

Active Shielding of Power Frequency Magnetic Field in Buildings in the Vicinity of the Electric Airlines

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V.

State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine»
Kharkiv, Ukraine

Abstract. The purpose of the work is the development of the method for the synthesis of a robust feed-forward active shielding system of the magnetic field, generated by high voltage power lines for reducing the initial magnetic field induction to the sanitary standards level and decreasing the system sensitivity to the plant parameters' variations. This work is devoted to the solution of a multicriterion stochastic game, in which the vector payoff is calculated based on the Maxwell equations solutions in the quasi-stationary approximation. The multicriterion game solution depends on the multiswarm particles optimization algorithms. The initial parameters for the synthesis of the active shielding system are the location of the high voltage power lines with respect to the protected from transmission line space, geometry and number of buses, operating currents, as well as the size of the protected space and magnetic field induction normative value. The aim is achieved by determination of the number, configuration, spatial arrangement, and currents in compensation coils, setting algorithm of the robust feed-forward active shielding system of the magnetic field, as well as the resulting value of the induction magnetic field at the points of the protected space. New scientific results of the theoretical and field experimental researches of the effectiveness of a single circuit active shielding system with a single compensation coil are carried out. The possibility of reduction of the initial magnetic field induction level is obtained. It is shown that the experimental and calculated magnetic field induction values differ up to 20 %.

Keywords: high voltage power lines, magnetic field, robust active screening system, theoretical and field experimental research.

DOI: 10.5281/zenodo.3239130

Ecranare activă a câmpului magnetic de frecvență industrială în spațiile rezidențiale situate în apropierea liniilor electrice aeriene

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovduy I.V.

Institutul de Stat "Institutul de Probleme Tehnice de Magnetism al Academiei Naționale de Științe a Ucrainei"
Kharkov, Ucraina

Rezumat. Scopul este de a dezvolta o metodă de sinteză a sistemului combinat robust de ecranare activă a câmpului magnetic generat de linii electrice de înaltă tensiune pentru a reduce sursa de inducție câmpului magnetic în spațiile locative la standarde sanitare și pentru a reduce sensibilitatea sistemului la modificări ale parametrilor de sistem. Lucrarea este dedicată rezolvării unui joc stochastic multicriterial, în care câștigul vectorial se calculează pe baza soluțiilor ecuațiilor Maxwell în aproximarea cvasiistă. Soluția unui joc cu mai multe criterii se bazează pe algoritmi de optimizare pentru soluții optice Pareto cu mai multe particule, cu posibilitate pentru relații de preferință binare. Parametrii de intrare pentru sinteza sistemului de ecranare activă sunt amplasarea liniilor electrice de înaltă tensiune în ceea ce privește spațiul protejat, dimensiunile geometrice, numărul de fire și curenții de funcționare a liniei, precum și dimensiunile spațiului protejat și valoarea standard a câmpului magnetic, care ar trebui realizată ca rezultat al ecranării. Scopul este atins prin determinarea cantității, configurația și dispunerea spațială a curenților înfășurării compensării, algoritmul de funcționare a sistemului combinat robust de ecranare activă a câmpului magnetic precum și prin calculul valorilor inducției rezultante a câmpului magnetic în spațiul ecranat. Noile rezultate științifice sunt studii teoretice și experimentale ale unui sistem sintetizat cu un singur circuit pentru ecranarea activă a câmpului magnetic creat de un grup de linii electrice de înaltă tensiune în zona de ecranare. Recomandări practice sunt date în selectarea rezonabilă a numărului și dispunerea spațială a înfășurării compensatoare a sistemului robust de ecranare activă a câmpului magnetic.

Cuvinte-cheie: linii electrice de înaltă tensiune, câmp magnetic, sistem robust de ecranare activă, studii experimentale și teoretice.

**Активное экранирование магнитного поля промышленной частоты в жилых помещениях,
расположенных вблизи воздушных линий электропередачи
Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В.**

Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма НАН Украины»
Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является разработка метода синтеза робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого высоковольтными линиями электропередачи для снижения индукции исходного магнитного поля в жилых помещениях до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Работа посвящена решению многокритериальной стохастической игры, в которой векторный выигрыш вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Решение многокритериальной игры находится на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из Парето оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. Исходными параметрами для синтеза системы активного экранирования являются расположение высоковольтных линий электропередачи по отношению к защищаемому пространству, геометрические размеры, количество проводов и рабочие токи линии электропередачи, а также размеры защищаемого пространства и нормативное значение индукции магнитного поля, которое должно быть достигнуто в результате экранирования. Поставленная цель достигается определением количества, конфигурации, пространственного расположения и токов компенсационных обмоток, алгоритма работы робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, а также расчетом значений индукции результирующего магнитного поля в точках пространства экранирования. Новыми научными результатами являются теоретические и полевые экспериментальные исследования синтезированной одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой высоковольтных линиями электропередач в зоне экранирования. Приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору количества и пространственного расположения компенсирующих обмоток робастных систем активного экранирования магнитного поля, создаваемого высоковольтными линиями электропередачи, с учетом пространственно временной характеристики магнитного поля. Показана возможность существенного снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм. Установлено, что экспериментальные и расчетные значения индукции магнитного поля в зоне экранирования различаются не более чем на 20 %.

Ключевые слова: высоковольтные линии электропередачи, магнитное поле, робастная система активного экранирования, теоретические и полевые экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее опасным для населения источником магнитного поля (МП) промышленной частоты (50–60 Гц) являются высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП). Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в рамках международного проекта по электромагнитному полю [1] подтверждает высокий риск развития раковых заболеваний у населения, проживающего вблизи ЛЭП. Это исследование ВОЗ обуславливает современную мировую тенденцию по ужесточению санитарных норм уровня индукции МП промышленной частоты. В настоящее время в нормативные документы Министерства энергетики Украины введены санитарные нормы по индукции МП промышленной частоты на уровне 0.5 мкТл для жилых помещений [2], что соответствует современным мировым стандартам. Однако, в Украине эти нормы повсеместно нарушаются, что создает угрозу для здоровья миллионов людей, проживающих на расстоянии менее 100 метров от высоковольтных ЛЭП. Государственное учреждение «Инсти-

тут технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины» провело экспериментальные исследования МП, генерируемого ЛЭП с напряжением 10–330 кВ [3]. В результатах экспериментальных исследований показано, что на границе ранее сформированных санитарных зон по уровню электрического поля, МП превышает нормативный уровень в 3–5 раз. Поэтому в городах Украины требуются срочные меры по снижению уровня МП от существующих ЛЭП в 3–5 раз.

Аналогичная ситуация характерна и для большинства промышленно развитых стран мира, однако в этих странах технологии нормализации МП для существующих ЛЭП уже созданы и широко используются [4–14].

