

## МЕТОД СИНТЕЗА ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

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

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

<sup>2</sup> – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,  
ул. Петровского, 25, Харьков, 61002, Украина.

*Разработан метод синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, создаваемого воздушными линиями электропередачи внутри расположенных вблизи жилых домов. Синтез основан на решении задачи многокритериальной оптимизации параметров системы, при которой вычисление вектора целевой функции выполняется на основании закона Био – Савара. Указанная задача решается на основе мультиролевой стохастической мультиагентной оптимизации. Приведен результат синтеза системы активного экранирования вращающегося магнитного поля с эффективностью не менее 4. Библ. 6, рис. 2. **Ключевые слова:** линия электропередачи, магнитное поле, замкнутая система активного экранирования, многокритериальный синтез.*

**Введение.** Обеспечение современных санитарных норм по электромагнитному полю промышленной частоты для населения требует выполнения все более жестких нормативов по индукции магнитного поля (МП) высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП). Так, в Украине введены новые нормативы для индукции МП кабельных ЛЭП, составляющие 0,5 мкТл для жилых помещений [2], которые будут распространяться и на воздушные ЛЭП. Однако МП воздушных ЛЭП на границе их охранных зон существенно (в 4 и более раз) превышает указанный нормативный уровень [1], что обуславливает необходимость применения эффективных методов экранирования МП для защиты здоровья населения, проживающего в жилых домах (ЖД), расположенных вблизи действующих ЛЭП. Из известных методов экранирования МП ЛЭП требуемую эффективность (4 единицы и более) при низкой частоте (50 Гц) могут обеспечить только активные методы контурного экранирования, реализуемые в замкнутых по МП структурах [5]. Такие методы получили широкое практическое применение в ведущих странах мира [5], однако методика их синтеза и технологии применения не раскрыты в открытой печати, что не позволяет осуществлять их практическую реализацию в Украине.

**Целью работы** является разработка метода синтеза эффективных замкнутых систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, создаваемого воздушными ЛЭП в помещениях жилых домов, для обеспечения их последующей практической реализации в Украине.

Система активного экранирования (САЭ, рис. 1) состоит из компенсационных обмоток (КО), формирующих компенсирующее МП при протекании по ним токов, создаваемых системой управления (СУ) в функции сигнала обратной связи по МП, формируемого датчиком магнитного поля (ДМП), установленного в защищаемом пространстве ЖД. СУ получает питание от вторичного источника питания (ИП).

В качестве исходных параметров синтеза выступают параметры ЛЭП (рабочие токи, геометрия и количество проводов, расположение ЛЭП относительно защищаемого пространства), а также размеры защищаемого пространства и нормативное значение индукции МП, которое должно быть достигнуто в результате экранирования.

В процессе синтеза требуют определения параметры КО (их количество, конфигурация, пространственное расположение, схема подключения), токи компенсационных обмоток и результирующее значение индукции МП в точках защищаемого пространства, а также алгоритм работы СУ.

**Метод синтеза САЭ.** Выберем в защищаемом пространстве конечное количество  $N$  точек  $P_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Введем вектор  $X_y$  искомым координат пространственного расположения и геометрических размеров КО. Введем векторы токов воздушной линии электропередачи  $I_0(t)$  и токов управляющих обмоток  $I_y(t)$ , компонентами которых являются токи  $I_l(t)$  в  $l = \overline{1, L}$  ЛЭП  $I_0(t) = \{I_l(t)\}$  и токи  $I_{ym}(t)$  в  $m = \overline{1, M}$  в КО  $I_y(t) = \{I_{ym}(t)\}$ . Тогда вектор результирующей индукции магнитного поля  $\mathbf{B}(P_n, I_0(t), I_y(t), X_y, t)$  в точке  $P_n$  равен сумме векторов

© Кузнецов Б.И., Туренко А.Н., Никитина Т.Б., Волошко А.В., Коломиец В.В., 2016  
ORCID ID: \*<http://orcid.org/0000-0002-1100-095X>; \*\* [orcid.org/0000-0002-9826-1123](http://orcid.org/0000-0002-9826-1123);  
\*\*\* [orcid.org/0000-0002-0965-1171](http://orcid.org/0000-0002-0965-1171)

