

Magnetic Field Active Shielding of Overhead Power Lines with Triangular Phase Conductors Arrangements

Kuznetsov B., Nikitina T., Bovdvi I.

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 synthesis of two degree of freedom robust two circuits system of active shielding of magnetic field, generated by overhead power lines with triangular phase conductor's arrangements for reducing the initial magnetic flux density to the sanitary standards level and reducing the system sensitivity to the plant parameters variations. Two circuits system of active shielding includes two shielding coils. System of active shielding synthesis reduced to the multiobjective stochastic game solution, in which the vector payoff is calculated on the basis of the Maxwell equations solutions in the quasi-stationary approximation. The calculation of multiobjective game solution is based on the multi swarm particles optimization algorithms. The initial parameters for the synthesis are geometry and number of phase conductors, operating currents of overhead power lines, as well as the size of the shielding space. As a result of the synthesis the number, configuration, spatial arrangement, and currents of shielding coil, algorithm parameters of the two degree of freedom robust two circuit system of active shielding of magnetic field as well as the resulting value of the magnetic flux density in the shielding space are determined. New scientific results are theoretical and field experimental research of the shielding factor of two circuit system of active shielding with two shielding coils carried out. The possibility of reduction of the initial magnetic flux density level is given. It is shown that the experimental and calculated magnetic field induction values differ by not more than 20 %.

Keywords: overhead power lines, triangular phase conductor's arrangements, magnetic field, active shielding system, theoretical and field experimental research.

DOI: 10.5281/zenodo.3713400

UDC: 621.3.013

Ecranarea activă a câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene cu amplasare în triunghi a conductoarelor fazelor

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

Instituția de stat „Institutul de probleme tehnice de magnetism al ANȘ din Ucraina”
Harkov, Ucraina

Rezumat. Obiectivul lucrării este sinteza unui sistem robust complex de ecranare activă a câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu amplasarea în triunghi a conductoarelor într-o a reduce inducția inițială a câmpului magnetic în clădirile rezidențiale până la nivelul prescris de standardele sanitare și a reduce sensibilitatea sistemului e alimentare în cazul devierilor parametrilor. Sistemul de ecranare activ este un dublu-circuit și conține două înfășurări de ecranare. Procedura de sinteza a sistemului se reduce la obținerea soluției unui șoc stohastic multicriterial în care câștigul vectorial este calculat pe baza obținerii soluțiilor ecuațiilor Maxwell în aproximarea quasistaționară. Obținerea soluției jocului multicriterial se bazează pe algoritmi de optimizare cu mulțimi de particule din soluțiile optime Pareto, luând în considerare relațiile binare de preferințe. Parametrii inițiali pentru sinteză sunt dimensiunile geometrice, numărul de conductoare și curenții de lucru ai liniei electrice aeriene, precum și dimensiunile spațiului ecranat. Ca urmare a sintezei, se determină cantitatea, configurația, locația spațială și curenții înfășurărilor de ecranare, parametrii algoritmului sistemului robust combinat de ecranare activă a câmpului magnetic, precum și valorile inducției câmpului magnetic rezultat în punctele spațiului de ecranare. Ca rezultat, sunt formulate recomandări practice cu privire la o alegere rezonabilă a amplasamentului spațial a două înfășurări de ecranare a sistemelor robuste de ecranare activă a câmpului magnetic creat de liniile electrice aeriene cu un aranjament triunghiular al fazelor, ținând cont de caracteristicile spațio-temporale ale câmpului magnetic. Se prezintă posibilitatea reducerii inducției câmpului magnetic inițial la nivelul standardelor sanitare. S-a constatat că valorile experimentale și calculate ale inducției câmpului magnetic în spațiul de ecranare diferă cu cel mult 20%.

Cuvinte-cheie: linii electrice aeriene, dispunere triunghiulară a firelor de fază, câmp magnetic, sistem robust de ecranare activă, studii teoretice și experimentale de teren.

Активное экранирование магнитного поля воздушных линий электропередачи с треугольным расположением фазных проводов

Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В.

Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма НАН Украины»

Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является синтез робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, генерируемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов предназначенной для снижения индукции исходного магнитного поля в жилых помещениях до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Система активного экранирования является двухконтурной и содержит две экранирующие обмотки. Синтез системы сведен к 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 являются геометрические размеры, количество проводов и рабочие токи воздушной линии электропередачи, а также размеры экранируемого пространства. В результате синтеза определяется количество, конфигурация, пространственное расположение и токи экранирующих обмоток, параметры алгоритма работы робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, а также значения индукции результирующего магнитного поля в точках пространства экранирования. Новыми научными результатами являются теоретические и полевые экспериментальные исследования синтезированной двухконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в зоне экранирования. Приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения двух экранирующих обмоток робастных систем активного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов с учетом пространственно-временной характеристики магнитного поля. Показана возможность снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм. Установлено, что экспериментальные и расчетные значения индукции магнитного поля в пространстве экранирования различаются не более чем на 20 %.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, треугольное расположение фазных проводов, магнитное поле, робастная система активного экранирования, теоретические и полевые экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтные воздушные линии электропередачи (ЛЭП) часто проходят в зонах жилой застройки и являются одним из наиболее опасных источников магнитного поля (МП) промышленной частоты (ПЧ). Причем, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) именно МП ПЧ является наиболее опасным для здоровья населения. В конце 20-го века выявлены канцерогенные свойства слабого МП ЛЭП при его долговременном действии на человека и приняты рекомендации ВОЗ по максимально возможному уровню индукции МП ПЧ в жилых домах для уменьшения возникновения раковых заболеваний [1].

Поэтому решение электромагнитной экологии является актуальной проблемой улучшения качества жизни населения. В течение последних 15 лет в мировой практике постоянно ужесточаются санитарные нормы по предельно допустимым уровням индукции МП частотой 50-60 Гц. В последнее время в практику большинства стран мира начали

вводить двухступенное нормирование уровня МП. Первое значение определяет предельный уровень слабого долговременного влияния МП, который распространяется только на вновь строящиеся городские ЛЭП. Второе значение определяет предельный уровень для сильного кратковременного влияния, например, для рабочего персонала.

При этом в большинстве стран мира запрещено строительство новых ЛЭП, которые не отвечают современным требованиям по уровню индукции МП. Однако, до сегодняшнего времени остается нерешенной проблема уменьшения до безопасного уровня МП действующих ЛЭП старой постройки.

В настоящее время для населения вводятся санитарные нормы по безопасному уровню индукции магнитного поля частотой 50 Гц на уровне 0.5 мкТл в нормативные документы Украины [2]. Однако, в Украине эти нормы еще не обеспечены, что создает угрозу для здоровья сотен тысяч людей, проживающих вблизи ЛЭП. Это положение требует срочного принятия соответствующих мер по

снижению до безопасного уровня МП ЛЭП, расположенных в пределах городов.

Государственным учреждением «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины» проведены теоретические и экспериментальные исследования [3–4] и установлено, что уровень индукции МП практически всех действующих в настоящий момент в Украине воздушных ЛЭП, охранные зоны, которых определялись раньше исключительно по уровню электрического поля и без учета уровня МП, превышает предельно допустимый уровень 0.5 мкТл по МП в 1.5–6 раз на расстоянии ближе 100 м от ЛЭП. Было также установлено, что около 2 % городского населения Украины проживает в таких зонах ЛЭП, что составляет около 0.7 млн. человек, для которых создается опасность их здоровью. Поэтому проблема уменьшения уровня индукции МП действующих ЛЭП в зоне размещения жилых домов с 1.5–3 мкТл до предельно допустимого уровня в 0.5 мкТл является неотложной задачей.

МЕТОДЫ НОРМАЛИЗАЦИИ УРОВНЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В течение последних 15 лет во всем мире проводятся интенсивные исследования и разрабатываются разнообразные методы нормализации МП [5–15].

Из известных методов нормализации магнитного поля действующих ЛЭП наиболее эффективным является их реконструкция, то есть перемещение ЛЭП на безопасное расстояние от жилых домов, или замена воздушной ЛЭП на подземную кабельную линию. Однако, такая реконструкция связана с существенными материальными расходами.

Как показывает мировая практика, традиционные методы электромагнитного экранирования низкочастотного (50–60 Гц) МП с помощью пассивных электропроводящих (магнитоэлектрических) экранов имеют незначительную эффективность, высокую металлоемкость и стоимость.

