

Electromagnetic Shielding of Two-Circuit Overhead Power Lines Magnetic Field

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdai I.V., Voloshko O.V., Chunikhin K.V.,
Dobrodeyev P.N.

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

Abstract. The purpose of the work is to design an electromagnetic shield to reduce the level of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines to increase the shielding efficiency of the initial magnetic field in residential buildings to the level of sanitary standards and reduce the system's sensitivity to changes in system parameters. To achieve this goal, the structure of the electromagnetic shield is determined, which consists of a single-circuit active and multi-circuit passive parts and is characterized by an increased efficiency of reducing the magnetic field of industrial frequency. The design of an electromagnetic shield is reduced to solving a minimax vector optimization problem, in which the vector objective function is calculated based on solutions of Maxwell's equations in a quasi-stationary approximation using the COMSOL Multiphysics software package. The solution of the minimax vector optimization problem is calculated on the basis of optimization algorithms by a multiswarm of particles from Pareto-optimal solutions. The most important results are theoretical and experimental studies of the effectiveness of the designed electromagnetic shield of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines. The significance of the results obtained lies in the fact that practical recommendations are given on the reasonable choice of the spatial arrangement of the contours of the multi-circuit passive screen and the shielding winding of the robust system of electromagnetic shielding of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines. The possibility of reducing the induction of the initial magnetic field to the level of sanitary standards has been shown as well.

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

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.02>

UDC: 621.3.013

Ecranarea electromagnetică a câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene cu circuit dublu

Kuznețov B.I., Nikitina T.B., Bovdai I.V., Voloșko E.V., Ciunihin K.V., Dobrodeev P.N.

Institutul de Probleme de Inginerie Mecanică numit după A.N. Podgorny Academia Națională de Științe din
Ucraina, Harkiv, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a proiecta un ecran electromagnetic pentru a reduce nivelul câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu dublu circuit pentru a crește eficiența de ecranare a câmpului magnetic inițial din clădirile rezidențiale la nivelul standardelor sanitare și pentru a reduce sensibilitatea sistemului la modificările parametrilor sistemului. Pentru a atinge acest scop, se determină structura scutului electromagnetic, care constă dintr-un singur circuit activ și părți pasive cu mai multe circuite și se caracterizează printr-o eficiență crescută a reducerii câmpului magnetic al frecvenței industriale. Proiectarea unui scut electromagnetic se reduce la rezolvarea unei probleme de optimizare vectorială minimax, în care funcția obiectiv vectorială este calculată pe baza soluțiilor ecuațiilor lui Maxwell într-o aproximare cvasi-staționară folosind pachetul software COMSOL Multiphysics. Soluția problemei de optimizare vectorială minimax este calculată pe baza algoritmilor de optimizare printr-un multiroi de particule din soluții Pareto-optime. Cele mai importante rezultate sunt studiile teoretice și experimentale ale eficienței scutului electromagnetic proiectat al câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu dublu circuit. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că se dau recomandări practice privind alegerea rezonabilă a dispunerii spațiale a conturilor ecranului pasiv multicircuit și înfășurarea de ecranare a sistemului robust de ecranare electromagnetică a câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu circuit dublu. S-a demonstrat și posibilitatea reducerii inducției câmpului magnetic inițial la nivelul standardelor sanitare.

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

Электромагнитное экранирование магнитного поля двухцепных воздушных линий электропередачи

Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко Е.В., Чунихин К.В., Добродеев П.Н.
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного национальной академии наук Украины
Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является проектирование электромагнитного 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 электромагнитного экрана, состоящего из одноконтурной активной и многоконтурной пассивной части. Разработанный электромагнитный экран характеризуется повышенной эффективностью снижения магнитного поля промышленной частоты. Проектирование электромагнитного 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 электромагнитного экрана вычислены координаты пространственного расположения 11 контуров пассивного экрана и координаты компенсационной обмотки, а также величина тока и его фазы в обмотке активного экрана. Наиболее важными результатами являются теоретические и экспериментальные исследования эффективности спроектированного электромагнитного экрана магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными линиями электропередачи. Значимость полученных результатов состоит в том, что приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения контуров многоконтурного пассивного экрана и экранирующей обмотки робастной системы электромагнитного 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, электромагнитное экранирование, теоретические и экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

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

Причем, в связи с постоянным ростом потребления электрической энергии, рядом с существующей ЛЭП часто строятся новые двухцепные ЛЭП с напряжением 330 кВ, как это показано на рис. 2.

Поэтому в современных городах двухцепные ЛЭП являются основным источником техногенного электромагнитного поля промышленной частоты. Воздействие электромагнитного поля промышленной частоты приводит к изменениям в гематологических параметрах крови, иммунном статусе человека, влияет на репродуктивную, центральную и нервно-сосудистую системы, биоэлектрическую деятельность головного мозга, а также может вызвать генетические мутации в организме человека и обладает канцерогенными свойствами [1]–[4].

Однако, основной причиной для беспокойства является вероятность того, что

непрерывное постоянное воздействие неионизирующих излучений низкого уровня может привести к долгосрочным последствиям, таким как раковые или дегенеративные заболевания иммунной и нервной систем. Оценкой подобных рисков длительного воздействия электромагнитного поля промышленной частоты на организм человека занимаются институты World Health Organization (WHO) Всемирной Организации Здравья [1] и IARC (the International Agency for Research on Cancer) (Международное агентство по изучению рака) [2].

На основании проведенных исследований, в развитых странах мира разработаны жесткие государственные санитарные нормы по допустимым уровням электромагнитного поля промышленной частоты в среде длительного пребывания людей [5]–[6].

Для выполнения этих санитарных норм по допустимым уровням электромагнитного поля промышленной частоты в последнее время в развитых странах мира все больше внимания уделяется разработке методов и средств защиты населения от электромагнитного загрязнения [7]–[8], интенсивность которого из года в год постоянно растет. Для экранирования магнитного поля промышленной частоты

ты (МП) широко используются пассивные экраны, которые можно разделить на электромагнитные, контурные и магнитоэлектронные [7]–[9]. По расположению относительно ЛЭП или зоны экранирования, по ориентации экранов относительно земли, по количеству элементов экрана пассивные экраны можно классифицировать как экраны источника магнитного поля либо экраны области экранирования [9].

