

Б. И. КУЗНЕЦОВ, докт. техн. наук, проф., Институт технических проблем магнетизма НАНУ, Харьков;
Т. Б. НИКИТИНА, докт. техн. наук, проф., Харьковский национальный автомобильно-дорожный ун-т;
И. В. БОВДУЙ, канд. техн. наук, н.с., Институт технических проблем магнетизма НАНУ, Харьков;
А. В. ВОЛОШКО, канд. техн. наук, н.с., Институт технических проблем магнетизма НАНУ, Харьков;
Е. В. ВИНИЧЕНКО, канд. техн. наук, м.н.с., Институт технических проблем магнетизма НАНУ, Харьков;
Б. Б. КОБЫЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук, доц., Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОДНОЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ОДНОЙ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБМОТКОЙ

Введение. Уровни индукции магнитного поля промышленной частоты в ряде случаев превышают предельно допустимые санитарные нормы Украины [1], что создает угрозу для здоровья людей, проживающих вблизи высоковольтных ЛЭП, и требует принятия определенных мер по снижению МП действующих ЛЭП в черте городов Украины [2]. Наиболее приемлемыми для Украины являются методы экранирования МП действующих ЛЭП, из которых необходимую эффективность обеспечивают методы активного контурного экранирования магнитного поля [3 – 5].

Анализ существующих систем активного экранирования. В работах [3, 6 – 12] выполнен синтез систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи различного конструктивного исполнения с учетом особенностей пространственно-временного распределения магнитного поля. Как показано в этих работах, одноцепные линии электропередачи с вертикальным и горизонтальным расположением токопроводов создают магнитное поле в рассматриваемом пространстве с незначительной поляризацией, так что годограф МП представляет сильно вытянутый эллипс, а коэффициент эллипсности (отношение меньшей полуоси эллипса к большей полуоси) существенно меньше единицы. Естественно, что такое МП можно достаточно эффективно компенсировать с помощью только одной обмотки системы активного экранирования. Годограф вектора МП, создаваемого одной обмоткой системы активного экранирования представляет собой линию и, следовательно, такое магнитное поле не имеет поляризации. С помощью этой обмотки можно скомпенсировать большую полуось эллипса годографа исходного МП, так что годограф результирующего МП, оставшегося после работы системы активного экранирования, будет представлять собой эллипс близкий к окружности, что и позволяет существенно компенсировать исходное магнитное поле.

Постановка задачи исследования. Метод синтеза замкнутых систем активного экранирования МП промышленной частоты, создаваемого воздушными ЛЭП в помещениях жилых домов разработан в [4]. Метод основан на решении задачи многокритериальной оптимизации, в которой вычисления векторов целевой функции и ограничений выполняются на основании уравнений Максвелла в квазистационарном приближении [5], а задача оптимизации решается методом мультирешивой стохастической мультиагентной оптимизации на основе Парето-оптимальных решений [4, 6, 7]. Однако при таком подходе не учитываются варьируемые параметры системы, обусловленные неточно заданной моделью объекта управления и неизбежными изменениями параметров системы в ходе эксплуатации. Поэтому разработка метода синтеза робастной системы активного экранирования, в которой учитываются возможные изменения параметров системы, является актуальной научной задачей.

Целью работы является усовершенствование метода синтеза системы активного экранирования с учетом изменения параметров объекта управления на основе многокритериального подхода и его применение для синтеза робастных систем активного экранирования магнитного поля одноцепных воздушных линий электропередачи с горизонтальным и вертикальным расположением токопроводов с помощью одной компенсационной обмотки.

Принцип построения систем активного экранирования. Сущность метода активного экранирования МП ЛЭП состоит в формировании компенсирующего МП с такой пространственно-временной структурой, суперпозиция которого с МП ЛЭП в зоне защиты минимизируется до уровня санитарных норм. Метод реализуется с помощью системы активного экранирования, которая состоит из компенсационных обмоток, с помощью которых формируется компенсирующее МП [8 – 12]. Токи в компенсационных обмотках автоматически формируются по определенному алгоритму в функции сигнала с датчиков МП, установленных в зоне защиты. Система содержит источник тока, получающий энергию от внешнего источника. При использовании в системе активного экранирования только одной компенсационной обмотки можно создать компенсирующее МП, вектор индукции которого ортогонален плоскости обмотки и не изменяет своего положения со временем. Поэтому с помощью такой системы можно скомпенсировать большую полуось эллипса годографа вектора индукции магнитного поля и получить достаточно высокую эффективность экранирования слабо поляризованного МП.