Наиболее эффективной технологией является реконструкция линий электропередачи путем ее удаления на безопасное расстояние от жилых зданий или замена воздушной ЛЭП кабельной линией. Однако, такая реконструкция требует огромных материальных ресурсов. Поэтому для Украины более приемлемыми и экономически обоснованным

является экранирование МП существующих ЛЭП методами активного контурного экранирования МП, которые обеспечивают необходимую эффективность.

Технология активного контурного экранирования МП существующих ЛЭП разрабатывается и применяется в развитых странах мира более 10 лет, например, в США и Израиле [4, 7]. Однако, в Украине данная технология и научная основа для ее создания в настоящее время отсутствуют. Поэтому создание науч-

ных основ отечественной технологии активного экранирования МП промышленной частоты в жилых помещениях является актуальной научно-технической проблемой.

Целью данной работы является разработка метода синтеза систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, генерируемого воздушными линиями электропередачи, позволяющего снизить уровень магнитного поля до санитарных норм.

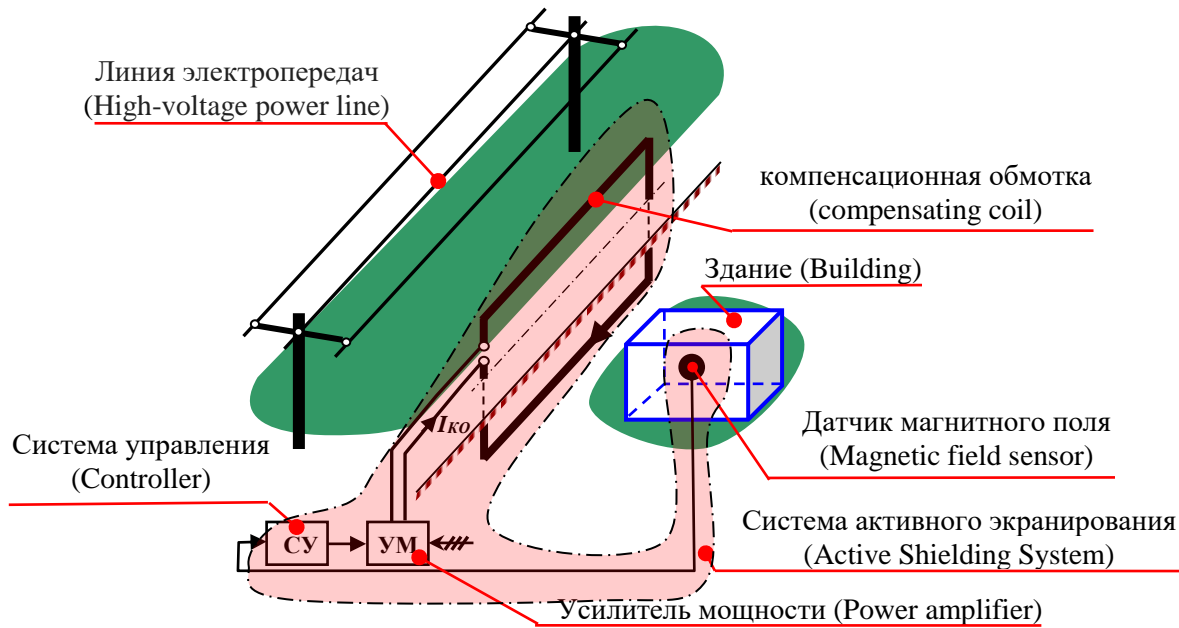


Рис. 1. Система активного экранирования.¹

I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Суть метода активного экранирования МП ЛЭП состоит в том, чтобы сформировать компенсирующее МП с такой пространственно-временной характеристикой (ПВХ) МП, суперпозиция которого с исходным МП в защищаемой зоне позволяет уменьшить МП до уровня санитарных норм. Метод реализуется с использованием системы активного экранирования (САЭ), схема которой показана на рис. 1. САЭ состоит из компенсирующих обмоток (КО), с помощью которых формируется компенсирующее МП. Токи в КО автоматически формируются по определенному алгоритму как функция сигналов от датчиков МП, установленных в зоне экранирования. Для питания САЭ используется внешний источник.

В настоящее время наиболее широко используются одноконтурные САЭ с одной

КО [4]. Для повышения эффективности САЭ используются две, три, шесть, двадцать четыре и более КО [11]. Для управления этими КО используется различное количество датчиков МП – один, два, три, шесть, двадцать четыре или более. Количество датчиков МП обычно равно количеству КО или количеству пар КО. В частности, при шести КО типа колец Гельмгольца можно использовать три датчика МП, расположенных в центре области экранирования МП, ориентированных ортогонально относительно управляемых КО [12]. Для обоснования количества и пространственного расположения КО, необходимо знать ПВХ исходного МП, генерируемого ЛЭП, в зоне экранирования. Кроме того, исходными параметрами для синтеза САЭ являются также расположение ЛЭП относительно зоны экранирования, геометрия и количество проводов ЛЭП, рабочие токи, а также размер зоны экранирования и норматив-

¹ Appendix 1

ное значение уровня индукция МП, который должен быть достигнут в результате экранирования.

Целью синтеза САЭ является определение количества, конфигурации и пространственного расположения КО, схем подключения и токов КО, алгоритма управления САЭ, а также результирующее значение индукции МП в зоне экранирования.

II. МЕТОД СИНТЕЗА

Математическая модель МП, генерируемого группой ЛЭП на основании квазистационарного решения уравнения Максвелла [15–20], может быть представлена [21–23] в следующем виде

$$\vec{B}_o(P_i, t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \vec{B}_{lk}(P_i, I_{lk}(t)), \quad (1)$$

где: $\vec{B}_o(P_i, t)$, $\vec{B}_{lk}(P_i, I_{lk}(t))$ – мгновенные значения векторов индукции результирующего МП, генерируемого группой ЛЭП в рассматриваемой точке P_i , и магнитного поля, создаваемого в той же P_i рассматриваемой точке k –тым проводом lk –той ЛЭП.

Где K – количество ЛЭП в группе, L_k количество проводов в lk –той ЛЭП, $I_{lk}(t)$ – мгновенное значение тока в k –том проводе lk –той ЛЭП.

Рассмотрим постановку задачи синтеза САЭ.

Введем векторы искомым геометрических параметров координат пространственного расположения КО

$$\vec{X} = \{x_i\} \vec{Y} = \{y_i\} \quad (2)$$

Рассмотрим синтез комбинированной САЭ, в которой одновременно используются разомкнутые и замкнутые контуры управления.

Введем вектор искомым параметров регуляторов

$$\Theta = \{A_c, B_c, C_c, D_c, \vec{A}, \vec{\varphi}\} \quad (3)$$

компонентами которого являются A_c, B_c, C_c и D_c – матрицы состояния, управления, выхода и выхода по управлению замкнутого контура

управления, и $\vec{A}, \vec{\varphi}$ векторы коэффициентов усиления и сдвигов фаз разомкнутого контура управления.

