

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

СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Проведено синтез систем активного екранування техногенного магнітного поля повітряних ліній електропередачі всередині заданої області простору за допомогою керованих джерел магнітного поля. Синтез зводиться до вирішення задачі багатокритеріального нелінійного програмування з обмеженнями, в якій обчислення цільових функцій і обмежень виконуються на основі закону Біо - Савара - Лапласа. Завдання вирішується методом стохастичної мультиагентної оптимізації мультироєм частинок, що дозволяє істотно скоротити час її вирішення. Приведені результати синтезу систем активного екранування для різних типів ЛЕП і з різною кількістю керованих обмоток. Показана можливість суттєвого зниження рівня індукції вихідного магнітного поля всередині заданої області простору. Бібл. 13, рис. 6.

Ключові слова: повітряні лінії електропередачі, магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, багатокритеріальний синтез, стохастична мультиагентна оптимізація, мультироєм частинок.

Проведен синтез систем активного екранування техногенного магнітного поля, створюваного різними повітряними лініями електропередачі всередині заданої області простору, з допомогою управляємих джерел магнітного поля. Синтез зводиться до вирішення задачі багатокритеріального нелінійного програмування з обмеженнями, в якій обчислення цільових функцій і обмежень виконуються на основі закону Біо - Савара - Лапласа. Задача вирішується методом стохастичної мультиагентної оптимізації мультироєм частинок, що дозволяє суттєво скоротити час її вирішення. Приведені результати синтезу систем активного екранування для різних типів ЛЕП і з різною кількістю керованих обмоток. Показана можливість суттєвого зниження рівня індукції вихідного магнітного поля всередині заданої області простору. Бібл. 13, рис. 6.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачі, магнитное поле промышленной частоты, система активного экранирования, многокритериальный синтез, стохастическая мультиагентная оптимизация, мультироєм частинок.

Введение. Многие жилые здания и сооружения расположены в непосредственной близости от воздушных линий электропередачи так, что уровень индукции магнитного поля внутри них превышает современные санитарные нормы. Кроме того, в связи с постоянным удорожанием земли, продолжается строительство жилых, административных и других общественных зданий и сооружений в местах прохождения существующих воздушных линий электропередачи. Одним из возможных путей эксплуатации таких зданий является применение систем активного экранирования.

Анализ существующих систем активного экранирования. В настоящее время интенсивно проводятся исследования и внедряются разнообразные системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты [1-9]. В таких системах в качестве исполнительного органа системы активного экранирования используются специальные обмотки – активные кабели, количество которых определяется спецификой решаемой задачи. Наиболее широкое распространение получили системы активного экранирования с одной обмоткой [1]. Для повышения эффективности системы используют две, три, шесть, двадцать четыре и более обмоток [9]. Для управления этими обмотками может использоваться различное количество измерителей индукции магнитного поля – магнитометров: один, два, три, шесть, двадцать четыре и более. Количество магнитометров, обычно, равно количеству управляемых обмоток, либо количеству пар обмоток. В частности, при шести обмотках типа колец Гельмгольца могут использоваться три магнитометра, расположенные в центре

области экранирования магнитного поля и ориентированные ортогонально относительно управляемых обмоток [9].

Целью работы является синтез и исследование систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, создаваемого различными ЛЭП, с различным количеством обмоток магнитных исполнительных органов и оценка эффективности синтезированных систем.

Формулировка задачи оптимального управления на основе многокритериальной оптимизации. Рассмотрим решение задачи синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты, создаваемого воздушными линиями электропередачи внутри заданной области пространства, на основе многокритериального подхода [12]. Техногенное магнитное поле создается трехфазной воздушной линией электропередачи. Система активного экранирования магнитного поля содержит датчики магнитного поля, систему управления, источник питания и управляемые источники магнитного поля – обмотки с регулируемым током, установленные в зоне, где необходимо поддерживать параметры внутреннего магнитного поля в заданных пределах.

