

## СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВНУТРИ ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВА

Б.И.Кузнецов<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Т.Б.Никитина<sup>2</sup>, докт.техн.наук, А.В.Волошко<sup>1</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> – Институт технических проблем магнетизма НАН Украины,  
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина.  
e-mail: bikuznetsov@mail.ru

<sup>2</sup> – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Фрунзе 21, Харьков, 61002, Украина.

*Разработан метод синтеза системы активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства с помощью управляемых источников магнитного поля. Задача синтеза системы активного экранирования внешнего магнитного поля сводится к решению задачи нелинейного программирования с ограничениями. Эта задача решается методом последовательного квадратичного программирования, когда вычисления целевой функции и ограничений выполняются на основании закона Био–Савара–Лапласа. Приведены примеры синтеза систем активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства для различных управляемых источников магнитного поля. Показана высокая эффективность синтезированных систем при малой чувствительности к изменению параметров и структуры моделей объектов управления и возмущающих воздействий. Библ. 3.*

**Ключевые слова:** внешнее техногенное магнитное поле промышленной частоты, система активного экранирования, синтез.

**Введение.** Магнитное поле промышленной частоты может быть канцерогенным и вызывать раковые заболевания, поэтому во всем мире проводят мероприятия по поддержанию параметров магнитного поля для выполнения экологических норм внутри рабочих помещений энергонасыщенных объектов, а также для создания комфортных условий жизни и работы. Для уменьшения уровня техногенного магнитного поля разрабатываются системы пассивного, активного и комбинированного экранирования. Эффективность систем пассивного экранирования, как правило, недостаточна для выполнения экологических норм. В работах [1,2] рассмотрены вопросы построения замкнутых систем управления магнитным полем технических объектов с различными способами формирования обратных связей, а в работе [3] – вопросы построения систем активного экранирования магнитного поля на рабочих местах. Рассмотрим построение систем активного экранирования внешнего 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.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка метода синтеза систем активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства с помощью управляемых источников магнитного поля. Задачей работы является синтез и исследование систем активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления, оценка эффективности синтезированных систем.

**Метод решения.** Рассмотрим задачу синтеза системы активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданного пространства с помощью системы  $m$  специальных управляемых источников магнитного поля – обмоток с регулируемым током, установленных определенным образом [1]. Введем  $m$ -мерный вектор управления  $\vec{u}(t)$ , компонентами которого являются  $m$  управляющих воздействий источников магнитного поля. Обозначим  $\vec{B}_o(i, j, k, t)$  и  $\vec{B}_y(i, j, k, \vec{u}(t), t)$  – индукцию исходного техногенного магнитного поля и индукцию магнитного поля, создаваемого управляемыми источниками магнитного поля, в точке  $(i, j, k)$  заданной области трехмерного пространства в момент времени  $t$ . Тогда задача синтеза системы активного экранирования магнитного поля может быть сформулирована как задача минимума критерия качества

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

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

Введем  $n$ -мерный вектор состояния  $\bar{x}(t)$  управляемых источников магнитного поля, компоненты которого включают токи в обмотках источников магнитного поля. Тогда уравнение состояния таких источников магнитного поля может быть записано в стандартной форме

$$\bar{x}(t+1) = \Phi(\bar{x}(t), \bar{u}(t)). \quad (2)$$

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

$$\bar{B}_y(i, j, k, t) = \sum_{m=1}^M \bar{B}_{ym}(i, j, k, x_m(t)). \quad (3)$$

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

$$\bar{B}_o(i, j, k, t) = \sum_{l=1}^L \bar{B}_{ol}(i, j, k, I_l(t)). \quad (4)$$

Сформируем вектор  $\bar{y}(t)$  измеряемых компонент индукции магнитного поля  $\bar{y}(t) = \{\bar{B}_o(i, j, k, t) + \bar{B}_y(i, j, k, t)\}$  в момент времени  $t$  в точках установки магнитометров  $(i, j, k)$

$$\bar{y}(t) = \bar{v}(t) + \bar{w}(t), \quad (5)$$

где  $\bar{w}(t)$  – 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 [2] 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 измеряемых компонент напряженностей магнитного поля  $\bar{y}(t)$ , а выходом – вектор управления  $\bar{u}(t)$  магнитных исполнительных органов

$$\begin{aligned} \bar{x}_p(t+1) &= A_p \bar{x}_p(t) + B_p \bar{y}(t), \\ \bar{u}(t) &= C_p \bar{x}_p(t) + D_p \bar{y}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где элементы матриц  $A_p, B_p, C_p, D_p$  определяются параметрами ПИД регуляторов.