Поэтому, целесообразным является использование методов и технологий активного экранирования, имеющих меньшую металлоемкость и обеспечивающих заданную эффективность экранирования МП [16–17].

Сущность методов активного экранирования заключается в формировании экранирующего магнитного поля с такой пространственно-временной структурой, суперпозиция которого с магнитным полем ЛЭП в зоне защиты, минимизирует МП до уровня санитарных норм. Этот метод реализуется с помощью системы активного экранирования (САЭ).

САЭ состоит из экранирующих обмоток (ЭО), системы управления и датчиков МП. САЭ автоматически формирует экранирующее МП в функции сигналов прямой и обратной связей по датчикам МП, установленным в пространстве экранирования и в непосредственной близости от ЛЭП.

Основной характеристикой системы экранирования является фактор экранирования [13–15], который определяет, во сколько раз значение уровня индукции МП с использованием технологий защиты меньше исходного МП.

Технологию активного экранирования магнитного поля действующих ЛЭП более 10 лет используют в большинстве развитых стран мира, например, США, Израиле, Италии, Испании [5–7, 13–14]. Однако непосредственное использование импортных технологий активного экранирования МП ЛЭП в Украине невыгодно из экономических соображений, в связи с высокой стоимостью оплаты зарубежных квалифицированных специалистов, обусловленной необходимостью индивидуальной разработки САЭ для каждого конкретного случая размещения источника поля и защитной зоны.

В Украине технология активного экранирования МП, и научные основы для создания подобной технологии отсутствуют. Поэтому, экономически более целесообразным является создание и внедрение отечественной технологии активного экранирования МП ЛЭП, которая может быть построена на основе разработанных авторами методов активного экранирования МП с использованием методов мультиагентной оптимизации [4].

Сложность синтеза САЭ в значительной степени определяется особенностями пространственно-временных (ПВХ) МП, генерируемого ЛЭП [8]. На Украине широко распространены самые различные типы высоковольтных ЛЭП, как по уровню

напряжения, конструкции опор, так и по вариантам подвеса проводов. Рассмотрим более подробно ПВХ МП, генерируемого различными типами ЛЭП.

Одноцепные ЛЭП с опорой ЛБ 330–3 с горизонтальным расположением проводов, одноцепные ЛЭП с опорой У 330 с вертикальным расположением проводов, двухцепные ЛЭП с опорой У 330-2 и У 330-2 с расположением проводов типа «бочка», «елка» и «обратная елка» генерируют слабо поляризованное МП с ПВХ в виде сильно вытянутого эллипса с осями B_x и B_z . Активное экранирование такого МП можно реализовать с помощью одной ЭО. При использовании в САЭ только одной ЭО можно создать экранирующее МП, вектор индукции которого ортогонален плоскости обмотки и не изменяет своего положения со временем. Поэтому с помощью такой системы можно экранировать большую ось эллипса ПВХ и получить достаточно высокий фактор экранирования. Именно для ЛЭП с такими типами опор и получили наибольшее распространение в мире САЭ МП с одной ЭО [5–15].

Однако одноцепные ЛЭП с опорой У 330-1Т и треугольным расположением проводов генерируют сильно поляризованное МП с ПВХ близкой к окружности. Активное экранирование такого МП представляет наибольшие трудности, так как для эффективного экранирования такого МП необходимо, по меньшей мере, две ЭО.

Целью работы является синтез и разработка практических рекомендаций по созданию эффективных систем активного экранирования жилых домов от магнитного поля существующих высоковольтных ЛЭП с треугольным расположением фазных проводов для его уменьшения внутри жилых помещений до предельно допустимого уровня и защите здоровья населения от его долговременного действия.

Основными задачами работы является исследование распределения МП в жилых домах от расположенных вблизи действующих ЛЭП 10-330 кВ старой застройки и определения необходимой эффективности экранирования МП а также размеров зон экранирования, достаточных для защиты населения и жилых домов; разработка основных структур САЭ в зависимости от конструктивного выполнения

ЛЭП, ее локализации, относительно жилых домов разных конструкций, анализ основных показателей САЭ; разработка метода оптимизации САЭ по критерию эффективности, синтез основных типов САЭ и экспериментальные исследования макета САЭ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

В качестве исходных параметров для синтеза САЭ выступают параметры ЛЭП (рабочие токи, геометрия и количество проводов, расположения ЛЭП, относительно зоны защиты) [4–5], а также размеры зоны защиты и нормативное значение индукции магнитного поля, которое должно быть достигнуто в результате экранирования.

В процессе синтеза необходимо определить параметры ЭО (их количество, конфигурацию, пространственное расположение, схему подключения), токи ЭО, результирующее значение индукции магнитного поля в пространстве экранирования, а также параметры алгоритма работы САЭ.

Рассмотрим схему синтезируемой САЭ, показанную на рис 1. Здесь введены матричные операторы W_{LM} формирования индукции исходного МП $B_{LM}(t)$, порождаемого токами ЛЭП $I_L(t)$ в точках расположения магнитометров, и матричные операторы W_L формирования индукции исходного МП $B_L(t)$, порождаемого этими же токами ЛЭП $I_L(t)$ в точках L рассматриваемого пространства экранирования P , матричные операторы W_{SCM} формирования индукции экранирующего МП $B_{SCM}(t)$, порождаемого токами $I_{SC}(t)$ компенсационных обмоток в точках расположения магнитометров, и матричные операторы W_{SC} формирования индукции $B_{SC}(t)$ экранирующего МП, порождаемого этими же токами $I_{SC}(t)$ ЭО в L точках пространства экранирования P [18–30]. Заметим, что числовые значения элементов этих матричных операторов рассчитаны на основании решений уравнений

Максвелла в квазистационарном приближении [16–17].

Матричные операторы W_{CC} и W_{OC} регуляторов формирования управляющих сигналов $U_C(t)$ и $U_O(t)$ ЭО соответственно по разомкнутому и замкнутому контурах управления [31–34]. При этом, элементы матричных операторов W_{CC} регуляторов

замкнутых контуров регулирования описывают ПИД регуляторы, а элементы матричных операторов W_{OC} регуляторов разомкнутых контуров регулирования описывают фазовращатели в виде звеньев чистого запаздывания с заданными фазой запаздывания и коэффициентом усиления.

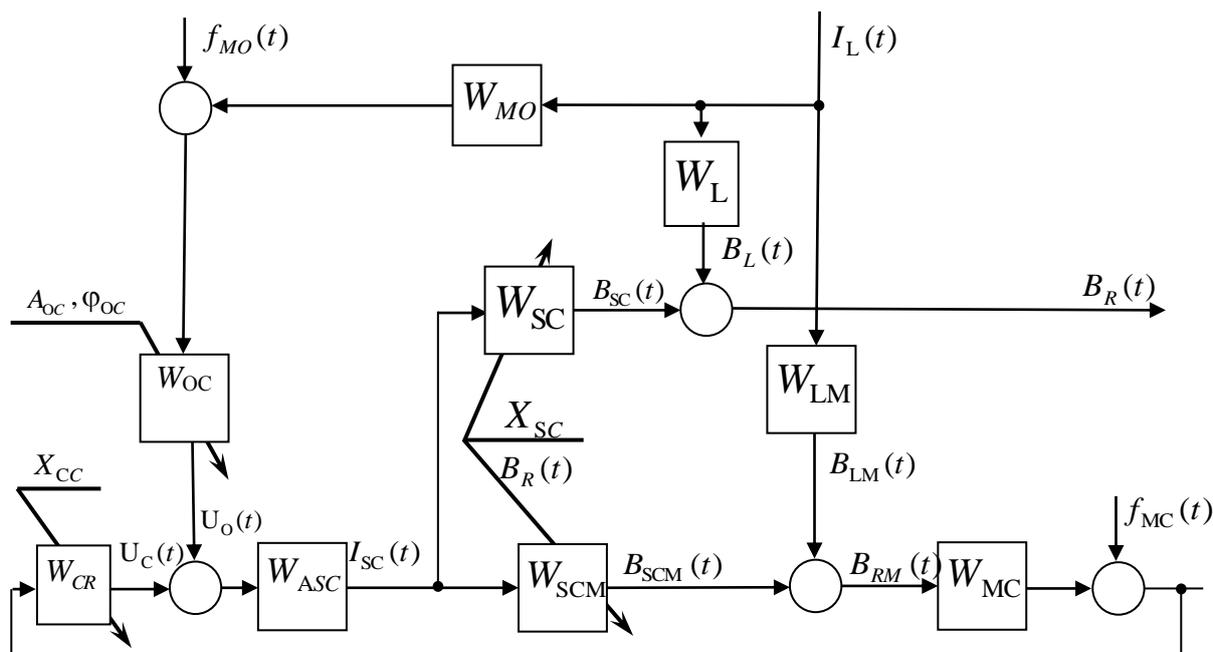


Рис. 1. Схема системы активного экранирования. ¹

Матричные операторы W_{ASC} описывает динамику усилителей мощности с внутренними регуляторами токов экранирующих обмоток. Матричные операторы W_{MC} и W_{MO} описывают динамику магнитометров, с помощью которых измеряются индукции МП в местах установки магнитометров внутри и вне пространства экранирования, необходимых для реализации замкнутых и разомкнутых контуров управления. $f_{MO}(t)$ и $f_{MC}(t)$ – помехи измерения индукции МП с помощью магнитометров, установленных соответственно внутри и вне рассмотренного пространства экранирования [31–34].