При заданной структуре системы активного экранирования задача синтеза системы активного экранирования магнитного поля в заданном пространстве сводится к определению такого вектора пространственного расположения и геометрических размеров компенсируемых обмоток, а также параметров регулятора X , при котором максимальное значение индукции магнитного поля в выбранных точках P_i рас-

смагриваемого пространства P принимает минимальное значение

$$X^* = \arg \min_{X \in X} \max_{P_i \in P} B(X, P_i). \quad (1)$$

При минимизации индукции $B(X, P_i)$ в точке P_i значения индукции в других точках рассматриваемого пространства, расположенных в окрестности этой точки, больше этого минимального значения либо за счет недокомпенсации, либо за счет перекомпенсации уровня индукции исходного магнитного поля с помощью системы активного экранирования. Причем, по мере приближения рассматриваемой точки к управляемым обмоткам значение индукции становится существенно больше индукции исходного уровня магнитного поля за счет перекомпенсации. Поэтому задача (13) не может быть сведена к решению m локальных задач минимизации индукции $B(X, P_i)$ в точках P_i

$$X_i^* = \arg \min_{X \in X} B(X, P_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

а затем к выбору такого решения X^* из множества m локальных оптимумов X_i^* , $i = \overline{1, m}$, при котором максимальное значение индукции $B(X, P_i)$ во всех рассматриваемых точках P_i является минимальным

$$X^{**} = \arg \min_{i=1, m} \max_{j=1, m} B_{ij}^*(X_i^*, P_j), \quad (3)$$

где $B_{ij}^*(X_i^*, P_j)$ – значение индукции в точке P_j , вычисленное при оптимальном значении вектора искомым параметров регуляторов X_i^* , найденных из условия минимизации (3) уровня индукции в точке P_i .

В общем виде задача (1) синтеза системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, создаваемого воздушными линиями электропередачи внутри заданной области пространства, может быть сформулирована в виде следующей задачи многокритериальной оптимизации векторного критерия

$$B(X) = [B(X, P_1), B(X, P_2), \dots, B(X, P_m)]^T, \quad (4)$$

компонентами которого $B(X, P_i)$ являются модули вектора индукции в m точках P_i рассматриваемого пространства. При этом, естественно, необходимо учитывать ограничения на вектор управления и переменные состояния в виде векторного неравенства и, возможно, равенства

$$G(X) \leq G_{\max}, \quad H(X) = 0. \quad (5)$$

Заметим, что компонентами векторного критерия (4) и ограничений (5) являются нелинейные функции вектора искомым параметров регуляторов X и их вычисление выполняется на основании закона Био-Савара-Лапласа [10, 11].

Метод решения задачи многокритериальной оптимизации. Задача нахождения локального минимума (4) в одной точке P_i рассматриваемого пространства, как правило, является многоэкстремальной, содержащей локальные минимумы и максимумы, поэтому, для ее решения целесообразно использовать алгоритмы стохастической мультиагентной оптимизации [12]. Рассмотрим алгоритм нахождения множе-

ства Парето-оптимальных решений многокритериальных задач нелинейного программирования на основе стохастической мультиагентной оптимизации. На сегодняшний день разработано большое количество алгоритмов оптимизации роем частиц – PSO алгоритмов на основе идеи коллективного интеллекта роя частиц, такие как gbest PSO и lbest PSO алгоритмы [13]. Применение стохастических мультиагентных методов оптимизации для решения многокритериальных задач на сегодняшний день вызывает определенные трудности и это направление продолжает интенсивно развиваться [12, 13]. Для решения исходной многокритериальной задачи нелинейного программирования (4) с ограничениями (5) построим алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации на основе множества роев частиц, количество которых равно количеству компонент векторного критерия оптимизации. В стандартном алгоритме оптимизации роем частиц изменение скоростей частиц осуществляется по линейным законам [13]. Для повышения скорости нахождения глобального оптимума используется нелинейный алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации [12].

С помощью отдельных j -тых роев решаются задачи оптимизации скалярных критериев $B(X, P_j)$, которые являются компонентами векторного критерия оптимизации (4). Для нахождения глобального решения исходной многокритериальной задачи (4) в ходе поисков оптимальных решений локальных критериев отдельные рои обмениваются информацией между собой. При этом для вычисления скорости движения частиц одного роя используется информация о глобальном оптимуме, полученным частицами другого роя, что позволяет выделить все потенциальные Парето оптимальные решения. С этой целью на каждом шаге t движения i -той частицы j -того роя используются функции бинарных предпочтений локальных решений, полученных всеми роями. Решение $X_j^*(t)$, полученное в ходе оптимизации целевой функции $B(X(t), P_j)$ с помощью j -того роя, является предпочтительным по отношению к решению $X_k^*(t)$, полученному в ходе оптимизации целевой функции $B(X(t), P_k)$ с помощью k -того роя, т.е. $X_j^*(t) \succ X_k^*(t)$, если выполняется условие

$$\max_{i=1, m} B(P_i, X_j^*(t)) < \max_{i=1, m} B(P_i, X_k^*(t)). \quad (6)$$

При этом в качестве глобального оптимального решения $X_k^*(t)$ k -того роя используется глобальное решение $X_j^*(t)$, полученное j -тым роем, которое является более предпочтительным по отношению к глобальному решению $X_k^*(t)$ k -того роя на основании отношения предпочтения (6).