Введем вектор искомого параметров  $\Theta = \{A_p, B_p, C_p, D_p\}$ , компонентами которого являются искомые элементы матриц  $A_p, B_p, C_p, D_p$ , определяемые коэффициентами усиления ПИД регуляторов каналов. Тогда синтез замкнутой системы активного экранирования магнитного поля (2)-(6) сводится к нахождению параметров регуляторов  $\Theta$ , минимизирующих принятый критерий качества (1)

$$\Theta^* = \arg \min I(\Theta). \quad (7)$$

При этом необходимо учитывать ограничения на переменные состояния, управления и параметры ПИД регуляторов в виде  $G(\bar{x}(t), \bar{u}(t)) \leq 0$ , обусловленные соответствующими ограничениями применяемых усилительных, преобразовательных и измерительных устройств. Сформулированная задача нелинейного программирования (7) с ограничениями решается методом последовательного квадратичного программирования, к которой применяется квазиньютоновский метод аппроксимации матрицы Гессе по алгоритму Левенберга–Макварта.

**Выводы.** Разработан метод синтеза систем активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства с помощью управляемых источников магнитного поля. Задача синтеза системы активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля сводится к решению задачи нелинейного программирования с ограничениями, которая решается методом последовательного квадратичного программирования. Приведены примеры синтеза систем активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля промышленной частоты, создаваемого генераторными токопроводами электростанций и воздушными линиями электропередачи ЛЭП, внутри заданной области пространства. Показана высокая эффективность синтезированных систем при малой чувствительности к изменению параметров и структуры моделей объектов управления и моделей задающих и возмущающих воздействий.

1. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 3. – С. 13–16.
2. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 4. – С. 97–100.
3. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Пелевин Д.Е. Принципы построения систем автоматической компенсации биотропных искажений геомагнитного поля на рабочих местах оперативного персонала // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 51–54.

УДК 621.3.01

## СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ТЕХНОГЕННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ ВСЕРЕДИНИ ЗАДАНОЇ ОБЛАСТІ ПРОСТОРУ

Б.І.Кузнецов<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Т.Б.Нікітіна<sup>2</sup>, докт.техн.наук, О.В.Волошко<sup>1</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> – Інститут технічних проблем магнетизму НАН України,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна,

e-mail: [bikuznetsov@mail.ru](mailto:bikuznetsov@mail.ru)

<sup>2</sup> – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Фрунзе 21, Харків, 61002, Україна.

*Розроблено метод синтезу системи активного екранування зовнішнього техногенного магнітного поля промислової частоти всередині заданої області простору за допомогою керованих джерел магнітного поля. Задача синтезу системи активного екранування зовнішнього магнітного поля зводиться до вирішення задачі нелінійного програмування з обмеженнями. Ця задача вирішується методом послідовного квадратичного програмування, в якій обчислення цільової функції та обмежень виконуються на підставі закону Біо–Савара–Лапласа. Наведені приклади синтезу систем активного екранування зовнішнього техногенного магнітного поля промислової частоти всередині заданої області простору для різних керованих джерел магнітного поля. Показана висока ефективність синтезованих систем при малій чутливості до зміни параметрів і структури моделей об'єктів керування і збурюючих впливів. Бібл. 3.*

**Ключові слова:** зовнішнє техногенне магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, синтез.

## SYNTHESIS OF ACTIVE SHIELDING SYSTEM BY EXTERNAL TECHNOGENIC POWER FREQUENCY MAGNETIC FIELD INSIDE A GIVEN REGION OF SPACE

В.І.Kuznetsov<sup>1</sup>, Т.В.Nikitina<sup>2</sup>, О.В.Voloshko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Technical Problems of Magnetism National Academy of Sciences of Ukraine,

19 Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine,

e-mail: [bikuznetsov@mail.ru](mailto:bikuznetsov@mail.ru)

<sup>2</sup> – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

str. Frunze, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine.

*The method of active screening system synthesis by power frequency external technogenic magnetic field inside a given region of space using controlled magnetic fields is given.*

*The problem of magnetic fields active screening system synthesis is reduced to solving a nonlinear programming problem with constraints, which is solved by sequential quadratic programming. Calculation of goal function and constraints based on the Biot–Savart–Laplace. Examples of external technogenic magnetic field inside a given region of space active screening system synthesis with different controlled magnetic fields are given. The high efficiency of the synthesized system with low sensitivity to changes of parameters and structure of plant models and disturbances is given. References 3.*

**Key words:** power frequency external technogenic magnetic field, active shielding system, synthesis.

1. Rozov V.Yu., Assuirov D.A. Method of external magnetic field active shielding of by technical objects // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2006. – № 3. – Pp. 13–16. (Rus)

2. Rozov V.Yu., Assuirov D.A., Reutskii S.Yu. Technical objects magnetic-field closed loop compensation systems with different feed-backs forming // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy sychasnoi elektrotekhniki”. – 2008. – Part 4. – Pp. 97–100. (Rus)

3. Rozov V.Yu., Assuirov D.A., Pelevin D.E. Construction principles of compensation automatic systems by geomagnetic field biotropic distortion in the operational staff workplace // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – № 1. – Pp. 51–54. (Rus)

Надійшла 30.01.2014