Реализация этой схемы позволяет синтезировать САЭ с необходимой эффективностью на основе данных о конструкции и технических характеристиках ЛЭП, а также координатах пространства экранирования.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Введем вектор параметров оптимизации X , компонентами которого является вектор координат пространственного расположения и геометрические размеры ЭО и вектор параметров регуляторов. Введем вектор параметров неопределенности Δ , учитывающий неточное знание параметров объекта управления и, возможно, их изменение в процессе работы САЭ [22–24]. В частности, наиболее сильно в процессе работы САЭ изменяется вектор токов ЛЭП $I_L(t)$. Причем, эти изменения имеют суточные, недельные, сезонные и годовые циклы. Тогда, при заданном векторе токов ЛЭП определим [16–17] действующее значение индукции результирующего МП, генерируемого в точках пространства экранирования токами ЛЭП и ЭО.

¹ Appendix 1

Синтез такой робастной САЭ может быть сведен к решению многокритериальной игры [37] с векторным выигрышем

$$\mathbf{B}(X, \Delta) = [\mathbf{B}(X, \Delta, P_1), \mathbf{B}(X, \Delta, P_2), \dots, \mathbf{B}(X, \Delta, P_N)]^T \quad (1)$$

В этой игре первым игроком является вектор искомым параметров X , и его стратегией является минимизация векторного выигрыша (1). Вторым игроком является вектор параметров неопределенности Δ , и его стратегией является максимизация этого же самого векторного выигрыша (1). Поэтому такая игра является многокритериальной нелинейной антагонистической игрой двух игроков с нулевой суммой. Причем стратегии каждого игрока определяются из множеств Парето-оптимальных решений векторного выигрыша для каждого игрока. Такой подход является стандартным подходом к синтезу робастных систем, соответствующим самому неблагоприятному случаю.

Компонентами векторного выигрыша (1) являются действующие значения модуля вектора индукции в заданных точках пространства экранирования. Эти компоненты векторного выигрыша (1) являются нелинейными функциями вектора искомым параметров X и вектора неопределенностей Δ параметров модели объекта управления и вычисляются на основе решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении [16,17].

Рассмотрим метод решения этой многокритериальной игры. Компоненты векторного выигрыша являются нелинейными функциями вектора X искомым параметров и вектора Δ неопределенностей параметров модели объекта управления и, как правило, является много экстремальными функциями, содержащими локальные минимумы и максимумы.

Для нахождения решения исходной многокритериальной нелинейной антагонистической игры (1) с ограничениями использован алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации на основе двух мультироев частиц [35–36]. Количество этих мультироев равняется количеству компонент векторного выигрыша (1). С помощью первого мультироя вычисляется ход первого игрока – вектор искомым параметров X . С

помощью второго мультироя вычисляется ход второго игрока – вектор параметров неопределенности Δ .

При этом с помощью отдельных роев первого мультироя вычисляются ходы первого игрока, минимизирующие отдельные компоненты векторного выигрыша (1). С помощью отдельных роев второго мультироя вычисляются ходы второго игрока, максимизирующие отдельные компоненты этого же векторного выигрыша (1).

Эти отдельные рои находят наилучшие локальные значения ходов первого и второго игроков. Для нахождения глобального решения исходной многокритериальной игры (1) в ходе поисков оптимальных решений отдельных компонент векторного выигрыша отдельные рои каждого мультироя обмениваются информацией между собой. При этом для вычисления скорости движения частиц одного роя используется информация о глобальном оптимуме, полученная частицами другого роя, что позволяет выделить все потенциальные Парето-оптимальные решения [36]. С этой целью на каждом шаге движения отдельной частицы роя используются функции бинарных предпочтений локальных решений, полученных всеми роями данного мультироя. В качестве локального оптимального решения каждого роя используется глобальное решение, полученное одним из роев мультироя на основании бинарных предпочтений локальных решений [35].

Фактически при таком подходе реализуется основная идея метода последовательного сужения области компромиссов – из исходного множества возможных решений последовательно удаляются все Парето-оптимальные решения, которые не могут быть выбраны на основании бинарных предпочтений локальных решений.

Удаление осуществляется до тех пор, пока не будет получено единственное глобально оптимальное решение. В результате применения такого подхода на каждом шаге сужения не будет удалено ни одно потенциально оптимальное решение [36].

Для повышения скорости нахождения глобального оптимального решения используется нелинейный алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации, в котором скорости движения

отдельных частиц роев вычисляются с помощью нелинейной функции переключения Хэвисайда [37].

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим результаты синтеза САЭ МП, генерируемого одноцепной ЛЭП 110 кВ с треугольным расположением фазных проводов. На рис. 2 показано взаиморасположение данной ЛЭП, генерирующей МП, уровень индукции, которой в рассматриваемом пространстве экранирования (ПЭ) должен быть уменьшен до санитарных норм. На рис. 3 показаны изолинии индукции исходного МП при токе ЛЭП 750 А. В рассматриваемом ПЭ уровень индукции исходного МП изменяется в диапазоне от 2.25 мкТл до 1 мкТл, что превышает санитарные нормы более чем в четыре раза.

Рассмотрим результаты синтеза САЭ при токе ЛЭП 700 А. На рис.2 также показано расположение двух ЭО, пространственное расположение которых получено в результате синтеза САЭ.

Верхние ветви ЭО имеют координаты (2; 4) и (6; 3.1031). Нижние ветви ЭО имеют координаты (6.6897; 1.5394) и (2; 0). Расчетные значения ампер-витков (A^*v) в ЭО при токе ЛЭП 750 А составляют 158.9729 A^*v и -178.5417 A^*v . Фазовые сдвиги токов ЭО относительно опорного напряжения составляют 0.6934 рад и 1.5959 рад.

На рис 4 показаны изолинии индукции результирующего МП при включенной САЭ. В рассматриваемом ПЭ уровень индукции результирующего МП не превышает 0.55 мкТл. Следовательно, фактор экранирования равен 4.1.

На рис. 5 показаны пространственно-временные характеристики (ПВХ) вектора напряженности МП, создаваемого: (а) ЛЭП – красная; (b) при включенной САЭ – синяя и (с) суммарного МП при включенной САЭ – зеленая.

Как видно из этого рисунка, ПВХ исходного МП и МП, генерируемого двумя ЭО представляют собой эллипсы с коэффициентом эллипсности примерно равным 0.8.

Причем, площади ПВХ исходного МП и ПВХ МП, генерируемого двумя ЭО примерно одинаковы. Однако, площадь ПВХ

результирующего МП при включенной САЭ существенно меньше площади ПВХ исходного МП, что и обуславливает высокое значение фактора экранирования.

