

## СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВНУТРИ ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВА МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

*Мета.* Розробка методу синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти в середині заданої області простору, а також синтез і оцінка ефективності синтезованих систем активного екранування магнітного поля. *Методика.* Розроблено математичну модель розрахунку компонент вектора індукції магнітного поля, створюваного струмопроводами ліній електропередачі (ЛЕП) або генераторними струмопроводами електростанцій, а також керуючими обмотками магнітних виконавчих органів на підставі закону Біо - Савара - Лапласа. Струмопроводи приймалися у вигляді набору елементарних ділянок струмопроводів, що дозволяє розраховувати магнітне поле струмопроводів практично будь-якої форми, відмінної від ідеальних прямих ліній, або прямокутників і, зокрема, враховувати провисання струмопроводів ЛЕП. *Результати.* Синтез систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти зведений до вирішення задачі нелінійного програмування з обмеженнями, у якій обчислення цільової функції і обмежень виконуються на підставі закону Біо - Савара - Лапласа. Сформульована задача нелінійного програмування є багатоекстремальною і вирішується стохастичним мультиагентним методом на основі оптимізації роєм часток, в якому частки рою переміщуються в багатовимірному просторі пошуку. Наукова новизна. Вперше розроблено метод синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти за допомогою керування джерел магнітного поля шляхом вирішення задачі нелінійного програмування з обмеженнями на основі стохастичної мультиагентної оптимізації роєм часток. Практична значимість. Наведені приклади синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти і показана висока ефективність синтезованих систем. Бібл. 15, рис. 4.

*Ключові слова:* техногенне магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, синтез, стохастична мультиагентна оптимізація.

*Цель.* Разработка метода синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства, а также синтез и оценка эффективности синтезированных систем активного экранирования магнитного поля. *Методика.* Разработана математическая модель расчета компонент вектора индукции магнитного поля, создаваемого токопроводами линий электропередачи (ЛЭП) либо генераторными токопроводами электростанций, а также управляющими обмотками магнитных исполнительных органов на основании закона Био – Савара – Лапласа. Токопроводы принимались в виде набора элементарных участков токопроводов, что позволяет рассчитывать магнитное поле токопроводов практически любой формы, отличной от идеальных прямых линий, либо прямоугольников и, в частности, учитывать провисание токопроводов ЛЭП. *Результаты.* Синтез систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты сведен к решению задачи нелинейного программирования с ограничениями, у которой вычисление целевой функции и ограничений выполняется на основании закона Био – Савара – Лапласа. Сформулированная задача нелинейного программирования является многоэкстремальной и решается стохастическим мультиагентным методом на основе оптимизации роём частиц, в котором частицы рою перемещаются в многомерном пространстве поиска. Научная новизна. Впервые разработан метод синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с помощью управляемых источников магнитного поля путем решения задачи нелинейного программирования с ограничениями на основе стохастической мультиагентной оптимизации роём частиц. Практическая значимость. Приведены примеры синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты и показана высокая эффективность синтезированных систем. Библ. 15, рис. 4.

*Ключевые слова:* техногенное магнитное поле промышленной частоты, система активного экранирования, синтез, стохастическая мультиагентная оптимизация.

**Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами.** Техногенное магнитное поле промышленной частоты является канцерогенным и приводит к раковым заболеваниям, поэтому во всем мире проводятся мероприятия по поддержанию параметров техногенного магнитного поля внутри рабочих помещений энергонасыщенных объектов для выполнения экологических норм, а также для создания комфортных условий жизни и работы [1-9]. Для уменьшения уровня техногенного магнитного поля разрабатываются системы пассивного, активного и интегрированного экранирования. В работе [10] рассмотрены методы активного экранирования внешнего магнитного поля, а в работе [11] рассмотрены вопросы построения замкнутых систем управления магнит-

ным полем технических объектов с различными способами формирования обратных связей. Эффективность систем пассивного экранирования, как правило, недостаточна для выполнения экологических норм, поэтому рассмотрим построение систем активного экранирования техногенного магнитного поля с помощью системы специальных управляемых источников магнитного поля – обмоток с регулируемым током, установленных в зоне, где необходимо поддерживать параметры внутреннего магнитного поля в заданных пределах.