Однако, пассивные экраны, как правило, обладают малой эффективностью экранирования и с их помощью невозможно обеспечить санитарные нормы по уровню МП. Поэтому в последнее время в промышленно развитых странах широкое распространение получили системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты с помощью компенсирующих обмоток [7]–[8]. Количество и пространственное расположение компенсирующих обмоток системы активного экранирования в значительной степени определяется пространственно-временной характеристикой исходного МП, генерируемого воздушными ЛЭП в зоне экранирования.

Наиболее распространенным пространственным расположением проводов в двухцепных ЛЭП является форма «Бочка» и реже используются формы «Ёлка» или «Перевернутая ёлка». В зарубежной практике, в двухцепных ЛЭП чаще всего используются вертикальное расположение проводов. Все эти двухцепные ЛЭП генерируют МП, пространственно-временная характеристика которого представляет вытянутый эллипс. Более того, группа двухцепных ЛЭП генерируют МП, пространственно-временная характеристика которого также представляет вытянутый эллипс.

Для активного экранирования магнитного поля с такой пространственно-временной характеристикой достаточно применения одноконтурной системы активного экранирования (САЭ) с одной компенсирующей обмоткой. Такие одноконтурные системы активного экранирования получили наибольшее распространение в зарубежной практике. Однако, при необходимости экранирования МП, генерируемого двухцепными ЛЭП в больших пространствах, одной обмотки может оказаться недостаточно. Для выполнения санитарных норм по уровню МП во всем объеме экранирования, к существующей одноконтурной системе активного экранирования с

одной компенсирующей обмоткой экономически наиболее целесообразным является добавить многоконтурный экран пассивного экранирования, и система электромагнитного экранирования преобразуется в гибридную систему активно-пассивного экранирования [9].



Рис.1. Жилой дом, расположенный вблизи двухцепной ЛЭП. ¹



Рис.2. Жилой дом, расположенный вблизи двух двухцепных ЛЭП. ²

Если расстояние от точки наблюдения P до элемента тока удовлетворяет условию $R_0 > 2L_0$, где L_0 – линейные размеры элемента тока, напряженность магнитного поля $\vec{H}(P)$ с достаточной для инженерной оценки точностью 10 % может быть определена дипольной составляющей магнитного поля [9]

$$\vec{H}_\delta(P, t) = -\nabla \frac{(\vec{M}_\delta(t), \vec{R}_0)}{4\pi R_0^3}, \quad (2)$$

где $\vec{M}_\delta(t)$ – магнитный момент элемента тока.

Поскольку магнитное поле линии электропередачи, как правило, нормируется на значительных расстояниях от ее проводов [5], значение $\vec{M}_s(t)$ для контура с током $\vec{i}(t)$ и площадью \vec{S} равно [9]

$$\vec{M}_s(t) = \frac{\vec{i}(t)}{2} \oint \vec{R}_0 \times d\vec{l} = \vec{i}(t) \cdot \vec{S}. \quad (3)$$

При построении математической модели магнитного поля воздушных линий электропередачи влияние высоковольтных опор на распределение магнитного поля обычно не учитывается. Однако, если жилой дом расположен вблизи опоры, то влияние опоры на распределение индукции магнитного поля необходимо учитывать. В работах [7]–[8] показано, что уровень магнитного поля вблизи опоры ЛЭП может отличаться более чем на 20 % от распределения магнитного поля вдали от опоры.

В большинстве работ, посвященных расчету электромагнитного поля воздушных линий электропередачи, провисание проводов на распределение поля не учитывается. Считается, что провода являются бесконечными, прямолинейными и параллельными поверхностями земли [9]–[10]. Преимущество такого подхода заключается в возможности рассмотрения задачи расчета магнитного поля в двумерной постановке.

В ряде работ при расчете магнитного поля воздушных линий электропередачи провисание проводов учитывается [7]–[8]. В этом случае задача расчета магнитного поля становится трехмерной. Пренебрежение эффектом провисания проводов при расчете магнитного поля воздушной ЛЭП может приводить к ошибкам до 45 % [7]–[8].

В зависимости от предположений, принятых при построении модели линии электропередачи, расчет магнитного поля может производиться аналитическими, полуаналитическими или численными методами. В частности, при моделировании магнитного поля воздушных ЛЭП с учетом влияния близкорасположенных опор ЛЭП необходимо использовать численные методы, в частности, с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, в основе работы которого лежат многочисленные конечно разностные методы.

К полуаналитическому методу расчета магнитного поля воздушных линий электропередачи можно отнести представление маг-

нитного поля линии электропередачи в виде системы магнитных диполей и вычисление результирующего магнитного поля в виде суперпозиции полей, создаваемого каждым из диполей.

Для расчета магнитного поля воздушных линий электропередачи наиболее широко используется аналитический метод, основывающийся на законе Био-Савара [7]–[9]. Мгновенное значение вектора элементарной индукции $d\vec{B}(Q_i, t)$ магнитного поля в рассматриваемой точке Q_i момент времени t , рассчитанное на основе закона Био-Савара [9]

$$d\vec{B}(Q_i, t) = \frac{\mu_0 I(t)}{4\pi} \frac{d\vec{L}_i \times \vec{R}_i}{|\vec{R}_i|^3} \quad (4)$$

где \vec{R}_i – вектор из общего поля элемента дифференциального тока в точке Q_i , $d\vec{L}_i$ – вектор элементарной длины элемента тока, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. Знак \times обозначает векторное произведение векторов $d\vec{L}_i$ и \vec{R}_i .

Тогда вектор полного магнитного поля равен:

$$\vec{B}_i(Q_i, t) = \frac{\mu\mu_0 \vec{i}(t)}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{R}_i}{R^3}. \quad (5)$$

Эта формула широко используется для расчета магнитного поля воздушных линий электропередачи. При построении модели магнитного поля воздушной линии электропередачи на основе аналитического метода традиционно для упрощения производят следующие предположения: провода считаются прямолинейными и бесконечно длинными, параллельными друг другу и земле; влияние опор на распределение магнитного поля линии электропередачи не учитывается. Тогда в силу принятых предположений данная модель позволяет решать задачу расчета магнитного поля линий электропередачи в двумерной постановке.