Фактически при таком подходе реализуется основная идея метода последовательного сужения области компромиссов – из исходного множества возможных решений на основании информации об относительной важности локальных решений последовательно удаляются все Парето-оптимальные решения,

которые не могут быть выбранными согласно имеющейся информации об отношении предпочтения. Удаление осуществляется до тех пор, пока не будет получено глобально оптимальное решение. В результате применения такого подхода на каждом шаге сужения не будет удалено ни одно потенциально оптимальное решение.

Результаты моделирования на ЭВМ. Рассмотрим синтез систем активного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи различного конструктивного исполнения, внутри заданной области пространства с помощью управляемых источников магнитного поля с различным количеством компенсирующих обмоток и различной конструкции. В начале рассмотрим системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого двухцепными воздушными линиями электропередачи, имеющими шесть токопроводов. Как было показано многими исследователями [3, 5], магнитное поле, создаваемое такой линией имеет эллиптическую поляризацию, что позволяет построить системы активного экранирования с одной компенсационной обмоткой. Заметим, что такие системы получили наибольшее распространение в мировой практике [1, 6, 8]. В качестве примера на рис. 1 показаны линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования магнитного поля с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. Как видно из этого рисунка, в рассматриваемом пространстве, где необходимо экранировать магнитное поле, при включенной системе активного экранирования уровень индукции магнитного поля не превосходит 0,4 мкТл, в то время как уровень индукции исходного магнитного поля изменяется в пределах от 1,8 мкТл до 0,5 мкТл.

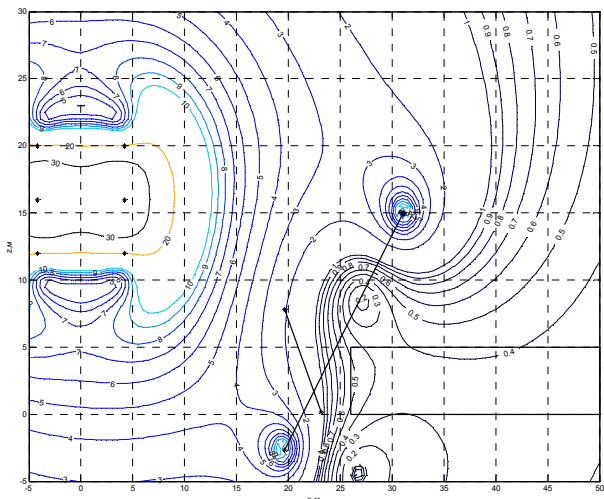


Рис. 1. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с одной обмоткой

Для повышения эффективности работы системы добавим еще одну обмотку, как это показано на рис. 2. В такой системе активного экранирования уровень индукции магнитного поля не превосходит 0,2 мкТл, в то время как уровень индукции магнитного поля в системе с одной обмоткой снижается лишь до 0,4 мкТл.

В мировой практике построения систем активно-экранирования кроме однофазных обмоток используются также трехфазные обмотки, позволяющие создавать вращающееся магнитное поле, как это показано на рис. 3.

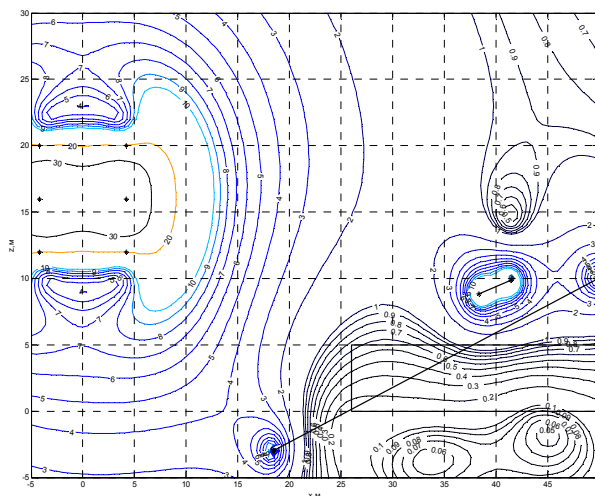


Рис. 2. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с двумя обмотками

В такой системе уровень магнитного поля не превосходит 0,4 мкТл, так что эта система обеспечивает такую же эффективность, что и система с одной обмоткой, как это показано на рис. 1. Однако, при этом, трехфазная обмотка занимает меньше места, чем однофазная обмотка при той же эффективности системы.