**Целью данной работы** является разработка метода синтеза систем активного экранирования техно-

генного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства.

**Задачей работы** является синтез и исследование систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты и оценка эффективности синтезированных систем активного экранирования магнитного поля.

**Изложение материала исследования, полученных научных результатов.** Для определения компонент вектора индукции магнитного поля, создаваемого токопроводами ЛЭП либо генераторными токопроводами электростанций, а также управляющими обмотками магнитных исполнительных органов могут использоваться различные подходы, основанные на законе Био – Савара – Лапласа. В частности, токопроводы ЛЭП могут в первом приближении приниматься в виде бесконечных линий [12], определенным образом ориентированных относительно рассматриваемых точек пространства, а управляющие обмотки магнитных исполнительных органов могут приниматься в виде прямоугольных элементов. Рассмотрим другой подход, основанный на представлении токопроводов ЛЭП, генераторных токопроводов электростанций, а также управляющих обмоток магнитных исполнительных органов в виде набора элементарных участков токопроводов [13]. Такой подход позволяет рассчитывать магнитное поле токопроводов практически любой формы, отличной от идеальных прямых линий, либо прямоугольников и, в частности, учитывать провисание токопроводов линий электропередачи ЛЭП и т.д.

**Математическая модель магнитного поля в заданном пространстве.** Представим рассматриваемый токопровод достаточно сложной конструкции с током  $I$  в виде  $n$  элементарных отрезков достаточно малой длины. Обозначим координаты середины  $i$ -того отрезка  $C_i$ . Определим вектор индукции магнитного поля  $B$  в точке  $P$  с координатами  $(x, y, z)$ , создаваемого этим элементарным отрезком, расположенным в точке  $C_i$ . Представим элементарный отрезок токопровода с учетом направления тока и расположения самого отрезка в ортогональной системе координат в виде ортов  $a_x, a_y, a_z$ . Определим компоненты разложения вектора элементарного отрезка токопровода в ортогональной системе координат как разность координат конца и начала рассматриваемого отрезка в следующем виде  $(x_{i+1} - x_i), (y_{i+1} - y_i), (z_{i+1} - z_i)$ . Введем вектор  $\Delta L_i$  этого элементарного отрезка токопровода в следующем виде

$$\Delta L_i = (x_{i+1} - x_i)a_x + (y_{i+1} - y_i)a_y + (z_{i+1} - z_i)a_z. \quad (1)$$

Введем вектор  $R_i$ , начало которого находится в центре рассматриваемого элементарного отрезка токопровода (1), а конец находится в точке  $P(x, y, z)$ , в которой необходимо определить вектор индукции магнитного поля, создаваемого элементарным отрезком токопровода, в следующем виде

$$R_i = P - C_i = \left( x, y, z \right) - \left( \frac{x_{i+1} + x_i}{2}, \frac{y_{i+1} + y_i}{2}, \frac{z_{i+1} + z_i}{2} \right).$$

Тогда вектор суммарной индукции магнитного поля  $B(x, y, z)$  в рассматриваемой точке  $P(x, y, z)$ , создаваемый  $n$  элементарными отрезками токопровода с током  $I$ , может быть определен [13] на основании закона Био – Савара – Лапласа в следующем виде

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i \times R_i}{|R_i|^3}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, векторное произведение векторов  $\Delta L_i \times R_i$  равно вектору со следующими компонентами

$$\Delta L_i \times R_i = \left( \Delta L_{iy} R_{iz} - \Delta L_{iz} R_{iy}, \left( \Delta L_{iz} R_{iy} - \Delta L_{ix} R_{iz} \right), \left( \Delta L_{ix} R_{iy} - \Delta L_{iy} R_{ix} \right) \right)$$

