

Synthesis of the Spatial Arrangement of Magnetic Field Sensors for Active Magnetic Field Shielding Systems of Overhead Power Lines

Kuznetsov B.I.¹, Nikitina T.B.², Bovdui I.V.¹, Voloshko O.V.¹, Kolomiets V.V.²,
Kobylianskyi B.B.²

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

² Educational scientific professional pedagogical Institute Ukrainian Engineering Pedagogical Academy
Bakhmut, Ukraine

Abstract. The purpose of the work is to develop a synthesis method for the spatial and angular arrangement of magnetic field sensors in order to ensure maximum efficiency of a robust system for active shielding of the magnetic field generated by overhead power lines, and to reduce the sensitivity of the synthesized system to initial uncertainties in changes in the level of the initial magnetic field, as well as system parameters while working. To achieve this goal, the spatial location coordinates and angular position of all magnetic field sensors, controller parameters, and gain vector for the compensating windings are determined. A synthesis of the spatial location and angular position of magnetic field sensors is created to solve a minimax vector optimization problem in which the vector objective function is calculated based on the Biot-Savart's law. Solution of the minimax vector optimization problem, calculated on the basis of optimization algorithms for a multi-swarm of particles from Pareto-optimal solutions, taking into account the parameters of binary relations. Significant results obtained on the basis of the developed synthesis method are the effectiveness of a robust active shielding system for magnetic fields generated, as a consequence, by power lines with a synthesized spatial arrangement and angular position of magnetic field sensors obtained in the process of theoretical and experimental research. The significance of the results lies in the fact that practical recommendations are given for the reasonable choice of spatial location and angular position of magnetic field sensors, the spatial arrangement of shielding windings of a robust magnetic field shielding system for various characteristics of power lines.

Keywords: overhead power transmission line, magnetic field, active silencing system, spatial arrangement and angular position of magnetic field sensors, minimax vector optimization problem, computer simulation, experimental research.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.1-61.01>

UDC: 621.3.013

Sinteza aranjamentului spațial al senzorilor de câmp magnetic pentru ecranarea activă a câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene

Kuznețov B.I.¹, Nikitina T.B.², Bovdui I.V.¹, Vološko E.V.¹, Kolomiț V.V.², Kobâlianski B.B.²

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

² Institutul Pedagogic Profesional Educațional și Științific al Academiei Ucrainene de Inginerie și Pedagogică, Bahmut, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a dezvolta o metodă de sintetizare a aranjamentului spațial și a poziției unghiulare a senzorilor de câmp magnetic pentru a asigura eficiența maximă a unui sistem robust de ecranare activă a câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene și pentru a reduce sensibilitatea sintetizată. Sistemul la incertitudinile inițiale și modificările parametrilor sistemului în timpul funcționării. Pentru a atinge acest obiectiv sunt determinate coordonatele locației spațiale și poziția unghiulară a tuturor senzorilor de câmp magnetic și câștigurile controlerului pentru înfășurările de compensare. Sinteza locației spațiale și a poziției unghiulare a senzorilor de câmp magnetic se reduce la rezolvarea unei probleme de optimizare vectorială minimax, în care funcția obiectiv vectorială este calculată pe baza legii Biot-Savart. Soluția problemei de optimizare vectorială minimax este calculată pe baza algoritmilor de optimizare a particulelor multiroi din soluții Pareto-optime ținând cont de relațiile de preferință binare. Cele mai importante rezultate obținute pe baza metodei de sinteză dezvoltate sunt studiile teoretice și experimentale ale eficacității unui sistem robust de

ecranare activă a câmpului magnetic generat de diverse linii electrice aeriene, cu locații spațiale sintetizate și poziții unghiulare ale senzorilor de câmp magnetic. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că se dau recomandări practice pentru alegerea rezonabilă a locației spațiale și a poziției unghiulare a senzorilor de câmp magnetic, aranjarea spațială a înfășurărilor de ecranare a unui sistem robust de ecranare a câmpului magnetic creat de diverse linii electrice aeriene. S-a arătat posibilitatea reducerii câmpului magnetic inițial la nivelul standardelor sanitare.

Cuvinte-cheie: linie aeriană de transmisie a energiei electrice, câmp magnetic, sistem de tăcere activă, problemă de optimizare vectorială minimax.

Синтез пространственного расположения сенсоров магнитного поля систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи

Кузнецов Б.И.¹, Никитина Т.Б.², Бовдуй И.В.¹, Волошко Е.В.¹, Коломиец В.В.², Кобылянский Б.Б.²

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

² Учебно-научный профессионально-педагогический институт Украинской инженерно-педагогической академии

Бахмут, Украина

Аннотация. Целью работы является разработка метода синтеза пространственного расположения и углового положения датчиков магнитного поля для обеспечения максимальной эффективности робастной системы активного экранирования магнитного поля, генерируемого воздушными линиями электропередачи, и снижения чувствительности синтезируемой системы к исходным неопределенностям и изменениям параметров системы в процессе работы. Для достижения этой цели определяются координаты пространственного расположения и угловое положение всех датчиков магнитного поля и коэффициентов усиления контроллеров для компенсирующих обмоток. Синтез пространственного расположения и углового положения датчиков магнитного поля сводится к решению минимаксной векторной задачи оптимизации, в которой векторная целевая функция рассчитывается на основе закона Био-Савара. Решение минимаксной задачи векторной оптимизации рассчитывается на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения, на основе стохастических нелинейных алгоритмов Архимеда. Вектор целевой функции задачи минимаксной оптимизации и ограничений вычисляется на основе закона Био-Савара. Важнейшими результатами, полученными на основе разработанного метода синтеза, являются полученные в процессе теоретических и экспериментальных исследований значения эффективности робастной системы активного экранирования магнитного поля, генерируемого различными воздушными линиями электропередачи, с синтезированными пространственными расположениями и угловыми положениями датчиков магнитного поля. Значимость полученных результатов заключается в том, что даны практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения и углового положения датчиков магнитного поля, пространственного расположения экранирующих обмоток робастной системы экранирования магнитного поля, создаваемого различными воздушными линиями электропередачи. Экспериментально показано, что с помощью синтезированного пространственного расположения и углового положения датчиков МП в САЭ МП возможно снизить уровень исходного МП до безопасного для населения уровня МП с индукцией в 0,5 мкТл.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, магнитное поле, система активного экранирования, пространственное расположение и угловое положение датчиков магнитного поля, минимаксная векторная задача оптимизации, компьютерное моделирование, экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ.

