

## Hybrid Active-Passive Shielding of Magnetic Field of Overhead Power Lines with Triangular Phase Conductors Arrangements

Kuznetsov B.I., Kutsenko A.S., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Chunikhin K.V.,  
Dobrodeyev P.N.

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

**Abstract.** The aim of the work is to design a robust hybrid active-passive magnetic field shielding system created by overhead power lines with a triangular arrangement of phase wires, designed to increase the shielding efficiency of the initial magnetic field in residential premises to the level of sanitary standards and reduce the system's sensitivity to changes in system parameters. To achieve this goal, the following tasks were solved: the structure of a hybrid system of active-passive shielding was developed, and the synthesis of a system consisting of a double-circuit active and multi-circuit passive parts was performed. The synthesis of the system is reduced to solving a vector game, in which the vector payoff is calculated based on the solutions of the Maxwell equations in the quasi-stationary approximation using the COMSOL Multiphysics software. The solution of a multicriteria game is found on the basis of algorithms for optimizing a multi-swarm of particles from Pareto optimal solutions, taking into account binary preference relations. The most important results are theoretical and experimental studies of the effectiveness of the synthesized hybrid active-passive shielding system for the magnetic field created by overhead power lines with a triangular arrangement of phase wires in the shielding zone. The significance of the results obtained lies in the fact that in the course of designing a hybrid active and multiloop passive screens, the parameters of passive and active screens were calculated; as well as practical recommendations are given on the reasonable choice of the spatial arrangement of a multi-loop passive shield and two shielding windings of a robust system of hybrid shielding of the magnetic field created by overhead power lines with a triangular arrangement of phase wires.

**Keywords:** overhead power lines, triangular arrangement of phase conductors, magnetic field, robust hybrid active-passive shielding system, theoretical and experimental studies.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.01>

UDC: 621.3.013

### Ecranarea hibridă activ-pasivă a câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene cu un aranjament triunghiular de fire de fază

Kuzneţov B.I., Kuţenko A.S., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Ciunihin K.V., Dobrodeev P.N.

Institutul pentru Probleme de Inginerie Mecanică A.N. Podgorny Academia Naţională de Ştiinţe din Ucraina,  
Harkiv, Ucraina

**Rezumat.** Scopul lucrării este de a proiecta un sistem robust hibrid activ-pasiv de ecranare a câmpului magnetic, creat de linii electrice aeriene cu dispunerea triunghiulară a firelor de fază, conceput pentru a creşte eficienţa de ecranare a câmpului magnetic iniţial din spaţiile rezidenţiale până la nivelul sanitar şi reduce sensibilitatea sistemului la modificările parametrilor sistemului. Pentru atingerea acestui scop, au fost rezolvate următoarele sarcini: a fost dezvoltată structura unui sistem hibrid activ-pasiv de ecranare şi a fost realizată sinteza unui sistem format dintr-o parte activă cu două circuite şi partea pasivă cu mai multe bucle. Soluţia jocului multicriterial se bazează pe algoritmi de optimizare a unui multi-roii de particule din soluţii optime Pareto, ţinând cont de relaţiile binare de preferinţă. Cele mai importante rezultate sunt studiile teoretice şi experimentale ale eficacităţii sistemului robust hibrid activ-pasiv de ecranare a câmpului magnetic creat de liniile electrice aeriene cu o dispoziţie triunghiulară a firelor de fază în zona de ecranare. Semnificaţia rezultatelor obţinute constă în faptul că, în cursul proiectării unui ecran hibrid activ şi pasiv cu mai multe bucle, au fost calculate coordonatele aranjamentului spaţial a 16 circuite de ecrane pasive şi două înfăşurări compensatoare, precum şi curenţii şi fazele din aceste înfăşurări ale ecranului activ, la fel sunt propuse recomandări practice cu privire la alegerea rezonabilă a aranjamentului spaţial a unui ecran pasiv cu mai multe bucle şi a două înfăşurări de ecranare a unui sistem robust de ecranare hibridă a câmpului magnetic creat de liniile electrice aeriene cu un aranjament

triunghiular de fire de fază. Se arată posibilitatea reducerii inducției câmpului magnetic inițial la nivelul standardelor sanitare.

**Cuvinte-cheie:** linii electrice aeriene, aranjarea triunghiulară a firelor de fază, câmp magnetic, sistem robust hibrid activ-pasiv de ecranare a câmpului magnetic, studii teoretice și experimentale.

**Гибридное активно-пассивное экранирование магнитного поля воздушных линий электропередачи с треугольным расположением фазных проводов**

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

**Аннотация.** Целью работы является проектирование робастной гибридной активно-пассивной системы экранирования магнитного поля, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов, предназначенной для повышения эффективности экранирования исходного магнитного поля в жилых помещениях до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработана структура гибридной системы активно-пассивного экранирования, и выполнен синтез системы, состоящей из двухконтурной активной и многоконтурной пассивной частей. Синтез системы сводится к решению векторной игры, в которой векторный выигрыш вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении с помощью программных средств COMSOL Multiphysics. Решение многокритериальной игры находится на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из Парето оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. Наиболее важными результатами являются теоретические и экспериментальные исследования эффективности синтезированной гибридной активно-пассивной системы экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в зоне экранирования. Значимость полученных результатов состоит в том, что в ходе проектирования гибридного активного и многоконтурного пассивного экранов вычислены координаты пространственного расположения 16 контуров пассивного экрана и двух компенсационных обмоток, а также токи и фазы в этих обмотках активного экрана; а также приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения многоконтурного пассивного экрана и двух экранирующих обмоток робастной системы гибридного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов. Показана возможность снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи, треугольное расположение фазных проводов, магнитное поле, робастная система гибридного активно-пассивного экранирования, теоретические и экспериментальные исследования.

## ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы защиты здоровья населения от биологического воздействия техногенного электромагнитного поля объектов электроэнергетики имеет высокую социальную значимость и является чрезвычайно актуальной и важной задачей в улучшении качества и продолжительности жизни населения. Приоритетность для человечества проблемы уменьшения влияния техногенного электромагнитного поля подтверждена Всемирной организацией здравоохранения, которая в числе многих всемирных проектов (наряду с изменениями климата, ионизирующей радиацией, химической безопасностью и COVID-19), открыла и с 1996 года реализует в настоящее время постоянно действующий Международный проект по электромагнитному полю, направленный на изучение влияния электромагнитного поля на организм человека [1]. Значительное место в указанных

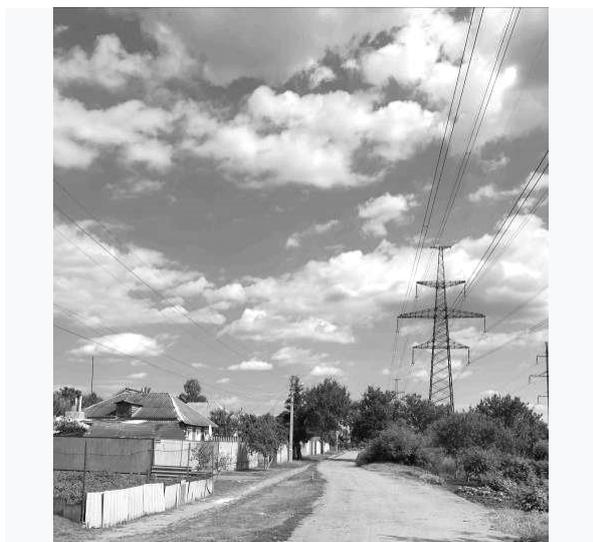
исследованиях помимо высокочастотного излучения от станций сотовой связи, занимает электромагнитное поле промышленной частоты, создаваемое линиями электропередачи ЛЭП (МП).