Здесь введены обозначения  $\Delta L_{ix}$  и  $R_{ix}$  компонент разложения векторов  $\Delta L_i$  и  $R_i$  по оси  $x$  и аналогично по осям  $y$  и  $z$ .  $|R_i|^3$  обозначает куб модуля вектора  $R_i$  и определяется выражением

$$|R_i|^3 = \left( \sqrt{R_{ix}^2 + R_{iy}^2 + R_{iz}^2} \right)^3.$$

**Метод синтеза систем активного экранирования.** Рассмотрим теперь метод синтеза системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты в заданном пространстве с помощью системы специальных управляемых источников магнитного поля – обмоток с регулируемым током, установленных определенным образом [1]. При этом вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}(\vec{p}_i, t)$  в точке  $\vec{p}_i$  рассматриваемого пространства в момент времени  $t$  представляет суперпозицию двух составляющих: индукции магнитного поля  $\vec{B}_y(\vec{p}_i, \vec{u}(t), t)$  управляемых источников, зависящей от вектора управления  $\vec{u}(t)$  – токов в обмотках [3], и индукции исходного магнитного поля  $\vec{B}_o(\vec{p}_i, t)$ , рассчитываемых по (2). Задача активного экранирования магнитного поля заключается в формировании такого вектора управления  $\vec{u}(t)$ , при котором суммарная индукция магнитного поля в рассматриваемых точках заданного пространства была бы близка к нулю.

Рассмотрим дискретный вариант этой задачи. Разобьем рассматриваемое пространство на  $N$  дискретных точек  $\vec{p}_i$ . В частности, для трехмерного пространства каждая точка  $\vec{p}_i$  характеризуется тремя координатами  $(i, j, k)$  так, что информация об индукции магнитного поля в точке  $\vec{p}_i$  в момент времени  $t$  является функцией этих трех координат и может храниться в виде трехмерного массива. Обозначим  $\vec{B}_o(i, j, k, t)$  и  $\vec{B}_y(i, j, k, u(t), t)$  исходную индукцию магнитного поля и индукцию магнитного поля, создаваемого управляющими обмотками, в точке  $(i, j, k)$  в момент времени  $t$ . Тогда задача синтеза системы активного экранирования магнитного поля может быть сформулирована как задача минимума квадратичного критерия качества

$$I(\vec{u}(t)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \gamma(i, j, k) \times \left| \vec{B}_o(i, j, k, t) + \vec{B}_y(i, j, k, \vec{u}(t), t) \right| \quad (3)$$

Весовой множитель  $\gamma(i, j, k)$  учитывает вес в критерии качества величины модуля индукции магнитного поля в точке  $(i, j, k)$  рассматриваемого пространства.

Для вычисления модуля индукции магнитного поля  $\left| \vec{B}_o(i, j, k, t) + \vec{B}_y(i, j, k, u(t), t) \right|$  в точке  $(i, j, k)$  рассматриваемого пространства используется разложение вектора  $\vec{B}_o(i, j, k, t)$  исходной индукции магнитного поля в точке  $(i, j, k)$  в момент времени  $t$  по ортогональным осям  $x, y$  и  $z$  в виде  $B_{ox}(i, j, k, t), B_{oy}(i, j, k, t)$  и  $B_{oz}(i, j, k, t)$ , а также разложение вектора  $\vec{B}_y(i, j, k, u(t), t)$  индукции магнитного поля, создаваемого управляющими обмотками, в виде  $B_{yx}(i, j, k, u(t), t), B_{yy}(i, j, k, u(t), t), B_{yz}(i, j, k, u(t), t)$ . При этом для расчета модуля индукции магнитного поля используется следующее выражение

$$\left| \vec{B}_o(i, j, k, t) + \vec{B}_y(i, j, k, u(t), t) \right| = \left[ \left( B_{0x}(i, j, k, t) + B_{yx}(i, j, k, u(t), t) \right)^2 + \left( B_{0y}(i, j, k, t) + B_{yy}(i, j, k, u(t), t) \right)^2 + \left( B_{0z}(i, j, k, t) + B_{yz}(i, j, k, u(t), t) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Заметим, что фактически при таком представлении (4) информация об индукции магнитного поля в точках рассматриваемого трехмерного пространства хранится в виде пятимерных массивов соответственно для индукции исходного техногенного магнитного поля, индукции магнитного поля, создаваемого управляющими обмотками и индукции суммарного магнитного поля.