Токи в проводах линии электропередачи изменяется по гармоническому закону, поэтому все зависимые от времени параметры магнитного поля также изменяются по гармоническому закону. Следовательно, распределение магнитного поля линии электропередачи можно описывать в терминах комплекс-

ных амплитуд. Рассмотрим трехфазную двухпроводную линию электропередачи. Зададим комплексные амплитуды токов и фаз, протекающие в фазных проводах.

В работах [7]–[10] параметры токов ЛЭП (9) считаются известными и не меняются со временем. Однако токи ЛЭП изменяются в течение суток, недель и времен года. Поэтому, в отличие от работ [7]–[10], введем в задаче проектирования гибридной активно-пассивной системы экранирования вектор параметров исходных неопределенностей $\vec{\delta}$. Компонентами вектора $\vec{\delta}$ являются неопределенности значения токов и фаз в проводах ЛЭП, а также другие параметры неопределенностей электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, которые, во-первых, изначально известны неточно, и, во-вторых, могут меняться в процессе эксплуатации системы [11]–[13].

Тогда вектор $\vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t)$ мгновенного значения индукции исходного магнитного поля может быть рассчитан по закону Био-Савара на основании (5) в виде суммы векторов $\vec{B}_{L_i}(Q_i, \vec{\delta}, t)$ индукции магнитного поля, создаваемое всеми шестью проводами двухцепной ЛЭП в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Зададим вектор \vec{X}_a искомых геометрических значений размеров компенсационной обмотки системы активного экранирования, а также амплитуду и фазу тока в компенсационной обмотке. Тогда вектор $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$ мгновенного значения индукции магнитного поля, генерируемого компенсационной обмоткой активного экрана в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования, также может быть рассчитан на основании закона Био-Савара интегрированием выражения (5).

Заметим, что для эффективного активного экранирования магнитного поля, генерируемого двухцепными ЛЭП в многоэтажных домах, может потребоваться две или даже три компенсационные обмотки системы активного экранирования [14]–[16]. В этом случае, вектор $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$ мгновенного значения индукции магнитного поля, генерируемого всеми компенсационными обмотками системы активного экранирования в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования, также может быть рассчитан на основании зако-

на Био-Савара интегрированием выражения (5), в виде суммы векторов $\vec{B}_{ai}(Q_i, \vec{X}_a, t)$ мгновенных значений индукции магнитного поля, генерируемого всеми компенсационными обмотками системы активного экранирования в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Тогда вектор $\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t)$ мгновенных значений индукции результирующего магнитного поля, генерируемого линией электропередачи и только обмотками системы активного экранирования в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования, рассчитывается в виде суммы

$$\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t) = \vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t) + \vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t) \quad (6)$$

Зададим вектор \vec{X}_p искомых значений геометрических размеров, толщины и материала многоконтурного пассивного экрана. Тогда для вычисленного вектора $\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t)$ результирующего магнитного поля, которое создается токами в токопроводах ЛЭП, токами в обмотках системы активного экранирования, и пассивным контурным экраном, можно вычислить магнитные потоки, пронизывающие контуры многоконтурного пассивного экрана, и токи в контурах. А также, на основании закона Био-Савара интегрированием выражения (5) для всех контуров многоконтурного пассивного экрана можно вычислить вектор $\vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$, мгновенного значения индукции результирующего магнитного поля, генерируемого всеми контурами многоконтурного пассивного экрана в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Тогда может быть вычислен вектор $\vec{B}_R(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$ мгновенного значения индукции результирующего магнитного поля

$$\vec{B}_R(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) = \vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t) + \dots + \vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t) + \vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) \quad (7)$$

в виде суммы вектора $\vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми проводами линии электропередачи, и вектора $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми проводами компенсирующих обмоток активной части гибрид-

ного экрана, и вектора $\vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми контурами пассивной части гибридного экрана в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Рассмотрим теперь математическую постановку задачи проектирования электромагнитного экрана.

Введем вектор \vec{X} искомых параметров задачи проектирования комбинированного экрана, компонентами которого являются вектор \vec{X}_a искомых параметров активного экрана, включающего геометрических размеров компенсационных обмоток, а также токи и фазы в компенсационных обмотках, а также вектор \vec{X}_p искомых параметров пассивного экрана, включающего геометрические размеры контуров, толщины и материал многоконтурного пассивного экрана [17]–[18]. Тогда для заданных значений вектора X искомых параметров и вектора $\vec{\delta}$ параметров неопределенности задачи проектирования электромагнитного экрана может быть вычислено эффективное значение $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, P_i)$ магнитной индукции в точке P_i пространства экранирования на основе пакета программ COMSOL Muliphysics.

Тогда задача проектирования электромагнитного экрана сводится к вычислению решения векторной минимаксной задачи оптимизации [14]–[18]

$$\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}) = \langle \vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, P_i) \rangle. \quad (8)$$

Компонентами векторной целевой функции $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta})$ являются эффективными значениями $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, P_i)$ индукции результирующего магнитного поля во всех рассматриваемых точках P_i пространства экранирования.

В этой векторной минимаксной задаче оптимизации необходимо найти минимум вектора целевой функции (8) по вектору искомых параметров \vec{X} , и максимум этой же целевой функции по вектору параметров неопределенности $\vec{\delta}$ задачи проектирования комбинированного экрана.

При этом, естественно, необходимо учитывать ограничения на вектор искомых параметров \vec{X} комбинированного экрана в виде

векторного неравенства и, возможно, векторного равенства [11]–[13]

$$\vec{G}(\vec{X}) \leq \vec{G}_{\max}, \quad \vec{H}(\vec{X}) = 0. \quad (9)$$

Отметим, что компоненты векторной целевой функции (8) и векторных ограничений (9) являются нелинейными функциями вектора искомых параметров \vec{X} и вектора $\vec{\delta}$ параметров неопределенности задачи проектирования электромагнитного экрана и рассчитываются на основе пакета программ COMSOL Muliphysics.

I. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Особенностью решения рассматриваемой задачи векторной минимаксной оптимизации (8) является наличие нескольких противоречивых целей. Минимизация магнитного поля в одной точке пространства экранирования приводит к увеличению магнитного поля в других точках за счет недокомпенсации или перекомпенсации исходного магнитного поля.

Минимаксные задачи широко используются в робастном управлении [11]–[13]. В последнее время в синтезе систем управления получил распространение игровой подход, позволяющий сформулировать задачу синтеза системы для игры. В этом случае область изменения параметров делится на два набора – дружественных \vec{X} и вражеских $\vec{\delta}$. Задача игроков — выбрать такие значения \vec{X} параметров дружественного игрока, при которых значение оптимизируемого векторного критерия качества (8) минимизируется, а задача соперника — выбрать такие значения параметров $\vec{\delta}$, при которых значение это же критерия качества максимизируется.

При минимизации по одной переменной \vec{X} и максимизации по другой переменной $\vec{\delta}$ одной и той же векторной целевой функции (8), необходимым условием оптимальной минимаксной задачи является равенство нулю градиента целевой функции по всем переменным, независимо от того, является ли целевая функция минимизируемой или максимизируемой функцией [11]–[13].

При численном решении этой минимаксной задачи для нахождения направления движения необходимо использовать компоненты градиента целевой функции для тех переменных, по которым производится максимизация, и необходимо использовать ком-

поненты антиградиент (т.е. градиента, взятого с обратным знаком) для тех переменных, по которым проводится минимизация [11]–[13].

Для решения этой минимаксной задачи многокритериальной оптимизации (8) воспользуемся простейшей линейной схемой компромиссов [14]–[18], в которой исходная многокритериальная задача сводится к однокритериальной

$$f(\bar{X}, \bar{\delta}) = \sum_{i=1}^J \alpha_i \bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta}, P_i) \quad (10)$$

где α_i – весовые коэффициенты, характеризующие важность тех или иных критериев и определяющие предпочтение отдельных критериев.

Необходимым условием оптимальности решения (10) этой минимаксной задачи

$$\bar{X}^* = \mathbf{arg\,min}_X \sum_{i=1}^J \alpha_i \bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta}, P_i) \quad (11)$$

$$\bar{\delta}^* = \mathbf{arg\,max}_{\delta} \sum_{i=1}^J \alpha_i \bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta}, P_i) \quad (12)$$

является наличие седловой точки, в которой градиенты целевой функции равны нулю

$$\nabla_{\bar{X}} f /_{\bar{X}=\bar{X}^*} = 0, \quad \nabla_{\bar{\delta}} f /_{\bar{\delta}=\bar{\delta}^*} = 0. \quad (13)$$

Достаточным условием существования седловой точки является изменение знака градиента $\nabla_{\bar{X}} f$ целевой функции при переходе точки минимума от минуса к плюсу и изменение знаков градиента при переходе точки максимума от плюса к минусу [17]–[18]. Эти условия можно сформулировать в виде положительной определенности $\bar{H}_{\bar{X}} > 0$ матрицы вторых производных – матрицы Гессе по вектору параметров \bar{X} и отрицательной определенности $\bar{H}_{\bar{\delta}} \leq 0$ матрицы Гессе по вектору параметров $\bar{\delta}$, т.е. задача существенно усложняется, если критерий качества $\bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta})$ – вектор.

Отметим, что критерий качества $\bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta})$ обычно включает в себя как переменные состояния системы, или их комбинацию, характеризующую точность системы, так и переменные состояния, которые необходимо

ограничить и обязательно включить в вектор управления. В противном случае исходная задача становится вырожденной и приводит к бесконечным управлениям. При этом выбор весовых матричных функций в качестве критерия качества при решении конкретных задач осуществляется итеративно путем многократного решения исходной оптимизационной задачи при различных значениях весовых функций до получения приемлемых результатов.

Фактически, смысловая постановка задачи сводится к синтезу такой системы, которая обеспечивает минимальные значения индукции результирующего магнитного поля (8), которые характеризуют точность системы, при выполнении ограничений (9) на компоненты вектора состояния и при ограничениях на вектор управления.

Рассмотрим использование штрафов (барьерных функций) для решения задачи математического программирования при наличии ограничений. Сначала рассмотрим применение метода внутренних точек для решения задачи математического программирования, не содержащей ограничений в виде равенств. Предположим, что вблизи оптимальной точки выполняются условия локального оптимума в следующем виде

$$\begin{cases} g_i(x) \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ \nabla f(x) - \sum_{i=1}^m u_i \nabla g_i(x) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Откуда можно получить следующее равенство

$$\nabla f(x(r)) - \sum_{i=1}^m \frac{r}{g_i(x(r))} \nabla g_i(x(r)) = 0. \quad (15)$$

Это равенство можно интерпретировать как необходимое условие локального оптимума в виде нулевого градиента, при котором исходная целевая функция задачи нелинейного программирования принимает следующий вид

$$L(x, r) = f(x) - r \sum_{i=1}^m \ln g_i(x). \quad (16)$$

Аналогично можно получить и другую целевую функцию, если из выражения

$$\lambda_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m} \quad (17)$$

для градиента

$$\nabla f[x(r)] - \sum_{i=1}^m \frac{r^2}{g_i^2[x(r)]} \nabla g_i[x(r)] = 0. \quad (18)$$

Целевая функция $L_1(x, r)$ примет следующий вид

$$L_1(x, r) = f(x) + r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(x)}. \quad (19)$$

Эти целевые функции позволяют свести исходную задачу нелинейного программирования при наличии ограничений к решению задачи безусловной оптимизации таким образом, что при подходе к границе ограничений изнутри штраф за нарушение ограничений стремится к бесконечности, что соответствует методу внутренних точек в алгоритме штрафных функций.