Тогда модель результирующего МП, генерируемого M КО с током $I_{ym}(t)$ в точке P_i рассматриваемого пространства экранирования на основании квазистационарного решения уравнения Максвелла [21], может быть представлена в следующем виде

$$\vec{B}_y(P_i, \vec{X}, \vec{Y}, \Theta, t) = \sum_{m=1}^M \vec{B}_{ym}(P_i, \vec{X}, \vec{Y}, \Theta, I_{ym}(t)) \quad (4)$$

Введем вектор X искомым параметров САЭ, включающий векторы (2)–(3) в следующей форме

$$X = \{A_c, B_c, C_c, D_c, \vec{A}, \vec{\varphi}, \vec{X}, \vec{Y}\} \quad (5)$$

Тогда результирующее МП, генерируемое группой ЛЭП (1) и M КО (4), может быть представлено в следующем виде

$$\vec{B}(X, P_i, t) = \vec{B}_o(P_i, t) + \vec{B}_y(X, P_i, t) \quad (6)$$

Тогда задача синтеза САЭ МП, генерируемой группой ЛЭП в зоне экранирования, может быть сформулирована [24–25] в виде следующей многокритериальной задачи оптимизации с векторным критерием

$$B(X) = [B(X, P_1), B(X, P_2), \dots, B(X, P_m)]^T, \quad (7)$$

в котором компонентами $B(X, P_i)$ являются эффективные значения модуля вектора индукции МП (4) в m точках P_i рассматриваемого пространства экранирования.

При синтезе САЭ математическая модель (1) исходного МП известна неточно [10]. В частности, токи в проводах $I_{lk}(t)$ известны приблизительно и имеют ежедневные, еженедельные, сезонные колебания Геометрические размеры КО (2) и параметры регуляторов (3) реализуются приближенно. Поэтому, введем вектор параметров неопределенностей объекта управления (1) САЭ δ , компонентами которого являются отклонения реальных параметров объекта управления (1) САЭ от их номинальных значений, используемых при синтезе.

Тогда задача синтеза такой робастной САЭ сводится к определению такого вектора пространственного расположения и геометрических размеров КО, а также параметров регулятора X и вектора параметров неопределенностей объекта управления δ , при которых максимальное значение индукции магнитного поля в рассматриваемых m точках P_i пространства экранирования P принимает минимальное значение по вектору параметров регулятора X , но максимальное значение по вектору параметров неопределенностей объекта управления системы δ так, что

$$X^* = \arg \min_{X \in X} \max_{\delta \in \Delta} \max_{P_i \in P} B(X, \delta, P_i) \quad (8)$$

Такой подход соответствует стандартному подходу к синтезу робастных систем для наихудшего случая (worst-case) [10], при котором изменение вектора параметров неопределенностей объекта управления системы δ приводит к наибольшему ухудшению компенсации исходного МП, генерируемого группой ЛЭП. Задача (8) может быть сформулирована в виде следующей многокритериальной игры [26–27] с векторным выигрышем

$$B(X, \delta) = [B(X, \delta, P_1), B(X, \delta, P_2), \dots, \dots B(X, \delta, P_m)]^T, \quad (9)$$

компонентами которого $B(X, \delta, P_i)$ являются модули вектора индукции МП в m точках P_i рассматриваемого пространства экранирования.

В многокритериальной игре (9) первым игроком является вектор параметров регулятора X , и его стратегией является минимизация вектора выигрыша (9), а вторым игроком является вектор параметров неопределенностей объекта управления системы δ и стратегией этого игрока является максимизация того же вектора выигрыша (9) [27].

Естественно, что при этом необходимо учитывать ограничения на вектора стратегии первого X и второго δ игроков в виде векторного неравенства

$$G(X, \delta) \leq G_{\max} \quad (10)$$

Заметим, что компонентами векторного выигрыша (9) и ограничений (10) являются нелинейные функции векторов стратегий первого X и второго δ игроков, которые рассчитываются на основе решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении [21–22].

III. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим нахождение решения многокритериальной игры (9) с ограничениями (10) из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтений [27] на основе алгоритма оптимизации мультироем частиц (PSO) [28–31], в котором количество роев m равно числу компонент векторного выигрыша (9). В стандартном алгоритме оптимизации роем частиц изменение скоростей частиц обычно осуществляется по линейным законам [32–42]. Для повышения скорости нахождения глобального решения используется нелинейный алгоритм оптимизации мультироем частиц, предложенный в [43], в котором движение i -той частицы j -того роя описывается следующими выражениями

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

$$\begin{aligned} u_{ij}(t+1) = & w_{2j}u_{ij}(t) + c_{3j}r_{3j}(t) H * \dots \\ & \dots * (p_{3ij}(t) - \varepsilon_{3ij}(t)) [z_{ij}(t) - \delta_{ij}(t)] + \dots \\ & \dots + c_{4j}r_{4j}(t) H(p_{4ij}(t) - \varepsilon_{4ij}(t)) * \dots \\ & \dots * [z_j^*(t) - \delta_{ij}(t)] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} x_{ij}(t+1) = & x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \\ \delta_{ij}(t+1) = & \delta_{ij}(t) + u_{ij}(t+1), \end{aligned} \quad (13)$$

где $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ положение и $v_{ij}(t)$, $u_{ij}(t)$ скорость i -той частицы j -того роя.

Заметим, что в связи с тем, что решением многокритериальной игры (9) являются два вектора стратегий X первого и δ второго игроков, каждая i -тая частица j -того роя имеет две составляющие положения $x_{ij}(t)$,

$\delta_{ij}(t)$ и две составляющие скорости $v_{ij}(t)$, $u_{ij}(t)$, для нахождения двух векторов стратегий первого и второго игроков.

В (11)–(13) $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ и y_j^* , z_j^* – наилучшие локальное и глобальное положения i -той частицы, найденные соответственно только одной i -той частицей и всеми i -тыми частицами j -того роя. Причем, лучшие компоненты локального $y_{ij}(t)$ и глобального $y_j^*(t)$ положения i -той частицы j -того роя понимаются в смысле стратегии первого игрока $x_{ij}(t)$ по минимизации компонент $B(X, \delta, P_j)$ векторного выигрыша (9). Однако при этом лучшие компоненты локального $z_{ij}(t)$ и глобального z_j^* положения этой же i -той частицы j -того роя понимаются в смысле стратегии второго игрока $\delta_{ij}(t)$ по максимизации тех же компонент $B(X, \delta, P_j)$ векторного выигрыша (9).

Такой подход соответствует движению частиц вдоль градиента и антиградиента при использовании детерминированных алгоритмов решения игр [24].

Четыре независимых случайных числа $r_{1j}(t)$, $r_{2j}(t)$, $r_{3j}(t)$, $r_{4j}(t)$ находятся в диапазоне $[0,1.0]$ и определяют стохастические составляющие компонент скоростей движения частиц.