Предположим, что в зоне активного экранирования магнитного поля установлено  $m$  источников магнитного поля – магнитных исполнительных органов. Введем  $m$ -мерный вектор управления  $\vec{u}(t)$ , компонентами которого являются  $m$  управляющих воздействий источников питания обмоток источников магнитного поля. Введем  $n$ -мерный вектор состояния  $\vec{x}(t)$ , компоненты которого включают токи в обмотках источников магнитного поля, тогда уравнение состояния таких источников магнитного поля может быть записано в стандартной форме

$$\vec{x}(t+1) = \Phi(\vec{x}(t), \vec{u}(t)). \quad (5)$$

Это разностное уравнение описывает динамику только собственно обмоток и их источников питания. Тогда на основании закона Био – Савара – Лапласа согласно (2) может быть вычислена индукция магнитного поля  $\vec{B}_y(i, j, k, t)$ , создаваемого  $m$  токами управляющих обмоток магнитных исполнительных органов (5) в точке  $(i, j, k)$  в момент времени  $t$  в следующем виде

$$\vec{B}_y(i, j, k, t) = \sum_{m=1}^M \vec{B}_{ym}(i, j, k, x_m(t)). \quad (6)$$

Аналогично на основании закона Био – Савара – Лапласа согласно (2) может быть вычислена индукция исходного магнитного поля  $\vec{B}_o(i, j, k, t)$ , создаваемого токами  $I_l(t)$   $l$  токопроводов в следующем виде

$$\vec{B}_o(i, j, k, t) = \sum_{l=1}^L \vec{B}_{ol}(i, j, k, I_l(t)). \quad (7)$$

Наиболее простой системой активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты является разомкнутая система. В частности, для трехфазных токопроводов, если имеется возможность измерения тока либо непосредственного измерения индукции магнитного поля вблизи токопровода, то разомкнутую систему можно построить следующим образом.

Модель магнитного поля в рассматриваемом пространстве (7), как правило, можно принять в виде магнитного поля, создаваемого тремя, шестью и т.д. проводниками трехфазного тока промышленной частоты, расположенных в известном положении относительно рассматриваемого пространства, в котором необходимо экранировать магнитное поле. Тогда, принимая токи в проводниках трехфазного токопровода в виде синусоидальных зависимостей заданной частоты  $\omega$  и фазы  $\varphi_i$   $I_i(t) = A_i \sin(\omega t + \varphi_i)$ , где  $i=1, 2, 3$  – номер проводника трехфазного токопровода, может быть получена зависимость вектора индукции  $\vec{B}_o(i, j, k, t)$  магнитного поля в точке  $(i, j, k)$  рассматриваемого пространства в момент времени  $t$  также в виде синусоидальной зависимости той же частоты и некоторой фазы  $\varphi_l$ . Обычно для построения контура разомкнутого управления системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты достаточно измерить ток одной фазы токопровода, а в случае постоянных амплитуд токов токопроводов – воспользоваться некоторым опорным напряжением в сети, питающейся от данного токопровода

$$u_u(t) = A_u \sin(\omega t + \varphi_u). \quad (8)$$

На основании измеренного тока одной фазы токопровода либо опорного напряжения сформируем управление магнитными исполнительными органами по разомкнутому контуру так, что управляющее напряжение магнитными исполнительными органами примет следующий вид

$$u_i(t) = A_i \sin(\omega t + \varphi_i) + f_{ul}, \quad (9)$$

где  $A_i$  – искомые амплитуды и  $\varphi_i$  – фазы управления в  $i$ -том исполнительном устройстве относительно измеренного тока в фазе токопровода либо опорного напряжения,  $f_{ul}$  – эквивалентная помеха измерения тока либо опорного напряжения.

