

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, А.В. Волошко, И.В. Бовдуй, Е.В. Виниченко, Б.Б. Кобылянский

ОДНОКОНТУРНОЕ АКТИВНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО В ЖИЛОЙ ЗОНЕ НЕСКОЛЬКИМИ ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Отримав подальший розвиток метод синтезу систем активного екранування магнітного поля, яке генерується кількома повітряними ЛЕП, на основі багатокритеріального підходу. При синтезі використовується спрощена математична модель магнітного поля, що створюється кількома ЛЕП, ідентифікація якої виконана за експериментальними значеннями індукції магнітного поля в заданих точках на основі рішення задачі оптимізації. Наведені результати синтезу одноколової системи активного екранування магнітного поля, яке генерується декількома повітряними ЛЕП. Показана можливість зменшення індукції магнітного поля за допомогою синтезованої системи до рівня санітарних норм України. Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: повітряні лінії електропередачі, магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, багатокритеріальний синтез.

Получил дальнейшее развитие метод синтеза систем активного экранирования магнитного поля, генерируемого несколькими воздушными ЛЭП, на основе многокритериального подхода. При синтезе используется упрощенная математическая модель магнитного поля, генерируемого несколькими воздушными ЛЭП, идентификация которой выполнена по экспериментальным значениям индукции магнитного поля в заданных точках на основе решения задачи оптимизации. Приведены результаты синтеза одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, генерируемого несколькими воздушными ЛЭП. Показана возможность уменьшения индукции магнитного поля с помощью синтезированной системы до уровня санитарных норм Украины. Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, магнитное поле промышленной частоты, система активного экранирования, многокритериальный синтез.

Введение. Электросети Украины характеризуются высокой плотностью, и особенно, вблизи высоковольтных силовых подстанций. Здесь обычно проходит группа воздушных линий электропередачи (ЛЭП), в непосредственной близости от которой могут быть расположены жилые дома. В этом случае уровень индукции магнитного поля (МП), создаваемого группой ЛЭП в жилых зонах, может превышать санитарные нормы [1], что создает угрозу для здоровья населения и требует принятия соответствующих мер по нормализации МП.

Для Украины экономически наиболее приемлемым методом уменьшения МП в жилой зоне от действующих воздушных ЛЭП является метод активного контурного экранирования МП [2].

Анализ существующих систем активного экранирования. В настоящее время во многих странах разработаны и внедрены системы активного экранирования (САЭ) МП, генерируемого воздушными ЛЭП [3-7]. В таких системах с различными алгоритмами управления [8, 9] в качестве исполнительного органа САЭ используются специальные компенсационные обмотки – активные кабели, количество которых определяются спецификой решаемой задачи.

Наиболее широкое распространение получили простейшие одноконтурные САЭ с одной компенсационной обмоткой [3], однако методы синтеза таких САЭ в настоящее время разработаны только для одиночных ЛЭП [10].

В связи с этим возникает задача синтеза одноконтурных САЭ для эффективного экранирования МП, генерируемого группой воздушных ЛЭП.

Целью данной работы является синтез и исследование одноконтурных систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты,

создаваемого в жилой зоне несколькими воздушными ЛЭП.

Постановка задачи исследования. Рассмотрим построение САЭ для защиты от МП, создаваемого несколькими ЛЭП, схема расположения которых показана на рис. 1.

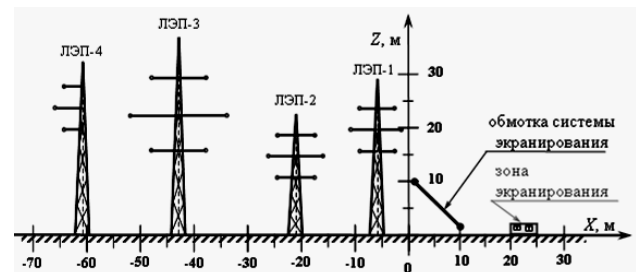


Рис. 1. Схема расположения нескольких ЛЭП и защищаемой зоны

В непосредственной близости от зоны экранирования находятся две двухцепные ЛЭП 110 кВ (ЛЭП-1 и ЛЭП-2), двухцепная ЛЭП 330 кВ (ЛЭП-3) и одноцепная ЛЭП 330 кВ (ЛЭП-4).