Высоковольтные воздушные ЛЭП, расположенные в зонах жилой застройки, являются основными источниками магнитного поля промышленной частоты, что негативно действует на население жилых домов, которые расположены вдоль трасс ЛЭП. Основой для обоснования этих выводов стало выявление в конце XX-го столетия канцерогенных свойств воздействия МП при его слабом, но длительном воздействии на человека [2] и разработка экспертами ВОЗ рекомендаций по максимально возможному уменьшению уровня индукции МП в расположенных близи ЛЭП жилых домах, для уменьшения вероят-

ности возникновения раковых заболеваний у населения.

Выявление канцерогенных свойств и смертельной опасности действия слабого МП с индукцией меньше  $1 \text{ мкТл}$  при его длительном воздействии на людей, привело к постепенному введению с начала XX-го столетия, и к настоящему времени, жестких санитарных норм по уровню индукции магнитного поля и постоянного ужесточения этих норм по граничным уровням индукции магнитного поля с частотой  $50\div 60 \text{ Гц}$ , до рекомендованного ВОЗ уровня  $0,2\div 0,6 \text{ мкТл}$  [3]–[6].

Многие жилые здания и сооружения расположены в непосредственной близости от высоковольтных линий электропередачи, так, что уровень индукции магнитного поля внутри этих сооружений существенно превышает современные санитарные нормы. Так, например, как это показано на рис. 1, на улице с символическим названием «Высоковольтная», жилые дома расположены в непосредственной близости от магистральной двухцепной ЛЭП  $330 \text{ кВ}$  с расщепленными проводами по  $2 \text{ кА}$  в каждой цепи.



**Рис.1. Жилые дома, расположенные в непосредственной близости от магистральной двухцепной ЛЭП.<sup>1</sup>**

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования показывают [7]–[10], что предельно допустимый уровень индукции МП ( $0,5 \text{ мкТл}$ ) может превышать на порядок, и более, что создает угрозу здоровью сотен тысяч граждан, проживающих ближе  $100 \text{ м}$  от воздушных ЛЭП. Кроме того, в связи с постоянным подорожанием земельных участков для застройки, продолжается

строительство жилых, административных и других общественных зданий, и сооружений в местах прохождения существующих высоковольтных ЛЭП. Так, например, на улице «Астрономическая» современный двухэтажный коттедж построен в непосредственной близости от опоры одноцепной ЛЭП  $110 \text{ кВ}$   $500 \text{ А}$ , как это показано на рис. 2.



**Рис.2. Современный жилой коттедж, расположенный вблизи опоры ЛЭП.<sup>2</sup>**

Такое состояние характерно для многих ведущих стран мира – США, Израиля, Италии, Испании и многих других и требует принятия срочных мер по снижению в  $3\div 5$  раз МП действующих ЛЭП. Поэтому во многих ведущих странах мира интенсивно ведутся разработки методов и средств нормализации магнитного поля в энергетической инфраструктуре, общественных сооружениях, и в жилых домах, а также проводится их широкое внедрение данных средств [11]–[15].

Наиболее эффективной технологией является реконструкция ЛЭП путем ее перемещения на безопасное расстояние от жилых домов, или замена воздушной ЛЭП на кабельную линию. Однако, подобная реконструкция требует огромных материальных средств. Поэтому более приемлемы менее дорогостоящие методы экранирования магнитного поля действующих ЛЭП, которые наиболее универсальны, относительно легко реализуемы, и обеспечивают необходимую эффективность.

В настоящее время во всем мире интенсивно методы активного контурного экранирования магнитного поля, и при этом данные методы проводятся исследования и внедряются различные системы активного экранирования техногенного магнитного поля про-

мышленной частоты (САЭ) [16]–[18].

В жилых домах старой застройки часто в непосредственной близости проходят воздушные линии электропередачи с "треугольным" расположением фазных проводов, которое является одним из наиболее опасных вариантов расположения проводов для источников МП. Магнитное поле, создаваемое воздушными линиями электропередачи с "треугольным" расположением фазных проводов, имеет пространственно-временную характеристику МП в форме окружности [9]. Для активного экранирования магнитного поля с такой пространственно-временной характеристикой, необходимо, не менее двух компенсационных обмоток в составе САЭ.

Активное экранирование требует использования внешних источников питания для формирования токов соответствующей величины и фазы в компенсирующих обмотках, для создания магнитного поля направленного противоположно исходному магнитному полю ЛЭП, что необходимо для реализации желаемого эффекта экранирования. Таким образом, системы активного экранирования способны обеспечить сильное ослабление исходного магнитного поля ЛЭП [16]–[18], однако, для этого требуется достаточно сложная система автоматического управления, в которой, помимо датчиков магнитного поля, необходимо установить дорогостоящее оборудование большой мощности, такое как – источники питания, силовые преобразователи и система управления, формирующая подаваемые в компенсирующие обмотки токи, для достижения требуемого подавления исходного магнитного поля. Именно по этим причинам, данное решение является значительно более дорогим в разработке, чем пассивные методы [7]–[10].

При пассивном экранировании ослабление исходного магнитного поля достигается за счет генерирования согласно закону Фарадея компенсирующего поля с помощью пассивного экрана. Для повышения эффективности экранирования исходного магнитного поля часто применяют многоконтурные пассивные экраны [8]. Однако, пассивные экраны имеют значительно меньший коэффициент экранирования, чем активные "экраны", поэтому пассивные экраны могут быть рекомендованы, лишь в качестве дополнения к САЭ, с целью получения равномерного распределения МП заданного уровня. Таким образом, гибридные активно-пассивные экраны одно-

временно используют как САЭ, так и пассивные экраны различной конструкции [19].

**Целью работы** является синтез робастной гибридной активно-пассивной системы, состоящей из активной и многоконтурной пассивной части, которая обеспечит повышение эффективности экранирования магнитного поля, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой постройки, при одновременном снижении чувствительности системы к изменениям параметров системы.