Введем вектор разомкнутого управления  $\vec{u}_p(t) = \{u_i(t)\}$ , компонентами которого являются сформированные управления (9) в магнитных исполнительных органах  $u_i(t)$ . Введем также векторы искоемых амплитуд  $\vec{A} = \{A_i\}$  и фаз токов  $\vec{\varphi} = \{\varphi_i\}$ , компонентами которых являются амплитуды  $A_i$  и  $\varphi_i$  токов в магнитных исполнительных органах (5).

Рассмотрим теперь построение замкнутого контура управления. Сформируем вектор  $\vec{y}(t)$  измеряемых компонент индукции магнитного поля  $\vec{v}(t) = \{\vec{B}_0(i, j, k, t) + \vec{B}_y(i, j, k, t)\}$  в момент времени  $t$  в точках установки магнитометров  $(i, j, k)$  в следующем виде

$$\vec{y}(t) = \vec{v}(t) + \vec{w}(t), \quad (10)$$

где  $\vec{w}(t)$  – вектор шумов магнитометров.

Примем структуру системы активного экранирования магнитного поля в следующем виде: на вход ПИД регулятора каждого  $i$ -го канала подадим выходное напряжение соответствующего магнитометра. В частности, в работе [11] предлагаются в качестве регулируемых координат использовать величины магнитных потенциалов в середине источника управляющего поля поверхностно распределенного типа.

Запишем разностное уравнение состояния дискретных ПИД регуляторов, входом которых является вектор  $\vec{y}(t)$  измеряемых компонент индукции магнитного поля (10), а выходом является вектор замкнутого управления  $\vec{u}_3(t)$  магнитных исполнительных органов (5) в следующем виде

$$\vec{x}_p(t+1) = A_p \vec{x}_p(t) + B_p \vec{y}(t), \quad (11)$$

$$\vec{u}_3(t) = C_p \vec{x}_p(t) + D_p \vec{y}(t), \quad (12)$$

в котором элементы матриц  $A_p, B_p, C_p, D_p$  определяют параметрами ПИД регуляторов.

Тогда комбинированное управление обмотками магнитных исполнительных органов будет представлять суперпозицию разомкнутого (9) и замкнутого (12) управлений

$$\vec{u}(t) = \vec{u}_p(t) + \vec{u}_3(t). \quad (13)$$

Введем вектор искомых параметров  $\Theta = \{A_p, B_p, C_p, D_p, \vec{A}, \vec{\Phi}\}$ , компонентами которого являются искомые элементы матриц  $A_p, B_p, C_p, D_p$ , определяемые коэффициентами усиления ПИД регуляторов замкнутых каналов управления (11)-(12), а также искомые векторы  $\vec{A}$  амплитуд и  $\vec{\Phi}$  фаз токов разомкнутых каналов управления (9).

Тогда синтез комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, включающей разомкнутый и замкнутый контуры управления (13) сводится к нахождению параметров регуляторов  $\Theta$ , минимизирующих принятый критерий качества (3)

$$\Theta^* = \arg \min I(\Theta). \quad (14)$$

При этом необходимо учитывать ограничения на переменные состояния, управления и параметры ПИД регуляторов в виде  $G(\vec{x}(t), \vec{u}(t)) \leq 0$ , обусловленные соответствующими ограничениями применяемых усилительных, преобразовательных и измерительных устройств.

В заключение заметим, что при косвенном измерении тока токопровода с помощью магнитометра при удалении магнитометра от токопровода и приближении его в область пространства, где необходимо экранировать техногенное магнитное поле промышленной частоты разомкнутый контур управления пре-

вращается в замкнутый контур управления, так что комбинированная система становится замкнутой системой.

**Решение задачи нелинейного программирования на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц.** Сформулированная задача нелинейного программирования (14) с ограничениями является многоэкстремальной и для ее вычисления требуется значительное машинное время. Кроме того, в целевой функции (3) имеются многомерные овраги и области, в окрестности которых значение целевой функции меняется очень медленно, вследствие чего применение классических методов оптимизации является малоэффективным. В первую очередь это связано с тем, что использование градиентов целевой функции и ограничений не только требует проведения дополнительных вычислений целевой функции, увеличение количества которых нежелательно, но может также привести к явлению «блуждания» по дну оврага или медленному продвижению к глобальному оптимуму при нахождении в окрестности участка типа «плато». Кроме того, высока вероятность попадания в область притяжения одного из локальных экстремумов с невозможностью выхода из него на следующих шагах оптимизационного процесса.