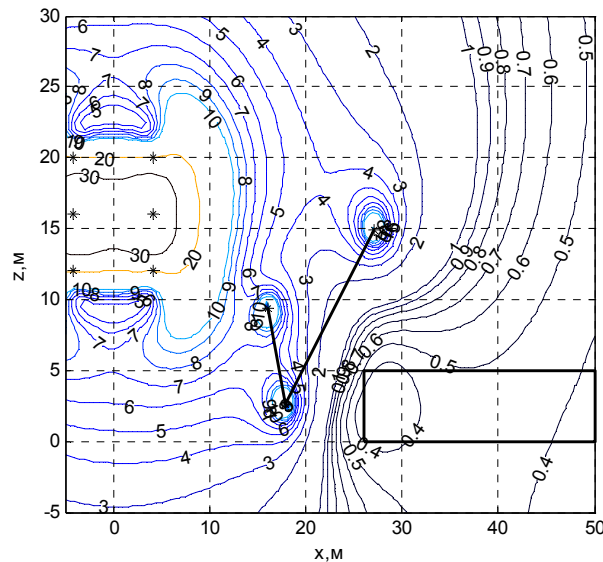


Рис. 3. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с трехфазной обмоткой

На рис. 4 показаны линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с помощью трехфазной и однофазной обмоток. Уровень индукции магнитного поля в такой системе не превосходит 0,3 мкТл.

Рассмотрим теперь синтез систем активного экранирования магнитного поля, создаваемого одноцепными

ми воздушными линиями электропередачи, имеющими три токоведущих провода. Магнитное поле, создаваемое такой линией имеет практически круговую поляризацию [3, 5], поэтому для построения системы активного экранирования необходимо использовать, по меньшей мере, две компенсационные обмотки.

На рис. 5 показаны линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с двумя обмотками.

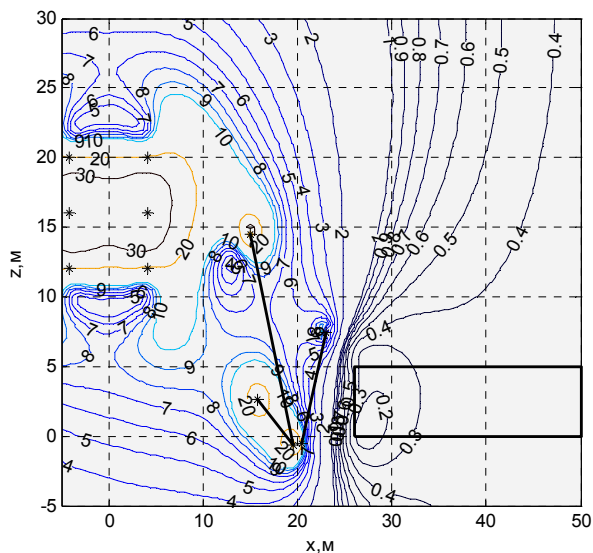


Рис. 4. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с трехфазной и однофазной обмотками

Как видно на рис. 5, в рассматриваемом пространстве, где необходимо экранировать магнитное поле, при включенной системе активного экранирования уровень индукции магнитного поля не превосходит 0,4 мкТл, в то время как уровень индукции исходного магнитного поля изменяется в пределах от 1,8 мкТл до 0,5 мкТл.