### **I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА РОБАСТНОЙ ГИБРИДНОЙ АКТИВНО-ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ**

Магнитное поле, создаваемое линией электропередачи необходимо уменьшить до безопасного уровня. При гибридном активно-пассивном экранировании с помощью многоконтурных обмоток пассивного экрана и компенсационных обмоток активного экрана необходимо создать магнитное поле, направленное против исходного магнитного поля, создаваемого ЛЭП. Задачей проектирования системы гибридного активно-пассивного экранирования является расчет координат пространственного расположения многоконтурных обмоток пассивного экрана и компенсационных обмоток активного экрана, а также величин токов, и их фаз, в компенсирующих обмотках.

При проектировании гибридной системы активно-пассивного экранирования, в первую очередь, спроектируем программный регулятор в виде разомкнутого контура грубого управления на основе квазистатической математической модели магнитного поля [20]–[22]. Затем спроектируем стабилизирующий точный регулятор в виде замкнутого контура управления, основанного на уравнениях динамики замкнутой системы с учетом моделей исполнительных и измерительных устройств, возмущений и шумов измерений и предназначенного для повышения точности управления по сравнению с разомкнутым управлением, основанным на квазистатической математической модели магнитного поля.

Рассмотрим квазистатическую модель МП, создаваемое воздушными ЛЭП. Математическое моделирование электромагнитного поля в общем случае сводится к решению

краевой задачи для системы уравнений Максвелла в частных производных [10]–[11].

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \partial_t \vec{D} + \vec{j}_{ex} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial_t \vec{B} \quad (2)$$

здесь:  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля,  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля,  $\vec{D}$  и  $\vec{B}$  – векторы электрической и магнитной индукции,  $\vec{j}$  – плотность тока проводимости,  $\vec{j}_{ex}$  – плотность сторонних токов, создаваемых источниками вне рассматриваемой области.

Первое уравнение (1) является обобщенным законом Ампера – полная плотность тока представляет собой вихрь напряженности магнитного поля. Второе уравнение (2) является дифференциальной формулировкой закона Фарадея, что изменение во времени магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле.

В частности, индукция магнитного поля в непосредственной близости от проводов зависит от двух пространственных переменных и изменяется по гармоническому закону во времени и, следовательно, удовлетворяет эллиптическому уравнению второго порядка

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial y} \right) - (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) B = 0 \quad (3)$$

Промежуточное положение между постоянным полем и быстро меняющимся полем занимает так называемое квазистационарное поле – такое электромагнитное поле, при исследовании которого токами смещения можно пренебречь по сравнению с токами проводимости. Для квазистационарного поля уравнения Максвелла имеют вид

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \vec{j}_{ex} \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial_t \vec{B}. \quad (5)$$

Из первого уравнения (4) этого приближения следует, что квазистационарное магнитное поле в каждый данный момент времени полностью определяется распределением электрических токов в этот же момент времени и может быть найдено из этого распределения точно так же, как это делается в магнитостатике. Для оценки воздействия магнитно-

го поля ЛЭП на окружающую среду, большинство расчетов [13]–[15] выполняется на основе закона Био-Савара-Лапласа для элементарного тока

$$d\vec{H}(t) = \frac{I(t)}{4\pi R^3} (dl \times \vec{R}) \quad (6)$$

Здесь вектор  $\vec{R}$  направлен от элементарного отрезка  $dl$  с полным током  $I(t)$  к точке наблюдения  $Q$ . Тогда вектор суммарной напряженности поля равен:

$$\vec{H}(Q, t) = \frac{I(t)}{4\pi} \int_L \frac{dl \times \vec{R}}{R^3}. \quad (7)$$

Эта формула широко используется для расчета магнитного поля воздушных линий электропередачи вместо системы уравнений Максвелла (4)–(5).

Таким образом, зависимость величины индукции магнитного поля от тока является статической и описывается уравнением (7).

В заключение, приведем еще одну форму записи квазистационарной модели электромагнитного поля, изменяющегося во времени по синусоидальному закону

$$H(Q, t) = A(Q) \exp j(\omega t), \quad (8)$$

где  $A(Q)$  – амплитуда напряженности магнитного поля.

Рассмотрим построение математической модели исходного магнитного поля, создаваемого линией электропередачи. Зададим амплитуды  $A_i$  и фазы  $\varphi_i$  токов проводов промышленной частоты  $\omega$  линии электропередачи. Запишем выражения для токов  $I_i(t)$  в проводах ЛЭП в комплексной форме

$$I_i(t) = A_i \exp j(\omega t + \varphi_i) \quad (9)$$

В работах [12]–[15] параметры токов ЛЭП (9) считаются известными и не меняются со временем. Однако величины токов ЛЭП имеют суточные, недельные и сезонные изменения. Поэтому, в отличие от работ [12]–[15], введем вектор параметров исходных неопределенностей  $\vec{\delta}$  задачи проектирования гибридной активно-пассивной системы экранирования, компонентами которого являются неопределенности значения токов и фаз в проводах ЛЭП, а также другие

параметры неопределенностей электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, которые, во-первых, изначально известны неточно, и, во-вторых, могут меняться в процессе эксплуатации системы [23]–[25].

Тогда вектор  $\vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t)$  индукции исходного магнитного поля может быть рассчитан по закону Био-Савара на основании (7) в виде суммы векторов  $\vec{B}_{Li}(Q_i, \vec{\delta}, t)$  индукции магнитного поля, создаваемое всеми проводниками ЛЭП в точке  $Q_i$  пространства экранирования [9]

$$\vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t) = \sum \vec{B}_{Li}(Q_i, \vec{\delta}, t) \quad (10)$$

Рассмотрим построение математической модели магнитного поля, создаваемого компенсационными обмотками активной части гибридного экрана. Зададим вектор  $\vec{X}_a$  пространственного расположения и геометрических размеров компенсационных обмоток активной части гибридного экрана, а также амплитуды  $A_{ai}$  и фазы  $\varphi_{ai}$  токов в компенсационных обмотках [26]–[28]. Запишем выражения для токов в проводниках компенсационных обмотках в комплексной форме

$$I_{ai}(t) = A_{ai} \exp j(\omega t + \varphi_{wi}) \quad (11)$$

Тогда вектор  $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$  индукции магнитного поля, создаваемое всеми проводниками компенсирующих обмоток активной части гибридного экрана  $\vec{B}_{ai}(Q_i, \vec{X}_a, t)$  в точке  $Q_i$  пространства экранирования также может быть рассчитан на основании (7), по закону Био-Савара [6]

$$\vec{B}_a(Q_i, X_a, t) = \sum \vec{B}_{ai}(Q_i, \vec{X}_a, t) \quad (12)$$

Тогда вектор  $\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t)$  результирующего магнитного поля, создаваемое всеми проводниками линии электропередачи и всеми обмотками активной части гибридного экрана вычисляется в виде суммы

$$\vec{B}_{Ra}(Q_i, X_a, \delta, t) = \vec{B}_L(Q_i, \delta, t) + \vec{B}_a(Q_i, X_a, t) \quad (13)$$

Рассмотрим построение математической модели магнитного поля, создаваемого многоконтурным пассивным экраном, являющегося частью гибридного активно-пассивного