Таким образом, задача многокритериального синтеза (8) нелинейного робастного управления с использованием линейной схемы компромиссов (10) сводится к однокритериальной задаче математического программирования. Рассмотрим применение метода последовательного квадратичного программирования для решения этой задачи. Этот метод и его программная реализация были предложены Шиттковски первоначально для решения задачи минимизации методом наименьших квадратов. Этот метод представляет собой комбинацию метода Гаусса-Ньютона с определением направления движения с помощью квазиньютоновского алгоритма.

Рассмотрим минимизацию квадратичной нормы, обычно называемую задачей наименьших квадратов без ограничений.

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l f_i(x)^2. \quad (20)$$

Градиент этой целевой функции может быть представлен следующим образом

$$\nabla f(x) = \nabla F(x) F(x). \quad (21)$$

Где $\nabla F(x) = (\nabla f_1(x), \dots, \nabla f_l(x))$ обозначен якобиан этой функции и предполагается, что компоненты целевой функции могут быть дважды продифференцированы. Тогда матрицу вторых производных целевой функции – матрицу Гессе можно записать в следующем виде

$$\nabla^2 f(x) = \nabla F(x) \nabla F(x)^T + B(x), \quad (22)$$

где

$$B(x) = \sum_{i=1}^l f_i(x) \nabla^2 f_i(x) \nabla^2 f_i(x).$$

Тогда итерационная процедура выбора направления движения $d_k \in R^n$ по методу Ньютона может быть сведена к решению линейной системы

$$\nabla^2 f(x_k) d + \nabla f(x_k) = 0, \quad (23)$$

или к решению эквивалентной системы в следующем виде

$$\begin{aligned} \nabla F(x_k) \nabla F(x_k)^T d + B(x_k) d + \dots \\ \dots + \nabla F(x_k) F(x_k) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

В точке оптимального решения x^* выполняется условие

$$F(x^*) = (f_1(x^*), \dots, f_l(x^*))^T = 0, \quad (25)$$

поэтому нахождение шага движения d можно свести к решению нормального уравнения задачи наименьших квадратов

$$\min_{d \in R^n} \|\nabla F(x_k)^T d + F(x_k)\|, \quad (26)$$

из которого можно получить рекуррентное выражение

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (27)$$

для итерационного нахождения вектора искомых параметров, в котором d_k является решением задачи оптимизации (26), а α_k – экспериментально определяемый параметр.

Этот алгоритм использует метод Гаусса-Ньютона, который является традиционным

алгоритмом решения нелинейной задачи наименьших квадратов, для вычисления направления движения. В общем случае метод Гаусса-Ньютона позволяет получить решение задачи последовательного квадратичного программирования с использованием только производных первого порядка, но в реальных ситуациях получить решение часто не удается.

Поэтому для улучшения сходимости применяют методы второго порядка, в которых используется матрица вторых производных целевой функции — матрица Якоби при решении оптимизационных задач без ограничений. Алгоритмы второго порядка, по сравнению с методами первого порядка, позволяют эффективно получать решение в области, близкой к оптимальной точке, когда компоненты вектора градиента имеют достаточно малые значения.

В последнее время в квазиньютоновских методах получили распространение методы, использующие алгоритмы Левенберга-Марквардта. Идея этих методов состоит в замене матрицы Гессе некоторой матрицей $\lambda_k I$ с положительным коэффициентом λ_k . Тогда получим следующую систему линейных уравнений

$$\begin{aligned} \nabla F(x_k) \nabla F(x_k)^T d + \lambda_k d + \dots \\ \dots + \nabla F(x_k) F(x_k) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

Существует множество различных методов решения нелинейной задачи наименьших квадратов без ограничений. С другой стороны, существует простой подход для объединения свойств метода Гаусса-Ньютона с методом последовательного квадратичного программирования. Основной проблемой применения метода последовательного квадратичного программирования является необходимость использования специальных методов, обеспечивающих отрицательные собственные значения при аппроксимации матрицы Гесса в случае альтернативных подходов.

Детерминированные методы оптимизации, такие как линейное программирование и нелинейное программирование, широко используются для решения задач многокритериальной оптимизации.

Однако, эти методы используют одноточечный подход, и результатом этих классических методов оптимизации является единственное оптимальное решение. Например,

метод взвешенной суммы локальных критериев переводит задачу многокритериальной оптимизации в задачу однокритериальной оптимизации, что позволяет получить одну точку на фронте Парето-оптимальных решений.

Для нахождения глобального оптимума из оптимальных Парето решений, необходимо рассмотреть все возможные фронты Парето. В этом случае необходимо, чтобы алгоритмы поиска точки глобального оптимума выполнялись итеративно, чтобы гарантировать использование каждой комбинации весов.

Для выбора всех комбинаций весов необходимо многократно повторять алгоритмы такого локального поиска. Следовательно, алгоритмы должны иметь возможность «учиться» на полученных решениях, чтобы направлять правильный выбор веса в дальнейших эволюциях. При использовании классических методов поиска глобального оптимального решения возникают проблемы, если оптимальное решение находится в невыпуклых или несвязных областях функционального пространства.

В последнее время, все более популярными для решения задач оптимизации становятся метаэвристические методы, такие как эволюционные алгоритмы и технологии группового интеллекта [19]–[21]. Эволюционные методы благодаря своей эффективности и простоте успешно применяются для решения оптимизационных задач с одной целевой функцией. Эти методы имеют некоторые преимущества перед классическими методами оптимизации, так как позволяют рассчитывать оптимальные решения для нелинейных и невыпуклых задач [29]–[32]. В этих методах используется множество решений на каждой итерации и стохастический поиск, поэтому могут найти поиск в любом месте во всем пространстве поиска и способны преодолеть проблемы локальных оптимумов.

Методы стохастического поиска также больше подходят для решения задач многокритериальной оптимизации.

Среди метаэвристических методов, до недавнего времени, оптимизация роением частиц применялась только к однокритериальным задачам оптимизации. Высокая скорость сходимости алгоритмов оптимизации роением частиц для разработки многокритериального алгоритма оптимизации имеет некоторые преимущества с точки зрения лучшего исследования и использования, которые обеспечи-

вает возможность алгоритма для глобального поиска.