Метод синтеза. Синтезируем САЭ МП, генерируемого несколькими ЛЭП, на основе метода, разработанного в [10]. При этом синтез САЭ сводится к решению задачи многокритериального нелинейного программирования с ограничениями, в которой вычисления целевых функций и ограничений выполняются на основании решения уравнения Максвелла в квазистационарном приближении [1]. Эта задача решается на основе построения Парето-оптимальных решений с помощью алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации мультимножествами [10].

Для синтеза САЭ, кроме геометрических размеров ЛЭП, расположения жилой зоны, где необходимо экранировать МП, необходимо определить комплексные значения токов в проводах ЛЭП. Причем, при изменении токов в различных ЛЭП изменяется не только уровень суммарного МП, генерируемого несколькими ЛЭП, но и пространственно-временные характеристики (ПВХ – space-time electromagnetic field characteristics [5]) МП за счет относительного перераспределения вертикальной и горизонтальной компонент вектора индукции МП, создаваемого различными ЛЭП.

Сложность решения задачи синтеза САЭ определяется количеством проводов ЛЭП. Естественно, что при учете всех проводов ЛЭП, создающих МП в зоне экранирования, задача синтеза САЭ усложняется.

Рассмотрим подход к синтезу САЭ, позволяющий упростить решение задачи синтеза на основе учета меньшего количества проводов по сравнению с исходной задачей. С этой целью вначале проведем экспериментальные исследования уровня МП как в зоне экранирования, так и вблизи ЛЭП. На основании полученных данных решим задачу идентификации токов в проводах ЛЭП, при которых минимизируется сумма квадратов ошибок измеренных и модельных значений индукции МП в заданных точках.

Фактически при таком подходе решается задача аппроксимации исходного МП, измеренного в результате экспериментальных исследований, с помощью нескольких ЛЭП. В зависимости от требуемой точности аппроксимации, количество учитываемых ЛЭП может быть уменьшено до двух и даже одной, что позволяет существенно упростить решение задачи синтеза САЭ.

На основании полученной упрощенной модели МП, создаваемого несколькими ЛЭП, может быть решена задача синтеза САЭ на основании метода, изложенного в [10].

Математическая модель исходного МП, генерируемого несколькими ЛЭП. Математическая модель МП, создаваемого несколькими ЛЭП, на основании квазистационарного решения уравнения Максвелла [1], может быть представлена в следующем виде

$$\vec{B}_o(P_i, t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \vec{B}_{lk}(P_i, I_{lk}(t)), \quad (1)$$

где $\vec{B}_o(P_i, t)$, $\vec{B}_{lk}(P_i, I_{lk}(t))$ – мгновенные значения векторов индукции результирующего магнитного поля в точке пространства P_i и магнитного поля, создаваемого в той же точке пространства k токопроводом lk ЛЭП, K – количество ЛЭП; L_k – количество проводов в k ЛЭП; $I_{lk}(t)$ – мгновенное значение тока в k -том проводе lk -той ЛЭП.

На рис. 2 показаны линии одинакового уровня индукции магнитного поля, рассчитанной для номинальных токов ЛЭП.

Экспериментальные исследования МП, создаваемого этими несколькими ЛЭП в жилой зоне, в которой необходимо снизить уровень магнитного поля до санитарных норм, показали, что значения

индукции МП, рассчитанные при номинальных значениях токов ЛЭП и измеренных значений сильно отличаются.

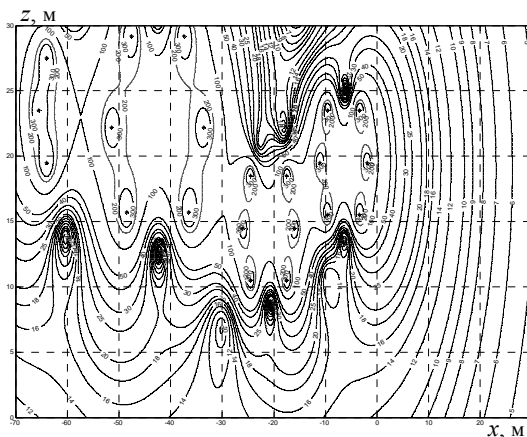


Рис. 2. Распределение индукции исходного магнитного поля, создаваемого несколькими ЛЭП при номинальных токах