Многие воздушные линии электропередачи (ЛЭП) проходят в жилых зонах и создают магнитное поле, уровень которого зачастую превышает безопасный для населения уровень индукции 0,5 мкТл, принятый в Европе, что представляет угрозу здоровью населения [1]–[3]. Всемирная организация здравоохранения осуществляет текущие глобальные программы, связанные с изменением климата, ионизирующей радиацией, химической безопасностью и т.д. Небольшое количество этих программ подчеркивает важность затро-

нутых проблем. Влияние электромагнитного поля на население является одной из таких проблем и изучается в рамках «Международного проекта ЭМП».

Результаты исследований подтверждают высокий риск магнитного поля промышленной частоты 50–60 Гц (МП) для здоровья человека. Это приводит к современным мировым тенденциям по ужесточению санитарных норм по контрольным уровням магнитного поля промышленной частоты [4]–[5].

В настоящее время в нормативные документы Минэнерго Украины введены строгие

санитарные нормы по индукции МП в 0,5 мкТл. Однако, в Украине эти нормы повсеместно превышаются, что создает угрозу здоровью для населения, которое проживает ближе чем 100 метров к воздушным ЛЭП.

В Институте проблем машиностроения имени Анатолия Подгорного Национальной академии наук Украины проведены экспериментальные исследования МП, генерируемое высоковольтными линиями электропередачи от 10 кВ до 330 кВ. Показано, что МП ЛЭП на границе санитарных зон в 3–5 раз превышает нормативный уровень, и данная ситуация требует принятия срочных мер по снижению уровня МП существующих линий электропередачи в городах Украины до нормативного безопасного уровня.

Аналогичная ситуация характерна для большинства промышленно развитых стран мира [7]–[8]; однако в этих странах уже созданы и широко используются технологии нормализации МП существующих линий электропередачи [9]–[10]. Наиболее эффективной технологией является реконструкция ЛЭП путем ее удаления на безопасное расстояние от жилых домов, или замена воздушной ЛЭП кабельной линией электропередачи. Однако, такая реконструкция требует значительных материальных ресурсов. Поэтому для Украины более приемлемы менее затратные методы уменьшения МП существующих линий электропередачи, наиболее целесообразными из которых являются методы активного контурного экранирования магнитного поля, так как они обеспечивают необходимую эффективность при приемлемом уровне затрат, и могут быть использованы для нормализации уровня МП практически любого объекта (отдельное помещение, рабочее место, жилой дом, часть жилой застройки, и т.д.).

Технология активного контурного экранирования магнитного поля существующих линий электропередачи разработана и применяется в развитых странах мира уже более 10 лет, например, в США и Израиле.

В Украине в настоящее время отсутствуют как подобная технология, так и научные основы ее создания.

Системы активного экранирования (САЭ) состоят из компенсационных обмоток, с помощью которых формируется экранирующее МП, и оборудования, которое обеспечивает формирование в них токов. Токи в компенсирующих обмотках автоматически формируются по определенному алгоритму в зависи-

мости от сигнала датчиков МП, установленных в зоне защиты. В качестве источника питания САЭ содержит источник тока, получающий энергию от внешнего источника.

В САЭ применяется различное количество компенсирующих обмоток, определяемое пространственно-временной характеристикой исходного МП, геометрическими размерами пространства экранирования и необходимым уровнем результирующего МП в пространстве экранирования.

Наиболее распространенными линиями электропередачи в Украине, проходящим вблизи жилых и общественных помещений, являются двухцепные ЛЭП с подвеской проводов типа «бочка», как это показано на рис. 1. Такие линии передачи генерируют МП, пространственно-временной характеристикой которого является сильно вытянутый эллипс.



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

Для активного экранирования такого МП часто бывает достаточно одноконтурной САЭ с одной компенсационной обмоткой. При использовании такой САЭ компенсируется большая ось эллипса пространственно-временной характеристики, что позволяет получить достаточную эффективность экранирования исходного МП.

В районах с застройкой старыми жилыми домами часто расположены одноцепные ЛЭП с треугольной подвеской проводов, как это показано на рис. 2.

Такие ЛЭП генерируют МП, с пространственно-временной характеристикой в виде окружности. Для активного экранирования такого МП необходимо использовать как минимум двухконтурную САЭ с двумя компенсирующими обмотками. При необходимости экранирования МП, создаваемого такой ЛЭП

в многоэтажном здании, может потребоваться три, и более, компенсационных обмоток, в зависимости от необходимого уровня результирующего магнитного поля в пространстве экранирования.



Рис.2. Жилой дом, расположенный вблизи одноцепной ЛЭП.²

Также довольно часто жилые дома могут быть расположены вблизи электрических подстанций, где магнитное поле генерируется группой ЛЭП, как это показано на рис. 3.

Такая группа ЛЭП генерирует МП с пространственно-временной характеристикой в виде сильно вытянутого эллипса.



Рис.3. Группа воздушных линий электропередачи вблизи жилых домов.³

Для активного экранирования такого МП достаточно одноконтурной САЭ с одной компенсационной обмоткой.

Для формирования токов в компенсационных обмотках могут быть использованы разомкнутые, замкнутые и комбинированные алгоритмы управления [11]–[13].

При разомкнутом алгоритме управления для компенсационных обмоток достаточно одного измерительного датчика МП, с помо-

щью которого измеряется индукция исходного МП. Этот датчик установлен вне пространства экранирования, так чтобы МП компенсационных обмоток не влияли на его работу.

Недостатком разомкнутого алгоритма управления компенсационными обмотками является относительно низкая эффективность экранирования исходного МП. В частности, при разомкнутом алгоритме управления невозможно подавление изменения индукции магнитного поля внутри пространства для экранирования, из-за наличия внутренних источников МП, а также неизбежного изменения параметров САЭ и объекта управления во время ее работы [14]–[16].

Для корректной реализации замкнутого алгоритма управления всеми экранирующими обмотками количество датчиков МП обычно равно числу экранирующих обмоток.

Причем все эти датчики установлены внутри экранирующего пространства для корректного измерения результирующего МП, создаваемого как ЛЭП, так и всеми экранирующими обмотками.

Естественно, эффективность активного экранирования исходного МП с помощью каждой экранирующей обмотки и всех одновременно работающих экранирующих обмоток зависит от пространственного расположения и ориентации в пространстве экранирования всех датчиков МП.

Целью работы является разработка метода синтеза пространственного расположения и углового положения датчиков МП для обеспечения максимальной эффективности робастной САУ МП, генерируемого ЛЭП, и снижения чувствительности синтезируемой системы к исходным неопределенностям и изменениям параметров системы в процессе работы.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим постановку задачи синтеза координат пространственного расположения и их угловой ориентации в пространстве экранирования всех датчиков МП, необходимых для реализации замкнутого алгоритма управления всеми обмотками экранирования. Введем вектор Y искомым параметров координат пространственного расположения и вектор φ искомым параметров углового положения всех датчиков магнитного поля в

точках Q_i пространства экранирования. Компонентами вектора угловой ориентации всех датчиков магнитного поля являются векторы единичной длины, направленные параллельно требуемым угловым положениям осей датчиков магнитного поля.