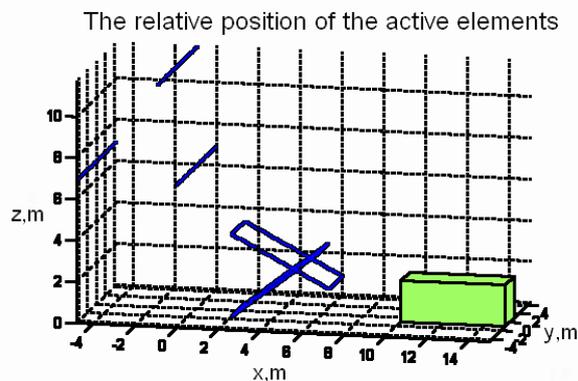


Рис. 2. Взаиморасположение воздушной ЛЭП 110 кВ с треугольным расположением фазных проводов, двух компенсационных обмоток и пространства экранирования. ²

Следует заметить, что ПВХ МП, генерируемого только одной первой ЭО, либо только одной второй ЭО представляют собой прямые линии. Однако ПВХ МП, генерируемого двумя ЭО, как это следует из рис. 5, представляет собой эллипс.

Рассмотрим более подробно ПВХ МП при работе только одной первой ЭО, либо только одной второй ЭО. На рис. 6 показаны ПВХ МП, создаваемого: (а) ЛЭП – красная; (b) при включенной только одной первой ЭО САЭ – синяя и (с) суммарного МП при включенной только одной первой ЭО САЭ – зеленая.

Как видно из этого рисунка ПВХ результирующего МП представляет собой сильно вытянутый эллипс, площадь, которой несколько меньше площади ПВХ исходного МП.

На рис 7 показаны изолинии индукции результирующего МП при включенной только одной первой ЭО САЭ.

В рассматриваемом ПЭ уровень индукции результирующего МП индукции изменяется в диапазоне от 2.0 мкТл до 0.8 мкТл.

Следовательно, фактор экранирования равен 1.1. Таким образом, при работе только одной первой ЭО САЭ исходное МП практически не экранируется.

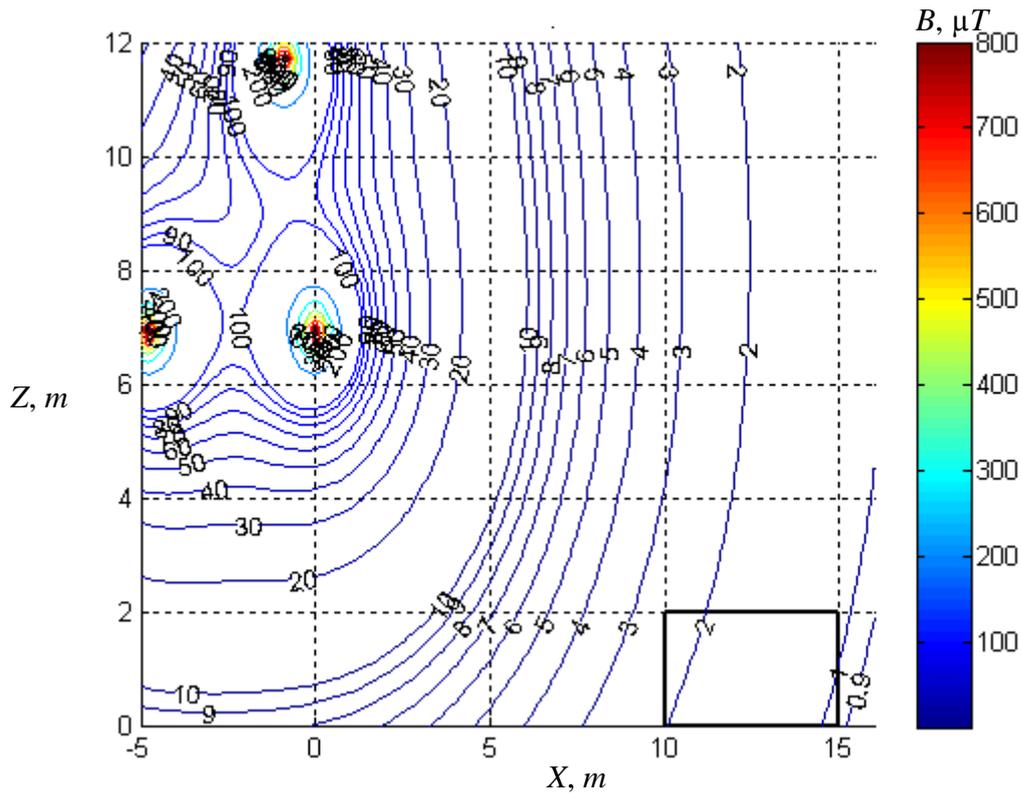


Рис. 3. Изолинии уровня индукции исходного магнитного поля.³

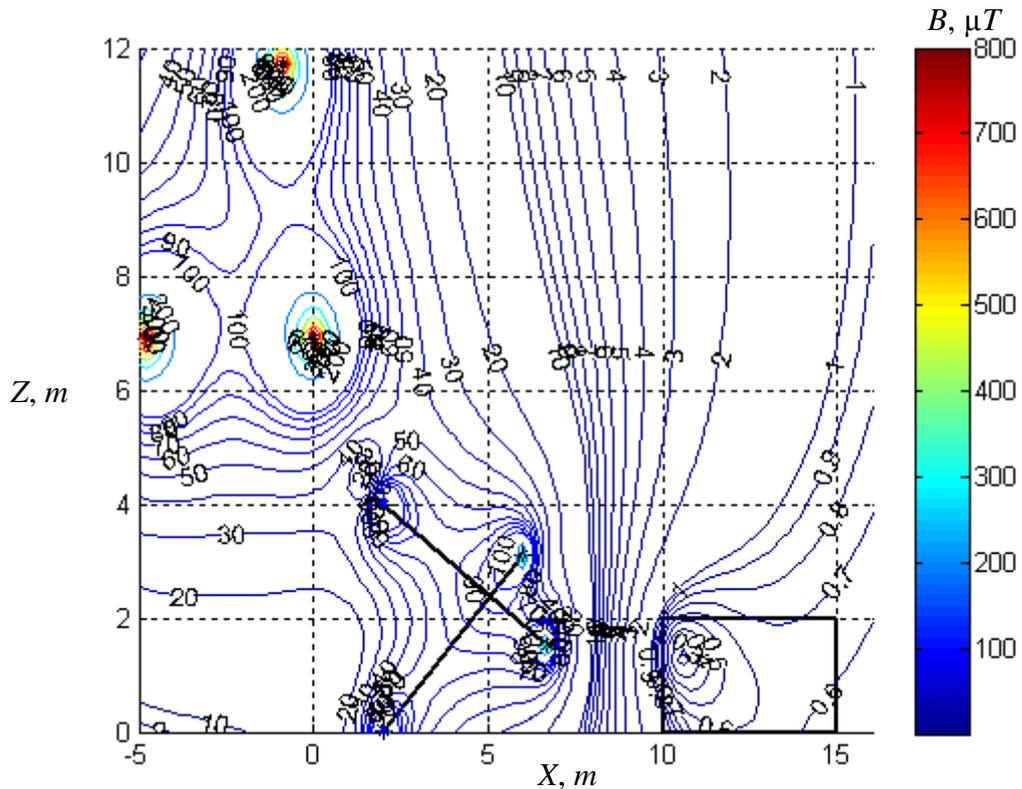


Рис. 4. Изолинии уровня индукции результирующего магнитного поля с включенной системой активного экранирования.⁴

На рис. 8 показаны ПВХ МП, создаваемого: (а) ЛЭП – красная; (б) при включенной только одной второй ЭО САЭ –

синяя и (с) суммарного МП при включенной только одной второй ЭО САЭ – зеленая. Как видно из этого рисунка ПВХ

результатирующего МП представляет собой практически прямую линию.

На рис 9 показаны изолинии индукции результатирующего МП при включенной только одной второй ЭО САЭ. В рассматриваемом ПЭ уровень индукции результатирующего МП индукции изменяется в диапазоне от 3.5 мкТл до 1.3 мкТл. Таким образом, при работе только одной второй ЭО САЭ, уровень индукции исходного МП возрастает более чем в полтора раза за счет перекompенсации исходного МП.

Заметим, что большая ось эллипса ПВХ результатирующего МП при включенной только одной первой ЭО САЭ практически параллельна линии ПВХ МП, генерируемого только одной второй ЭО САЭ, а большая ось эллипса ПВХ результатирующего МП при включенной только одной второй ЭО САЭ практически параллельна линии ПВХ МП, генерируемого только одной первой ЭО САЭ, что и обеспечивает высокий фактор экранирования.