экрана [19]. В работах [13]–[15] параметры пассивного экрана считаются заданными. Фактически эти параметры необходимо вычислить в ходе проектирования системы активно-пассивного экранирования. Поэтому, в отличие от работ [13]–[15], зададим вектор  $\vec{X}_p$  начальных значений геометрических размеров, толщины и материала многоконтурного пассивного экрана. Тогда для заданного вектора  $\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t)$  может быть вычислен магнитный поток  $\vec{\Phi}_l(\vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$ , пронизывающий  $l$ -тый контур многоконтурного пассивного экрана, в соответствии с индукцией результирующего магнитного поля, создаваемой ЛЭП и обмотками активной части гибридного активно-пассивного экрана, а также значениями вектора геометрических размеров пассивного контурного экрана  $\vec{X}_p$

$$\vec{\Phi}_l(\vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) = \int_S \vec{B}_{Ra}(\vec{X}_a, \vec{\delta}, t) dS \quad (14)$$

Ток  $\vec{I}_{pl}(\vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$  в комплексной форме, индуцируемый в  $l$ -том контуре многоконтурного пассивного экрана, вычисляется по закону Ома и интегральной форме закона Фарадея [9]:

$$\vec{I}_{pl}(\vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) = -j\omega \vec{\Phi}_l(\vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) / \dots \dots / (R_l(\vec{X}_p) + j\omega L_l(\vec{X}_p)) \quad (15)$$

Здесь активное сопротивление  $R_l(\vec{X}_p)$  и индуктивность  $L_l(\vec{X}_p)$   $l$ -того контура многоконтурного пассивного экрана вычисляется для значений вектора  $\vec{X}_p$  геометрических размеров пассивного контурного экрана.

Тогда для вычисленных значений токов  $\vec{I}_{pl}(\vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$  в  $l$ -тых контурах многоконтурного пассивного экрана [13]–[15] и значений вектора  $\vec{X}_p$  геометрических размеров пассивного контурного экрана по закону Био-Савара может быть вычислен на основании (7) вектор  $\vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$  индукции магнитного поля, создаваемое всеми  $l$ -контурами многоконтурного пассивного экрана. Естественно, что на основании закона Фарадея, вектор  $\vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$  индукции этого поля пассивного экрана направлен противо-

положно исходному полю, генерируемому линией электропередачи и только обмотками активной части гибридного активно-пассивного экрана. Следовательно, с помощью пассивной части гибридного активно-пассивного экрана экранируется результирующее магнитное поле, оставшееся некомпенсированным после работы только активной части гибридного активно-пассивного экрана.

Тогда может быть вычислен вектор  $\vec{B}_R(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$  индукции результирующего магнитного поля в виде суммы вектора  $\vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t)$  индукции магнитного поля, создаваемое всеми проводами линии электропередачи, вектор  $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$  индукции магнитного поля, создаваемое всеми проводами компенсирующих обмоток активной части гибридного экрана, и вектор  $\vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$  индукции магнитного поля, создаваемое всеми контурами пассивной части гибридного экрана в точке  $Q_i$ , пространства экранирования

$$\vec{B}_R(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) = \vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t) + \dots + \vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t) + \vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) \quad (16)$$

## II. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ

Введем вектор  $\vec{X}$  искомым параметров задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования, компонентами которого являются вектор  $\vec{X}_a$  значений геометрических размеров компенсационных обмоток, а также амплитуд  $A_{wi}$  и фаз  $\varphi_{wi}$  токов в компенсационных обмотках активной части гибридной системы активно-пассивного экранирования, а также вектор  $\vec{X}_p$  геометрических размеров, толщины и материала экрана пассивной части гибридной системы активно-пассивного экранирования [29]–[30].

Тогда для заданных начальных значений вектора  $\vec{X}$  искомым параметров и вектора  $\vec{\delta}$  параметров неопределенностей гибридной системы активно-пассивного экранирования по вектору  $\vec{B}_R(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$  мгновенного значения индукции результирующего магнитного поля может быть вычислено в программной среде COMSOL Multiphysics эффективное значение  $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, P_i)$  вектора ин-

дукции результирующего магнитного поля в точке пространства экранирования  $Q_i$ .

В работах [16]–[18] задача проектирования системы экранирования магнитного поля сводится к задаче оптимизации одного скалярного критерия, который вычисляется в виде линейной свертки значений индукции в различных точках пространства экранирования. Однако, задача корректного вычисления весовых множителей, с помощью которых формируется скалярный критерий оптимизации в общем виде является некорректно поставленной задачей и ее решение требует специальных подходов [26]–[30]. Кроме того, в постановках задачи проектирования системы экранирования магнитного поля вообще не учитывались неопределенности моделей исходного магнитного поля и параметров системы управления. Поэтому, в отличие от работ [16]–[18] задачу проектирования гибридной системы робастного активно-пассивного экранирования сведем к вычислению решения векторной игры [31]–[32]

$$\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}) = \langle \vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, Q_i) \rangle \quad (17)$$

В этой векторной игре необходимо найти минимум вектора выигрыша игры (17) по вектору  $\vec{X}$  искомым параметров задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования, но максимум этого же вектора выигрыша игры (17) по вектору  $\vec{\delta}$  параметров неопределенностей гибридной системы активно-пассивного экранирования.

Компонентами вектора игры (17) являются эффективные значения  $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, Q_i)$  индукции результирующего магнитного поля во всех рассматриваемых точках  $Q_i$  пространства экранирования.

При этом, естественно, необходимо учитывать ограничения [33]–[35] на вектор  $\vec{X}$  искомым параметров и вектор  $\vec{\delta}$  параметров неопределенностей задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования в виде векторного неравенства и, возможно, векторного равенства

$$\vec{G}(\vec{X}, \vec{\delta}) \leq \vec{G}_{\max}, \quad \vec{H}(\vec{X}, \vec{\delta}) = 0 \quad (18)$$

Заметим, что компоненты векторной игры (17) и векторных ограничений (18) являются нелинейными функциями вектора  $\vec{X}$

искомых параметров и вектора  $\bar{\delta}$  параметров неопределенностей задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования [19] и рассчитываются в программной среде COMSOL Multiphysics.

### III. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим алгоритм вычисления решения векторной игры (17) с ограничениями (18). В работах [31]–[32] рассматриваются различные подходы к вычислению решений векторных игр на основе различных эвристических подходов. В отличие от работ [31]–[32] в данной работе для нахождения единственного решения векторной игры из множества Парето-оптимальных решений помимо векторного выигрыша (17) и ограничений (18) будем также использовать информацию о бинарных отношениях предпочтения локальных решений друг относительно друга [29]–[30].

Для нахождения такого единственного оптимального решения необходимо сначала разработать алгоритм построения всей области Парето-оптимальных решений. Затем на основе анализа всего множества возможных оптимальных решений исходной векторной игры сузить область рассматриваемых решений и, следовательно, уменьшить трудоемкость лица, принимающего решение в выборе единственного варианта оптимального решения.