Метод синтеза. В отличие от метода синтеза [4], в данной работе рассматривается многокритериальный подход к синтезу робастных систем активного экранирования. При синтезе системы математическая модель исходного магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи известна неточно.

В частности, приближенно известны токи в токопроводах, которые имеют суточные, недельные, сезонные изменения. Неточно реализуются геометрические размеры компенсирующих обмоток, параметры регуляторов и т.д. Поэтому введем вектор $\delta \in \Delta$ отклонений параметров системы от их номинальных значений, используемых при синтезе системы. Синтезируем робастную систему для наихудшего случая (worst-case) [6], когда вариации параметров $\delta \in \Delta$ приводят к наибольшему ухудшению компенсации исходного магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи. С этой целью найдем вектор варьируемых параметров $\delta \in \Delta$, при котором значение индукции магнитного поля в выбранной точке P_i рассматриваемого пространства P принимает максимальное значение

$$\bar{B}(X, P_i) = \max_{\delta \in \Delta} B(X, P_i, \delta), \quad (1)$$

для заданного вектора пространственного расположения и геометрических размеров компенсируемых обмоток, а также параметров регулятора X . Тогда синтез робастной системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, создаваемого воздушными линиями электропередачи внутри заданной области пространства (1), может быть сформулирована в виде следующей задачи многокритериальной оптимизации векторного критерия

$$B(X) = [\bar{B}(X, P_1), \bar{B}(X, P_2), \dots, \bar{B}(X, P_m)]^T, \quad (2)$$

компонентами которого $\bar{B}(X, P_i)$ являются максимальные значения векторов индукции в m точках P_i рассматриваемого пространства. Компонентами векторного критерия (2) и, возможно, ограничений являются нелинейные функции вектора искомых параметров регуляторов X и вектора варьируемых параметров X их вычисление выполняется на основании закона Био – Савара [5]. Задача многокритериальной оптимизации (2) решается методом мультироевой стохастической мультиагентной оптимизации [6 – 7] на основе Парето-оптимальных решений [3].

Результаты моделирования на ЭВМ. Рассмотрим результаты синтеза робастных систем активного экранирования магнитного поля одноцепных воздушных линий электропередачи с горизонтальным и вертикальным расположением токопроводов с помощью одной компенсационной обмотки. Схемы расположения ЛЭП, компенсирующей обмотки и защищаемой области: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП показаны на рис. 1.

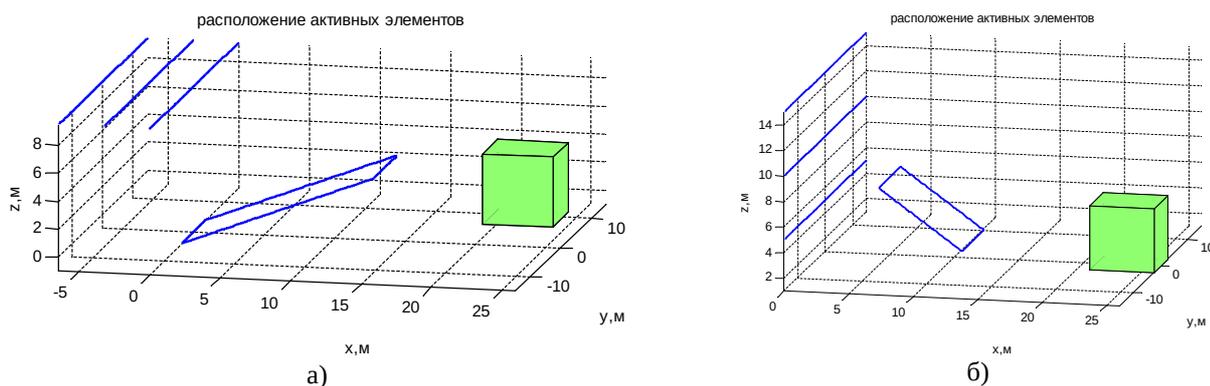


Рис. 1 Схемы расположения ЛЭП, компенсирующей обмотки и защищаемой области: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП

На рис. 2 показаны линии равного уровня модуля индукции исходного магнитного поля трехфазной одноцепной воздушной линии электропередачи: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП. При токе ЛЭП 1000 А, исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 2,1 мкТл, что более чем в четыре раза превышает санитарные нормы в 0,5 мкТл [1].