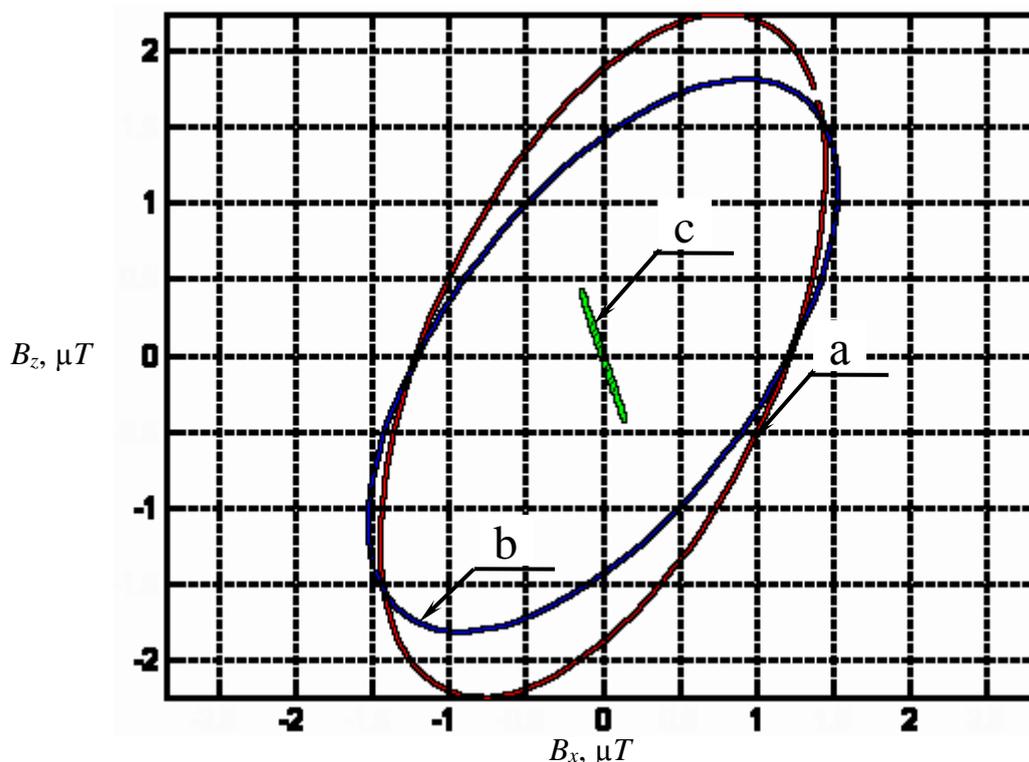


Рис. 5. Пространственно-временные характеристики магнитного поля: (а) исходного, (b) - генерируемого двумя экранирующими обмотками и (с) результатирующего с включенной системой активного экранирования.⁵

На рис. 10 показано сравнение уровней индукции исходного МП и результатирующего МП при включенной САЭ. Уровень индукции исходного МП составляет 2.25 мкТл, что более чем в пять раз превышает санитарные нормы Украины по МП в 0.5 мкТл. При включенной САЭ уровень индукции МП составляет 0.55 мкТл. Следовательно, фактор экранирования равен 4.1.

Заметим, что при синтезе САЭ была принята величина тока в ЛЭП на уровне 750 А. При таком токе САЭ уменьшает индукцию исходного МП от величины

2.25 мкТл до 0.55 мкТл. Фактически ток в рассматриваемой ЛЭП изменяется в диапазоне от 250 А до 600 А, и поэтому такая САЭ обеспечивает санитарные стандарты Украины по МП на уровне 0.5 мкТл.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Рассмотрим полевые экспериментальные исследования макета САЭ.

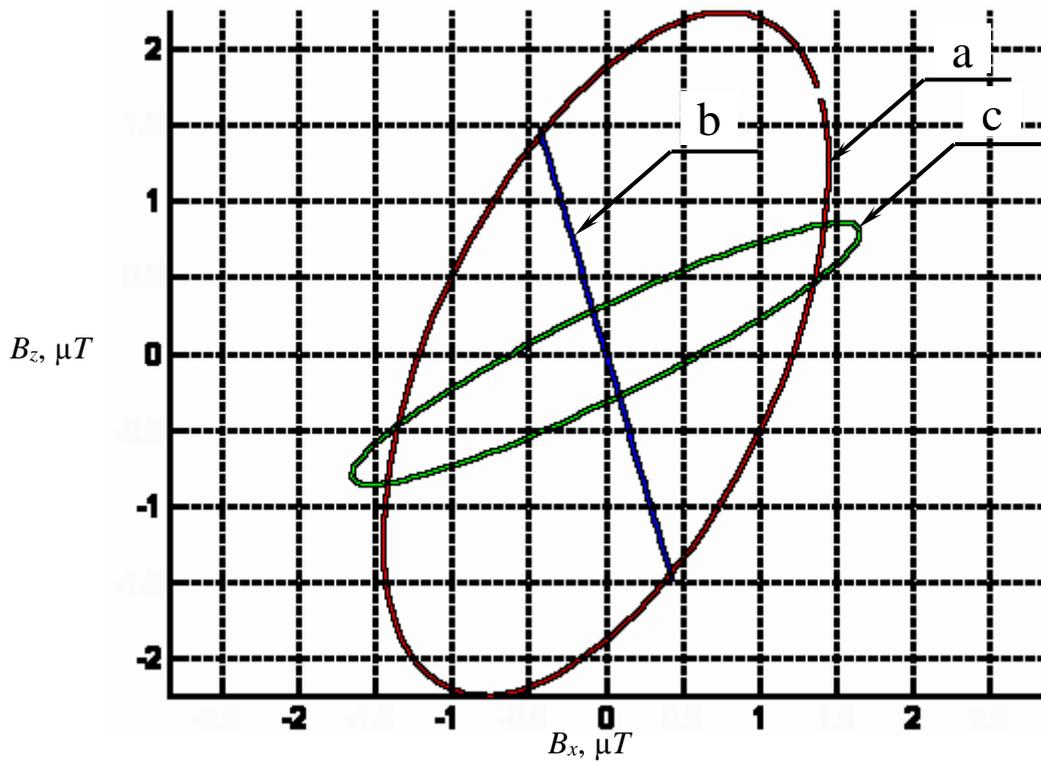


Рис. 6. Пространственно-временные характеристики магнитного поля: (а) исходного, (б) -генерируемого только одной первой экранирующей обмоткой и (с) результирующего с включенной системой активного экранирования только с одной первой экранирующей обмоткой. ⁶

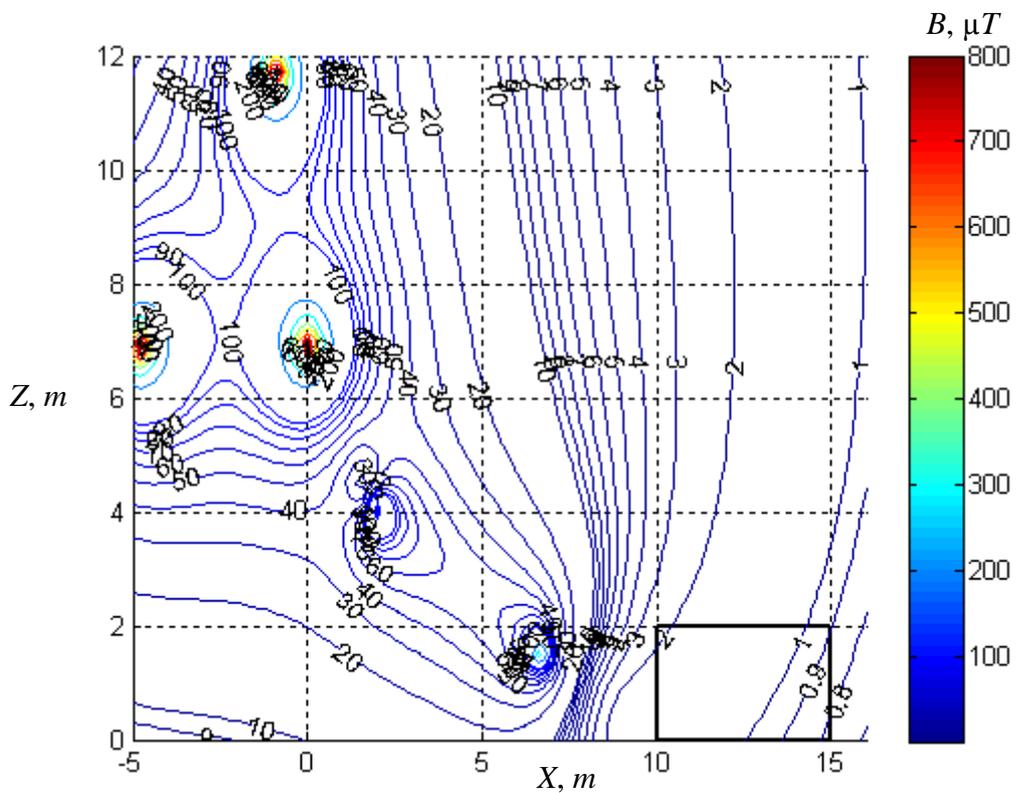


Рис. 7. Изолинии результирующего магнитного поля с включенной системой активного экранирования только с одной первой экранирующей обмоткой. ⁷