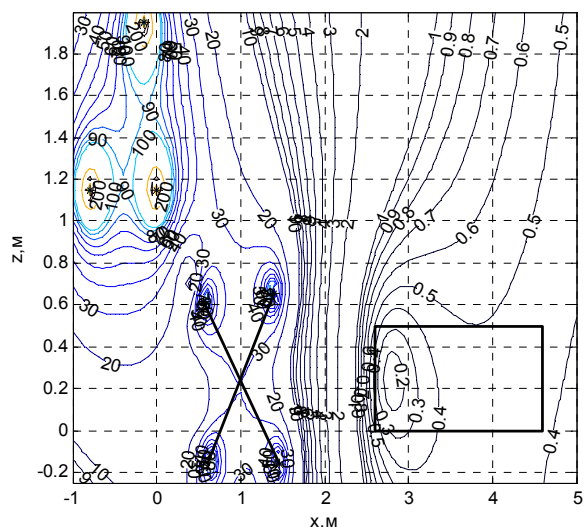


Рис. 5. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с двумя обмотками

Магнитное поле с круговой поляризацией можно также создавать и с помощью трехфазной обмотки, как это показано на рис. 6. Уровень индукции магнитного поля в такой системе не превышает 0,4 мкТл.

Выводы.

1. Показано, что задача синтеза системы активного экранирования сводится к решению задачи многокритериального нелинейного программирования с ограничениями, в которой вычисления целевых функций и ограничений выполняются на основании закона Био-Савара-Лапласа.

2. Предложено осуществлять решение задачи синтеза на основе построения Парето оптимальных решений с помощью алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации мультироем частиц, что позволяет сократить время решения задачи.

3. Подтверждена возможность снижения уровня индукции магнитного поля внутри заданной области пространства при использовании синтезированной системы активного экранирования в четыре раза.

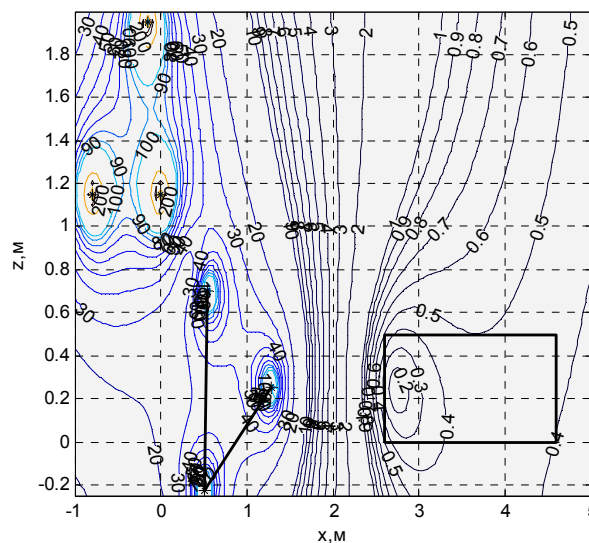


Рис. 6. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования с трехфазной обмоткой

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
2. 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 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. 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 // *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*. – 2005. – Vol. 125. – Issue 2. – pp. 99-106. doi: 10.1541/ieejfms.125.99.

10. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №5. – С. 11-13.

11. Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3* // Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. – 96 p.

12. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.

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

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. *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 2005, Vol. 125, Issue 2, pp. 99-106. doi: 10.1541/ieejfms.125.99.

10. Rozov V.Yu., Reutsky S.Yu. Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

11. Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3*. Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. 96 p.

12. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.

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

Поступила (received) 15.09.2016

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: bikuznetsov@mail.ru

² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: tatjana55555@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 Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization.

Purpose. The synthesis of the active shielding systems by technogenic magnetic field generated by the different types of high voltage power lines in a given region of space using various cables of controlled magnetic field sources. **Methodology.** The initial parameters for the synthesis of active shielding system parameters are the location of the high voltage power 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 magnetic field induction, which should be achieved as a result of shielding. The objective of the synthesis of the active shielding 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 shielding system is reduced to the problem of multiobjective nonlinear programming with constraints in which calculation of the objective functions and constraints are carried out on the basis of Biot – Savart – Laplace law. The problem is solved by a stochastic multi-agent optimization of multiswarm of particles which can significantly reduce the time to solve it. **Results.** Active screening system synthesis results for the various types of transmission lines and with different amounts of controlled cables is given. The possibility of a significant reduction in the level of induction of the magnetic field source within a given region of space. **Originality.** For the first time carried out the synthesis of the active shielding systems, by magnetic field generated by the different types of high voltage power lines within a given region of space controlled by a magnetic field sources with different amounts of controlled cables. **Practical value.** Practical recommendations on reasonable choice of the number and spatial arrangement of compensating cables of active shielding systems for different types of high voltage power lines in order to ensure the effectiveness of a given shielding of the magnetic field high voltage power lines. References 13. figures 6.

Key words: power lines, power frequency magnetic field, active shielding system, multiobjective synthesis, stochastic multi-agent optimization, particle multiswarm.