Рассмотрим математическую модель магнитного поля, создаваемого в пространстве экранирования всеми проводами ЛЭП и всеми обмотками магнитного поля в точках Q_i установки компенсирующих датчиков в пространстве магнитного поля. Вектор $I_p(t)$ мгновенных значений токов во всех проводах ЛЭП трехфазного тока зададим в виде синусоидальных зависимостей

$$I_i(t) = A \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (1)$$

заданной частоты ω и заданной фазы φ_i , где $i = 1, 2, 3$ – номер проводника линии трехфазного тока.

Тогда мгновенное значение элементарного вектора индукции $dB(Q_i, t)$ исходного МП в рассматриваемой точке Q_i пространства в момент времени t , рассчитанное на основе закона Био–Савара [7]–[9]

$$dB(Q_i, t) = \frac{\mu_0 I(t)}{4\pi} \frac{dL_i \times R_i}{|R_i|^3} \quad (2)$$

где R_i – вектор проведенный для элементарного участка тока в точку наблюдения Q_i , dL_i – вектор элементарного участка тока, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. Знак \times обозначает векторное произведение векторов dL_i и R_i .

На основании (2) для вектора мгновенных значений токов $I_p(t)$ во всех проводах ЛЭП (1), путем интегрирования по всей длине всех токовых проводов ЛЭП, рассчитывается мгновенное значение вектора индукции исходного МП $B_p(Q_i, t)$ в момент времени t в точке Q_i , которая генерируются всеми проводами всех линий электропередачи.

Предположим, что заданы количество и геометрические размеры компенсирующих

обмоток. Зададим вектор-столбец мгновенных значений токов $I_w(t)$ в компенсирующих обмотках. Затем для заданных значений геометрических размеров компенсирующих обмоток и вектора мгновенных значений токов $I_w(t)$ в компенсирующих обмотках на основе закона Био-Савара, аналогично (1), рассчитывается мгновенное значение вектора индукции магнитного поля $B_w(Q_i, t)$, создаваемое всеми проводами всех компенсирующих обмоток в момент времени t в точках Q_i .

Тогда, величина вектора мгновенных значений индукции результирующего МП $B_R(Q_i, t)$, создаваемая всеми проводами ЛЭП и всеми компенсирующими обмотками в момент времени t в точках Q_i пространства экранирования

$$B_R(Q_i, t) = B_p(Q_i, t) + B_w(Q_i, t) \quad (3)$$

II. СИНТЕЗ ЗАМКНУТЫХ РЕГУЛЯТОРОВ САЭ

Расчет величины вектора мгновенных значений индукции результирующего вектора МП $B_R(Q_i, t)$ в точках установки датчиков МП Q_i выполняется с учетом вектора углов пространственного положения датчиков МП φ . Измеряемый вектор проекций $B_M(Q_i, t)$ рассчитывается как вектор мгновенных значений индукции результирующего МП $B_R(Q_i, t)$ на единичный вектор угловых положений этих датчиков МП φ

$$B_M(Q_i, t) = B_R(Q_i) \otimes \varphi \quad (4)$$

Здесь знак \otimes обозначает тензорное (кронекеровское) произведение векторов-столбцов. В этом случае элементы вектора $B_M(Q_i, t)$ являются результатом поэлементного скалярного умножения компонент вектора-столбца $B_R(Q_i, t)$ и вектора-столбца φ . Компоненты вектора проекции $B_M(Q_i, t)$ представляют собой скалярные величины, полученные в результате покомпонентного скалярного умножения результирующих векторов индукции МП $B_R(Q_i, t)$ в точке установки датчиков МП на орты углового поло-

жения датчиков МП φ . Компонентами этого вектора проекций вектора мгновенных значений индукции результирующего МП $B_M(Q_i, t)$ являются мгновенные значения напряжений $y(t)$ на выходах датчиков магнитного поля.

$$y_M(t) = B_R(Q_i, t) \otimes \varphi \otimes K_M + w(t) \quad (5)$$

где $w(t)$ – вектор шума магнитометра.

При этом учитывается векторный столбец коэффициентов усиления датчиков МП K_M с учетом числа витков их измерительных катушек и коэффициентов усиления преусилителей.

Примем структуру контуров замкнутого управления САЭ МП в следующем виде: на вход ПИД-регулятора каждого канала $u(t)$ подадим выходное напряжение соответствующего магнитометра $y(t)$.

Запишем дифференциальное уравнение состояния дискретных ПИД-регуляторов, входом которого является вектор измеряемых составляющих индукции МП $y(t)$, а выходом — вектор замкнутого управления объектом $u(t)$:

$$x_c(t+1) = A_c x_c(t) + B_c y(t), \quad (6)$$

$$u_c(t) = C_c x_c(t). \quad (7)$$

в которых элементы матриц A_c , B_c , C_c определяются параметрами ПИД-регуляторов.

III. СИНТЕЗ РАЗОМКНУТЫХ РЕГУЛЯТОРОВ САЭ

Предположим, что с помощью датчика МП, установленного на значительном расстоянии от зоны экранирования измеряется индукция МП, генерируемого всеми проводами ЛЭП.

В направлении установки этого датчика напряжение на выходе датчика пропорционально индукции исходного МП, которое генерируется всеми проводами ЛЭП в направлении установки этого датчика.

Данное напряжение является синусоидальным напряжением с частотой питающей сети и имеет некоторый фазовый сдвиг φ_m .

Запишем выражение для напряжения на выходе датчика МП в следующем виде

$$u_m(t) = A_m \sin(\omega(t) + \varphi_m) + w_m(t) \quad (8)$$

где $w_m(t)$ – шум магнитометра.

В отличие от синтеза системы управления по замкнутому контуру с обратной связью, реализуемой с помощью отдельных датчиков МП для каждой компенсационной обмотки, при синтезе управления по разомкнутому контуру, для всех компенсирующих обмоток используется один и тот же датчик МП, установленный на некотором расстоянии от зоны экранирования, так чтобы компенсационные обмотки не влияли на измеренное датчиком значение индукции МП генерируемое проводами ЛЭП.