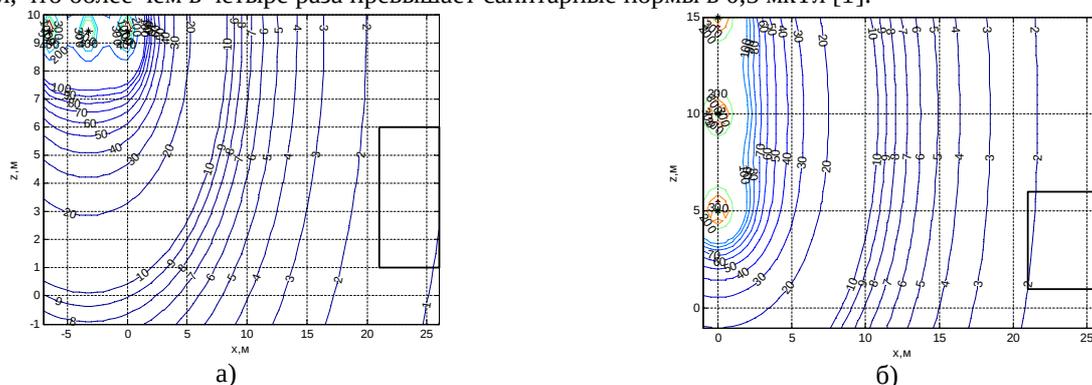


Рис. 2 Линии равного уровня модуля индукции исходного магнитного поля трехфазной одноцепной воздушной линии электропередачи: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП

На рис. 3 показаны линии равного уровня модуля индукции магнитного поля воздушных линий электропередачи при включенной системе активного экранирования в функции расстояния от крайнего токопровода линии электропередачи: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП.

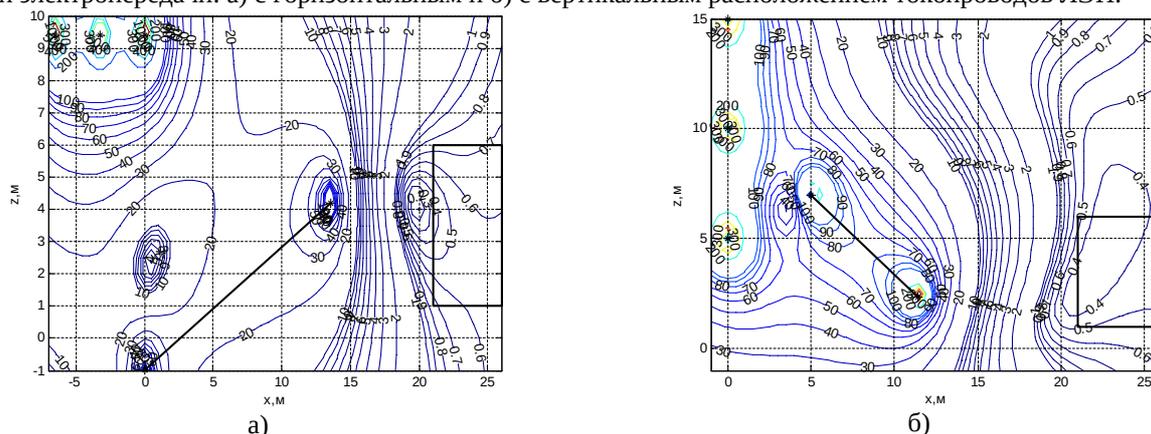


Рис. 3 Линии равного уровня модуля индукции магнитного с включенной системой активного экранирования: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП

На рис. 4 показаны зависимости величин индукции исходного магнитного поля и магнитного поля при включенной системе активного экранирования в функции расстояния от крайнего токопровода линии электропередачи: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП.