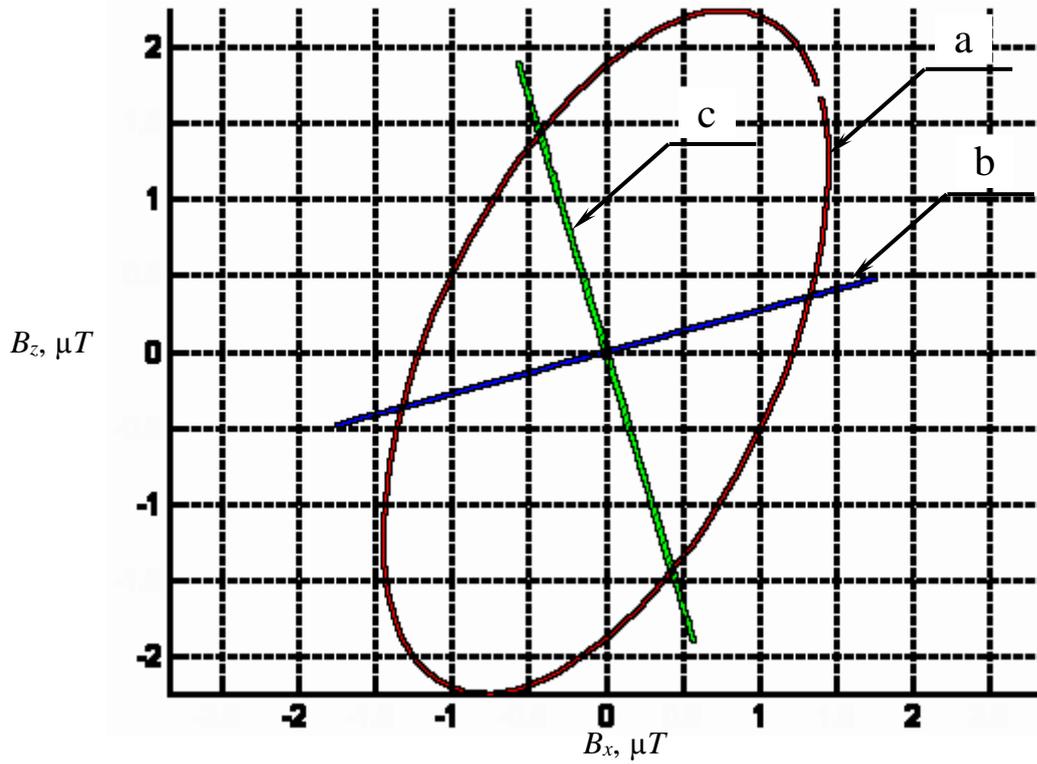


Рис. 8. Пространственно-временные характеристики магнитного поля: (а) исходного, (b) - генерируемого только одной второй экранирующей обмоткой и (с) результирующего с включенной системой активного экранирования только с одной второй экранирующей обмоткой. ⁸

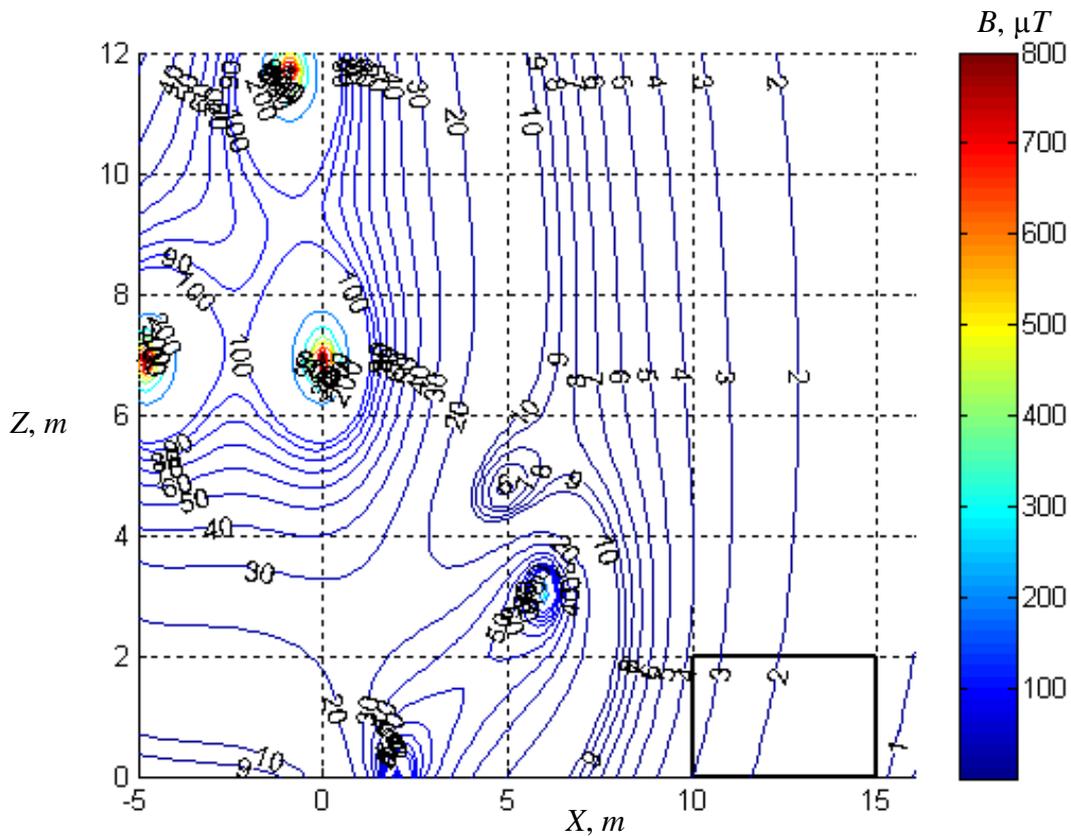


Рис. 9. Изолинии результирующего магнитного поля с включенной системой активного экранирования только с одной второй экранирующей обмоткой. ⁹

На рис. 11 показаны ЛЭП, первая ЭО (ЭО1) и вторая ЭО (ЭО2).

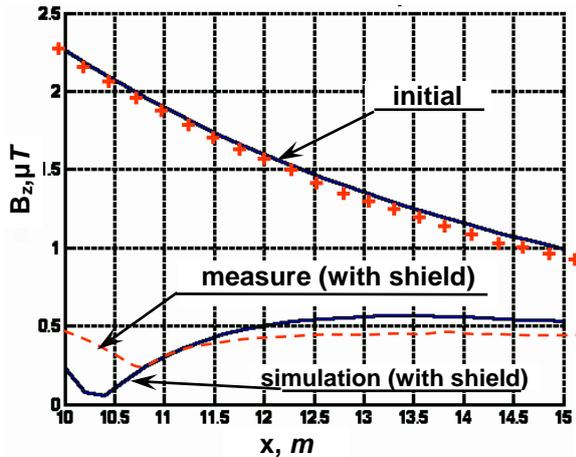


Рис. 10. Сравнение индукции исходного магнитного поля и магнитного поля при включенной системе активного экранирования.¹⁰

Обе ЭО представляет собой квадратные обмотки, верхние ветви которых расположены на высоте 4 м и 3.1 м от уровня земли, а нижние ветви расположены на высоте 1.5 м и 0 м от уровня земли.

Каждая ЭО САЭ содержит по 20 витков и питается от усилителя типа TDA7294.