Положительные константы c_{1j} , c_{2j} и c_{3j} , c_{4j} определяют когнитивные и социальные веса компонент скоростей частиц. Заметим, что особенностью решения этой игры является то, что компонентами вектора стратегии первого игрока $x_{ij}(t)$ являются геометрические размеры КО, которые измеряются в метрах, параметры регуляторов разомкнутых (без обратных связей) контуров управления – \bar{A} , $\bar{\varphi}$ – векторы коэффициентов усиления \bar{A} , которые измеряются в ампер-витках КО, и векторы фазовых сдвигов $\bar{\varphi}$, которые измеряются в радианах, параметры регуляторов замкнутых (с обратной связью) контуров управления – A_c , B_c , C_c и D_c – коэффициенты матриц состояния, управления, выхода и выхода по управлению, которые измеряются в безразмерных величинах. Поэтому, значения

этих констант константы c_{1j} , c_{2j} и c_{3j} , c_{4j} выбираются с учетом диапазона возможных изменений стратегий игроков X и δ .

Особенностью решения этой многокритериальной игры (9) с ограничениями (10) является наличие «оврагов» и «гребней» в векторном выигрыше (9). Это связано, во-первых, с тем, что значения компонент стратегий игроков X и δ отличаются более чем на порядок. Во-вторых, изменение некоторых составляющих стратегий игроков, в частности, коэффициентов усиления регуляторов замкнутых контуров управления, приводит к незначительным изменениям векторного выигрыша игры (9). Поэтому, для улучшения скорости нахождения глобального решения при небольших приращениях векторного выигрыша (9) для определения стратегий игроков $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ в (11)–(12) используется нелинейный алгоритм поиска (Cuckoo Search) [43] стохастической оптимизации мультироем частиц. В качестве нелинейной функции переключения H движения частицы соответственно к локальному $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ и глобальному $y_j^*(t)$, z_j^* оптимумам используется функция Хевисайда [43]. Параметры переключения p_{1ij} , p_{3ij} когнитивной и p_{2ij} , p_{4ij} социальной составляющих компонент скоростей движения частиц к локальному $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ и к глобальному $y_j^*(t)$, z_j^* оптимумам принимались в виде приращений изменений компонент векторного выигрыша (9) для стратегий игроков $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ при движении, соответственно, к локальному и глобальному оптимумам.

Случайные числа $\varepsilon_{1ij}(t)$, $\varepsilon_{2ij}(t)$, $\varepsilon_{3ij}(t)$ и $\varepsilon_{4ij}(t)$ определяют параметры переключения движения частиц, соответственно, к локальному и глобальному оптимумам. Если $p_{1ij} < \varepsilon_{1ij}(t)$ и $p_{2ij} < \varepsilon_{2ij}(t)$, то компонента $v_{ij}(t)$ скорости движения i -той частицы j -того роя на шаге t не изменяется, и эта частица движется в том же направлении, что и на предыдущем шаге оптимизации. Аналогично, если $p_{3ij} < \varepsilon_{3ij}(t)$ и $p_{4ij} < \varepsilon_{4ij}(t)$, то компонента $u_{ij}(t)$ скорости движения i -той

частицы j -го роя на шаге t также не изменяется.

Для повышения качества процесса поиска решения используются коэффициенты инерции w_{1j} , w_{2j} в диапазоне (0,5–0,9).

В качестве ограничений (10) в этой задаче, прежде всего, учитывались ограничения на пространственное расположение КО, которые являются компонентами вектора стратегии $x_{ij}(t)$ первого игрока. Эти ограничения обусловлены техническими возможностями реализации КО. Кроме того, ограничивались коэффициенты усиления замкнутых контуров управления, которые также являются компонентами вектора стратегии $x_{ij}(t)$ первого игрока. Ограничивались также максимальные скорости движения частиц $v_{ij}(t)$, $u_{ij}(t)$ исходя из желаемой точности получения решений соответствующих компонент векторов стратегий X и δ , а также для улучшения сходимости решения игры (9).

Для нахождения глобального оптимума решения многокритериальной игры (9) в ходе поиска локальных оптимальных решений этой игры, отдельные частицы и рои обмениваются информацией между собой. При этом, для расчета скорости частицы одного роя используется информация о глобальном оптимуме, полученном частицами другого роя, что позволяет выделить все возможные Парето-оптимальные решения. Для этого на каждом шаге t движения i -той частицы j -того роя используются функции бинарных отношений предпочтения локальных решений, полученных всеми роями. Решение $X_j^*(t)$, полученное в ходе решения игры $B(X(t), \delta(t), P_j)$ с помощью j -того роя, является более предпочтительным, чем решение $X_k^*(t)$ игры $B(X(t), P_k)$, полученное с помощью k -того роя, если выполняется условие

$$\max_{i=1,m} B(P_i, X_j^*(t), \delta(t)) < \max_{i=1,m} B(P_i, \dots \dots X_k^*(t), \delta(t)) \quad (14)$$

В этом случае в качестве глобального оптимального решения $X_k^*(t)$, полученного k -тым роем используется глобальное решение $X_j^*(t)$, полученное j роем, которое является

более предпочтительным по сравнению с глобальным решением $X_k^*(t)$, полученным k -тым роем на основании бинарного отношения предпочтения (14).

Фактически при таком подходе реализуется основная идея метода последовательного сужения области компромиссных решений – Парето-оптимальных решений из исходного множества возможных решений, основанного на информации об относительной важности локальных решений, которые не могут быть выбранным в соответствии с информацией о бинарных отношениях предпочтения (14). Удаление решений осуществляется до тех пор, пока не будет найдено глобальнооптимальное решение. В результате применения этого подхода потенциально оптимальное решение не будет удалено на каждом этапе сужения.

Заметим, что искусство применения алгоритма оптимизации мультироем частиц (PSO) заключается в обоснованном выборе констант его настроек.

В заключение заметим, что исходная многокритериальная игра (9)–(10), с учетом алгоритма ее решения (11)–(13), является многокритериальной стохастической динамической игрой, поскольку в ней явно есть время и случайный поиск [26].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим результаты синтеза САЭ МП, генерируемого группой ЛЭП. Электрические сети Украины характеризуются высокой плотностью, особенно вблизи высоковольтных подстанций.

Часто ЛЭП проходит в непосредственной близости от жилой застройки.

В этом случае уровень индукции МП, генерируемого группой ЛЭП в зоне жилой застройки, может превышать санитарные нормы [2], что создает угрозу для здоровья населения [1] и требует принятия соответствующих мер для нормализации МП.

На рис. 2 показано расположение группы ЛЭП, генерирующих МП, уровень индукции которых в зоне жилой застройки должен быть уменьшен до санитарных норм.

