрана, показанных на рис. 10. Данное повышение эффективности по краям экрана обусловлено наличием боковых экранирующих поверхностей.

Рассмотрим эффективность экранирования магнитного поля, генерируемого одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов.

В результате решения геометрической обратной задачи квазимагнитостатики были вычислены координаты расположения двух компенсационных обмоток системы активного экранирования, а также токи и фазы в этих обмотках.

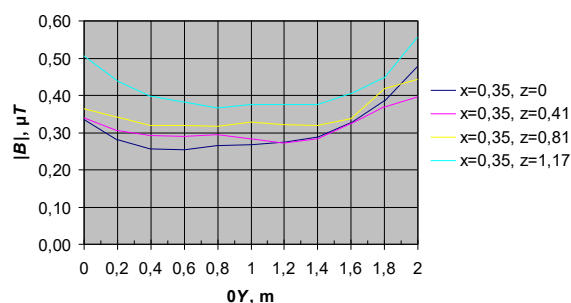


Рис. 15. Распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана.¹⁵

Естественно, что распределение индукции исходного поля, генерируемого одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов для этого экрана точно такое же, как и для сплошного П-образного экрана, которое показано на рис. 11.

На рис. 15 показано распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана.

Эффективность экранирования по центру у этого экрана такая же, как и у экрана без боковых поверхностей и составляет $2 \div 3$ единицы.

Однако по краям пассивного экрана эффективность экранирования исходного магнитного поля уменьшается значительно меньше, чем у экрана без боковых поверхностей, показанных на рис. 12.

Такое повышение эффективности по краям экрана обусловлено наличием боковых экранирующих поверхностей.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭКРАНОВ С МНОГОКОНТУРНЫМИ ПАССИВНЫМИ ЭКРАНАМИ

Рассмотрим экспериментальные исследования эффективности экранирования магнитного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП с подвесом проводов типа «Бочка» с помощью многоконтурного экрана. В результате решения геометрической обратной задачи квазимагнитостатики были вычислены 11 контуров многоконтурного пассивного экрана. Естественно, что в ходе решения геометрической обратной задачи были вычислены координаты расположения двух компенсационных обмоток системы активного экранирования, а также токи и фазы в этих обмотках. На рис. 16 показан многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки, состоящий из 11 экранирующих контуров.

Естественно, что распределение индукции исходного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка» для этого экрана точно такое же, как и для сплошного П-образного экрана, которое показано на рис. 9.

На рис. 17 показано распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана с многоконтурным пассивным экраном.

Эффективность составляет $4 \div 5$ единицы. Однако по краям пассивного экрана эффективность экранирования исходного магнитного поля существенно уменьшается.

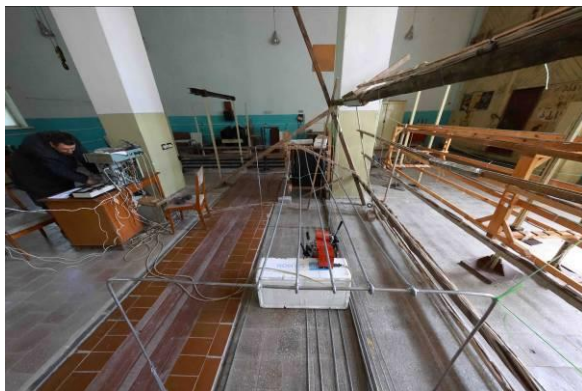


Рис. 16. Многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки, состоящий из 11 экранирующих контуров.¹⁶

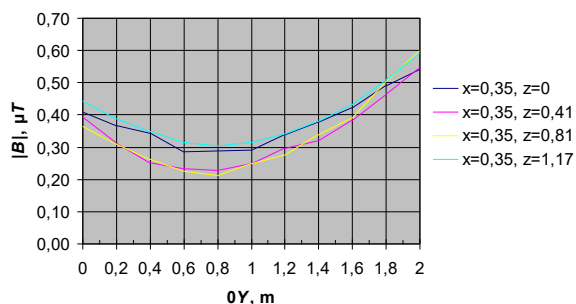


Рис. 17. Распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана с многоконтурным пассивным экраном.¹⁷

Рассмотрим экспериментальные исследования эффективности экранирования магнитного поля, генерируемого одноцепной ЛЭП с треугольным расположением проводов с помощью комбинированного экрана с многоконтурным пассивным экраном. В результате решения геометрической обратной задачи квазимагнитостатики были вычислены 16 контуров многоконтурного пассивного экрана. В ходе решения геометрической обратной задачи были вычислены координаты расположения двух компенсационных обмоток системы активного экранирования, а также токи и фазы в этих обмотках. На рис. 18 показан многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки, состоящий из 16 экранирующих контуров.

Естественно, что распределение индукции исходного поля, генерируемого одноцепной ЛЭП с триангулярным расположением проводов для этого экрана точно такое же, как и для сплошного П-образного экрана, которое показано на рис. 11. На рис. 19 показано распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана с многоконтурным пассивным экраном.