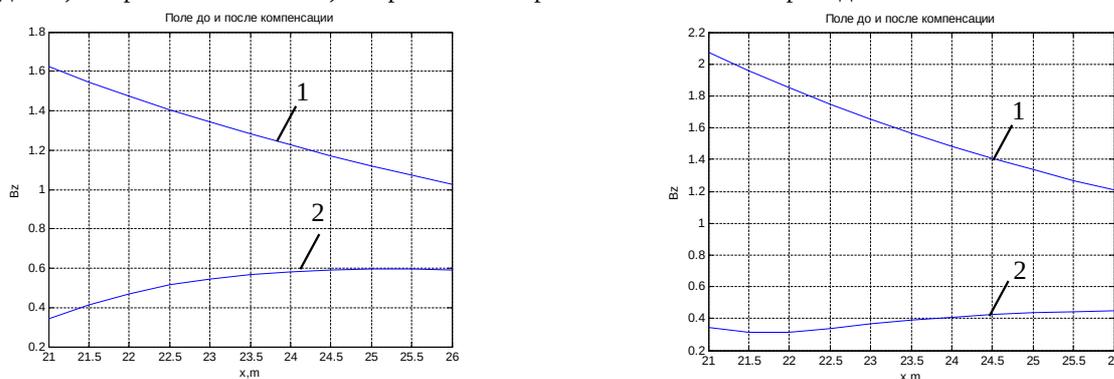


Рис. 4 Зависимости величины индукции:

1) – исходного магнитного поля и 2) – магнитного поля с включенной системой активного экранирования: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП

На рис. 5 показаны годографы вектора напряженности магнитного поля, создаваемого: 1 – ЛЭП; 2 – компенсирующей обмоткой, 3 – суммарного магнитного поля с включенной системой активного экранирования магнитного поля линий электропередачи: а) с горизонтальным, б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП. Заметим, что в англоязычных работах [12] годограф вектора напряженности магнитного поля называют пространственно-временной характеристикой магнитного поля (space-time electromagnetic field characteristics).

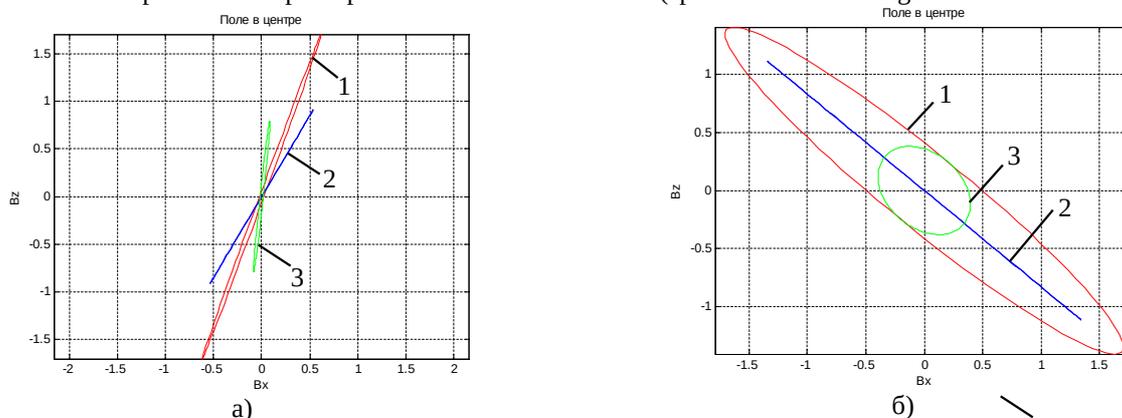


Рис. 5 Годографы вектора напряженности магнитного поля, создаваемого: 1 – ЛЭП; 2 – компенсирующей обмоткой и 3 – суммарного магнитного поля: а) с горизонтальным и б) с вертикальным расположением токопроводов ЛЭП

Как видно из этого рисунка, рассматриваемые одноцепные линии электропередачи с горизонтальным и вертикальным расположением токопроводов в рассматриваемом пространстве создают магнитное поле с незначительной поляризацией, так что годограф МП представляет сильно вытянутый эллипс с достаточно малым коэффициентом эллипсности. Естественно, что такое МП можно достаточно эффективно компенсировать с помощью только одной обмотки системы активного экранирования. Как видно из этого рисунка, годограф вектора МП, создаваемого одной обмоткой системы активного экранирования представляет собой линию и, следовательно, такое магнитное поле не имеет поляризации. С помощью этой обмотки компенсируется большая полуось эллипса годографа исходного МП, так что годографы результирующего МП, оставшегося после работы систем активного экранирования, представляют собой эллипсы существенно меньшего размера по сравнению с годографами исходного магнитного поля.

Выводы. Усовершенствован метод синтеза системы активного экранирования, позволяющий учитывать изменения параметров объекта управления. Синтез системы сводится к задаче многокритериальной оптимизации, решаемой методом мультирешивой стохастической мультиагентной оптимизации на основе Парето-оптимальных решений.

