

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Проведено експериментальне дослідження впливу просторового розташування датчиків магнітного поля на ефективність замкненої системи активного екранування магнітного поля ліній електропередачі на розробленому макеті трифазної одноланцюгової повітряної лінії електропередачі, яка створює обертове поле з найбільш складною просторово-часовою структурою. Експериментально показано, що найбільшу ефективність має замкнена система активного екранування магнітного поля, у якій датчики магнітного поля просторово розташовані в розрахункових точках, отриманих при синтезі системи, в яких значення відповідних компонент вектора магнітної індукції приймають мінімальні значення. Бібл. 14, рис. 6.

Ключові слова: магнітне поле промислової частоти, макет повітряної лінії електропередачі, макет системи активного екранування, експериментальні дослідження.

Проведено експериментальное исследование влияния пространственного расположения датчиков магнитного поля на эффективность замкнутой системы активного экранирования магнитного поля линий электропередачи на разработанном макете трехфазной одноцепной воздушной линии электропередачи, создающей вращающееся поле с наиболее сложной пространственно-временной структурой. Экспериментально показано, что наибольшую эффективность имеет замкнутая система активного экранирования магнитного поля, у которой датчики магнитного поля пространственно расположены в расчетных точках, полученных при синтезе системы, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальное значение. Библ. 14, рис. 6.

Ключевые слова: магнитное поле промышленной частоты, макет воздушной линии электропередачи, макет системы активного экранирования, экспериментальные исследования.

Введение. Министерством топлива и энергетики Украины [1] в 2014 году введены нормативные уровни магнитного поля (МП) с частотой 50 Гц. Многие жилые здания и сооружения расположены в непосредственной близости от воздушных линий электропередачи так, что уровень индукции магнитного поля внутри них превышает эти нормы. Применение систем активного экранирования позволяет снизить уровни магнитного поля до нормативных значений и продолжить эксплуатацию таких зданий.

Анализ существующих систем активного экранирования. В системах активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты [2-10] в качестве исполнительного органа используют специальные обмотки – активные кабели, количество которых определяется спецификой решаемой задачи. Система активного экранирования может содержать одну, две, три, шесть, двадцать четыре и более обмоток. Для управления этими обмотками применяют 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 [10], либо шесть магнитометров, расположенных в соответствующих плоскостях, и ориентированные ортогонально относительно управляемых обмоток.

При синтезе замкнутых систем активного экранирования магнитного поля линий электропередачи важным вопросом является определение положения

датчиков магнитного поля, при котором эффективность системы имеет наибольшее значение. Обычно замкнутая система настраивается таким образом, чтобы с помощью заданных обмоток магнитных исполнительных органов минимизировать уровень индукции магнитного поля в точках установки датчиков магнитного поля. Один из подходов к определению такого положения датчиков магнитного поля основан на решении задачи синтеза системы активного экранирования магнитного поля, с помощью которой обеспечивается наибольшая эффективность системы активного экранирования магнитного поля. Синтез 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 [11, 12]. Задача решается методом стохастической мультиагентной оптимизации мультироем частиц [13, 14], что позволяет существенно сократить время ее решения. Расчетное расположение датчиков магнитного поля в заданном пространстве определяется точками, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальные значения.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния пространственного расположения датчиков магнитного поля на эффективность замкнутой системы активного экранирования магнитного поля линий электропередачи на разработанном макете трехфазной одноцепной воздушной линии электропередачи, создающей вращающееся поле с наиболее сложной пространственно-временной структурой.

Схема макета ЛЭП, управляющих обмоток, а также области пространства, в котором необходимо экранировать магнитное поле, показаны на рис. 1. Система активного экранирования содержит две компенсационные обмотки, формирующие компенсирующее магнитное поле при протекании по ним токов, создаваемых системой управления (СУ) в функции сигналов обратной связи по магнитному полю, формируемому датчиками магнитного поля (ДП), установленными в защищаемом пространстве. СУ получает питание от вторичного источника питания.

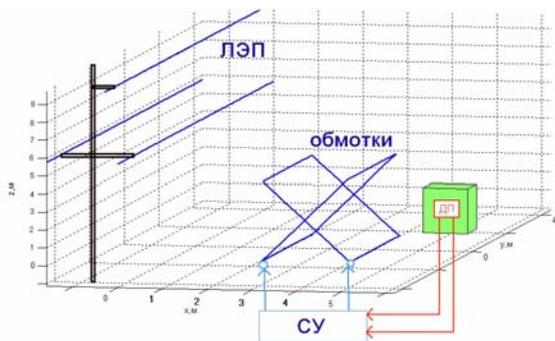


Рис. 1. Схема макета системы активного экранирования

Координаты пространственного расположения и геометрические размеры компенсационных обмоток, а также параметры регуляторов САЭ определены на основании разработанного в [11] метода синтеза САЭ МП в ходе решения многокритериальной задачи оптимизации. На рис. 2 показаны линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования.