Особенностью рассматриваемой задачи нахождения решения является многоэкстремальность векторного выигрыша (17), так что рассматриваемая область возможных решений содержит локальные минимумы и максимумы. Это связано с тем, что при минимизации уровня индукции результирующего магнитного поля в одной точке пространства экранирования уровень индукция в другой точке этого пространства увеличивается за счет недокомпенсации или перекомпенсации исходного магнитного поля. Поэтому для вычисления решения рассматриваемой векторной игры целесообразно использовать алгоритмы стохастической мультиагентной оптимизации [31]–[32].

Рассмотрим один из возможных алгоритмов нахождения множества Парето-оптимальных решений векторной игры на основе стохастической мультиагентной оптимизации – алгоритм PSO, основанный на идее коллективного разума роя частиц для нахождения глобально оптимального значе-

ние  $y_j^*(t)$  – gbest PSO, найденное всеми частицами роя, и локально оптимального значения  $y_{ij}(t)$  – lbest PSO, найденного одной частицей роя [33]–[34].

Для вычисления решений векторных игр использование стохастических мультиагентных эвристических методов оптимизации вызывает определенные трудности, однако это направление продолжает интенсивно развиваться с использованием различных эвристических приемов. Рассмотрим стохастический мультиагентный алгоритм оптимизации для вычисления решения исходной векторной игры (17) с ограничениями (18) на основе множества роев частиц, количество которых равно количеству компонент векторного выигрыша (17).

В простейшем алгоритме расчета оптимального положения  $x_{ij}(t)$  и скорости  $v_{ij}(t)$  движения частицы  $i$  роя  $j$  скорости движения вычисляются по линейным законам [31]–[32]. В отличие от этих алгоритмов, в данной работе для повышения скорости нахождения глобального решения используется специальный нелинейный алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации [35]–[36]. В этом алгоритме для переключения движения частицы соответственно с локального оптимума  $y_{ij}(t)$  на глобальный  $y_j^*(t)$  используется функция Хевисайда  $H$ . Движение частицы  $i$  роя  $j$  в этом нелинейном алгоритме описывается следующими выражениями

$$v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + \dots + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) * \dots * [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \dots \quad (19)$$

$$\dots + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) * \dots * [y_j^*(t) - x_{ij}(t)]$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (20)$$

где  $c_1, c_2$  – положительные константы, определяющие веса когнитивной и социальной составляющих скорости движения частицы;  $r_{1j}(t), r_{2j}(t)$  — случайные числа из диапазона  $[0, 1]$ , определяющие стохастическую составляющую скорости частицы. Параметры переключения когнитивной  $p_{1j}$  и социальной  $p_{2j}$  составляющих скорости движения частиц в соответствии с локальным и гло-

бальным оптимумом; случайные чисел  $\varepsilon_{1j}(t)$  и  $\varepsilon_{2j}(t)$  определить параметры переключения движения частицы по локальному и глобальному оптимумам. Если  $p_{1j} < \varepsilon_{1j}(t)$  и  $p_{2j} < \varepsilon_{2j}(t)$ , то скорость движения частицы  $i$  роя  $j$  на шаге не меняется и частица движется в том же направлении, что и на предыдущем шаге оптимизации.

При вычислении одного единственного глобального решения векторной игры (17) с ограничениями (18) с помощью отдельных роев вычисляются решения скалярных игр, являющихся компонентами вектора игры (17). Для вычисления одного единственного глобального решения векторной игры (17) с ограничениями (18) отдельные рои обмениваются информацией друг с другом в ходе вычисления оптимальных решений локальных игр. Информация о глобальном оптимуме, полученном частицами другого роя, используется для вычисления скорости движения частиц другого роя, что и позволяет вычислить все потенциальные Парето-оптимальные решения.

При этом, в отличие от работ [36]–[37], на каждом шаге  $t$  движения частицы  $i$  роя  $j$  используются функции бинарного предпочтения локального решения  $y_{ij}(t)$ , полученного одной частицей роя и глобального решения  $y_j^*$ , полученных всеми роями. Решение  $X_j^*(t)$ , полученное при оптимизации решения игры  $B(X(t), P_j)$  с помощью роя  $j$  лучше, чем решение  $X_k^*(t)$ , полученное при оптимизации решения игры  $B(X(t), P_k)$  с использованием роя  $k$ , т. е.  $X_j^*(t) > X_k^*(t)$  если выполняется условие

$$\max_{i=1,m} B(P_i, X_j^*(t)) < \max_{i=1,m} B(P_i, X_k^*(t)) \quad (21)$$

Глобальное решение  $X_k^*(t)$ , полученное роем  $k$  используется как глобальное оптимальное решение  $X_j^*(t)$  роя  $j$ , которое является лучшим по отношению к глобальному решению  $X_k^*(t)$  роя  $k$  на основе отношения предпочтения (21).

Основная идея последовательного сужения области компромиссов Парето-

оптимальных решений состоит в том, что все, что не может быть выбрано в соответствии с имеющейся информацией об отношениях бинарных предпочтениях, последовательно удаляется из начального множества возможных решений на основе информации об относительной важности локальных решений. Удаление выполняется до тех пор, пока не будет получено глобально-оптимальное решение [33]–[34].

На основании бинарных отношений предпочтений (21) при минимизации уровня индукции результирующего магнитного поля в одной точке пространства экранирования и увеличении уровня индукция в другой точке этого пространства за счет недокомпенсации или перекомпенсации исходного магнитного поля можно выбрать такое решение, при котором минимизируется максимальное значение уровня индукции по всем рассматриваемым точкам пространства экранирования.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе разработки гибридного экрана, были вычислены координаты пространственного расположения 16 проводников многоконтурного пассивного экрана. Кроме того, были так же вычислены координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также, токи и фазы в этих обмотках системы активного экранирования.

В отличие от работ [13]–[15], в настоящей работе координаты пространственного расположения контуров многоконтурного пассивного экрана вычислены в ходе решения многокритериальной антагонистической игры (17) с ограничениями (18) и для экранирования исходного магнитного поля используется электромагнитный гибридный активно-пассивный экран.

Схема расположения ЛЭП, компенсирующих обмоток активного экрана и проводников многоконтурного пассивного экрана показана на рис. 1.

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

рования составляет 1,7 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 1,54 единицы.

При работе только многоконтурного пассивного экрана наблюдаются характерные области концентрации напряжений в 16 точках расположения проводников много-петлевого пассивного экрана, рассчитанных в процессе проектирования экрана.

На рис. 5 показано результирующее магнитное поле при работе только активного экрана. Уровень МП в центральной части пространства экранирования составляет 0,2 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 8,5 единицы.

На рис. 6 показано результирующее магнитное поле при работе гибридного активно-пассивного экрана. Уровень МП в центральной части пространства экранирования составляет 0,17 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 10 единицы. Применение гибридного экрана позволяет снизить уровень исходного магнитного поля в существенно большей области пространства экранирования по сравнению с использованием только активного экрана.