Примем регуляторы разомкнутых каналов в виде усилителей с коэффициентами усиления K_i и фазовыми сдвигами φ_i . Тогда напряжения на выходе регуляторов разомкнутых каналов для i -той компенсационной обмотки запишем в следующем виде

$$u_{oi}(t) = K_i u_m(t + \varphi_i) \quad (9)$$

Введем по каналам разомкнутого управления вектор напряжений $u_o(t)$, компонентами которого являются напряжения на выходах регуляторов разомкнутых каналов $u_{oi}(t)$ для i -той компенсационной обмотки.

Запишем разностное уравнение состояния компенсирующих обмоток как объектов управления

$$x_p(t+1) = A_p x_p(t) + B_p (u_c(t) + u_o(t)), \quad (10)$$

$$I_w(t) = C_p x_p(t), \quad (11)$$

в котором элементы матриц A_p , B_p , C_p определяются параметрами модели объекта управления, включающего в себя компенсирующие обмотки, усилители мощности и стабилизаторы токов.

На входы усилителей мощности компенсационных обмоток подается сумма вектора выходных напряжений ПИД-регуляторов $u_c(t)$, с помощью которых реализуется замкнутое управление, и вектора выходных напряжений регуляторов $u_o(t)$, с помощью с

помощью которых реализуется разомкнутое управление, а выходом которых является вектор мгновенных значений токов $I_w(t)$ компенсирующих обмоток.

Таким образом, с помощью (4)–(11) формируется мгновенное значение вектора тока в компенсирующих обмотках $I_w(t)$, в виде обратной связи замкнутого управления по вектору $B_R(Q_i, t)$ индукции результирующего МП (3), и в виде прямой связи – разомкнутого управления по вектору (8), пропорциональное индукции исходного МП, генерируемого ЛЭП. Следовательно, по алгоритму управления синтезируемая САЭ является комбинированной системой, у которой одновременно реализуется разомкнутое управление – по возмущению, и замкнутое управление – с обратной связью по отклонению. В англоязычной литературе такие комбинированные системы называются системами управления с двумя степенями свободы.

IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА

Введем вектор искоемых параметров X , компонентами которого являются вектор искоемых параметров координат пространственного расположения Y , вектор искоемых параметров углового положения всех датчиков МП φ в точках пространства экранирования Q_i , и вектор-столбец K желаемых коэффициентов усиления ПИД-регуляторов компенсирующих обмоток, с помощью которых реализуется обратная связь. В вектор искоемых параметров X включим также коэффициенты усиления K_i и фазовые сдвиги φ_i регуляторов разомкнутых каналов.

Отметим, что если параметры геометрических размеров компенсирующих обмоток не указаны, то они могут быть включены в вектор искоемых параметров X . Введем также вектор параметров неопределенности объекта управления системы активного экранирования δ , компонентами которого являются параметры неопределенности математической модели исходного магнитного поля и компенсирующих обмоток [17]–[18].

Введем M точек в пространстве экранирования P_i . Отметим, что рассматриваемые M точек пространства экранирования P_i выбраны из соображений обеспечения

заданного уровня индукции результирующего МП во всем заданном пространстве экранирования, а их количество и пространственное расположение могут не соответствовать точкам установки датчиков МП. Эти точки обычно выбирают по всему пространству экранирования, поскольку с помощью САЭ можно перекомпенсировать исходное МП вблизи ЛЭП и недокомпенсировать исходное МП вдали от ЛЭП.

Затем, на основе (2) для вектора мгновенных значений токов $I_p(t)$ во всех проводах ЛЭП, путем интегрирования (1) по всей длине всех проводов ЛЭП вычисляется мгновенное значение вектора индукции исходного МП $B_p(P_i, t)$ в момент времени t в точках P_i , генерируемое всеми проводами всех линий электропередачи.

Тогда, для заданных значений геометрических размеров компенсационных обмоток и вектора мгновенных значений токов $I_w(t)$ в компенсационных обмотках, рассчитанных по (5), на основе закона Био-Савара, аналогично (1), рассчитаем мгновенное значение вектора индукции МП $B_w(X, \delta, P_i, t)$, создаваемое всеми проводами всех компенсирующих обмоток в момент времени t в точках P_i .

Тогда, вектор мгновенных значений индукции результирующего МП, создаваемого всеми проводами ЛЭП и всеми экранирующими обмотками в момент времени t в точках P_i пространства экранирования

$$B_R(X, \delta, P_i, t) = B_p(P_i, t) + \dots \dots + B_w(X, \delta, P_i, t) \quad (12)$$

Введем M -мерный вектор действующих значений результирующего МП $B_R(X, \delta, P_i)$ в M точках пространства экранирования, рассчитанный путем интегрирования квадрата модуля вектора мгновенного значения $B_R(X, \delta, P_i, t)$ на интервале периода изменения сетевого напряжения.

Тогда задача вычисления искомого вектора Y параметров координат пространственного расположения и вектора искоемых параметров углового положения φ всех датчиков МП в точках Q_i пространства экраниро-

вания, а также и искомого вектора-столбца K коэффициентов усиления регуляторов компенсирующих обмоток сводится к решению векторной минимаксной оптимизации с векторной целевой функцией [19]–[21]

$$B_R(X, \delta) = \langle B_R(X, \delta, P_i) \rangle \quad (13)$$

Компонентами $B_R(X, \delta, P_i)$ которой являются эффективные значения индукции результирующего МП во всех рассматриваемых точках Q_i пространства экранирования.

В данной задаче минимаксной оптимизации необходимо найти минимум векторной целевой функции (13) по вектору X , но максимум этой же векторной целевой функции по вектору δ .

При этом, естественно, необходимо учитывать ограничения на вектор управления и переменные состояния в виде векторного неравенства и, возможно, равенства

$$G(X) \leq G_{\max}, \quad H(X) = 0. \quad (14)$$

Отметим, что компоненты векторного критерия (13) и ограничений (14) являются нелинейными функциями вектора искомых параметров X и их расчет выполняется на основе закона Био-Савара [7]–[9].

Такой подход к синтезу САЭ МП является стандартным подходом при синтезе робастных систем управления, при котором задача синтеза рассматривается для наихудшего случая «worst case» влияния неопределенностей. В рассматриваемой задаче синтеза робастной САЭ МП находятся такие значения вектора искомых параметров координат пространственного расположения и углового положения всех датчиков МП и вектор желаемых коэффициентов усиления регуляторов компенсирующих обмоток, при которых минимизируется максимальное значение индукции в рассматриваемых точках пространства экранирования для наихудшего случая вектора параметров неопределенности синтезируемой САЭ МП. В рассматриваемой САЭ МП наиболее сильно изменяются токи в проводах ЛЭП в течении суток, недель, месяцев и сезонов. При таком подходе обеспечивается минимальная чувствительность синтезируемой САЭ МП к неопределенности и изменению параметров синтезируемой системы в ходе ее работы.