В связи с тем, что при решении исходной задачи нелинейного программирования требуется многократное вычисление целевой функции (3), для ускорения выполнения синтеза, целесообразно использовать алгоритмы многоэкстремальной оптимизации, позволяющих находить глобальный оптимум при минимальном количестве вычислений целевой функции. Это требование, в первую очередь, связано с тем, что вычисление целевой функции носит алгоритмический характер, включающий многократное вычисление индукция магнитного поля на основании закона Био – Савара – Лапласа согласно (2) для заданных значений вектора искомых параметров регуляторов  $\Theta = \{A_p, B_p, C_p, D_p, \vec{A}, \vec{\Phi}\}$ , что само по себе требует значительных вычислительных ресурсов.

Применение бионических алгоритмов для решения многоэкстремальных задач математического программирования, в которых целевые функции являются многоэкстремальными овражными функциями и функциями с участками типа «плато», показало их высокую эффективность нахождения глобального оптимума таких целевых функций. Среди большого разнообразия бионических алгоритмов наиболее перспективными являются стохастические мультиагентные методы, к которым относится оптимизация роем частиц [14, 15], в котором частицы роя перемещаются в многомерном пространстве поиска. При своем движении частицы пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями, за счет чего находят глобальный оптимум за меньшее количество итераций.

Преимуществом этих методов перед классическими градиентными методами оптимизации является также то, что в них не требуется вычисления производных целевой функции, они практически нечувствительны к близости начального приближения

к искомому решению, и позволяют легче учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума.

**Результаты синтеза систем активного экранирования.** В качестве примера рассмотрим синтез системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства вблизи генераторных токопроводов электростанций с помощью системы пяти прямоугольных обмоток.

На рис. 1 показаны поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля, создаваемого трехфазным токопроводом, и индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования, создаваемого пятью обмотками магнитных исполнительных органов, в центральном сечении рабочего места, ортогональном оси  $z$ .

На рис. 2 показаны поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях, ортогональных оси  $z$ . Как видно из этого рисунка, система эффективно – почти в 25 раз компенсирует магнитное поле в центральной части центрального сечения, на которую она настроена, однако по краям рабочей области эффективность системы существенно уменьшается.

Эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства существенно зависит от выбора целевой функции исходной задачи нелинейного программирования (6).

На рис. 3 показаны поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля, создаваемого трехфазным токопроводом, и индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования, для других параметров настройки целевой функции (6).

На рис. 4 показаны поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях, ортогональных оси  $z$ . Как видно из этого рисунка, система эффективно – более чем в 25 раз компенсирует магнитное поле в области левее центрального сечения, на которую она настроена, а также компенсирует магнитное поле более чем в 10 раз в области правее центрального сечения.