### V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим теперь результаты экспериментальных исследований электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана.

На рис. 7 показаны компенсационная обмотка и многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки.

На рис. 8 показан многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки гибридного активно-пассивного экранирования.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований гибридной системы активно-пассивного экранирования.

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

Экспериментально измеренное минимальное значение индукции в малой зоне экранирования при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования составляет 0,1 мкТл. Индукция исходного магнитного поля в рассматриваемом пространстве составляет 2 мкТл, а при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования уровень магнитного поля во всей зоне экранирования не превышает 0,28 мкТл.

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

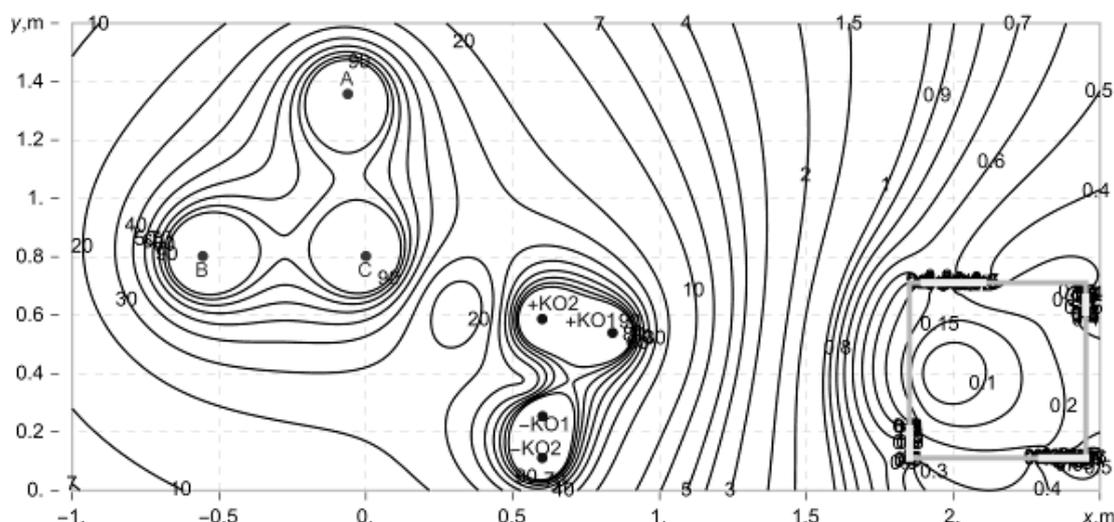
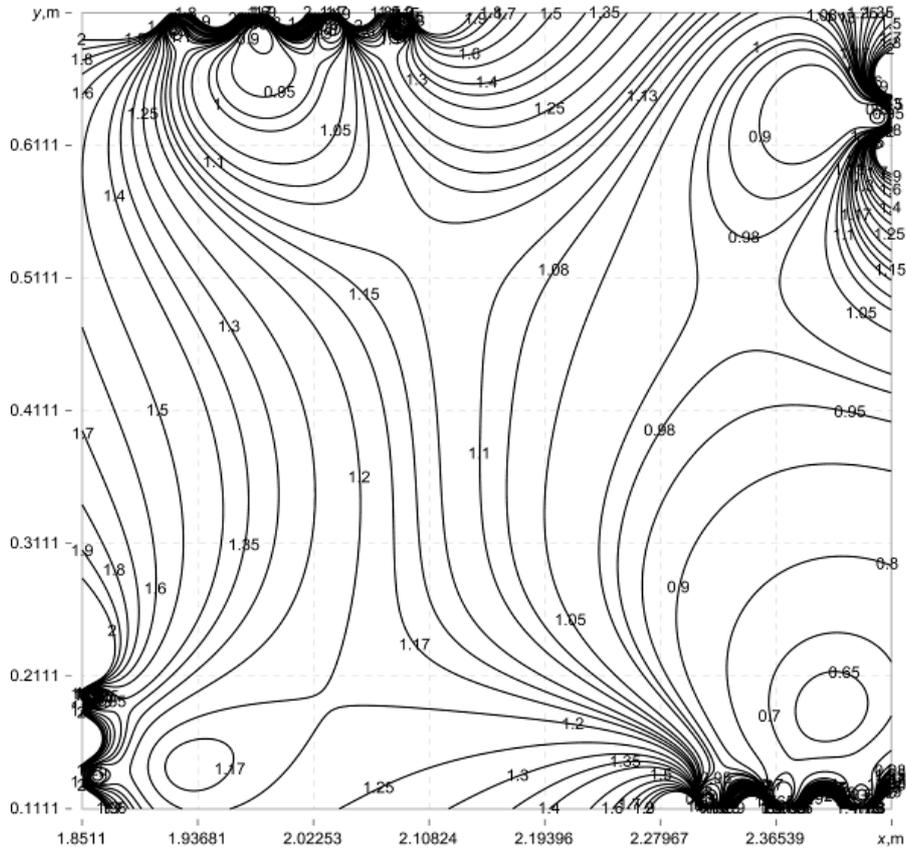
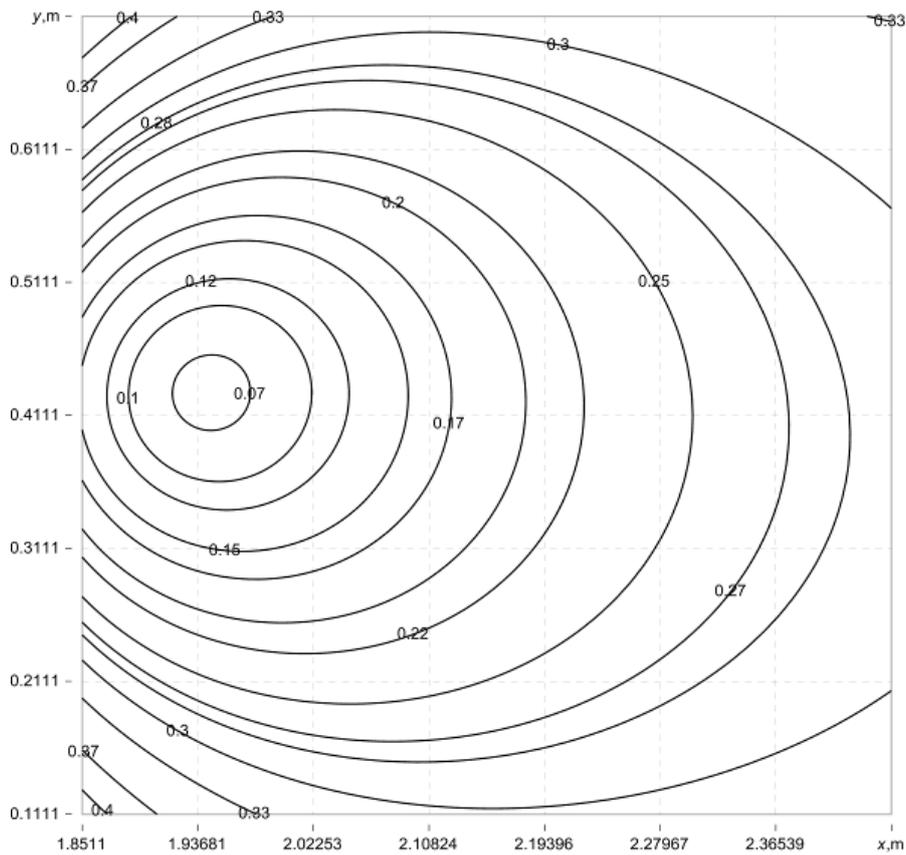