V. МЕТОД РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА

Решением векторной задачи минимаксной оптимизации с векторной целевой функцией (13) является множество неулучшаемых решений – множество Парето оптимальных решений, если задана только одна векторная целевая функция [22]–[23]. Такая постановка задачи оптимизации является некорректной, поскольку решение в виде Парето-оптимального множества неулучшаемых решений лишено инженерного смысла с точки зрения практического применения [24]–[25]. Поэтому, помимо векторного критерия оптимизации (13) и ограничений (14), для корректного решения задачи многокритериальной оптимизации необходимо также иметь информацию о бинарных отношениях предпочтения локальных решений друг другу. Такой подход позволяет существенно сузить круг возможных оптимальных решений исходной задачи многокритериальной оптимизации.

Задача нахождения локального минимума в одной точке рассматриваемого пространства, как правило, является многоэкстремальной, содержащей локальные минимумы и максимумы, поэтому для ее решения целесообразно использовать эвристические алгоритмы. В настоящее время наибольшее распространение получили мультиагентные методы стохастической оптимизации. Для нахождения решения минимаксной задачи векторной оптимизации (13) из оптимальных по Парето решений [16]–[18] с учетом отношений предпочтения использован специальный нелинейный алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации [19]–[21]. Методы первого порядка имеют хорошую сходимость в области, далекой от локального оптимума, когда первая производная имеет большие значения.

Основным недостатком методов поиска первого порядка, использующих только первую производную – скорость частиц, является низкая эффективность поиска и возможность застрять в поиске вблизи локального минимума, где значение скорости изменения целевой функции стремится к нулю. Преимуществом алгоритмов второго порядка является возможность определять не только направление движения, но и величину шага движения к оптимуму, так что при квадратичной аппроксимации целевой функции оптимум находится за одну итерацию.

При поиске компоненты $X_{ij}(t)$ оптимальных значений вектора искомым параметров X , минимизирующих векторный критерий оптимизации (13) при ограничениях (14), скорости $V_{ij}(t)$ и ускорения $A_{ij}(t)$ частицы i роя j , вычисляются по следующим выражениям:

$$V_{ij}(t+1) = W_{1j}V_{ij}(t) + C_{1j}R_{1j}(t) * \dots * H(P_{1ij}(t) - E_{1ij}(t)) [Y_{ij}(t) - \dots - X_{ij}(t)] + C_{2j}R_{2j}(t)H(P_{1ij}(t) - \dots - E_{2ij}(t)) [Y_j^*(t) - X_{ij}(t)] \quad (15)$$

$$A_{ij}(t+1) = W_{2j}A_{ij}(t) + C_{3j}R_{3j}(t) * \dots * H(P_{3ij}(t) - E_{3ij}(t)) [Z_{ij}(t) - \dots - V_{ij}(t)] + C_{4j}R_{4j}(t)H(P_{4ij}(t) - \dots - E_{4ij}(t)) [Z_j^*(t) - V_{ij}(t)] \quad (16)$$

Здесь $Y_{ij}(t)$ и Y_j^* – лучшее локальное и глобальное положение $X_{ij}(t)$, а $Z_{ij}(t)$ и Z_j^* – лучшие локальная и глобальная скорости $V_{ij}(t)$ частицы i , найденные соответственно только одной частицы i и всеми частицами i роя j . Случайные числа $R_{ij}(t)$, $E_{ij}(t)$ и константы C_{ij} , P_{ij} , W_j , являются параметрами настройки, H – функция Хевисайда.

Для поиска компонентов $X_{ij}(t)$ оптимальных значений вектора δ параметров неопределенности объекта управления (2) САЭ, максимизирующего тот же векторный критерий оптимизации (13) при ограничениях (14), для расчета скоростей $V_{ij}(t)$ и ускорений частиц i роя j , используя шаги аналогично (13)–(14). Однако в отличие от (13) и (14) лучшими локальными и глобальными компонентами положения и скорости являются те, которые приводят не к уменьшению соответствующих компонент векторной целевой функции (13), а наоборот к их увеличению. Именно в этом и проявляется «злонамеренное» поведение вектора δ неопределенностей проектируемой системы.

Использование алгоритма Архимеда [26] для расчета решений минимаксной векторной задачи оптимизации (15) с векторными огра-

ничениями (16) и бинарными отношениями предпочтения позволяет существенно сократить время вычислений [21]–[23].

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим синтез оптимального пространственного расположения и углового положения датчиков МП для замкнутой системы, обеспечивающего максимальную эффективность активного экранирования МП, создаваемое двухцепной ЛЭП с подвеской проводов типа «Бочка» в пятиэтажном жилом доме, как это показано на рис. 1.

На рис. 4 показано пространственное расположение расчетной модели ЛЭП и модели пятиэтажного жилого дома, а также две прямоугольные компенсирующие обмотки САЭ.

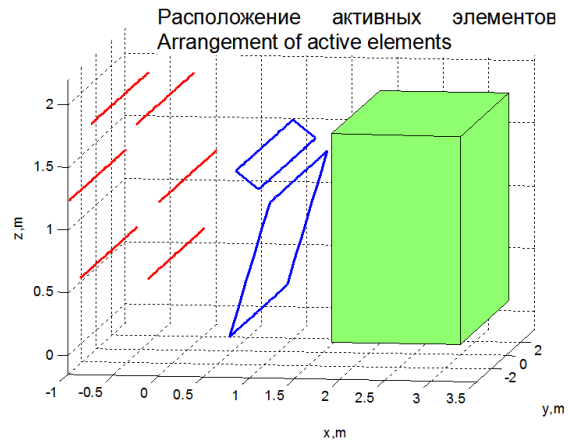


Рис.4. Пространственное расположение ЛЭП и пятиэтажного жилого дома. ⁴

В процессе синтеза оптимального пространственного расположения и углового положения датчиков МП выполняется также определение расположение двух компенсирующих обмоток в пространстве, а также необходимые значение параметров токов в них. Пространственное положение двух компенсационных обмоток для одного из возможных вариантов показано на рис. 4. При синтезе границы изменения положения компенсационных обмоток в пространстве, выбираются исходя из условий удобства обслуживания, а также монтажа при установке.

На рис. 5 показаны пространственно-временные характеристики (ПВХ) исходного магнитного поля (а), магнитного поля, создаваемого обеими компенсирующими обмотками (б), и результирующего магнитного поля (с) при включенной САЭ.