Было проведено моделирование МП, создаваемого отдельными ЛЭП в зоне экранирования. На рис. 3 показаны результаты расчетов распределения индукции магнитного поля в зоне экранирования при работе: а) одной ЛЭП-4; б) при работе двух ЛЭП-3 и ЛЭП-4; в) при работе трех ЛЭП-2, ЛЭП-3 и ЛЭП-4 и г) при работе четырех ЛЭП-1, ЛЭП-2, ЛЭП-3 и ЛЭП-4. При этом токи в проводах всех ЛЭП принимались одинаковыми и равными 500 А.

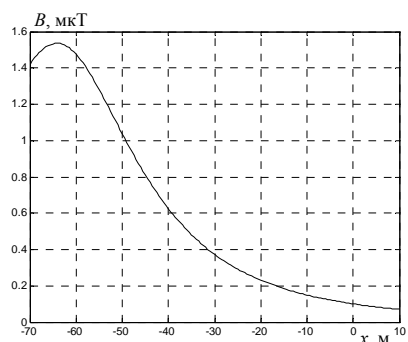
На основании анализа зависимостей, показанных на рис. 3 видно, что по мере удаления ЛЭП от зоны экранирования, уровень индукции магнитного поля, создаваемого этой ЛЭП в зоне экранирования, уменьшается. Однако, в рассматриваемой системе номинальные токи в проводах ЛЭП-3 и ЛЭП-4 составляют 2000 А, а номинальные токи в проводах ЛЭП-1 и ЛЭП-2 составляют 1000 А. Поэтому, несмотря на то, что ЛЭП-3 и ЛЭП-4 удалены от зоны экранирования на большее расстояние чем ЛЭП-1 и ЛЭП-2, влияние ЛЭП-4 и, особенно, ЛЭП-3 на уровень индукции МП в зоне экранирования может быть существенным.

Рассмотрим теперь построение упрощенной математической модели исходного МП, генерируемого несколькими ЛЭП, и ее идентификацию по экспериментальным данным. Для определения необходимого количества учитываемых проводов ЛЭП и значений токов в этих проводах построим упрощенную модель МП на основании моделирования распределения МП в зоне экранирования с учетом различного количества проводов и результатов экспериментальных исследований

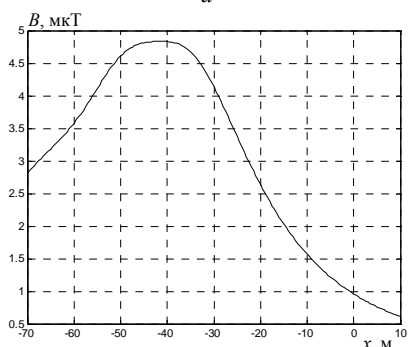
Зададим ток в $I_{lk}(t)$ в k -том проводе lk -той ЛЭП в следующем виде

$$I_{lk}(t) = A_{lk} \sin(\omega t + \varphi_{lk}). \quad (2)$$

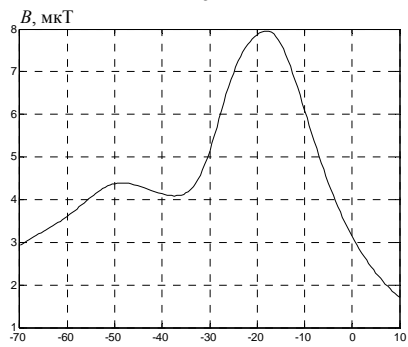
Для определения амплитуд A_{lk} токов $I_{lk}(t)$ введем вектор искомых параметров $\vec{Z} = \{A_{lk}\}$, компонентами которого являются амплитуды A_{lk} токов $I_{lk}(t)$ в k -том проводе lk -той ЛЭП.