Рис.3. Схема расположения ЛЭП, обмоток активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.<sup>3</sup>

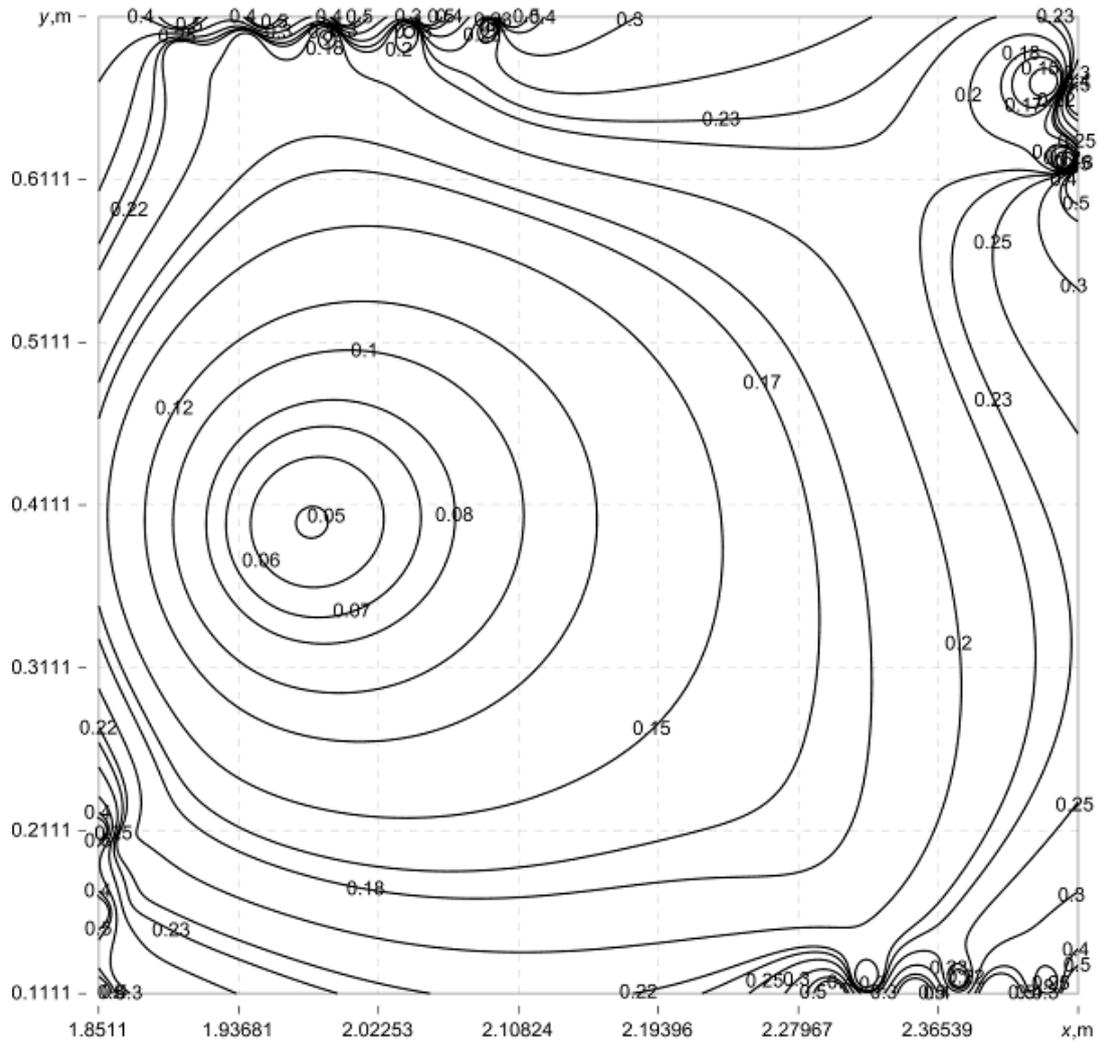
<sup>3</sup> Appendix 1



**Рис.4. Результирующее магнитное поле при работе только многоконтурного пассивного экрана. <sup>4</sup>**



**Рис.5. Результирующее магнитное поле при работе только активного экрана. <sup>5</sup>**



**Рис.6. Результирующее магнитное поле при работе гибридного активно пассивного экрана.<sup>6</sup>**



**Рис.7. Схема расположения обмотки активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.<sup>7</sup>**



**Рис.8. Многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки гибридного активно- пассивного экранирования.<sup>8</sup>**

<sup>6,7,8</sup> Appendix 1

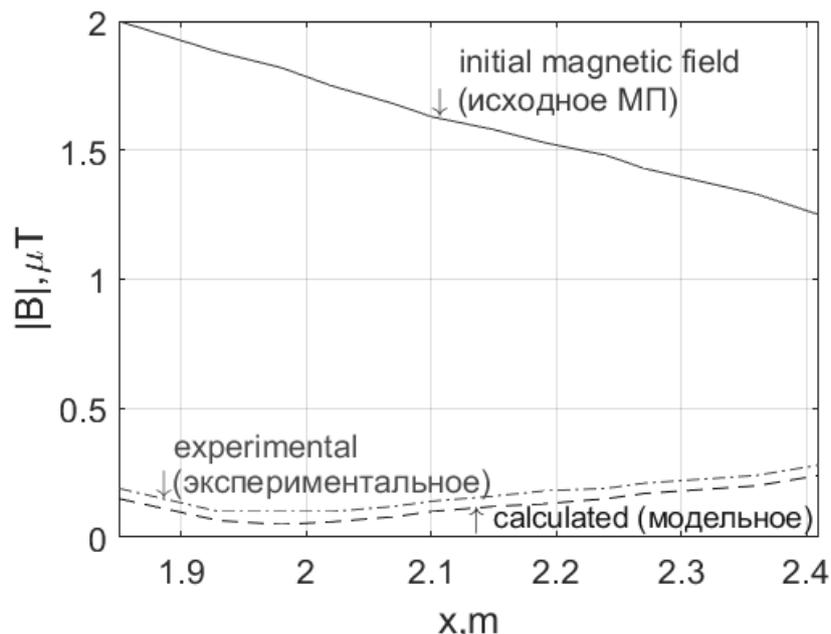


Рис. 9. Сравнение индукции исходного магнитного поля и магнитного поля при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования.<sup>9</sup>

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

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика проектирования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной частей, который характеризуется повышенной эффективностью снижения магнитного поля промышленной частоты, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой застройки.