Рис.18. Многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки, состоящий из 16 экранирующих контуров.¹⁸

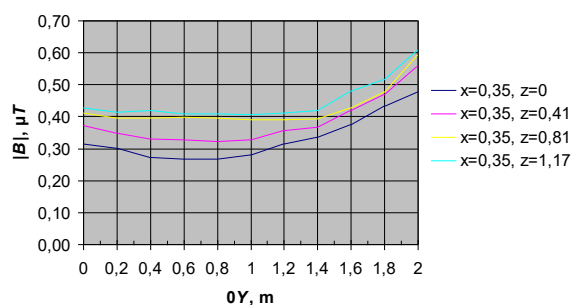


Рис.19. Распределение индукции результирующего поля при работе комбинированного экрана с многоконтурным пассивным экраном.¹⁹

Эффективность составляет 2÷3 единицы. 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 экспериментальных исследований эффективности комбинированного экранирования, включающего активное и пассивное экранирование с помощью сплошного и многоконтурного экранов, магнитного поля, генерируемого одноцепными ЛЭП с треугольным расположением проводов и двухцепными ЛЭП с расположением проводов типа «Бочка».

2. Задача проектирования комбинированных экранов сведена к решению векторных игр, у которых вектор стоимости игры вычисляется с помощью программных средств пакета COMSOL Multiphysics. Решение этих векторных игр вычисляются на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтений решений локальных критериев.

3. В ходе проектирования комбинированных экранов для снижения уровня МП, генерируемого воздушными ЛЭП вычислены координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также токи и фазы в этих обмотках активного экрана, а также параметры П-образных сплошных и многоконтурных пассивных экранов.

4. Основные преимущества применения комбинированных электромагнитных экранов, состоящих из активной и пассивной сплошной, либо многоконтурной, частей, заключается в снижении уровня индукции ис-

ходного МП в значительно большей области пространства экранирования, по сравнению с применением только активного экрана.

5. Практическое применение комбинированных электромагнитных экранов позволяет снизить уровень магнитного поля, генерируемого воздушными ЛЭП внутри жилых домов до безопасного уровня для населения, проживающего с ЛЭП размещенными в непосредственной близости от зоны жилой застройки, или непосредственно в таковой.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Model of a double-circuit power transmission line with a "Barrel" type wire arrangement.

²Fig. 2. Model of a single-circuit power transmission line with a triangular arrangement of wires.

³Fig. 3. Two compensation windings of the active shielding system.

⁴Fig. 4. Power amplifiers for power supply of compensation windings, with control and measuring equipment.

⁵Fig. 5. Control system of the active shielding system (SAS).

⁶Fig. 6. Three-coordinate magnetometer.

⁷Fig. 7. Three measuring coils of the magnetometer (fragment of the device board).

⁸Fig. 8. Solid passive screen.

⁹Fig. 9. Distribution of the induction of the initial field generated by a double-circuit power transmission line with a "Barrel" type wire arrangement.

¹⁰Fig. 10. Distribution of the resulting field induction during operation of the combined screen.

¹¹Fig. 11. Distribution of the induction of the initial field generated by a single-circuit power transmission line with a triangular arrangement of wires.

¹²Fig. 12. Distribution of the resulting field induction during operation of the combined screen.

¹³Fig. 13. A continuous passive screen in which the side surfaces of the passive screen are covered with aluminum sheets.

¹⁴Fig. 14. Distribution of the resulting field induction during operation of the combined screen.

¹⁵Fig. 15. Distribution of the resulting field induction during operation of the combined screen.

¹⁶Fig. 16. Multi-circuit passive screen of the experimental setup, consisting of 11 screening circuits.

¹⁷Fig. 17. Distribution of the resulting field induction during operation of a combined screen with a multi-circuit passive screen.

¹⁸Fig. 18. Multi-circuit passive screen of the experimental setup, consisting of 16 screening circuits.

¹⁹Fig. 19. Distribution of the resulting field induction during operation of a combined screen with a multi-circuit passive screen.

ЛІТЕРАТУРА (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 12.03.2025).*
- [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 12.03.2025).*
- [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/ijeei.v10i2.3572 (accessed 12.03.2025).*
- [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 12.03.2025).*
- [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 12.03.2025).*
- [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 (accessed 12.03.2025).*
- [20] *Havrylenko O., Dergachov K., Pavlikov V., Zhy-*

- la 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 12.03.2025).
- [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 12.03.2025).
- [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 12.03.2025).
- [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 12.03.2025).
- [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.2022202.24> 6878 (accessed 12.03.2025).
- [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 12.03.2025).
- [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 12.03.2025).

Сведения об авторе.



Бовдуй Игорь Валентинович

Институт энергетических машин и систем им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, с.н.с., 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: ibovdui@gmail.com