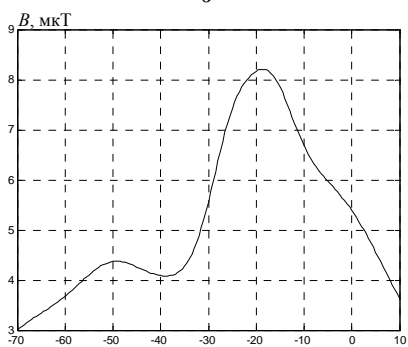
а



б



в



г

Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля в зоне экранирования при работе: а) одной ЛЭП-4; б) двух ЛЭП-3 и ЛЭП-4; в) трех ЛЭП-2, ЛЭП-3 и ЛЭП-4; г) четырех ЛЭП-1, ЛЭП-2, ЛЭП-3 и ЛЭП-4

Тогда идентификация математической модели (1) может быть сведена к минимизации квадратичного критерия

$$\vec{Z}^* = \arg \min \sum_{i=1}^I \left| \vec{B}_0(P_i) - \vec{B}_e(P_i) \right|^2, \quad (3)$$

где $\vec{B}_e(P_i)$ – измеренный вектор индукции МП в точке P_i .

Для рассматриваемой задачи построена такая аппроксимированная математическая модель исходного МП, в которой учитывается влияние на МП только двух ЛЭП 110 кВ. На рис. 4 показано распределение индукции МП индукции этой аппроксимированной модели.

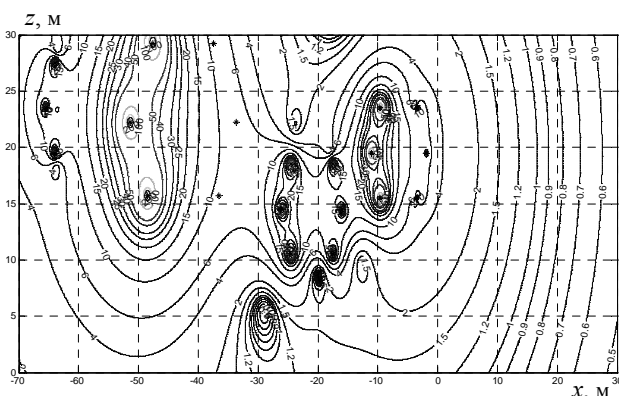


Рис. 4. Распределение индукции аппроксимированной модели магнитного поля, создаваемого несколькими ЛЭП

На рис. 5 показаны зависимости индукции МП 1 – аппроксимированной модели и 2 – измеренных значений. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований распределения МП в зоне экранирования показало, что при учете только первых двух ЛЭП-1 и ЛЭП-2 напряжением 110 кВ, ошибка между такой аппроксимированной моделью и экспериментальными значениями уровня МП не превосходит 4 %.

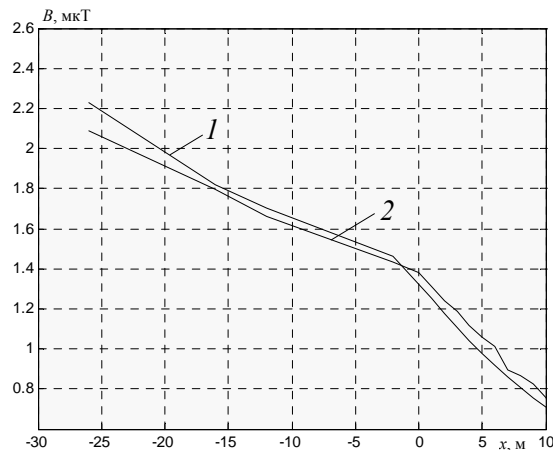
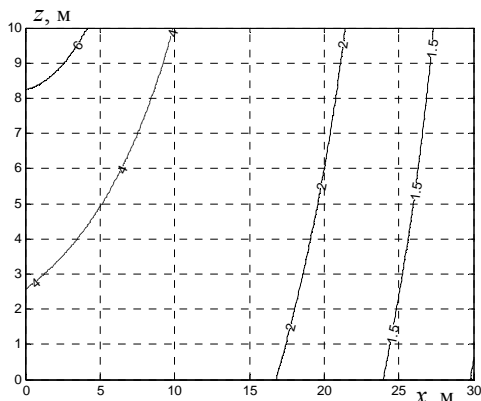