Приведены результаты синтеза систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, создаваемого одноцепными ЛЭП с вертикальным и горизонтальным расположением токопроводов, в жилом доме, расположенном вблизи ЛЭП. Системы содержат одну компенсационную обмотку и позволяют существенно снизить уровень индукции исходного МП во всем рассматриваемом пространстве жилого дома.

Эффективность систем активного экранирования составляет более 4.

Список литературы: 1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання 3-тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с. 2. Розов В.Ю. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи / В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, Д.Е. Пелевин, К.В. Чунихин // Техническая электродинамика. – 2016. – №3. – С. 6–9. 3. Кузнецов Б.И. Синтез систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи на основе многокритериальной оптимизации / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, И.В. Бовдуй, А.В. Волошко, Е.В. Виниченко, Б.Б. Кобылянский // Электротехника і електромеханіка – 2016. – №6. – С. 26–30. 4. Кузнецов Б.И. Метод синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи / Б.И. Кузнецов, А.Н. Туренко, Т.Б. Никитина, А.В. Волошко, В.В. Коломиец // Техническая электродинамика. – 2016. – №4. – С. 8–10. 5. Розов В.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи / В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцкий, О.Ю. Пилюгина // Техническая электродинамика. – 2014. – №5. – С. 11–13. 6. Clerc. M. Particle Swarm Optimization / M. Clerc. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. 7. Gazi V. Swarm Stability and Optimization / V. Gazi, K.M. Passino. – Springer, 2011. – 318 p. 8. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>. 9. Beltran H. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications / H. Beltran, V. Fuster, M. García // 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9CHLIE), Marbella (Málaga). – 2005. – Pp. 84–99. 10. Brake H.J.M. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms / Brake H.J.M. R. Huonker, H. Rogalla / Meas. Sci. Technol. – 1993. – № 4. – Pp. 1370–1375. 11. Celozzi S. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization / S. Celozzi, F. Garzia // IEE Proc. Sci. Meas. Technol. – Rome, Italy, Jan. 2004. – Vol. 151. – №1. – Pp. 2–7. 12. Shenkman A. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line / A. Shenkman, N. Sonkin, V. Kamensky // HAIT Journal of Science and Engineering. – 2005. – Vol. 2. – №2. – Pp. 254–265.

Bibliography (transliterated): 1. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok*. Vyd. 3, pererob. i dop. Kyiv: Minpalyvenergo of Ukraine Publ. 2010. 736. Print. 2. Rozov, V.Yu., Grinchenko, V.S., Pelevin, D.Ye., Chunikhin, K.V. “Modelirovanie ehlektromagnitnogo polya v pomeshcheniyah zhilyh domov, raspolozhennyh vblizi linij ehlektroperedachi”. *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 3. 2016. 6–9. Print. 3. Kuznetsov, B.I., Nikitina, T.B., Voloshko, A.V., Bovdyi, I.V., Vinichenko, E.V., Kobilyanskiy, B.B. “Cintez sistem aktivnogo ekranirovaniya magnitnogo polya vozdushnyh linij elektroperedachi na osnove mnogokriterialnoy optimizatsii”. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. No. 6. 2016. 26–30. Print. 4. Kuznetsov, B.I., Turenko, A.N., Nikitina, T.B., Voloshko, A.V., Kolomiets, V.V. “Metod sinteza zamknytyh sistem aktivnogo ehkranirovaniya magnitnogo polya vozdushnyh linij ehlektroperedachi.” *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 4. 2016. 8–10. Print. 5. Rozov, V.Yu., Reutskiy, S.Yu. Pyliugina, O.Yu. “Metod rascheta magnitnogo polia trekhfaznykh linii elektroperedachi.” *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 5. 2014. 11–13. Print. 6. Clerc, M. *Particle Swarm Optimization*. London: ISTE Ltd, 2006. 244. Print. 7. Gazi, V. Passino, K.M. *Swarm Stability and Optimization*. Springer, 2011. 318. Print. 8. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>. 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. 84–99. Print. 10. Brake, H.J.M. Huonker, R., Rogalla, H. “New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms.” *Meas. Sci. Technol.* No. 4. 1993. 1370–1375. Print. 11. Celozzi, S. Garzia, F. “Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization.” *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.* – Rome, Italy. No. 1.151. 2004. 2–7. Print. 12. Shenkman, A., Sonkin, N., Kamensky, V. “Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line.” *HAIT Journal of Science and Engineering*. No. 2.2. 2005. 254–265. Print.

Поступила 13.04.2017