В непосредственной близости от зоны экранирования находятся две двухцепные ЛЭП 110 кВ, двухцепная ЛЭП 330 кВ и одноцепная ЛЭП 330 кВ.



Рис. 2. Группа высоковольтных линий электропередач.²

Для синтеза САЭ, кроме геометрических размеров и зоны экранирования, необходимы значения токов в проводах ЛЭП. Для определения значений токов в проводах ЛЭП вначале были проведены экспериментальные исследования уровня индукции МП как в зоне экранирования, так и вблизи линий электропередачи. На основании полученных экспериментальных данных решена задача идентификации тока в проводах ЛЭП, при которой сумма квадратов погрешностей измеренных и модельных значений индукции МП в заданных точках зоны экранирования сводится к минимуму.

На рис. 3 (а) показаны изолинии модуля вектора индукции исходного МП, генерируемого группой ЛЭП. Как видно из этого рисунка, уровень индукции исходного МП в рассматриваемом пространстве экранирования составляет 0,9 мкТл, что в 1,8 раза выше санитарных норм для МП в Украине [2].

На основе экспериментальных исследований было установлено, что в зоне экранирования МП, генерируемая группой ЛЭП, имеет ПВХ в виде сильно вытянутого эллипса и, следовательно, исходное МП имеет незначительную поляризацию. Активное экранирование такого МП возможно с использованием одной КО. Заметим, что такие системы одной КО получили наибольшее распространение в мировой практике [4].

На основе модели МП, генерируемого группой ЛЭП, была решена задача синтеза робастной одноконтурной САЭ, содержащей одну КО. Координаты КО в соответствии с обозначениями, показанными на рис. 3 (б), имеют значения (1,0; 3,0) и (4,0; 1,5). Верхняя

ветвь КО расположена на высоте 3,0 м от уровня грунта, а нижняя ветвь расположена на высоте 1,5 м от уровня грунта. Расчетное значение ампер-витков КО составляет $17,2 A \cdot \text{витка}$, а фазовый сдвиг тока КО относительно опорного напряжения составляет $1,4 \text{ рад}$.

На рис. 3 (б) показаны изолинии модуля вектора индукции магнитного поля с включенной синтезированной робастной САЭ. Как видно из рис. 3 (б), при включенной САЭ уровень индукции МП в рассматриваемой зоне экранирования не превышает 0,5 мкТл. На рис. 4 показана ПВХ МП, создаваемого группой ЛЭП (1); КО (2) и результирующее МП с включенной САЭ (3).

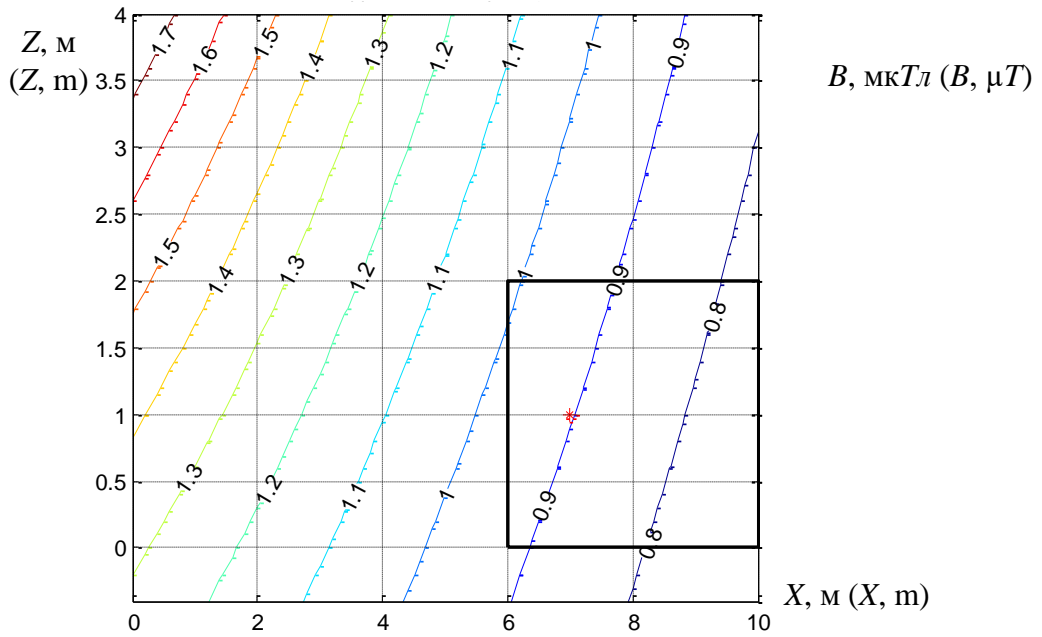
Естественно, что такое исходное МП может быть эффективно компенсировано с использованием одноконтурной САЭ, содержащей одну КО. При одной КО компенсируется большая ось эллипса ПВХ исходного МП, так что ПВХ результирующего МП с включенной САЭ является эллипсом с коэффициентом эллипса 0,8.

В робастной САЭ максимальное значение индукции МП в зоне экранирования не превышает 0,5 мкТл, что соответствует санитарным нормам Украины [2].

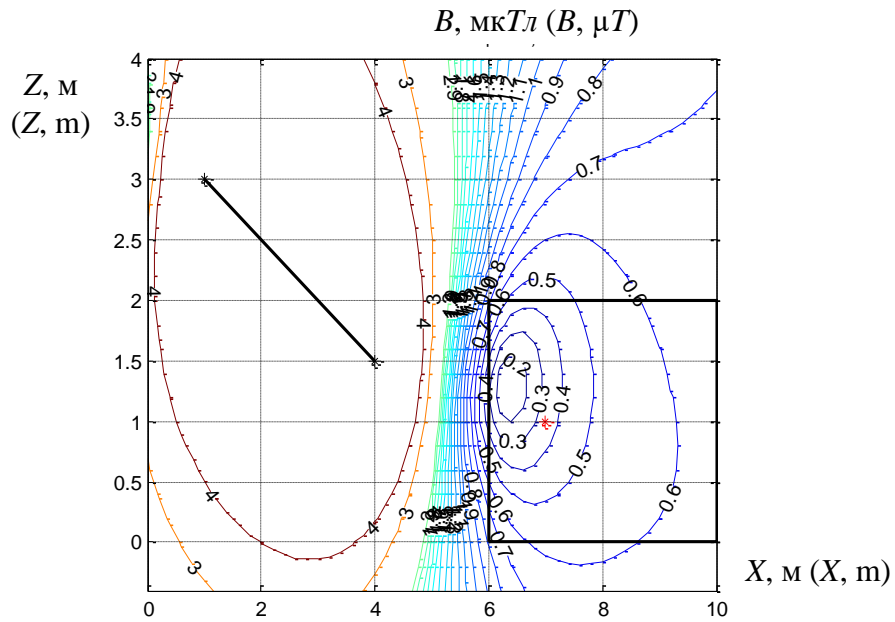
Для наихудшего случая (worst-case) [10], когда вариации вектора параметров неопределенности объекта управления δ приводят к наибольшему ухудшению компенсации исходного МП робастной САЭ, максимальное значение уровня индукции МП в зоне экранирования увеличивается на 10 % по сравнению с робастной САЭ при номинальных значениях параметров неопределенности объекта управления $\delta = 0$.