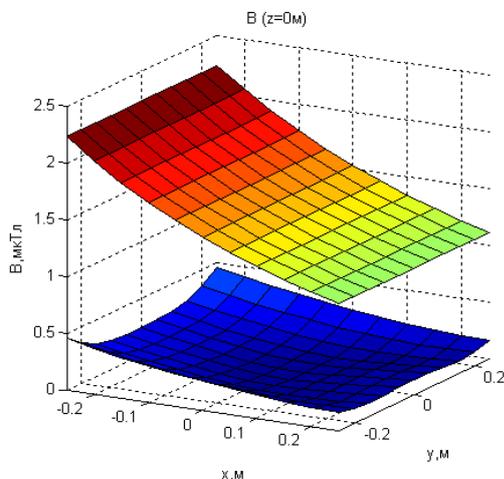


Рис. 1. Поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования

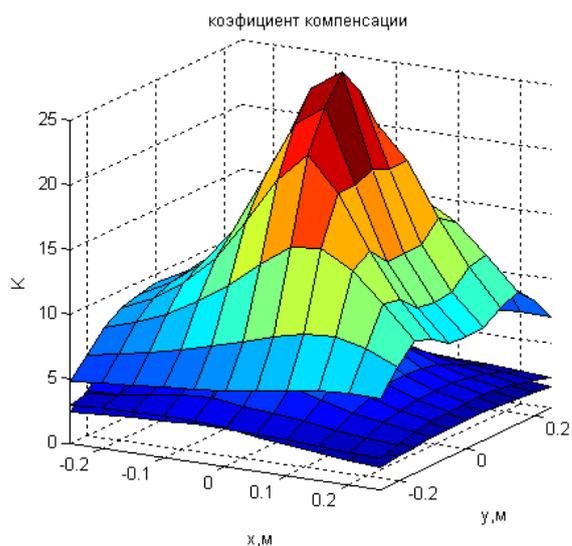


Рис. 2. Поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях

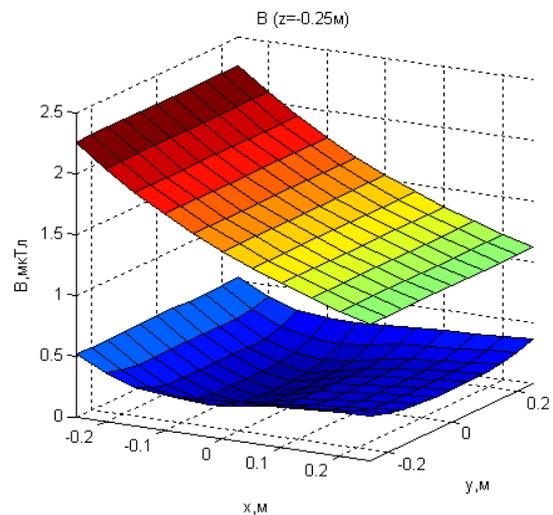


Рис. 3. Поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования

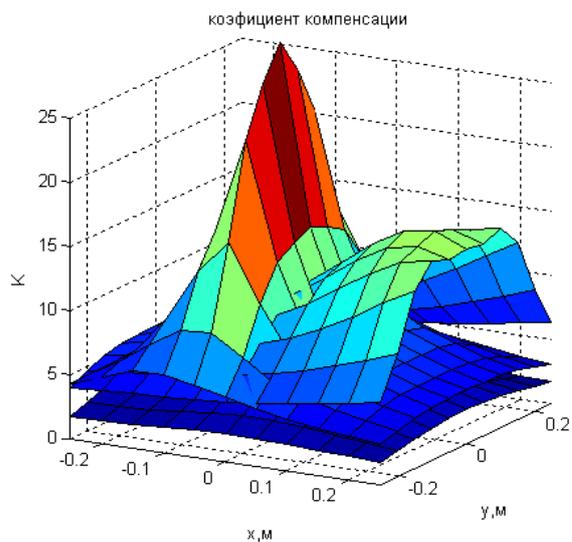


Рис. 4. Поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях

## Выводы.

Разработан метод синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с помощью управляемых источников магнитного поля. Задача синтеза систем активного экранирования магнитного поля сводится к решению задачи нелинейного программирования с ограничениями, которая решается на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц.

Приведены примеры синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты и показана высокая эффективность синтезированных систем.

Для дальнейшего повышения эффективности активного экранирования магнитного поля до заданного уровня необходимо синтезировать дополнительные обмотки активного экранирования, с помощью которых потенциально можно достигнуть заданного уровня экранирования магнитного поля с помощью системы активного экранирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
2. 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), 2005. – pp. 84-99.
3. 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. – № 1. – pp. 2-7.
4. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu -metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications) // Measurement Science and Technology. – 1991. – Vol. 2(7). – pp. 596-601.
5. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield // Neurology and Clinical Neurophysiology, 2004, Vol. 40, pp. 1-4.
6. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction // Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis (USA). – 2002. – Vol. 1. – pp. 222-226.
7. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line // HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering. – Vol. 2. – Issues 1-2, pp. 254-265.
8. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms // Measurement Science and Technology. – 1993. – Vol. 4. – Issue 12. – pp. 1370-1375.
9. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation // IEEE Transactions on Fundamentals and Materials. – 2005. – Vol. 125. – Issue 2. – pp. 99-106.
10. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 13-16.
11. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Технічна електродинаміка. – 2008. – №4. – С. 97-100.
12. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 11-13.
13. Nikolova N.K., Bakr M.H. Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3 // Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. – 96 p.
14. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.
15. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.