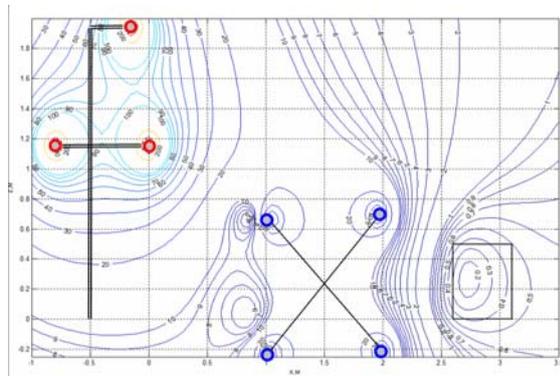


Рис. 2. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования

Заметим, что необходимость использования двух компенсирующих обмоток обусловлена тем, что трехфазная одноцепная линия электропередачи создает практически круговое магнитное поле. На рис. 3,а в качестве примера показан годограф, образованный вектором индукции исходного магнитного поля, создаваемого этой линией электропередачи. Поэтому для компенсации такого исходного магнитного поля необходимо иметь, по меньшей мере, две компенсационные обмотки для создания кругового магнитного поля.

На рис. 3,б показан годограф, образованный вектором индукции магнитного поля, создаваемого двумя компенсационными обмотками. Как видно из этого рисунка, с помощью компенсационных обмоток соз-

дается магнитное поле, достаточно близкое к исходному магнитному полю, создаваемому ЛЭП.

На рис. 3,в показан годограф, образованный вектором индукции суммарного магнитного поля, создаваемого ЛЭП и компенсационными обмотками при работе системы активного экранирования. Как видно из этого рисунка, годограф, образованный вектором индукции оставшегося после работы системы активного экранирования магнитного поля имеет на порядок меньший модуль по сравнению с исходным магнитным полем.

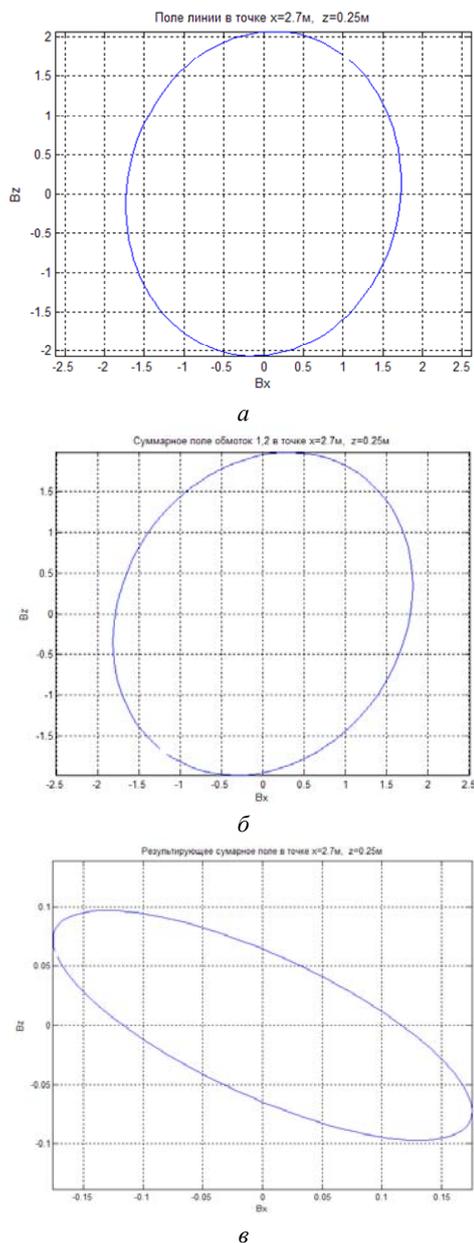


Рис. 3. Годографы векторов индукции магнитного поля: а) исходного, создаваемого ЛЭП; б) компенсирующих обмоток; в) суммарного, создаваемого ЛЭП и включенной системой

Макет ЛЭП и системы активного экранирования. Для проведения экспериментальных исследований разработан макет ЛЭП и системы активного экранирования. На рис. 4,а показан внешний вид макета ЛЭП, а на рис. 4,б показан внешний вид макета системы компенсации. На этом рисунке показаны компенсационные обмотки и датчики магнитного поля.



