

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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ГРУППОЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Розроблено макет одноколової системи активного екранування магнітного поля, яке створюється у житлових приміщеннях групою ЛЕП. Просторове розташування і геометричні розміри компенсуючої обмотки, а також параметри регуляторів визначені на основі рішення задачі багатокритеріальної оптимізації. Проведено польові експериментальні дослідження макету системи з розімкнутим та замкнутим управлінням. Показано, що ефективність системи при розімкненому та замкненому управлінні приблизно однакова і складає більше 4 одиниць. Наведено результати порівняння експериментальних і розрахункових значень індукції магнітного поля в зоні екранування. Показано, що експериментальні і розрахункові значення індукції магнітного поля відрізняються не більше ніж на 20 %. Бібл. 12, рис. 5.

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

Разработан макет одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого в жилом помещении группой ЛЭП. Пространственное расположение и геометрические размеры компенсирующей обмотки, а также параметры регуляторов определены на основе решения задачи многокритериальной оптимизации. Проведены полевые экспериментальные исследования макета системы с разомкнутым и замкнутым управлением. Показано, что эффективность системы при разомкнутом и замкнутом управлении примерно одинаковая и составляет более 4 единиц. Приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений индукции магнитного поля в зоне экранирования. Показано, что экспериментальные и расчетные значения индукции магнитного поля отличаются не более чем на 20 %. Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, магнитное поле промышленной частоты, макет одноконтурной система активного экранирования, полевые экспериментальные исследования.

Введение. Индукция магнитного поля (МП) промышленной частоты за пределами охранных зон высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) в ряде случаев превышает гранично допустимый уровень 0,5 мкТл [1], что создает угрозу здоровью населения и требует принятия определенных мер по снижению МП действующих ЛЭП в черте городов Украины. Экономически наиболее приемлемыми для Украины являются [2] методы активного контурного экранирования МП действующих ЛЭП, реализуемые с помощью систем активного экранирования (САЭ) [3-10].

Анализ существующих систем активного экранирования. В [10] разработан метод синтеза САЭ МП, а в [11] проведены экспериментальные исследования макета САЭ с различным количеством компенсирующих обмоток и датчиков МП, функционирующих по различным алгоритмам управления [8, 9]. По отношению к геометрическим размерам реальных систем эти макеты выполнены в масштабе 1 к 10, что обуславливает дополнительные погрешности макетирования САЭ, вызванные, в частности, конечными размерами датчиков МП, соизмеримых с размерами компенсационных обмоток макета. Кроме того, исследования макетов САЭ проводились для МП, генерируемого одиночной ЛЭП. В связи с этим возникает задача верификации метода синтеза [10] САЭ МП, создаваемого группой ЛЭП, на полномасштабном макете САЭ.

Целью работы являются разработка и полевые экспериментальные исследования полномасштабного макета одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой воздушных линий электропередачи в жилых помещениях.

Разработка макета одноконтурной САЭ. На рис. 1 показана схема расположения группы ЛЭП, генерирующих МП, индукцию которого необходимо уменьшить в жилых помещениях (в дальнейшем «в зоне экранирования»).

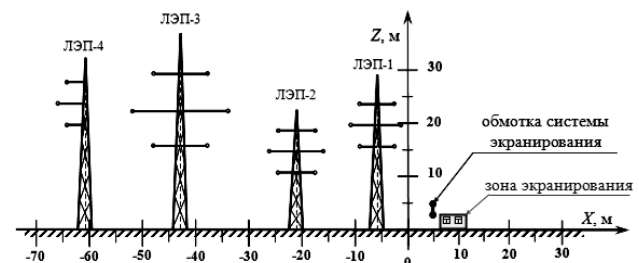


Рис. 1. Схема расположения группы ЛЭП и одноконтурной САЭ

Исходное МП в зоне экранирования генерируют две двухцепные ЛЭП 110 кВ (ЛЭП 1 и ЛЭП 2), двухцепная ЛЭП 330 кВ (ЛЭП 3) и одноцепная ЛЭП 330 кВ (ЛЭП 4). На рис. 1 также показана зона, в которой необходимо экранировать МП. На основании экспериментальных исследований было установлено, что в зоне экранирования МП имеет незначительную поляризацию [12], что позволяет использовать одноконтурную САЭ с одной компенсационной обмоткой. При синтезе макета САЭ учитывались ограничения на геометрические размеры и точки расположения опор ее компенсационной обмотки.

На рис. 2,а показана расчетная схема макета одноконтурной САЭ, зона экранирования и компенсирующая обмотка.