2. Задача проектирования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана сведена к решению векторной игры, в которой вектор выигрышей вычисляется с помощью программных средств системы COMSOL Multiphysics. Решение этой игры вычисляется на основе алгоритмов мультиролевой мультиагентной стохастической оптимизации из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтений решений локальных игр.

3. В ходе проектирования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана для снижения магнитного поля промышленной частоты, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой застройки, вычислены координаты пространственного расположения 16 контурных пассивных экранов и координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также токи и фазы в этих обмотках активного экрана.

4. Основным преимуществом использования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной частей, является возможность снижения уровня начальной индукции магнитного поля в значительно большей области пространства экранирования по сравнению с использованием только активного экрана.

5. Практическое использование разработанного электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана позволит снизить уровень магнитного поля, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой застройки до безопасного уровня 0,5 мкТл для населения, проживающего вблизи ЛЭП.

**APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)**

- <sup>1</sup>Fig. 1. An example of residential buildings located in close proximity to the main double-circuit power transmission line.
- <sup>2</sup>Fig. 2. A modern residential cottage located near a power line pylon.
- <sup>3</sup>Fig. 3. The relative position of the 110 kV overhead power transmission line with a triangular arrangement of phase wires, two compensation windings and a shielding space.
- <sup>4</sup>Fig. 4. The resulting magnetic field when multi-loop passive shield only.
- <sup>5</sup>Fig. 5. The resulting magnetic field when active shield only.
- <sup>6</sup>Fig. 6. The resulting magnetic field during operation of the hybrid active-passive shield.
- <sup>7</sup>Fig. 7. The layout of the winding of the active shield and multiloop passive shield.
- <sup>8</sup>Fig. 8. Multiloop passive shield of the experimental installation of hybrid active-passive shielding.
- <sup>9</sup>Fig. 9. Comparison of the induction of the initial magnetic field and the magnetic field with the hybrid active-passive shielding system switched on.

**БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)**

- [1] *The World Health Organization, "The International EMF Project" / Radiation & Environmental Health Protection of the Human Environment World Health Organization // Geneva, Switzerland. – 1996. – 2 p. Available at: <http://www.who.int/emf/> (accessed 23.06.2023))* *Global Cancer Statistics: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. Enhanced Reader* (2020). (accessed 28-02-2023).
- [2] *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.
- [3] *Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields), Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>. (accessed 23.06.2023).*
- [4] *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).
- [5] Grellier James, Ravazzani Paolo, Cardis Elisabeth. Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe, *Environment International*, Volume 62, January 2014, Pages 55–63, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.017>. (accessed 23.06.2023).
- [6] Salceanu A., Paulet M., Alistar B.D., Asimincesei O. Upon the Contribution of Image Currents on the Magnetic Fields Generated by Overhead Power Lines. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. 2019. doi: 10.1109/sielmen.2019.8905880. (accessed 23.06.2023).
- [7] Del-Pino-López J., Cruz Romero P. Influence of different types of magnetic shields on the thermal behavior and ampacity of underground power cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 4, pp. 2659–2667. doi: 10.1109/tpwr.2011.2158593. (accessed 23.06.2023).
- [8] 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/ije.10i2.3572. (accessed 23.06.2023).
- [9] Mary S. Victoria, Sugumaran C. Pugazhendhi. Investigation on magneto-thermal-structural coupled field effect of nano coated 230 kV busbar. 2020, IOP Publishing Ltd., *Physica Scripta*, Volume 95, Number 4. doi: 10.1088/1402-4896/ab6524. (accessed 23.06.2023).
- [10] Working group C4.204, Int. Council Lucio Ippolito, Pierluigi Siano. Using multi-objective optimal power flow for reducing magnetic fields from power lines. *Electric Power Systems Research*, vol. 68 (2004) pp. 93–101.
- [11] Barsali S., Giglioli R., Poli D. Active shielding of overhead line magnetic field: Design and applications. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 110, pp. 55–63. doi: 10.1016/j.epsr.2014.01.005. (accessed 23.06.2023).
- [12] Bavastro D., Canova A., Freschi F., Giaccone L., Manca M. Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 2009–2016.
- [13] 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 (9 CHLIE)*, Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84–99.
- [14] Bravo-Rodríguez J., Del-Pino-López J., Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. *Energies*, 2019, vol.12, no.7, pp. 1332–1332. doi: 10.3390/en12071332. (accessed 23.06.2023).

- [15] Canova A., del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF 10.1109/tmag.2014.2354515. (accessed 23.06.2023).
- [16] 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 23.06.2023).
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *Proc. IEEE Int. Symp. On Electromagnetic Compatibility*, Minneapolis, USA, 2002. – pp. 222–226.
- [20] Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2–7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002. (accessed 23.06.2023).
- [21] Celozzi S., Garzia F. Magnetic field reduction by means of active shielding techniques. *Environmental Risk 2003*, WIT Press, Southampton (UK). – 2003. – pp. 64–73.
- [22] 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.
- [23] Sushchenko O. “Algorithms for Design of Robust Stabilization Systems,” in. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol.13375, 2022, Springer, Cham, pp. 198–213. doi: 10.1007/978-3-031-10522-7\_15. (accessed 23.06.2023).
- [24] Zhyla S., Volosyuk V., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Practical imaging algorithms in ultra-wideband radar systems using active aperture synthesis and stochastic probing signals,” in *Radioelectronic and computer systems*, vol.105, issue 1, 2023, pp. 55–73. doi: 10.32620/reks.2023.1.05. (accessed 23.06.2023).
- [25] 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 Magnetic Fields. IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 1–4. doi: and *Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 295–304. doi: 10.1007/978-981-19-2211-4\_26. (accessed 23.06.2023).
- [26] 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 23.06.2023).
- [27] 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 23.06.2023).
- [28] 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 23.06.2023).
- [29] 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 23.06.2023).
- [30] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam University Press, 2010. 174 p.
- [31] 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 23.06.2023).
- [32] 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 23.06.2023).
- [33] 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.
- [34] 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 23.06.2023).

- [35] 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–

Сведения об авторах.



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



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



**Чунихин Константин Вадимович**  
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, область научных интересов: моделирование электромагнитных процессов, синтез систем активного компенсирования МП промышленной частоты.  
ORCID: 0000-0001-9822-5870  
E-mail: [kvchukhin@gmail.com](mailto:kvchukhin@gmail.com)

1551. doi: 10.1007/s10489-020-01893-z. (accessed 23.06.2023).

- [36] Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 2009. 504 p.
- [37] Zilzter Eckart. *Evolutionary algorithms for multiobjective optimizations: methods and applications*. Ph. D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 1999. 114 p.



**Куценко Александр Сергеевич**  
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез автоматизированных систем управления высокой точности.  
ORCID: 0000-0001-6059-3694  
E-mail: [oleksandr.kutsenko@khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.kutsenko@khpi.edu.ua)



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



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