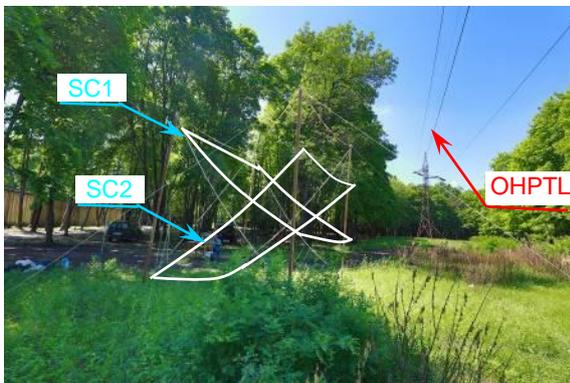


Рис. 11. ЛЭП 110 кВ и две компенсационные обмотки системы активного экранирования магнитного поля.¹¹

Обе ЭО содержат внешний контур индукции магнитного поля и внутренний контур тока. Для реализации разомкнутого и замкнутого управлений в САЭ используются индуктивные датчики. Причем, для реализации замкнутого управления используются два индуктивных датчика, расположенных в пространстве экранирования. Оси этих датчиков расположены параллельно расчетным направлениям линий ПВХ МП,

генерируемых отдельными ЭО. Для реализации разомкнутого управления используется один индуктивный датчик, расположенный вне пространства экранирования. САЭ запитывается от автономного генератора.

Контрольные измерения МП выполняются магнитометром типа EMF-828 фирмы Lutron.

Рассмотрим результаты полевых экспериментальных исследований САЭ. На рис. 10 вместе с расчетными значениями показаны и экспериментально измеренные значения индукции МП, генерируемого ЛЭП, и индукции результирующего МП при включенной САЭ.

Экспериментально измеренное минимальное значение индукции в малой зоне экранирования при включенной САЭ составляет 0.3 мкТл. Исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 2.25 мкТл, а при включенной САЭ уровень МП во всей зоне экранирования не превышает 0.6 мкТл.

Сравнение результатов расчетных и экспериментально измеренных значений индукции исходного МП и результирующего МП с включенной САЭ, показано на рис. 10, как видим результаты отличаются не более чем на 20 %.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Рассмотрим экономическую целесообразность внедрения в Украине отечественных САЭ по сравнению с такими практически доступными методами нормализации магнитного поля действующих ЛЭП, как реконструкция ЛЭП, или использование импортных технологий активного экранирования. В качестве примера рассмотрим составляющие стоимости нормализации МП в жилом доме размерами 60x20x18 м, расположенном на расстоянии 15 м от ЛЭП 110 кВ различными методами.

Определим составляющие стоимости при установке кабельной вставки длиной 250 м между соседними опорами ЛЭП: стоимость 1 м кабеля 110 кВ составляет \$100; стоимость кабеля трехфазной КЛ длиной 250 м составляет \$75 000. Себестоимость проектно-монтажных работ составляет до

^{10,11} Appendix 1

\$75 000. Таким образом, общая стоимость реализации метода составляет \$150 000 (4 млн. грн.)

Рассмотрим теперь составляющие стоимости при использовании САЭ фирмы «EMF Services» USA. Стоимость изготовления САЭ составляет \$10 000; проектно-монтажных и наладочных работ составляет от \$90 000; Общая стоимость реализации технологии – составляет от \$100 000 (2.7 млн. грн.)

Рассмотрим теперь составляющие стоимости при использовании отечественной САЭ. Стоимость изготовления экспериментального образца САЭ составляет \$8 000; стоимость разработки и проектно-монтажных работ составляет \$12 000; Общая стоимость реализации САЭ составляет \$20 000 (540 тыс. грн.).

Поэтому использование в Украине отечественных САЭ по сравнению с другими методами защиты дома от МП ЛЭП требует в 5–8 раз меньших расходов. Так реконструкция ЛЭП 110 кВ обойдется 4 млн. грн.; использование технологии экранирования США затребует не менее 2,5 млн. грн; применение же разработанной отечественной САЭ будет стоить около 500 тыс. грн.

Кроме этого, широкое внедрение в Украине отечественных САЭ позволит в 2–6 раз уменьшить техногенное электромагнитное воздействие энергетики на жилую и окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены принципы построения систем активного экранирования магнитного поля, создаваемого различными типами воздушных линий электропередачи. Показано, что для эффективного экранирования магнитного поля создаваемого воздушной линией электропередачи с треугольным расположением фазных проводов необходимо не менее двух экранирующих обмоток. Разработана схема комбинированной робастной системы активного экранирования.

2. Впервые выполнен синтез системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушной линией электропередачи с треугольным

расположением фазных проводов. Синтезированная система является двухконтурной и имеет две экранирующие обмотки. По алгоритму управления каждая обмотка является комбинированной системой и содержит контуры разомкнутого и замкнутого управления по индукции магнитного поля. По структуре управления каждая обмотка является системой подчиненного регулирования и содержит внешний контур регулирования индукции магнитного поля и внутренний контур регулирования тока обмотки. Синтез робастной системы основан на решении многокритериальной стохастической игры. Компоненты векторного выигрыша вычисляются на основе решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Решение многокритериальной игры из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения находится на основе алгоритма нелинейной оптимизации мультирелем частиц.

3. Проведен анализ результатов исследования синтеза системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, генерируемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением проводов. Система позволяет уменьшить индукцию исходного магнитного поля до уровня санитарных норм и снизить чувствительность системы к неопределенности параметров модели объекта управления.

4. Для верификации результатов синтеза системы активного экранирования магнитного поля определена структура и параметры и разработан полномасштабный макет системы активного экранирования, с двумя независимыми каналами, для нормализации уровня техногенного магнитного поля, генерируемого ЛЭП с треугольным расположением проводов. Проведены экспериментальные исследования элементов и макета САЭ в полевых условиях. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных систем активного экранирования магнитного поля на уровне коэффициента экранирования 2–5 единиц, что позволяет снизить в жилой зоне уровень исходной индукции магнитного поля от расположенных вблизи ЛЭП до уровня

санитарных норм. Показано, что экспериментальные и расчетные значения индукции отличаются не более чем на 20 %.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Scheme active shielding system. ($B_L(t)$ – initial magnetic flux density generated by overhead power lines in shielding space, $B_{LM}(t)$ – initial magnetic flux density generated by overhead power lines in shielding space points, in which magnetic field sensors are located, $B_{SC}(t)$ – magnetic flux density generated by only shielding coils in shielding space, $B_{SCM}(t)$ – magnetic flux density generated by only shielding coils in shielding space points, in which magnetic field sensors are located, $B_R(t)$ – resultant magnetic flux density in shielding space with the system of active shielding is on, $B_{RM}(t)$ – resultant magnetic flux density in shielding space points, in which magnetic field sensors are located with the system of active shielding is on, $I_L(t)$ – overhead power line current, $I_{SC}(t)$ – shielding coils current, $U_O(t)$ – open loop control, $U_C(t)$ – closed loop control, $f_{MC}(t)$ – noise of magnetic flux density sensors, which are located in the shielding space, $f_{MO}(t)$ – noise of magnetic flux density sensors which are located outside the shielding space for open loop control, W_{MC} – matrix operator of magnetic flux density sensors are located in the shielding zone, W_{MO} – matrix operator of magnetic flux density sensors, which are located outside the shielding space for open loop control, W_{ASC} – matrix operator of amplifiers powered by shielding coils, W_L – matrix operator which are formatted by initial magnetic flux density $B_L(t)$ generated by overhead power lines current $I_L(t)$ in the shielding space, W_{LM} – matrix operator which are formatted by initial magnetic flux density $B_{LM}(t)$ generated by overhead power lines current $I_L(t)$ in the in shielding space points, in which magnetic field sensors are located, W_{SC} – matrix operator which are formatted by magnetic flux density $B_{SC}(t)$ generated by only shielding coils current $I_{SC}(t)$ in the shielding space, W_{SCM} – matrix operators, which are formatted by magnetic flux density, $B_{SCM}(t)$ generated by only shielding coils current $I_{SC}(t)$ in the shielding space points, in which magnetic field sensors are located, W_{OC} – matrix operator of open loop controller, W_{CC} – matrix operator of closed

loop controller, X_{SC} – shielding coils spatial arrangement and geometric sizes, A_{OC}, φ_{OC} – parameters of the open loop controller, X_{CC} – parameters of the closed loop controller).