a



б

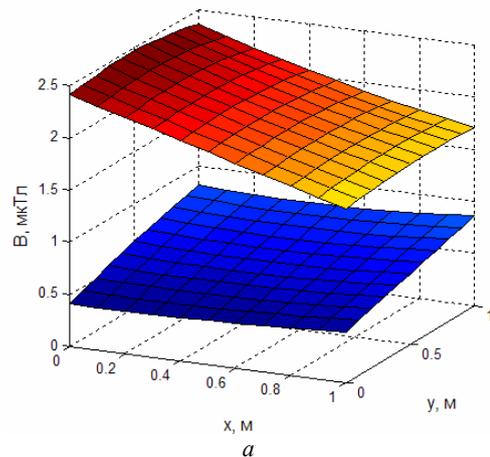
Рис. 4. Внешний вид макета:
a) ЛЭП; *б)* системы компенсации

На этих макетах были проведены предварительные экспериментальные исследования по проверке адекватности используемых математических моделей магнитного поля на основе закона Био – Савара – Лапласа [11, 12] реальным процессам, происходящим в макетах ЛЭП и компенсационных обмотках системы активного экранирования. Как показали экспериментальные исследования макетов ЛЭП и компенсационных обмоток при различных токах и в различных режимах работы, отклонения экспериментальных значений магнитной индукции, создаваемых макетом ЛЭП и компенсационными обмотками от расчетных, выполненных по методике [11], не превышают 7 %.

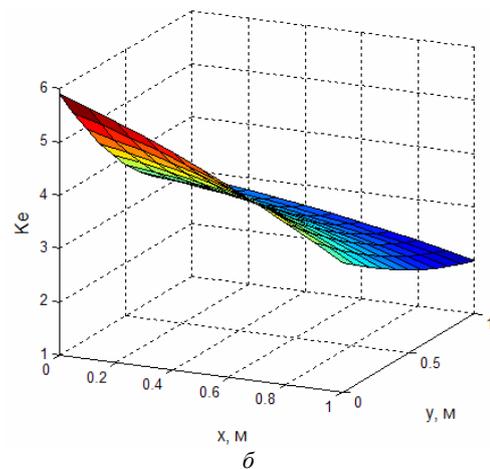
Результаты экспериментальных исследований. Рассмотрим теперь экспериментальные исследования системы активного экранирования. В системе имеются два независимых датчика магнитного поля, с помощью которых замыкаются каналы управления токами компенсационных обмоток. Вначале рассмотрим экспериментальные исследования системы активного экранирования, когда датчики магнитного поля расположены в расчетных точках рассматриваемого пространства, в которых необходимо экранировать магнитное поле. Эти расчетные точки соответствуют точкам, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальные значения. Для определения этих точек вначале решается задача синтеза системы активного экранирования. Исходными параметрами для синтеза

системы выступают параметры линии электропередачи – рабочие токи, геометрия и количество проводов, расположение линии электропередачи относительно защищаемого пространства, а также размеры защищаемого пространства и нормативное значение индукции магнитного поля, которое должно быть достигнуто в результате экранирования. Результатом синтеза системы является количество, конфигурация, пространственное расположение, схема подключения, токи компенсационных обмоток, а также результирующее значение индукции магнитного поля в точках защищаемого пространства, а также параметры регуляторов системы управления. На основании полученного в ходе синтеза системы распределения результирующего магнитного поля в рассматриваемом пространстве находятся точки, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальные значения.

На рис. 5,*a* показаны поверхности распределения индукции исходного магнитного поля линии электропередачи в среднем сечении рассматриваемого пространства и поверхности распределения индукции магнитного поля с включенной системой, а на рис. 5,*б* показана поверхность уровня компенсации индукции магнитного поля такой системы относительно исходного уровня индукции магнитного поля линии электропередачи.



a



б

Рис. 5. Поверхности распределения: *a)* индукций исходного магнитного поля линии электропередачи и магнитного поля с включенной системой; *б)* уровня компенсации индукции магнитного поля с помощью системы

Таким образом, при работе системы активного экранирования уровень индукции магнитного поля в рассматриваемой области практически остается постоянным и не превосходит 0,5 мкТл, а уровень компенсации магнитного поля составляет более 5 мкТл.

Заметим, что отклонения экспериментальных значений магнитной индукции макета с включенной системой активного экранирования от расчетных, полученных в [11], не превышают 10 %. Причем, эти отклонения, в основном, обусловлены неточной установкой магнитометра, а также погрешностью работы регуляторов разомкнутого и замкнутого каналов управления.

На рис. 6 показаны те же поверхности распределения, что и на рис. 5 при размещении датчиков магнитного поля в центральной части области экранирования. При таком размещении датчиков система имеет наибольшую эффективность экранирования в центральной части пространства экранирования – именно там, где расположены датчики магнитного поля. Однако, при таком расположении датчиков система активного экранирования имеет более высокий остаточный уровень магнитной индукции практически во всей области, где необходимо экранировать магнитное поле.