В исходной оптимальной САЭ с номинальными значениями параметров максимальное значение уровня индукции МП в зоне экранирования составляет 0,4 мкТл, что примерно на 10 % меньше, чем в робастной САЭ.

Однако при изменении вектора параметров неопределенности объекта управления δ для наихудшего случая (worst-case), максимальное значение уровня индукции МП в исходной оптимальной системе увеличивается до 0,6 мкТл.



а)



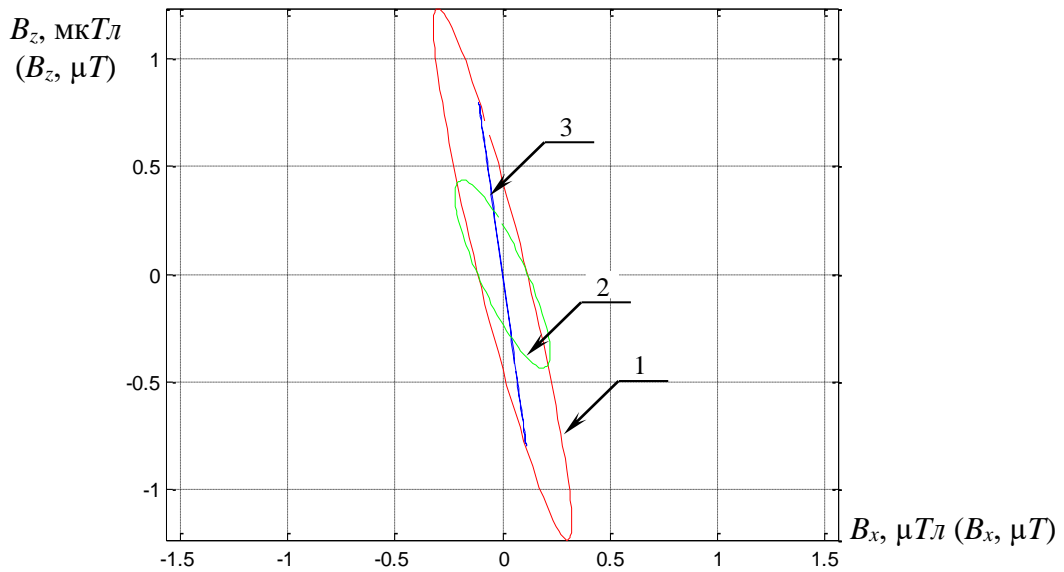
б)

Рис. 3. Изолинии магнитного поля: (а) исходного и (б) с включенной системой активного экранирования.³

Заметим, что положение КО робастной системы, показанной на рис. б, несколько отличается от положения КО оптимальной системы. Кроме того, параметры регуляторов робастной и исходной оптимальной САЭ также существенно не различаются, в результате чего и обеспечивается робастность синтезированной САЭ по сравнению с оптимальной

САЭ. Таким образом, синтезированная робастная САЭ позволяет снизить чувствительность системы к изменениям параметров объекта управления по сравнению с исходной оптимальной САЭ.

³ Appendix 1



(1) начальное магнитное поле, (2) катушка компенсации магнитного поля, (3) результирующее магнитное поле с включенной надежной системой активного экранирования

Рис. 4. Пространственно-временные характеристики магнитного поля.⁴

В заключение заметим, что с помощью одной КО можно компенсировать МП, у которого ПВХ имеет форму сильно вытянутого эллипса. В этом случае с помощью одной КО компенсируется большая полуось эллипса ПВХ МП, за счет чего обеспечивается достаточно высокая эффективность экранирования слабо поляризованного МП. Такие системы могут использоваться для экранирования МП, генерируемого одноконтурным ЛЭП с горизонтальным и вертикальным подвесом проводов, а также для двухконтурных ЛЭП с подвесом проводов типа «бочка», «ёлка» или «перевернутая ёлка». Однако, если ПВХ МП близка к форме окружности, то для компенсации такого МП необходимы по меньшей мере две, три или более КО. В частности, МП с такой ПВХ генерируют одноцепные ЛЭП с подвесом проводов типа «треугольным».

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Как следует из рис. 3(б), КО САЭ представляет собой квадратную обмотку, верхняя ветвь которой расположена на высоте 3,0 м от уровня грунта, а нижняя ветвь расположена на высоте 1,5 м от уровня грунта.

Компенсационная обмотка САЭ содержит 20 витков и питается от усилителя типа TDA7294. На рис. 5 показана фотография КО САЭ. Верхняя левая КО расположена на вы-

соте 3,0 м от уровня грунта, а нижняя правая ветвь КО расположена на высоте 1,5 м от уровня грунта.



Рис. 5. Компенсационная обмотка системы активного экранирования магнитного поля.⁵

На рис. 6 показана фотография САЭ.



Рис. 6. Система активного экранирования магнитного поля.⁶

САЭ содержит внешний регулятор индукции МП и внутренний регулятор тока КО. В качестве датчика индукции МП в САЭ используется индуктивный датчик. Для контроля уровня индукции МП используется магнитометр типа EMF-828 фирмы Lutron.

Рассмотрим результаты полевых экспериментальных исследований САЭ. На рис. 7(а) показано экспериментально измеренное распределение индукции МП, генерируемого группой ЛЭП, и на рис. 7(б) – результирующее распределение индукции МП при включенной САЭ.

Минимальное значение индукции в малой зоне экранирования при включенной САЭ составляет 0,2 мкТл. Исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 0,95 мкТл, а при включенной САЭ уровень МП во всей зоне экранирования не превышает 0,4 мкТл.

Активное сопротивление КО равно 124 Ом. Ток в КО равен 1,5 А. Потеря мощности в КО составляет 279 Вт.

Сравнение результатов распределения индукции МП с включенной САЭ, показанных на рис. 3 (б), с экспериментальными распределениями индукции МП с включенной САЭ, показанными на рис. 7 (б), показало, что они отличаются не более чем на 20 %.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые разработан метод синтеза робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, генерируемого линиями электропередач, для снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм, а также для снижения чувствительности системы к параметрам объекта управления.

2. Синтез робастной комбинированной системы активного экранирования основан на решении многокритериальной стохастической игры с векторным выигрышем, компонентами которого являются значения индукции магнитного поля в точках зоны экранирования.

3. Решение многокритериальной игры находится на основе алгоритма оптимизации мультироем частиц из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. Компоненты векторного выигрыша многокритериальной игры вычисляются на основе решений уравнений

Максвелла в квазистационарном приближении.