магнитной индукции  $B_{ol}(P_n, I_l(t))$ , создаваемых  $L$  токами ЛЭП  $I_0(t)$ , и векторов магнитной индукции  $B_{ym}(P_n, I_{ym}(t), X_y, t)$ , создаваемых  $M$  токами управляющих обмоток  $I_y(t)$  [4]

$$B(P_n, I_0(t), I_y(t), X_y, t) = \sum_{l=1}^L B_{ol}(P_n, I_l(t), t) + \sum_{m=1}^M B_{ym}(P_n, I_{ym}(t), X_y, t). \quad (1)$$

Векторы магнитной индукции  $B_{ol}(P_n, I_l(t))$  и  $B_{ym}(P_n, I_{ym}(t), X_y, t)$  в точке  $P_n$  рассчитываются в соответствии с методикой [4], основанной на законе Био-Савара [5].

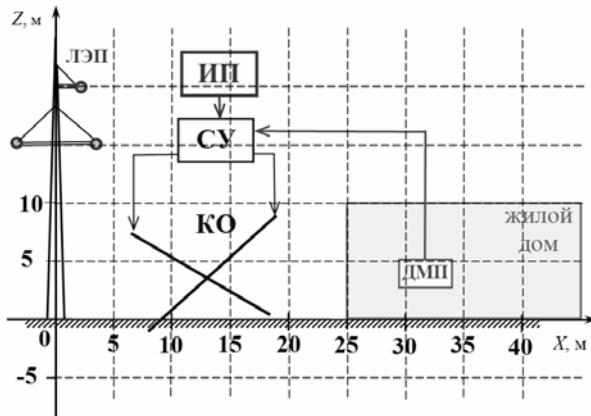


Рис. 1

Введем вектор искомых параметров  $X$ , компонентами которого являются вектор  $X_y$  искомых координат пространственного расположения и геометрических размеров КО и вектор  $X_p$  искомых параметров регуляторов, так что  $X = \{X_y^T, X_p^T\}^T$ .

Тогда при заданном векторе токов ЛЭП  $I_0(t)$ , определим действующее значение индукции магнитного поля  $B(X, P_n)$  в точках  $P_n$ , которое необходимо экранировать до нормативного уровня. Синтез САК сведем к решению следующей задачи многокритериальной оптимизации векторного критерия

$$B(X) = [B(X, P_1), B(X, P_2), \dots, B(X, P_N)]^T, \quad (2)$$

компонентами которого  $B(X, P_n)$  являются действующие значения модуля вектора индукции в  $N$  точках  $P_n$  защищаемого пространства. Эти компоненты  $B(X, P_n)$  векторного критерия (2) являются нелинейными функциями вектора искомых параметров  $X$ . Многокритериальная задача для СУ САК решается на основе мультироевой стохастической мультиагентной оптимизации с учетом бинарных отношений предпочтения локальных критериев [6].

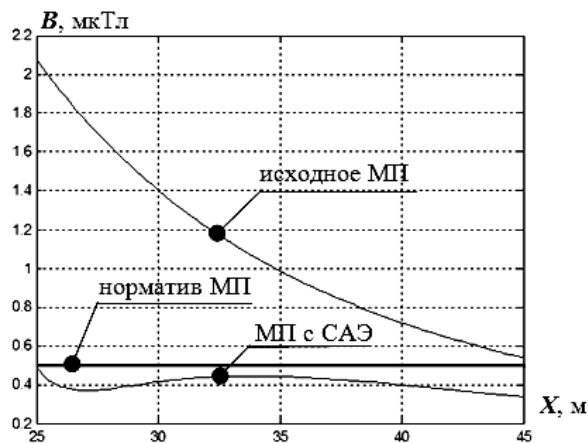


Рис. 2

**Пример синтеза.** САЭ приведен для ЛЭП типа У 110-1 с треугольным подвесом проводов (рис. 1), создающей вращающееся МП с наиболее сложной пространственно-временной структурой. Эта ЛЭП при токе 1000 А создает в защищаемой зоне МП с индукцией 2,1 мкТл (рис. 2), что более, чем в 4 раза превышает нормативный уровень в 0,5 мкТл.

В результате синтеза предложена САК с двумя КО (рис. 1), координаты которых соответственно равны: (6.9637 м, 5.6654 м), (18.9912 м, 0.5990 м) и (18.6707 м, 9.6786 м), (7.8874 м, -0.4401 м). Рабочее количество ампер-витков составляет 150.4169 и 150.8431, а фазовые сдвиги токов КО относительно опорного напряжения составляют 1.4032 рад и -1.0931 рад. На рис. 2 показаны расчетные зависимости индукций исходного МП и МП с САЭ в защищаемой зоне ЖД, откуда следует, что синтезированная САЭ обеспечивает эффективность экранирования более 4 и позволяет нормализовать уровень индукции МП во всем защищаемом пространстве.