## REFERENCES

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
2. 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.
3. 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.
4. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu -metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications). Measurement Science and Technology, 1991, Vol. 2(7), pp. 596-601. doi: 10.1088/0957-0233/2/7/004.
5. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield. Neurology and Clinical Neurophysiology, 2004, Vol. 40, pp. 1-4.
6. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis (USA), 2002, Vol. 1, pp. 222-226. doi: 10.1109/isemc.2002.1032478.
7. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering, Vol. 2, Issues 1-2, pp. 254-265.
8. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. Measurement Science and Technology, 1993, Vol. 4, Issue 12, pp. 1370-1375. doi: 10.1088/0957-0233/4/12/010.
9. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation. IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, 2005, Vol. 125, Issue 2, pp. 99-106. doi: 10.1541/ieejfms.125.99.
10. Rozov V.Yu., Assiyrov D.A. Method of external magnetic field active shielding of technical objects. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic, 2006, no.3, pp. 13-16. (Rus).
11. Rozov V.Yu., Assiyrov D.A., Reyskiy S.Yu. Technical objects magnetic-field closed loop compensation systems with different feed-backs forming. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic, 2008, no.4, pp. 97-100. (Rus).
12. Rozov V.Yu., Reyskiy S.Yu., Pylugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).
13. Nikolova N.K., Bakr M.H. Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3. Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. 96 p.
14. Clerc M. Particle Swarm Optimization. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.

15. Gazi V., Passino K.M. *Swarm Stability and Optimization*. Springer, 2011. 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.

Поступила (received) 20.11.2014

Кузнецов Борис Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Никитина Татьяна Борисовна<sup>2</sup>, д.т.н., проф.,  
Волошко Александр Валерьевич<sup>1</sup>, к.т.н., н.с.,

<sup>1</sup> Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +38 050 5766900, e-mail: bikuznetsov@mail.ru

<sup>2</sup> Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: tatjana55555@gmail.com

B.I. Kuznetsov<sup>1</sup>, T.B. Nikitina<sup>2</sup>, A.V. Voloshko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

<sup>2</sup> Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

**Power frequency technogenic magnetic field reduction by active screening in system synthesis in area based on stochastic multi-agent optimization.**

**Purpose.** Development of a method of synthesis of systems of active screening of technogenic power frequency magnetic fields within a given region of space, as well as the synthesis and

performance evaluation systems synthesized active shielding magnetic field. **Methodology.** A mathematical model for calculating the components of the magnetic field created by current distributors power line generator or electrical conductors power and control windings magnetic executive bodies on the basis of the law of Biot - Savart - Laplace. Conductors are taken as a set of elementary sections conductors, which allows to calculate the magnetic field conductors of any shape that is different from the ideal straight lines or rectangles, and in particular, to consider the slack conductors power line power lines. **Results.** Synthesis of active shielding systems for technogenic power frequency magnetic fields is reduced to the solution of a nonlinear programming problem with constraints, which computation of the objective function and constraints is performed based on the Biot - Savart - Laplace law. Formulated nonlinear programming problem is solved by using the multiextremal and stochastic multi-agent method based on particle swarm optimization, in which the particle swarm move in a multidimensional search space. **Originality.** First developed a method for the synthesis of active shielding systems for technogenic power frequency magnetic fields using controlled source of the magnetic field by solving a nonlinear programming problem with constraints based on stochastic particle swarm optimization of multi-agent. **Practical value.** Examples of synthesis of systems of active shielding technogenic power frequency magnetic fields and high efficiency of the synthesized systems. References 15, figures 4.

**Key words:** technogenic magnetic field of power frequency, the system of active screening, synthesis, stochastic multi-agent optimization.