Эти ПВХ рассчитываются в точке оптимального пространственного расположения датчиков МП. Из рис. 5 следует, что при использовании двух компенсирующих обмоток, реализуется достаточно высокое значение коэффициента экранирования в точке пространственного расположения датчиков МП, и обеспечивается необходимое значение уровня МП, меньше чем $0,5 \text{ мкТл}$.

Рассмотрим синтез пространственного расположения датчиков магнитного поля системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого одноцепной воздушной линией электропередачи с треугольным подвесом проводов в одноэтажном доме, как это показано на рис. 2.

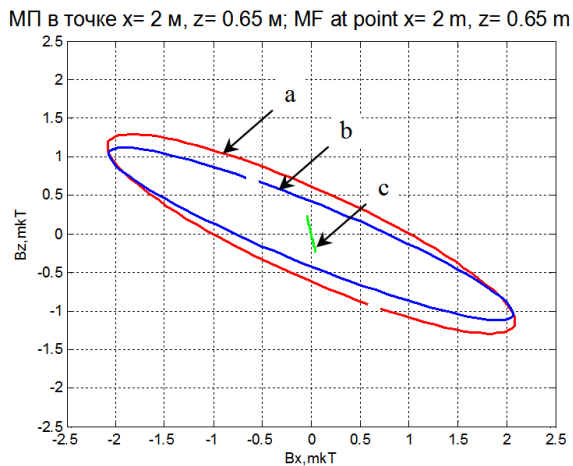


Рис.5. Пространственно-временные характеристики магнитного поля.⁵

На рис. 6 показано пространственное расположение расчетной модели одноцепной линии электропередачи и одноэтажного жилого дома.

В процессе синтеза оптимального пространственного расположения и углового положения датчиков магнитного поля было также синтезировано пространственное расположение двух компенсирующих обмоток. Пространственное положение этих двух компенсирующих обмоток также показано на рис. 6.

На рис. 7 показаны пространственно-временные характеристики (ПВХ) исходного МП (а), МП, создаваемого обеими компенсирующими обмотками (b), и результирующего МП (c) при включенной САЭ. Эти пространственно-временные характеристики также рассчитываются в точке оптимального пространственного расположения датчиков МП.

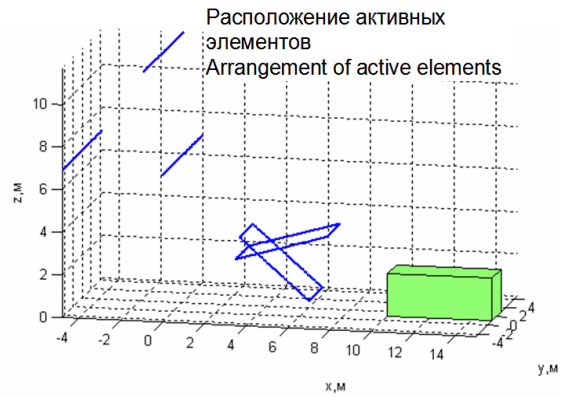


Рис.6. Пространственное расположение одноцепной ЛЭП и пятиэтажного дома.⁶

МП в точке $x = 11 \text{ м}$, $z = 1 \text{ м}$; MF at point $x = 11 \text{ м}$, $z = 1 \text{ м}$

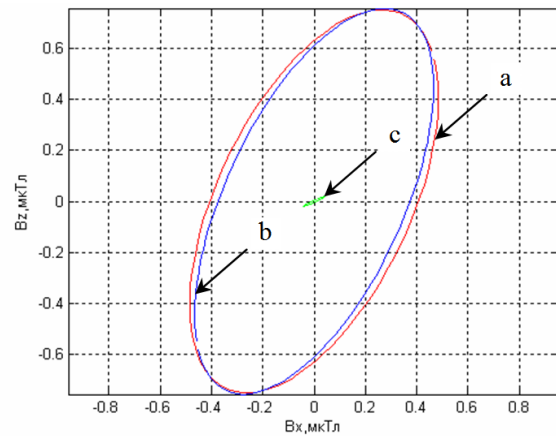


Рис.7. Пространственно-временные характеристики магнитного поля.⁷

Рассмотрим синтез пространственного расположения датчиков МП для САЭ МП, создаваемого группой воздушных ЛЭП в одноэтажном доме, как это показано на рис. 3.

На рисунке 8 представлена расчетная схема расположения группы воздушных ЛЭП, одноэтажного здания (в котором необходимо нормализовать исходный уровень МП), и компенсирующая обмотка САЭ, расположенная между группой ЛЭП и одноэтажным зданием.

На рисунке 9 показаны расчетные пространственно-временные характеристики: а) - исходного МП, б) - генерируемой одной компенсационной обмоткой и с) - результирующего магнитного поля для спроектированной системы активного экранирования.

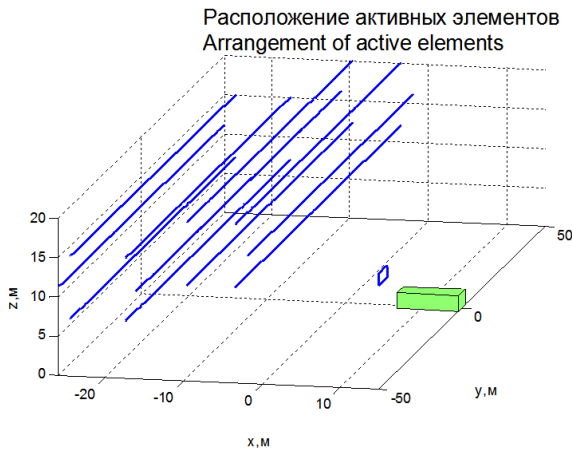


Рис.8. Схема расположения группы воздушных линий электропередачи и одноэтажного здания. ⁸

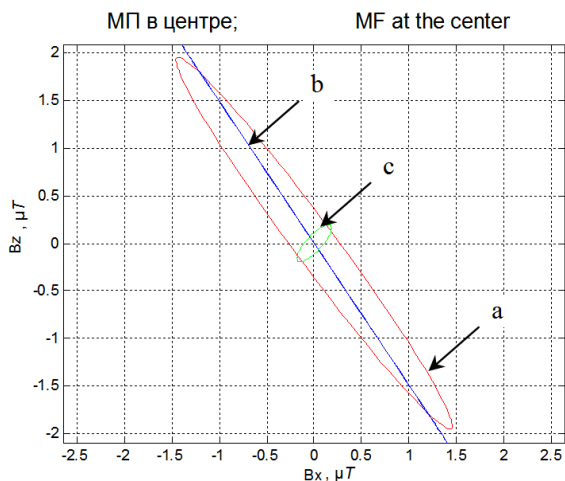


Рис.9. Расчетные пространственно-временные характеристики а) - исходного магнитного поля, б) - генерируемой компенсационной обмотки и с) - результирующего магнитного поля при включенной системе активного экранирования. ⁹

VII. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим теперь экспериментальные исследования синтезированного оптимального пространственного расположения и углового положения датчиков МП для системы, обеспечивающего максимальную эффективность активного экранирования МП, создаваемого двухцепной линии электропередачи с подвеской проводов типа «Бочка» в пятиэтажном жилом доме.