В стандартном алгоритме оптимизации роя частиц скорость частицы i роя j изменяется по линейным законам, в которых движение роя частиц описывается следующими выражениями [19]–[21]

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) = & c_1 r_{1j}(t) \dots \\ & \dots * [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t) \dots, \end{aligned} \quad (29)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (30)$$

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

Для увеличения скорости нахождения глобального решения в последнее время получили распространение специальные нелинейные алгоритмы стохастической многоагентной оптимизации [33].

Естественно, что формализация решения многокритериальной задачи оптимизации (8) путем сведения ее к однокритериальной задаче (10) позволяет обоснованно выбрать из области компромиссов одну-единственную точку – область Парето [24]–[28].

Однако эта «единственная» точка может быть дополнительно проверена для дальнейшего улучшения схемы компромисса с точки зрения лица, принимающего решение [19]–[20].

В заключение заметим, что алгоритм вычисления скорости частиц (29)–(30) при минимизации по переменной \vec{X} параметров системы электромагнитного экранирования и максимизации по переменной $\vec{\delta}$ параметров неопределенностей проектируемой системы по одной и той же векторной целевой функции (8) описываются одними и теми же вы-

ражениями (29)–(30). Различие состоит лишь в том, что при вычислении переменной \vec{X} для минимизации целевой функции (8) – наилучшие локальные – lbest $y_{ij}(t)$ и глобальные – gbest y_j^* положения частицы i , которые находятся соответственно только одной частицей i и всеми частицами i роя j считаются позиции, при которых целевая функция принимает минимальные значения. А при вычислении переменной $\vec{\delta}$ для максимизации этой же векторной целевой функции (8) наилучшими локальными – lbest $y_{ij}(t)$ и глобальными – gbest y_j^* положения частицы i считаются такие положения, при которых эта же целевая функция принимает максимальные значения. Такой выбор наилучших положений частиц соответствует движению частиц в направлении антиградиента при минимизации целевой функции по переменным \vec{X} и, соответственно, движению частиц в направлении градиента при максимизации целевой функции по переменным $\vec{\delta}$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проектировании электромагнитного экрана определены координаты пространственного расположения 11 проводников многоконтурного пассивного экрана.

Были так же определены координаты пространственного расположения компенсационной обмотки, а также, ток и фаза в этой обмотке системы активного экранирования.

В отличие от работ [16]–[19] координаты пространственного расположения 11 контуров многоконтурного пассивного экрана вычислены в ходе решения многокритериальной минимаксной задачи оптимизации (8) с ограничениями (9) и для экранирования исходного магнитного поля используется электромагнитный активно-пассивный экран.

Схема расположения двухцепной ЛЭП, компенсирующей обмотки активного экрана и 11 проводников многоконтурного пассивного экрана показаны на рис. 3.

На рис. 4 показано результирующее магнитное поле при работе только многоконтурного пассивного экрана. В центральной части пространства экранирования уровень магнитного поля составляет 2,1 мкТл, в то время как уровень индукции исходного МП в центральной части пространства экранирования составляет 2,4 мкТл. Расчетное значение факто-

ра экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 1,14. При этом наблюдаются характерные области концентрации напряжений в 11 точках расположения проводников контурного пассивного экрана, рассчитанных в процессе проектирования экрана.

На рис. 5 показано распределение индукции результирующего МП при работе только САЭ. В центральной части пространства экранирования уровень индукции результирующего МП составляет 0,43 мкТл так, что расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 5,58.

На рис. 6 показано результирующее МП при работе САЭ. Уровень МП в центральной части пространства экранирования составляет 0,29 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 8,2. Применение САЭ позволяет снизить уровень исходного магнитного поля до безопасного для проживания уровня в 0,5 мкТл в существенно большей области пространства экранирования (80,45 %) по сравнению с использованием только активного экрана.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим теперь результаты экспериментальных исследований электромагнитного активно-пассивного экрана. На рис. 7 показана компенсационная обмотка и многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки электромагнитного экрана. На рис. 8 показан многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки электромагнитного активно-пассивного экранирования.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований электромагнитной системы активно-пассивного экранирования.

На рис. 9 вместе с расчетными значениями показаны и экспериментально измеренные значения индукции магнитного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП, и индукции результирующего магнитного поля при включенной системе электромагнитного активно-пассивного экранирования.

Экспериментально измеренное минимальное значение индукции в малой зоне экранирования при включенной электромагнитной системе активно-пассивного экранирования составляет 0,35 мкТл.

Индукция исходного магнитного поля в рассматриваемом пространстве составляет 2,95 мкТл, а при включенной электромагнитной системе активно-пассивного экранирования уровень магнитного поля во всей зоне экранирования не превышает безопасного для проживания уровня индукции в 0,5 мкТл более чем в 70 % пространства экранирования.

Сравнение результатов расчетных и экспериментально измеренных значений индукции исходного и результирующего магнитного поля с включенной электромагнитной системой активно-пассивного экранирования, показанных на рис. 9, отличаются не более чем на 20 %.

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

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика проектирования электромагнитного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной части, который характеризуется повышенной эффективностью снижения магнитного поля промышленной частоты, которое создается двухцепными воздушными ЛЭП в жилых домах.

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

3. В ходе проектирования электромагнитного экрана для снижения уровня магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными ЛЭП в жилых домах, вычислено расположение 11 контурных пассивных экранов и координаты пространственного расположения компенсационной обмотки, а также ток и фаза в этой обмотке активного экрана.