4. В результате синтеза одноконтурной системы активного экранирования определено пространственное расположение компенсационной обмотки и параметры регуляторов комбинированной системы, включающей контуры разомкнутого и замкнутого управлений. С помощью синтезированной системы удалось уменьшить индукцию исходного магнитного поля во всей зоне экранирования до уровня санитарных норм Украины и снизить чувствительность системы к изменениям параметров объекта управления по сравнению с известными системами.

5. Проведены полевые экспериментальные исследования эффективности одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой воздушных линий электропередачи. Эффективность системы активного экранирования составляет более 4 единиц. Сравнение результатов экспериментальных и расчетных значений индукции магнитного поля в зоне экранирования показывает, что их отклонения не превышают 20 %.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Active shielding system.

²Fig. 2. Group of high voltage power lines.

Fig. 3. The isolines of the magnetic field: (a) initial and (b) with the robust active screening system is on.

Fig. 4. Space-time characteristics of magnetic field. ((1) initial magnetic field, (2) magnetic field compensation coil, (3) resultant magnetic field with the robust active screening system is on).

⁵Fig. 5. Compensation coil of active screening system of magnetic field.

⁶Fig. 6. Active screening system of magnetic field.

⁷Fig. 7. Experimental research of equal level lines of the: (a) initial magnetic field and (b) resultant magnetic field with the active screening system is on.

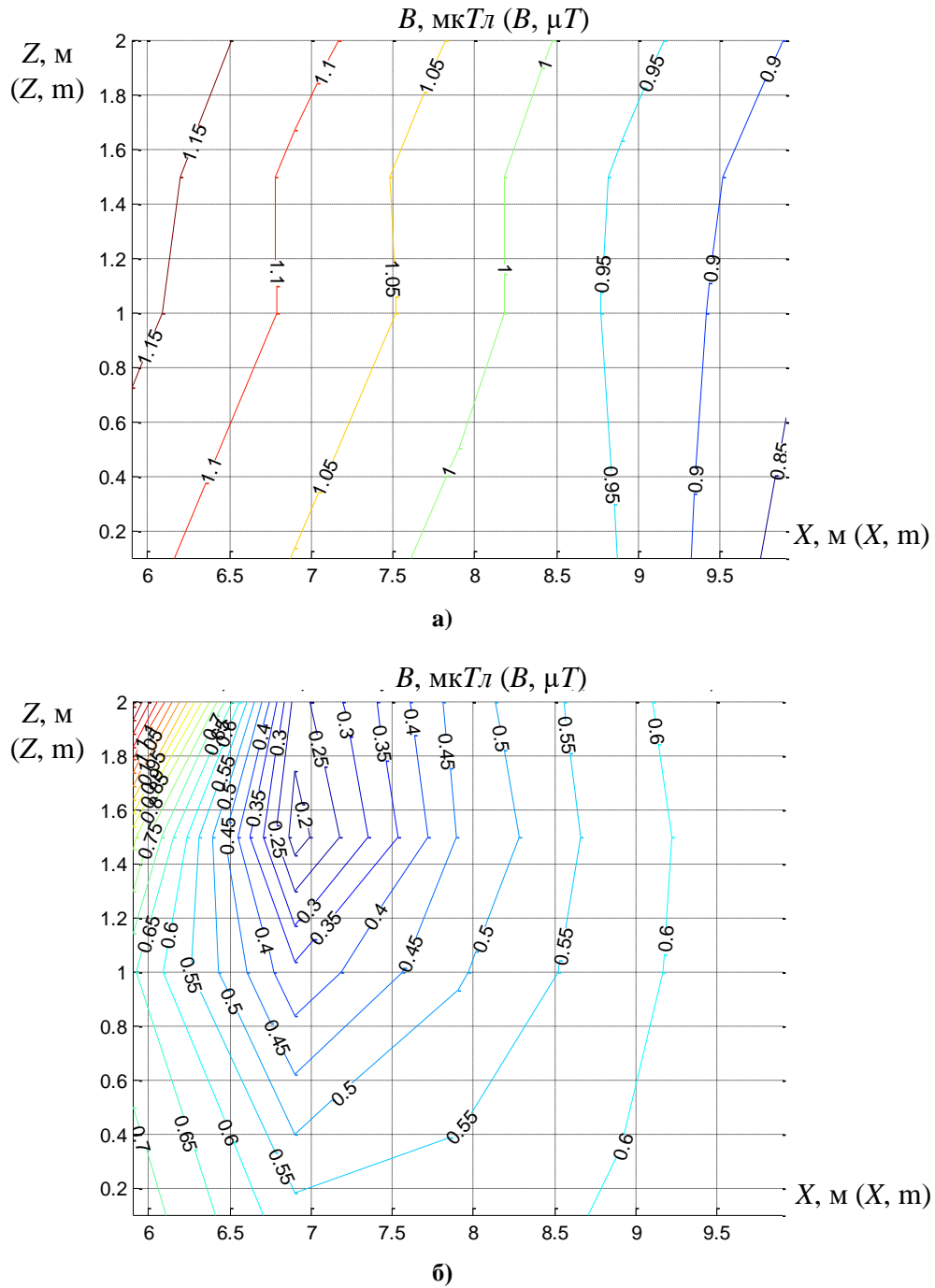


Рис. 7. Экспериментальные исследования уровней индукции: (а) исходного магнитного поля и (б) результирующего магнитного поля с включенной системой активного экранирования магнитного поля.⁷

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

[1] The World Health Organization, “The International EMF Project”. Available at: <http://www.who.int/peh-emf/project/en/>. (accessed 02.04.2019).

[2] Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. – 5-te vid., pererobl. y dopovn. (stanom na 22.08.2014) [Electrical installation regulations, 5th ed., The

Ministry of Energy and Coal Mining of Ukraine] – Kharkiv: Fort, 2014. 800 p. (In Ukrainian).

[3] Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Pylugina O.Yu. Magnitnoe pole liniy elektroperedachi i metodyi ego snizheniya do bezopasnogo urovnya [The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level]. *Tekhnicheskaya elektrodynamika*, 2013. №2. pp. 3–9. (In Russian).