Для проведения экспериментальных исследований разработана модель двухцепной линии электропередачи с подвесом типа «Бочка», а также разработана модель двухконтурной системы активного экранирования

с двумя компенсирующими обмотками, фото которой показано на рис. 10.

Для управления токами в компенсационных обмотках и реализации регуляторов разработана аппаратная часть системы активного экранирования, фото которой показано на рис. 11.

Для реализации замкнутого алгоритма управления двумя компенсирующими обмотками используются два датчика МП, с помощью которых измеряется результирующее МП.

Датчики установлены на штативах, как это показано на рис. 12, с помощью которых можно устанавливать необходимые углы позиционирования датчиков МП. Рядом с этими двумя датчиками магнитного поля, фото которых показано на рис. 12, установлен третий датчик, с помощью которого измеряется пространственно-временная характеристика результирующего МП.

Датчики МП установлены таким образом, чтобы на их выходах было минимальное напряжение при работе только одной компенсирующей обмотки другого канала.



Рис.10. Две компенсационные обмотки модели двухконтурной системы активного экранирования. ¹⁰



Рис. 11. Аппаратная часть двухконтурной системы активного экранирования. ¹¹

При этом угловые положения датчиков равны соответственно 222 градусам и 187 градусам.



Рис.12. Датчики магнитного поля.¹²

На рис.13 показана экспериментальная поверхность распределения фактора экранирования.

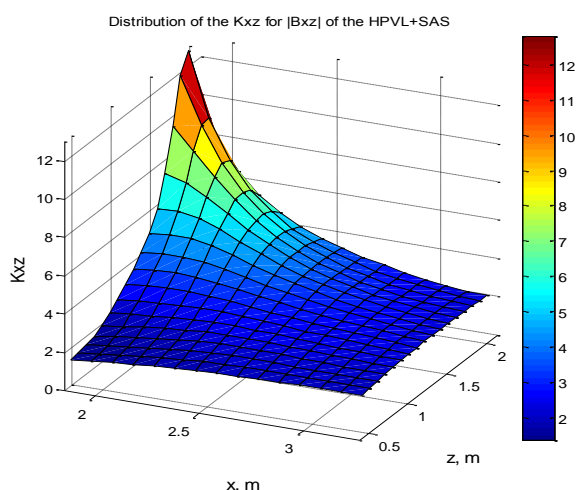


Рис. 13. Экспериментальная поверхность распределения фактора экранирования.¹³

Экспериментальный коэффициент экранирования превышает 12. При такой установке датчиков магнитного поля каждый канал наиболее эффективно подавляет индукцию исходного МП в плоскости, ортогональной плоскости, в которой другой канал генерирует МП. Поэтому каналы при совместной работе оказывают минимальное влияние друг на друга.

Рассмотрим теперь экспериментальное исследование синтезированной САЭ МП, генерируемого ЛЭП с треугольным подвесом проводов. Для проведения натуральных экспериментальных исследований эффективности разработанного метода синтеза пространственного расположения датчиков МП разработана САЭ с двумя компенсирующими обмотками. На рис. 14 показано пространственное расположение этих двух компенса-

ционных обмоток и провода ЛЭП с треугольным подвесом проводов.



Рис. 14. Пространственное расположение двух компенсирующих обмоток и ЛЭП.¹⁴

Для реализации замкнутого алгоритма управления двумя компенсирующими обмотками используются два датчика МП, с помощью которых измеряется результирующее МП. Датчики установлены на штативах, как это показано на рис. 15, с помощью которых можно устанавливать необходимые углы позиционирования датчиков МП.



Рис. 15. Датчик магнитного поля для замкнутого контура управления САЭ.¹⁵

Для реализации разомкнутого контура управления САЭ датчик МП для измерения исходного МП установлен на значительном расстоянии от области экранирования, как это показано на рис. 16.



Рис. 16. Датчик магнитного поля для разомкнутого контура управления САЭ.¹⁶

Рассмотрим теперь экспериментальное исследование синтезированной САЭ МП, генерируемого группой ЛЭП.

Для проведения натурных экспериментальных исследований эффективности разработанного метода синтеза пространственного расположения датчиков МП разработана САЭ с одной компенсационной обмоткой.

На рис. 17 показано пространственное расположение компенсационной обмотки этой системы. Для реализации замкнутого управления с обратной связью по результирующему МП используется датчик МП. На рис. 17 показан такой датчик МП, который расположен внутри пространства для экранирования.



Рис. 17. Пространственное расположение компенсационной обмотки и датчика магнитного поля.¹⁷

Этот датчик измеряет результирующее МП внутри пространства экранирования и обеспечивает обратную связь по уровню результирующего МП внутри пространства экранирования.

Для реализации разомкнутого управления по исходному МП используется датчик МП, установленный на значительном удалении от зоны экранирования, как это показано на рис. 18. С помощью этого датчика измеряется индукция исходного МП и реализуется разомкнутый контур управления САЭ.

На рис. 19 показано сравнение уровней индукции магнитного поля между экспериментальными измерениями и моделированием с САЭ и без нее. Экспериментально измеренный коэффициент экранирования САЭ составляет более 4 единиц. Уровень индукции во всем пространстве экранирования не превышает предельно допустимого значения в 0,5 мкТл для длительного безопасного проживания населения.

Заметим, что в результате синтеза пространственного положения датчика, с помощью которого измеряется результирующее

МП, в ходе экспериментальной наладки САЭ пространственное положение этого датчика соответствовало точке пространства экранирования, в которой уровень индукции результирующего МП принимает минимальное значение. При таком расположении датчика результирующего МП с помощью замкнутого контура регулирования комбинированной САЭ обеспечивается наибольшая эффективность компенсации исходного МП.