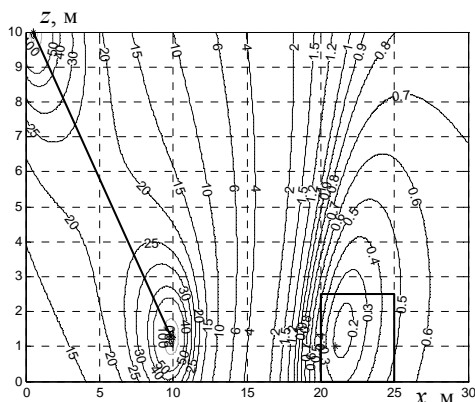
Рис. 5. Зависимости индукции МП: 1 – расчетной и 2 – измеренных значений

Результаты синтеза САЭ. Рассмотрим синтез САЭ МП, создаваемого несколькими ЛЭП, схема расположения которых показана на рис. 1. На этом рисунке также показана жилая зона, в которой необходимо экранирование МП, и расположение компенсационной обмотки. На основании экспериментальных исследований было установлено, что в зоне экранирования МП, генерируемое этими ЛЭП, имеет незначительную поляризацию, что позволяет построить одноконтурную САЭ с одной компенсационной обмоткой. Заметим, что такие системы получили наибольшее распространение в мировой практике [3-7].

На рис. 6 показаны линии равного уровня модуля индукции: а) исходного МП, создаваемого несколькими ЛЭП и б) с включенной системой активного экранирования. Исходная индукция МП в рассматриваемом жилом пространстве составляет 1,8 мкТл, что в 3,6 раза превышает санитарные нормы 0,5 мкТл [1]. При включенной системе активного экранирования уровень индукции МП не превосходит 0,4 мкТл.



а



б

Рис. 6. Распределение индукции: а) исходного МП, создаваемого несколькими ЛЭП и б) МП с включенной САЭ

На рис. 7 показаны ПВХ МП, создаваемого: 1 – несколькими ЛЭП; 2 – компенсирующей обмоткой и 3 – суммарного МП с включенной системой. Как видно из этого рисунка, в рассматриваемом пространстве исходное МП, создаваемое несколькими ЛЭП, имеет незначительную поляризацию, так что его ПВХ представляет сильно вытянутый эллипс, а коэффициент эллипсности (отношение меньшей полуоси эллипса к большей полуоси) равен около 0,4, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Естественно, что такое МП можно достаточно эффективно компенсировать с помощью одноконтурной САЭ. С помощью одной обмотки компенсируется большая полуось эллипса ПВХ исходного МП, так что ПВХ результирующего МП, оставшегося после работы САЭ, представляет собой эллипс с коэффициентом эллипсности равным 0,8.

В заключение отметим, что расчетная эффективность экранирования синтезированной САЭ в жилой зоне экспериментально подтверждена в полевых условиях на ее полномасштабном макете и составляет более четырех.

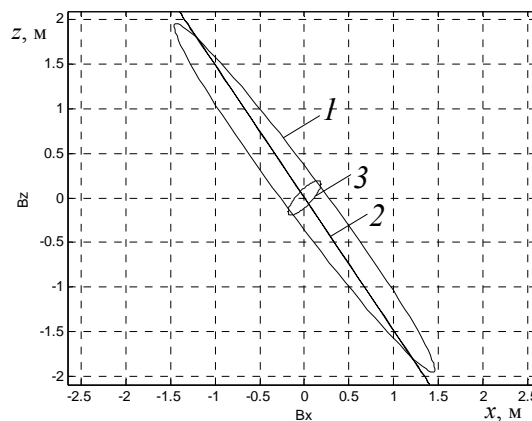


Рис. 7. Пространственно-временные характеристики вектора индукции МП, создаваемого: 1 – ЛЭП; 2 – компенсирующей обмоткой и 3 – суммарного МП с включенной САЭ

Выводы.

1. Получили дальнейшее развитие методы синтеза систем активного экранирования МП, генерируемого несколькими ЛЭП на основе многокритериального подхода, а также методы построения математической модели МП, генерируемого несколькими ЛЭП, по экспериментальным значениям индукции МП в заданных точках пространства, на основе решения задачи оптимизации.

2. На основе предложенных методов впервые синтезирована одноконтурная система активного экранирования МП, создаваемого несколькими воздушными ЛЭП в жилой зоне.