- [4] Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html>. (accessed 02.04.2019)
- [5] Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. *Meas. Sci. Technol.* 1993, no. 4, pp. 1370–1375.
- [6] Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.* Rome, Italy, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2–7.
- [7] Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering.* 2005, vol. 2, no. 2, pp. 254–265.
- [8] Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. *9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9CHLIE)*, Marbella (Málaga). 2005, pp. 84–99.
- [9] Yamazaki K. Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield. *Neurology and Clinical Neurophysiology.* 2004, v. 40, pp. 1–4.
- [10] Schnabel A., Voigt J. Burghoff M., Knappe-Gruneberg S. Magnetic Shielding State of art, new magnetic shielding and active magnetic shielding for low noise applications. Rome, Italy, 2003, v. 51, №5, pp. 137–142.
- [11] Kato, Kazuo, Yamazaki, Keita, Sato, Tomoya, Haga, Akira, Okitsu, Takashi, Muramatsu, Kazuhiro, Ueda, Tomoaki, Yoshizawa, Masahito. Shielding Effect of Panel Type Active Magnetic Compensation. *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials.* 2005, v. 125, pp. 99–106.
- [12] Canova L. Giaccone Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop *Electricity Distribution / CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on Date of Conference. – Part 12009. – Pp. 1–4.*
- [13] Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction' / S. Celozzi // *Proc. IEEE Int. Symp. On Electromagnetic Compatibility, Minneapolis, USA, 2002. – pp. 222–226.*
- [14] Celozzi S. Magnetic field reduction by means of active shielding techniques / S. Celozzi, F. Garzia // *Environmental Risk 2003, WIT Press, Southampton (UK). – 2003. – pp. 64–73.*
- [15] El Dein A.Z. Magnetic-field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases / Adel Z. El Dein // *IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24. – № 4. – pp. 2214–2222.*
- [16] Electromagnetic field tester, with separate probe. Model: EMF-827. Available at: http://www.lutron.com.tw/ugCShowroomItem_Detail.aspx?KindID=1&hidTypeID. (accessed 02.04.2019)
- [17] Fard M.S. Measurement of the magnetic fields of high-voltage substations (230 kV) in Tehran (Iran) and comparison with the ACGIH threshold limit values / M.S. Fard, P. Nasiri, M.R. Monazzam // *Radiation Protection Dosimetry.* 2011. vol. 145. № 4. pp. 421–425.
- [18] Hamza A-S.H. Environmental pollution by magnetic field associated with power transmission lines / A-S.H. Hamza, S.A. Mohmoud, S.M. Ghania // *Energy Conversion and Management.* 2002. vol. 43. pp. 2443–2452.
- [19] Hamza A-S.H. Evaluation and measurement of magnetic field exposure over human body near EHV transmission lines / A-S.H. Hamza // *Electric Power Systems Research.* 2005. vol. 74. pp. 105–118.
- [20] Hasselgren L. Geometrical Aspects of Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies / L. Hasselgren, J. Luomi // *IEEE Transaction on EMC.* 1995. vol. 37. No 3. pp. 409–420.
- [21] Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3.* Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012, 96 p.
- [22] Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Modelirovanie elektromagnitnogo polya v pomescheniyah zhilyih domov, raspolozhennyih vblizi liniy elektroperedachi [Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines]. *Tehnicheskaya elektrodynamika,* 2016, vol. 3, pp. 6–9. (In Russian).
- [23] Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu. Pylugina O.Yu. Metod rascheta magnitnogo polya trehfaznyih liniy elektroperedachi [The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines]. *Tehnicheskaya elektrodynamika,* 2014, vol. 5, pp. 11–13. (In Russian).
- [24] Liu G.P., Yang J.B., Whidborne J.F. *Multiobjective optimisation and control. – Research Studies Press Ltd, 2003. 320 p.*
- [25] Ren Z., Pham M.-T., Koh C. S. Robust Global Optimization of Electromagnetic Devices with Uncertain Design Parameters: Comparison of the Worst Case Optimization Methods and Multiobjective Optimization Approach Using Gradient Index Magnetics *IEEE Transactions.* 2013. №49. pp. 851–859.
- [26] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms / Amsterdam University Press – Amsterdam., 2010. – 174 p.*
- [27] Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and*

- Logical Foundations / Cambridge University Press, 2009. 504 p.
- [28] Clerc. M. Particle Swarm Optimization. London, ISTE Ltd, 2006. 244 p.
- [29] Gazi V. Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. Springer, 2011. 318 p.
- [30] Coello Coello, C.A. and Lechuga, M.S. MOPSO: A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. 2002. vol. 2. pp. 1051–1056.
- [31] Coello Coello, C.A., Pulido, G.T. and Lechuga, M.S. Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization, In IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004. 8(3). pp. 256–279.
- [32] Coello Coello. C. A. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques // Knowledge and Information Systems. – vol.1. № 3. 1999. pp. 269–308.
- [33] Hu, X. and Eberhart, R. Multiobjective Optimization using Dynamic Neighborhood Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2002. pp. 1677–1681.
- [34] Hu, X. and Eberhart, R. (2002) Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the Sixth World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. 2002. pp. 17–27.
- [35] Hu, X., Eberhart, R.C. and Shi, Y. Particle Swarm with Extended Memory for Multiobjective Optimization, In Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium. 2003. pp. 193–197.
- [36] Michalewicz Z., Schoenauer M. Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems. – Evolutionary Computation. 1996. vol.4(1). pp. 1–32.
- [37] Parsopoulos, K.E., and Vrahatis, M.N., Particle Swarm Optimization Method for Constrained Optimization Problems, In Proceedings of the Euro-International Symposium on Computational Intelligence. 2002. pp. 174–181.
- [38] Pulido, G.T., and Coello Coello, C.A., A Constraint-Handling Mechanism for Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. 2004. pp. 137–143.
- [39] Ray, T., Liew, K.M. A swarm metaphor for multiobjective design optimization // Engineering Optimization. 2002. vol. 34. № 2. pp. 141–153.
- [40] Reyes-Sierra, M. and Coello Coello, C.A Multi-Objective Particle Swarm Optimizers a Survey of the State-of-the-Art, In International Journal of Computational Intelligence Research, 2006. vol. 2(3) pp. 287–308.
- [41] Vaz A. I. F., and Fernandes E. M. G. P. Optimization of Nonlinear Constrained Particle Swarm in Technological and economic development of economy Baltic Journal on Sustainability. Vilnius: Technika, 2006. vol. 12(1). pp. 30–36.
- [42] Zilzter Eckart. Evolutionary algorithms for multiobjective optimizations: methods and applications. – Ph. D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 1999. 114 p.
- [43] Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, and Mehmet Karamanoglu., Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications, Elsevier Inc., 2013. 450 p.

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович
Государственное учреждение
«Институт технических
проблем магнетизма НАН
Украины, д.т.н., синтез систем
управления высокой точности.
ORCID: 0000-0002-1100-095X
E-mail:
kuznetsov.boris.i@gmail.com



**Бовдуй Игорь
Валентинович. К.т.н.**
Государственное учреждение
«Институт технических
проблем магнетизма НАН
Украины», синтез систем
управления высокой
точности.
ORCID: 0000-0003-3508-9781
E-mail: ibovduj@gmail.com



**Никитина Татьяна
Борисовна**
Харьковский национальный
автодорожный университет,
д.т.н., синтез систем управ-
ления высокой точности.
ORCID: 0000-0002-0185-3078
E-mail: tatjana55555@gmail.com