²**Fig. 2.** 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.

³**Fig. 3.** Isolines of the level of induction of the initial magnetic field.

⁴**Fig. 4.** Isolines of the level of induction of the resulting magnetic field with the active shielding system turned on.

⁵**Fig. 5.** Spatio-temporal characteristics of the magnetic field: (a) the source, (b) generated by two shielding windings and (c) resulting with the active shielding system turned on.

⁶**Fig. 6.** Spatio-temporal characteristics of the magnetic field: (a) the source, (b) generated by only one first shielding winding and (c) resulting with the active shielding system turned on, with only one first shielding winding.

⁷**Fig. 7.** Isolines of the resulting magnetic field with the active shielding system turned on with only one first shielding winding.

⁸**Fig. 8.** Spatio-temporal characteristics of the magnetic field: (a) the source, (b) generated by only one second shielding winding and (c) resulting with the active shielding system turned on, with only one second shielding winding.

⁹**Fig. 9.** Isolines of the resulting magnetic field with the active shielding system turned on with only one second shielding winding.

¹⁰**Fig. 10.** Comparison of the induction of the initial magnetic field and the magnetic field when the active shielding system is turned on.

¹¹**Fig. 11.** 110 kV overhead power transmission line (OHPTL) and two compensation windings (SC1, SC2) of the active magnetic field shielding system.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] The World Health Organization, “The International EMF Project”. [Online]. Available: <http://www.who.int/peh-emf/project/en/>. [Accessed: 17-Feb-2017].
- [2] . Electrical installation regulations, 5th ed., The Ministry of Energy and Coal Mining of Ukraine, 2014, 800 p.
- [3] Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines, Technical Electrodynamics, 2016, vol. 3, pp. 6-9.
- [4] Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyliugina O.Yu. The magnetic field of transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level, Technical Electrodynamics, 2013, no. 2, pp. 3–9.

- [5] Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Kato, Kazuo, Yamazaki, Keita, Sato, Tomoya, Haga, Akira, Okitsu, Takashi, Muramatsu, Kazuhiro, Ueda, Tomoaki, Yoshizawa, Masahito. Shielding Effect of Panel Type Active Magnetic Compensation. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials.* 2005, v. 125, pp. 99–106.
- [13] Canova L. Giaccone Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop Electricity Distribution / CIRE2009. 20th International Conference and Exhibition on Date of Conference. – Part 12009. – Pp. 1–4.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. – *Technical electro-dynamics,* 2014, v. 5, pp. 11-13.
- [18] Chorna O. Identification of changes in the parameters of induction motors during monitoring by measuring the induction of a magnetic field on the stator surface / O. Chorna, O. Chorny, V. Tytiuk // *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES).* – Kremenchuk, 2019. doi:10.1109/MEES.2019.8896554
- [19] Chystiakov P. Remote control of electromechanical systems based on computer simulators / P. Chystiakov, O. Chorny, B. Zhautikov, G. Sivyakova // *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Nov. 2017.* doi: 10.1109/mees.2017.8248934.
- [20] Korol S. Investigation the maximal values of flux and stator current of autonomous induction generator / S. Korol, S. Buryan, M. Pushkar, M. Ostroverkhov // *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), May 2017.* doi: 10.1109/ukrcon.2017.8100302.
- [21] Ostroverkhov N. Investigation the maximal values of flux and stator current of autonomous induction generator / N. Ostroverkhov, S. Korol, S. Buryan, M. Pushkar // *Proc. IEEE Internat. Conference First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017), May 29 – June 2, 2017, Kyiv, Ukraine.* pp. 560-563.
- [22] Ostroverkhov S.M. Control of the electric drive under conditions of parametric uncertainty and coordinates / S.M. Ostroverkhov, V. Pyzhov, S. Korol // *Interrelation Proc. IEEE Internat. Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES-2017), November 15-17, 2017, Kremenchuk, Ukraine.* pp. 64-67.
- [23] Panchenko V.V. Determination of pulsation factors of the system of suppression of interfering harmonics of a semiconductor converter / V.V. Panchenko, A.S. Maslii, D.P. Pomazan, S.G. Buriakovskiy // *Electrical engineering & electromechanics,* 2018, no.4, pp. 24-28. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.04.
- [24] Buriakovskiy S.G. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model / S.G. Buriakovskiy, A.S. Maslii, V.V. Panchenko, D.P. Pomazan, I.V. Denis // *Electrical engineering & electromechanics,* 2018, no.2, pp. 59-62. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.10.
- [25] Buriakovskiy S. Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor / S. Buriakovskiy, A. Maslii, A. Maslii // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2016, vol.4, no.1(82), pp. 32-41. (Rus). doi: 10.15587/1729-4061.2016.75860.
- [26] Shchur I. Comparison of different types of electro-mechanical systems for creating of counter-rotating VAWT / I. Shchur, V. Klymko // *Proc. IEEE First Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017), May 29 – June 2, 2017, Kyiv, Ukraine.* – P. 373-378.
- [27] Shchur I. Impact of nonsinusoidalness on efficiency of alternative electricity generation systems // *Proc. 10th Conference-Seminar, June 15-18, 2010.* – Łagów, Poland. – P. 154-159.
- [28] Zagirnyak M. A model of the assessment of an induction motor condition and operation life, based on the measurement of the external magnetic field / M. Za-

- girnyak, O. Bisikalo, O. Chorna, O. Chorny // *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2018. pp.316-321. doi:10.1109/ieps.2018.8559564.
- [29] Zagirnyak M. Experimental research of electromechanical and biological systems compatibility / M. Zagirnyak, O. Chorny, V. Nykyforov, O. Sakun, K. Panchenko // *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, vol.1, no.1, pp. 130-133. doi:10.15199/48.2016.01.31.
- [30] Zagirnyak M. Innovative technologies in laboratory workshop for students of technical specialties / M. Zagirnyak, S. Serhiienko, O. Chorny // *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, May 2017. doi: 10.1109/ukrcon.2017.8100446.
- [31] Sushchenko O.A. Optimization of inertially stabilized platforms / O.A. Sushchenko, A.A. Tunik // *IEEE 2nd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, October, 9–12, 2012*, Proceedings, pp. 101-105.
- [32] Sushchenko O.A. Robust control of angular motion of platform with payload based on H-synthesis // *Journal of Automation and Information Sciences*, no. 48(12), 2016, pp. 13–26.
- [33] Sushchenko O.A. Robust Control of Platforms with Instrumentation // *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering Lviv, Ukraine, July 2-6, 2019*, Proceedings, pp.518-521.
- [34] Zhiteckii L.S. Robust Adaptive Pseudoinverse Model-Based Control of an Uncertain SIMO Memoryless System with Bounded Disturbances / L.S. Zhiteckii, K. Solovchuk. // *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering Lviv, Ukraine, July 2-6, 2019*, Proceedings, pp. 621-627.
- [35] Galchenko V.Y. A turmitobionic method for the solution of magnetic defectometry problems in structural-parametric optimization formulation / V.Y. Galchenko, A.N. Yakimov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol.50, no.2, pp. 59-71. doi: 10.1134/s106183091402003x.
- [36] Gal'chenko V.Ya. Pareto-optimal parametric synthesis of axisymmetric magnetic systems with allowance for nonlinear properties of the ferromagnet / V.Ya. Gal'chenko, A.N. Yakimov, D.L. Ostapushchenko // *Technical Physics*. – 2012. Vol. 57, Issue 7, pp. 893–899.
- [37] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam University Press, 2010. 174 p.

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович
 Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма НАН Украины», зав. отделом проблем управления магнитным полем, доктор технических наук, профессор, синтез систем управления высокой точности.
 ORCID: 0000-0002-1100-095X
 E-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com
 тел. +(380)505766900



Никитина Татьяна Борисовна
 Харьковский национальный автомобильный университет, кафедра естественных наук, доктор технических наук, профессор, синтез систем управления высокой точности.
 ORCID: 0000-0002-0185-3078
 E-mail: tatjana5555@gmail.com



Бовдуй Игорь Валентинович
 Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма НАН Украины», отдел проблем управления магнитным полем, кандидат технических наук, с.н.с., синтез систем управления высокой точности.
 ORCID: 0000-0003-3508-9781
 E-mail: ibovduj@gmail.com