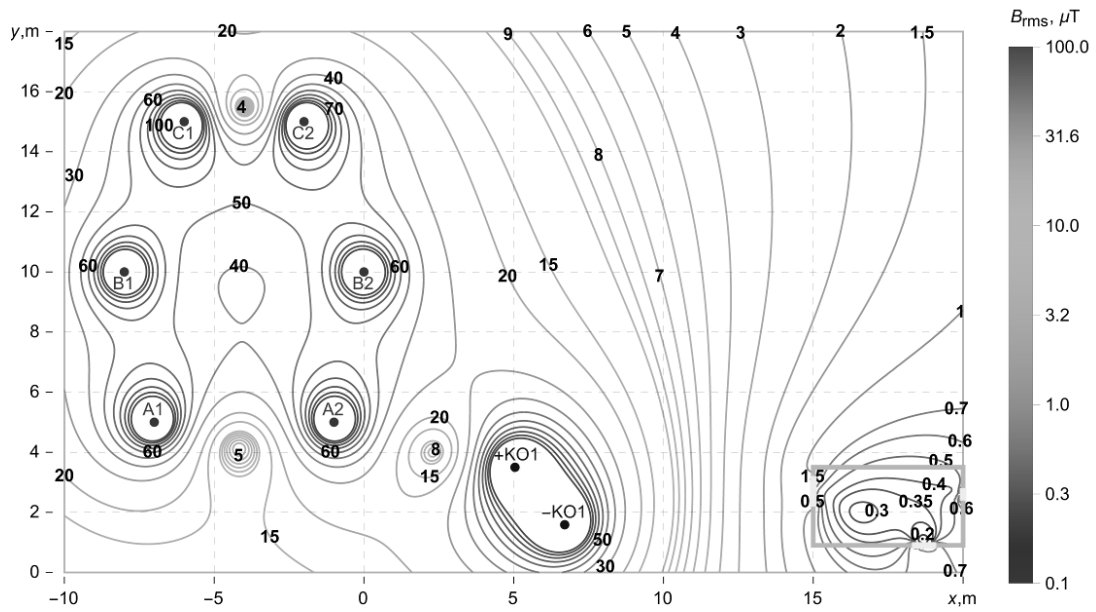


Рис.3. Схема расположения ЛЭП, обмоток активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.³

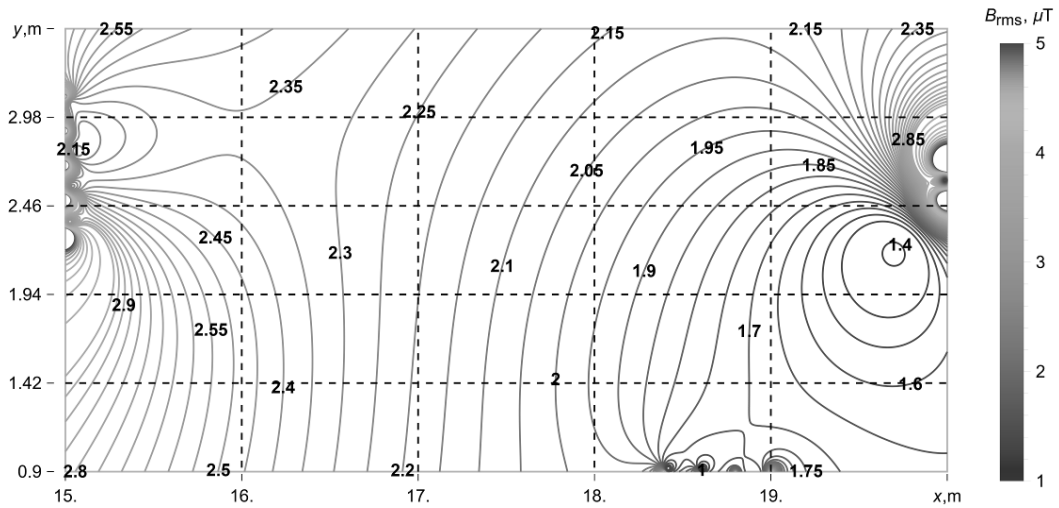


Рис.4. Результирующее магнитное поле при работе только многоконтурного пассивного экрана.⁴