Расчетная эффективность экранирования синтезированной САК (более 4 единиц) подтверждена экспериментально на ее лабораторном макете.

**Выводы.** Впервые в Украине разработан метод синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи, обеспечивающих эффективность экранирования не менее 4 и нормализацию магнитного поля в защищаемом пространстве жилого дома до уровня санитарных норм, что имеет экспериментальное подтверждение. Задача синтеза решена на основе алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации мультироемой части исходной задачи многокритериальной оптимизации.

1. Пелевин Д.Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 14–16.
2. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с.
3. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 11–13.

4. Стреттон Дж. Теория электромагнетизма. – М.: Гостехиздат, 1947. – 539 с.
5. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). – 2010. – Режим доступа: <http://www.emfservices.com/afcs.html/>
6. Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, Mehmet Karamanoglu. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications. – Elsevier Inc., 2013. – 450 p.

УДК 621.3.01

## МЕТОД СИНТЕЗУ ЗАМКНЕНИХ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Б.І. Кузнецов<sup>1</sup>, докт.техн.наук, А.М. Туренко<sup>2</sup>, докт.техн.наук, Т.Б. Нікітіна<sup>2</sup>, докт.техн.наук,  
О.В. Волошко<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.В. Коломієць<sup>2</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> – Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Петровського, 25, Харків, 61002, Україна.

*Розроблено метод синтезу замкнених систем активного екранування магнітного поля промислової частоти, яке створюється повітряними лініями електропередачі всередині розташованих поблизу житлових будинків. Синтез засновано на вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації параметрів системи, при якій обчислення вектора цільової функції виконується на підставі закону Біо – Савара. Вказана задача вирішується на основі мультиросової стохастичної мультиагентної оптимізації. Наведено результат синтезу системи активного екранування магнітного поля, яке обертається, з ефективністю не менше 4. Бібл. 6, рис. 2.*

**Ключові слова:** повітряні лінії електропередачі, магнітне поле промислової частоти, замкнена система активного екранування, багатокритеріальний синтез, стохастична мультиагентна оптимізація, мультирої частинки.

## METHOD OF SYNTHESIS OF CLOSED-LOOP SYSTEMS OF ACTIVE SHIELDING MAGNETIC FIELD OF POWER TRANSMISSION LINES

B.I. Kuznetsov<sup>1</sup>, A.N. Turenko<sup>2</sup>, T.B. Nikitina<sup>2</sup>, A.V. Voloshko<sup>1</sup>, V.V. Kolomiets<sup>2</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> – Kharkov National Automobile and Highway University,  
25, Petrovskoho st., Kharkiv, 61002, Ukraine.

*The method of synthesis of closed-loop systems of active screening of power frequency magnetic field generated by overhead lines inside located near residential buildings. The synthesis based on the problem of multiobjective optimization of system parameters at which the calculation of the objective function vector is performed on the basis of the Biot - Savart law. This problem is solved by multiswarm stochastic multi-agent optimization. The results of the synthesis of the active screening system of the rotating magnetic field with an efficiency of at least 4. References 6, figures 2.*

**Key words:** power transmission line, power frequency magnetic field, active shielding system, multiobjective synthesis, stochastic multiagent optimization, multiswarm particles.

1. Pelevin D.Ye. The methods of reducing of the magnetic fields of overhead power lines outside security zones // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 5. – Pp. 14–16. (Rus)

2. Pravyly ulashuvannsa elektroustanovok. [Electrical Installation Regulations]. – Kyiv, Minpalyvenerho Ukrainy, 2010. 736 p. (Ukr)

3. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pyliugina O.Yu. Method of calculating the magnetic field of three-phase power lines // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 5. – Pp. 11–13. (Rus)

4. Stretton J.A. The theory of electromagnetism. – Moskva: Gostekhizdat, 1947. – 539 p. (Rus)

5. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). – 2010. – Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html/> (Accessed 15.01.2016)

6. Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, Mehmet Karamanoglu. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications. – Elsevier Inc., 2013. – 450 p.

Надійшла 03.02.2016

Остаточний варіант 18.05.2016