Рис. 18. Датчик магнитного поля для разомкнутого контура управления САЭ.¹⁸

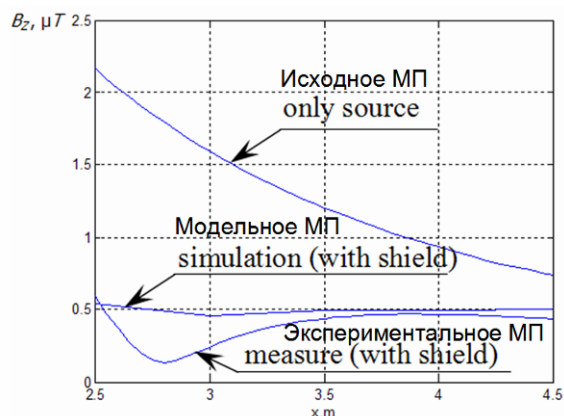


Рис. 19. Сравнение индукции магнитного поля между измерениями и моделированием с САЭ и без нее.¹⁹

Угловое положение датчика, с помощью которого измеряется результирующее МП, соответствовало направлению большей полуоси эллипса пространственно-временной характеристики исходного МП. При таком угловом положении датчика МП с помощью одноконтурной САЭ, содержащей одну компенсационную обмотку, компенсируется большая полуось пространственно-временной характеристики исходного МП. При этом реализуется наибольшее значение коэффициента экранирования исходного МП с помощью синтезированной одноконтурной САЭ с одной компенсационной обмоткой.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Целью работы является разработка метода синтеза пространственного расположения и углового положения датчиков МП для обеспечения максимальной эффективности робастной САЭ МП, генерируемого различными воздушными ЛЭП, и снижения чувствительности синтезируемой системы к исходным неопределенностям и изменениям параметров системы в процессе работы.

2. На основе разработанного метода синтез пространственного расположения и углового положения датчиков МП сводится к решению векторной минимаксной задачи оптимизации на основе бинарных отношений предпочтения. Вектор целевой функции задачи минимаксной оптимизации и ограничений вычисляется на основе закона Био–Савара. Решение задачи минимаксной оптимизации вычисляется на основе стохастических нелинейных алгоритмов Архимеда.

3. На основе разработанного метода выполнен синтез пространственного расположения и угловых положений датчиков МП, а также токов в компенсирующих обмотках САЭ МП, генерируемого различными воздушными ЛЭП.

4. На основе проведенных экспериментальных исследований подтверждена высокая эффективность синтезированного пространственного расположения и углового положения датчиков МП САЭ МП, генерируемого различными воздушными ЛЭП, а также низкая чувствительность синтезируемой системы к исходным неопределенностям и изменениям параметров системы в процессе работы. Экспериментально показано, что с помощью синтезированного пространственного расположения и углового положения датчиков МП в САЭ МП возможно снизить уровень исходного МП до безопасного для населения уровня МП с индукцией в 0,5 мкТл.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Residential building located near a double-circuit power line.

²Fig. 2. Residential building located near a single-circuit power line.

³Fig. 3. Residential building located near a single-circuit power line.

⁴Fig. 4. Spatial arrangement of power lines and a five-story residential building.

⁵Fig. 5. Spatiotemporal characteristics of the magnetic field.

⁶Fig. 6. Spatial arrangement of a single-circuit power line and a five-story building.

⁷Fig. 7. Spatiotemporal characteristics of the magnetic field.

⁸Fig. 8. Layout diagram of a group of overhead power lines and a one-story building.

⁹Fig. 9. Calculated space-time characteristics of a) - the original magnetic field, b) - the generated compensation winding and c) - the resulting magnetic field with the active shielding system turned on.

¹⁰Fig. 10. Two compensation windings of a dual-circuit active shielding system model.

¹¹Fig. 11. Hardware part of a dual-circuit active shielding system.

¹²Fig. 12. Magnetic field sensors.

¹³Fig. 13. Experimental shielding factor distribution surface.

¹⁴Fig. 14. Spatial arrangement of two compensation windings and power lines.

¹⁵Fig. 15. Magnetic field sensor for closed-loop control of the active shielding system.

¹⁶Fig. 16. Magnetic field sensor for open-loop the active shielding system control.

¹⁷Fig. 17. Spatial arrangement of the compensation winding and magnetic field sensor.

¹⁸Fig. 18. Magnetic field sensor for open-loop the active shielding system control.

¹⁹Fig. 19. Comparison of magnetic flux density between measurements and simulations with and without system of active shielding

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 10.11.2023).*
- [2] *Global Cancer Statistics: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. Enhanced Reader (2020). (accessed 28-09-2023).*
- [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 10.11.2023).*
- [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: 10.52549/ijeei.v10i2.3572. (accessed 10.11.2023).
- [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: 10.3233/jae-172286. (accessed 10.11.2023).
- [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 10.11.2023).
- [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] O.A. Sushchenko, Y.M. Bezkorovainyi, and V.O. Golitsyn, “Processing of redundant information in airborne electronic systems by means of neural networks,” in *Proc. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO*, Kyiv, Ukraine, April 16–18, 2019, pp. 652–655.
- [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 10.11.2023).
- [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: 10.1007/978-981-19-2211-4_26. (accessed 10.11.2023).
- [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: 10.1007/978-981-19-2211-4_6. (accessed 10.11.2023).
- [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: 10.32620/reks.2021.4.16. (accessed 10.11.2023).
- [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: 10.24425/ijet.2022.139852. (accessed 10.11.2023).
- [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: 10.37936/ecti-eec.2022202.246878. (accessed 10.11.2023).
- [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 multiobjective design optimization. *Engineering Optimization*, 2002, vol. 34, no. 2, pp. 141–153. doi: 10.1080/03052150210915. (accessed 10.11.2023).
- [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: 10.1109/sis.2003.1202267. (accessed 10.11.2023).
- [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: 10.32620/reks.2022.1.14. (accessed 10.11.2023).

- [24] O.A. Sushchenko, Y.N. Bezkorovainyi, and N.D. Novytska, “Theoretical and experimental assessments of accuracy of nonorthogonal MEMS sensor arrays,” *Eastern European Journal*, vol. 3, no. 9 (93), pp. 40–49, 2018.
- [25] O.A. Sushchenko, Y.N. Bezkorovainyi, and N.D. Novytska, “Nonorthogonal redundant

configurations of inertial sensors,” in *Proc. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD*, Kyiv, Ukraine, October 17 – 19, 2017, pp. 73–78.

- [26] 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: 10.1007/s10489-020-01893-z. (accessed 10.11.2023).

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: системы активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты. ORCID: 0000-0002-1100-095X E-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com



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



Бовдуй Игорь Валентинович, кандидат технических наук, с.и., область научных интересов: синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты. ORCID: 0000-0003-3508-9781 E-mail: ibovduj@gmail.com



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



Коломиец Валерий Витальевич, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов: моделирование электромагнитных процессов. ORCID: 0000-0002-9073-5793 E-mail: nnppiupa@ukr.net



Кобылянский Борис Борисович, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов: синтез систем автоматического управления. ORCID: 0000-0003-3226-5997 E-mail: b.b.kobiliansky@gmail.com