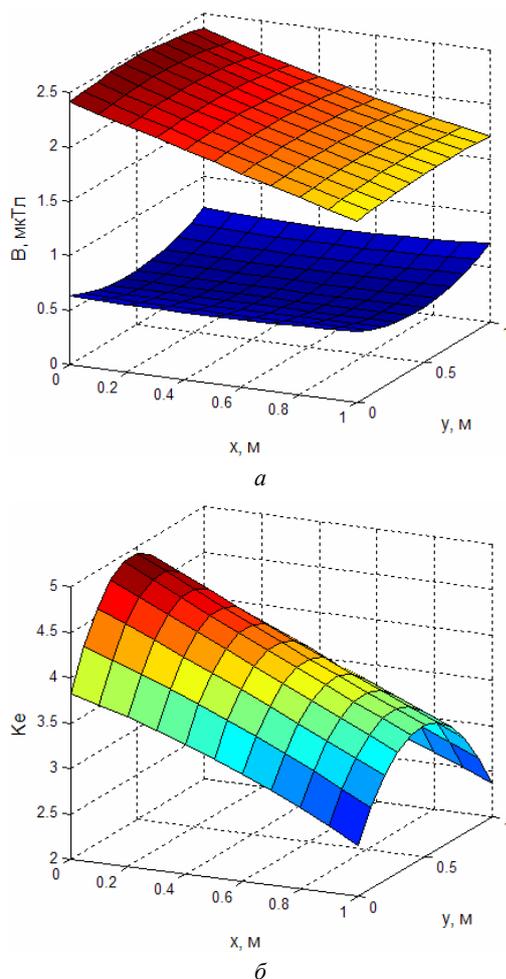


Рис. 6. Поверхности распределения: а) индукций исходного магнитного поля линии электропередачи и магнитного поля с включенной системой; б) уровня компенсации индукции магнитного поля с помощью системы при размещении датчиков поля в центральной части области экранирования

Выводы. Таким образом, экспериментально установлено, что изменение положения датчиков магнитного поля относительно их расчетного положения приводит к снижению эффективности экранирования системы. Оптимальным положением датчиков магнитного поля являются точки, в которых уровни проекций вектора магнитной индукции, ортогональные плоскостям компенсирующих обмоток, имеют минимальные значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання 3-тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с.
2. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
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. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 11-13.
12. Nikolova N.K., Bakr M.H. Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3 // Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. – 96 p.
13. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.
14. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.

REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok. Vyd. 3, pererob. i dop* [Electrical Installation Regulations. 3rd edition, revised and enlarged]. Kyiv, Minpalyvenergo of Ukraine Publ., 2010. 736 p. (Ukr).

2. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
3. 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.
4. 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](https://doi.org/10.1049/ip-smt:20040002).
5. 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](https://doi.org/10.1088/0957-0233/2/7/004).
6. 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.
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](https://doi.org/10.1109/isemc.2002.1032478).
8. 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.
9. 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](https://doi.org/10.1088/0957-0233/4/12/010).
10. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation. *IEEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 2005, Vol. 125, Issue 2, pp. 99-106. doi: [10.1541/ieejfms.125.99](https://doi.org/10.1541/ieejfms.125.99).
11. Rozov V.Yu., Reutskiy 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).
12. Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3*. Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. 96 p.
13. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: [10.1002/9780470612163](https://doi.org/10.1002/9780470612163).
14. Gazi V., Passino K.M. *Swarm Stability and Optimization*. Springer, 2011. 318 p. doi: [10.1007/978-3-642-18041-5](https://doi.org/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: 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 Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line.

Purpose. Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop active screening system by magnetic field of high voltage power lines developed a three-phase single-circuit high voltage power lines, creating a rotating magnetic field with the most complex space-time structure. **Methodology.** Optimal spatial arrangement of the magnetic field sensors is determined by solving the active magnetic field screening synthesis problems with which the system provides the greatest efficiency of the active magnetic field shielding. Synthesis of active screening system is reduced to the problem of multi-criteria 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 by multiswarm of particles which can significantly reduce the time to solve it. Calculated arrangement of magnetic field sensors in a given space defined by the points at which the values of the corresponding components of the vector of magnetic induction take minimal values. **Results.** For the first time experimentally that changes in the position of the magnetic field sensors relative to their calculated position reduces the effectiveness of screening. The optimum position of the magnetic field sensors are the points at which the levels of the magnetic induction vector of projections orthogonal to the planes of the compensating coils are minimum values. **Originality.** For the first time invited to place sensors closed loop active screening system by magnetic field of high voltage power lines at the points where the calculated levels of corresponding projections of the magnetic induction vector orthogonal planes compensating windings are minimum values. **Practical value.** Practical recommendations for evidence-based selection of the spatial arrangement of the magnetic field sensors in a given area to ensure maximum efficiency of the active magnetic field screening system. References 14. figures 6.

Key words: power frequency magnetic field, high voltage power lines model, active screening system model, experimental research.