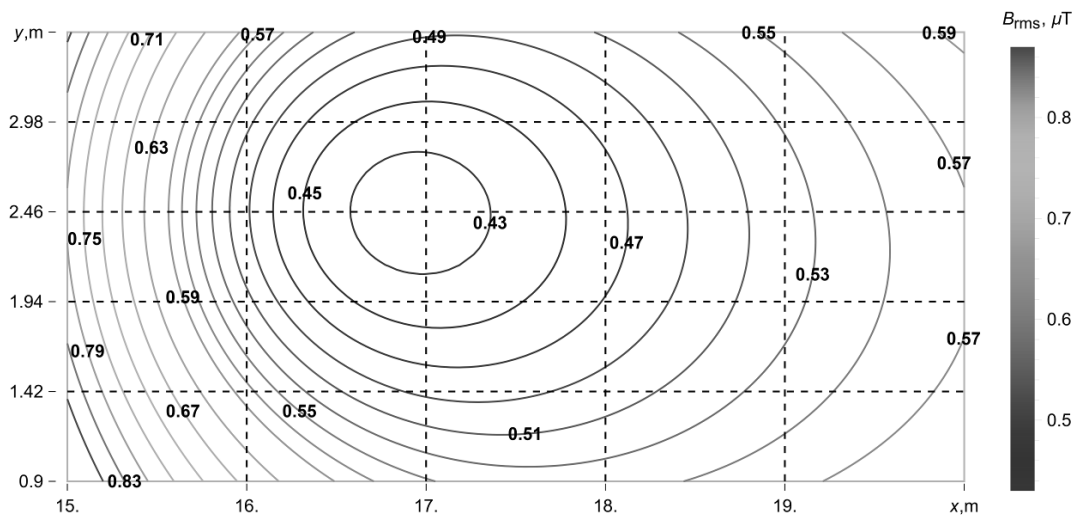


Рис.5. Результирующее магнитное поле при работе только активного экрана.⁵

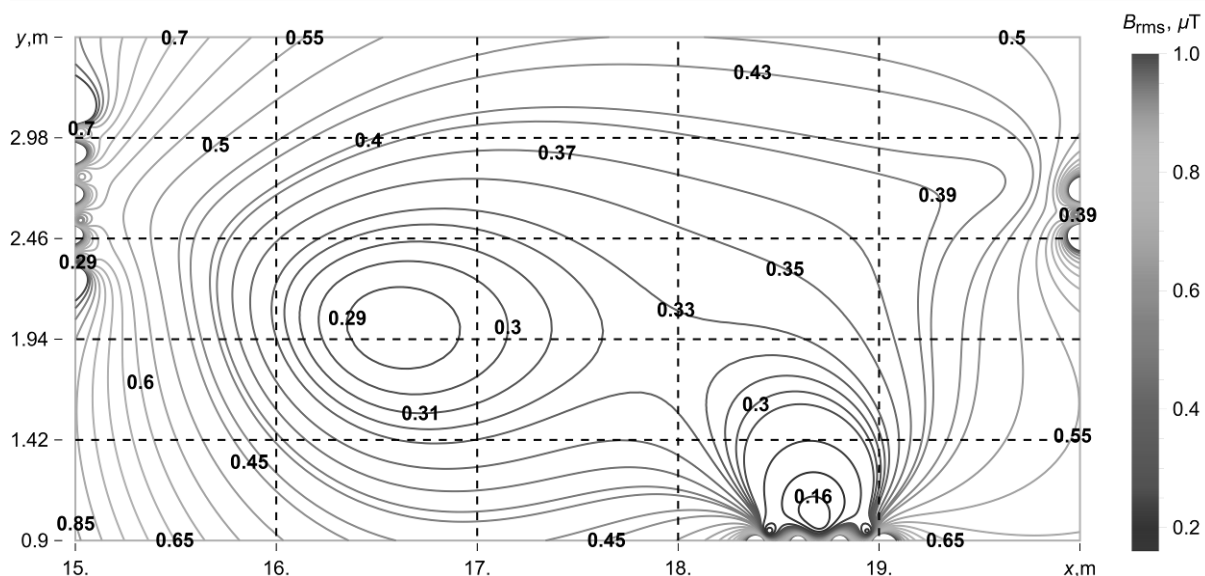


Рис.6. Результирующее магнитное поле при работе гибридного активно пассивного экрана.⁶



Рис.7. Схема расположения обмотки активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.⁷



Рис.8. Многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки электромагнитного экрана.⁸

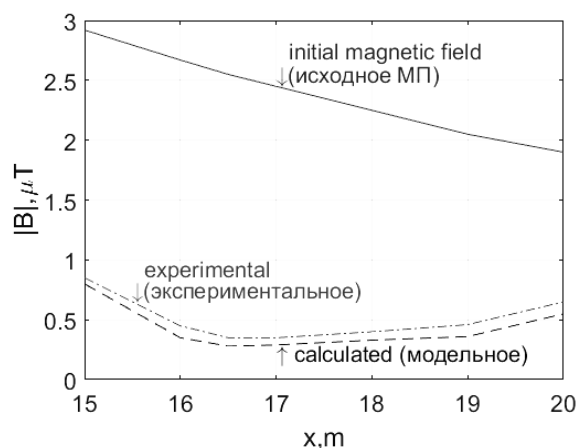


Рис. 9. Сравнение индукции исходного магнитного поля и магнитного поля при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования.⁹

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

5. Практическое применение электромагнитного экрана позволяет снизить уровень магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными ЛЭП в жилых домах, до безопасного уровня для населения проживающего вблизи ЛЭП, на уровне до 0,5 мкТл.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

- ¹Fig. 1. An example of residential buildings located near a double-circuit power line.
²Fig. 2. Residential building located near two double-circuit power lines.
³Fig. 3. The relative position of the double-circuit overhead power transmission line, single compensation winding and a shielding space.
⁴Fig. 4. The resulting magnetic field when multi-loop passive shield only.
⁵Fig. 5. The resulting magnetic field when active shield only.
⁶Fig. 6. The resulting magnetic field during operation of the electromagnetic shield.
⁷Fig. 7. The layout of the single winding of the active shield and multiloop passive shield.
⁸Fig. 8. Multiloop passive shield of the experimental installation of electromagnetic shield.
⁹Fig. 9. Comparison of the induction of the initial magnetic field and the magnetic field with the electromagnetic shielding system switched on.

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 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: <https://doi.org/10.52549/ijeei.v10i2.3572> (accessed 23.06.2023).
- [7] Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, vol. 56, pp. 97–106. doi: <https://doi.org/10.3233/jae-172286> (accessed 23.06.2023).
- [8] Canova Aldo, Giaccone Luca. High performance magnetic shielding solution for elf sources. *24th International Conference on Electricity Distribution Glasgow, 12-15 June 2017*. Paper 1029. pp. 1–5.
- [9] Canova Aldo, Giaccone Luca, Cirimele Vincenzo. Active and passive shield for aerial power lines. *25th International Conference on Electricity Distribution*. Madrid, 3–6 June 2019. Paper n°1096, pp.1–5.
- [10] Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2–7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002 (accessed 23.06.2023).
- [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: 10.1007/978-3-031-10522-7_15 (accessed 23.06.2023).
- [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: 10.32620/reks.2023.1.05 (accessed 23.06.2023).
- [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 (accessed 23.06.2023).
- [15] Solomentsev O. "Method of Optimal Threshold Calculation in Case of Radio Equipment Maintenance," in *Data Science and Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 69–79. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2211-4_6 (accessed 23.06.2023).

- [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> (accessed 23.06.2023).
- [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> (accessed 23.06.2023).
- [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>. (accessed 23.06.2023).
- [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>. (accessed 23.06.2023).
- [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> (accessed 23.06.2023).
- [24] O.A. Sushchenko and A.A. Tunik, "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. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11181-005-0124-7>, 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. [https://link.springer.com/article/10.1134/S1061830908090015](https://link.springer.com/article/10.1134%2FS10.1134/S1061830908090015). 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. <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. <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. <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. <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

algorithm for solving optimization problems.
Applied Intelligence, 2021, vol. 51, pp. 1531–

1551. doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z> (accessed 23.06.2023).

Сведения об авторах.



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



Никитина Татьяна Борисовна
 Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез систем автоматического управления повышенной точности.
 ORCID: 0000-0002-0185-3078
 E-mail: tatjana55555@gmail.com



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



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



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



Добродеев Павел Николаевич
 Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, с.и., область научных интересов: синтез систем автоматического управления высокой точности, синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
 ORCID: 0000-0002-2648-0319
 E-mail: Dobrodeyev@nas.gov.ua