3. Показана возможность существенного (в 4 и более раз) уменьшения индукции МП с помощью синтезированной одноконтурной системы экранирования и достижения уровня санитарных норм по МП в жилой зоне, расположенной вблизи группы ЛЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2016. – №3. – С. 6-8.
2. Волошко О.В. Синтез систем активного экранирования магнитного поля повітряних ліній електропередачі / Вісник Національної академії наук України. – 2017. – №7. – С. 64-73. doi: 10.15407/vsn2017.07.064.
3. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
4. 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.
5. 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. doi: 10.1049/ip-smt:20040002.
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. – 2006. – Ч.3. – С. 13-16.
10. Кузнецов Б.И., Туренко А.Н., Никитина Т.Б., Волошко А.В., Коломиец В.В. Метод синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – №4. – С. 8-10.

REFERENCES

1. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chukhikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Technical electrodynamics*, 2016, no.3, pp. 6-8. (Rus).
2. Voloshko O.V. Synthesis of active shielding systems of power transmission lines magnetic field. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2017, no.7, pp. 64-73. (Ukr). doi: 10.15407/visn2017.07.064.
3. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
4. Beltran H., Fuster V., Garcia M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. *9 Congreso Hispano Luso de Ingenieria Eléctrica (9 CHLIE)*, Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84-99.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Rozov V.Yu., Assyirov D.A., Reytskiy S.Yu. Technical objects magnetic-field closed loop compensation systems with different feed-backs forming. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2008, chapter 4, pp. 97-100. (Rus).
9. Rozov V.Y., Assyirov D.A. Method of external magnetic field active shielding of technical objects. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2006, chapter 3, pp. 13-16. (Rus).
10. Kuznetsov B.I., Turenko A.N., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Kolomiets V.V. Method of synthesis of closed-loop systems of active shielding magnetic field of power transmission lines. *Technical electrodynamics*, 2016, no.4, pp. 8-10. (Rus).

Поступила (received) 15.12.2017

Кузнецов Борис Иванович¹, д.т.н., проф.,
Никитина Татьяна Борисовна², д.т.н., проф.,
Волошко Александр Валерьевич¹, к.т.н., н.с.,
Бовдуй Игорь Валентинович¹, к.т.н., н.с.,
Виниченко Елена Владимировна¹, к.т.н., м.н.с.,
Кобылянский Борис Борисович¹, к.т.н. доц.

¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +38 050 5766900, e-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com

² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25, e-mail: tatjana5555@gmail.com

B.I. Kuznetsov¹, T.B. Nikitina², A.V. Voloshko¹, I.V. Bovdyj¹, E.V. Vinichenko¹, B.B. Kobilyanskiy¹

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

² Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Single-circuit active screening of magnetic field generated by several overhead transmission lines in residential area.

Purpose. The synthesis of active screening system of magnetic field, generated by several high voltage overhead transmission lines, with the help of single compensation cables is presented. **Methodology.** The initial parameters for the synthesis of active screening system parameters are the location of the high voltage overhead transmission lines with respect to the protected transmission line space, geometry and number of cables, operating currents, as well as the size of the protected space and normative value of magnetic flux density, which should be achieved as a result of screening. The objective of the synthesis of the active screening system is to determine their number, configuration, spatial arrangement, wiring diagrams and compensation cables currents, setting algorithm of the control systems as well as the resulting value of the induction magnetic field at the points of the protected space. Synthesis of active screening system is reduced to the problem of multi objective nonlinear programming with constraints in which calculation of the objective functions and constraints are carried out on the basis of the Maxwell equations solutions in the quasi-stationary approximation. The problem is solved by a stochastic multi swarm multi agent particles optimization, which can significantly reduce the time to solve it. **Results.** Active screening system synthesis results for reduction of a magnetic field generated by several high voltage overhead transmission lines are presented. The possibility of a significant reduction in the level of source magnetic flux density within a given. **Originality.** For the first time the synthesis of the active screening systems of magnetic field generated by the several high voltage overhead transmission lines within a given region of space is carried out. **Practical value.** Practical recommendations on reasonable choice of the number and spatial arrangement of compensating cables of active screening systems of the magnetic field generated by the several high voltage overhead transmission lines is given. References 10, figures 7.

Key words: high voltage overhead transmission lines, power frequency technogenic magnetic field, active screening system, multiobjective synthesis.