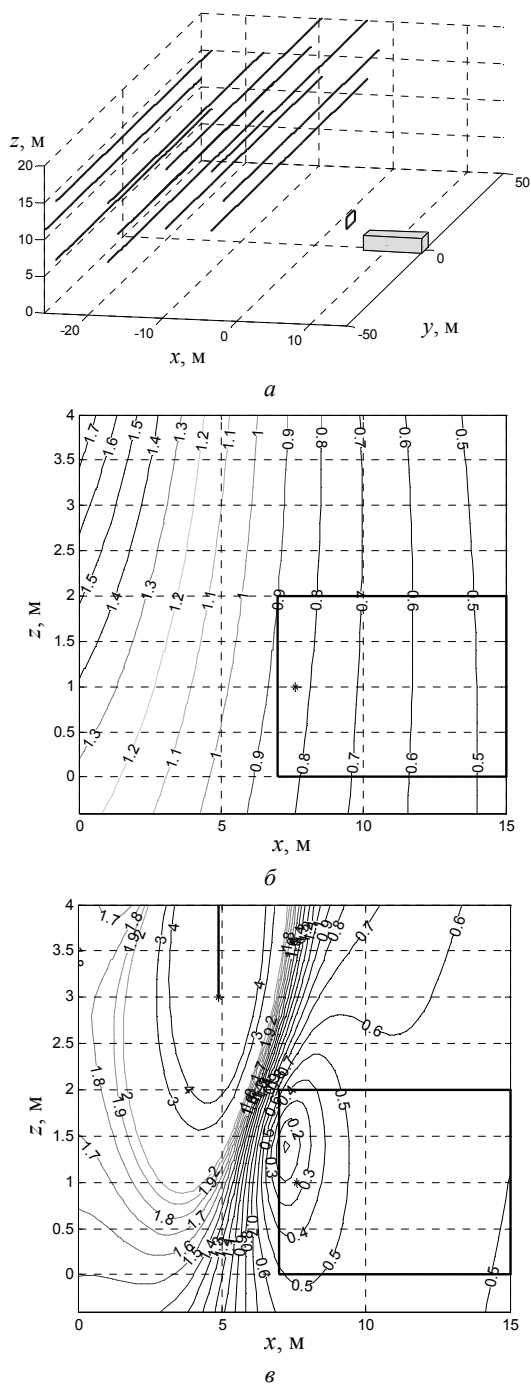


Рис. 2. Расчетная схема макета одноконтурной САЭ (а), распределение МП исходного (б) и с включенной САЭ (в)

На рис. 2,б показано распределение индукции исходного МП, создаваемого группой ЛЭП, а на рис. 2,в – распределение индукции МП с включенной САЭ. Исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 0,9 мкТл, а при включенной САЭ уровень индукции магнитного поля не превосходит 0,4 мкТл.

На рис. 3 показаны пространственно-временные характеристики (ПВХ) МП, создаваемого: 1 – группой ЛЭП; 2 – компенсирующей обмоткой и 3 – суммарного магнитного поля с включенной системой. Как видно из этого рисунка, в рассматриваемом пространстве исходное МП, создаваемое группой ЛЭП, имеет незначительную поляризацию, так что его ПВХ пред-

ставляет сильно вытянутый эллипс, а коэффициент эллипсности (отношение меньшей полуоси эллипса к большей полуоси) равен около 0,4, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

ПВХ МП, создаваемого обмоткой одноконтурной САЭ представляет собой линию и, следовательно, такое МП не имеет поляризации. С помощью этой 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.

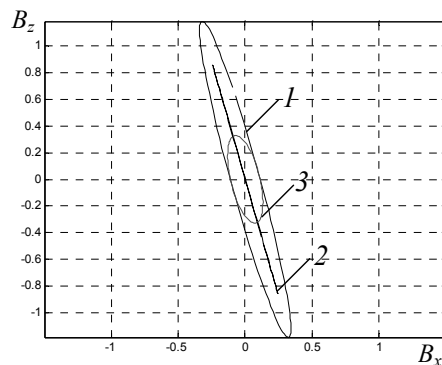


Рис. 3. Пространственно-временные характеристики МП создаваемого: группой ЛЭП (1); компенсирующей обмоткой (2) и суммарного МП с включенной САЭ (3)

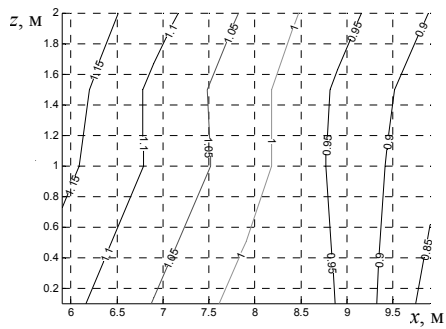
Реализация макета одноконтурной САЭ. Макет одноконтурной САЭ содержит [10] одну квадратную обмотку, верхняя часть которой расположена на высоте 5,1 м, а нижняя – на высоте 3,1 м. Обмотка содержит 20 витков и питается от усилителя типа TDA7294. В качестве датчика индукции МП используется индуктивный датчик, а измерение индукции МП выполняется магнитометром типа EMF-828 фирмы Lutron. Питание САЭ осуществляется от автономного источника.

Система управления обмоткой построена по принципу подчиненного регулирования и содержит внутренний регулятор тока и внешний регулятор индукции МП.

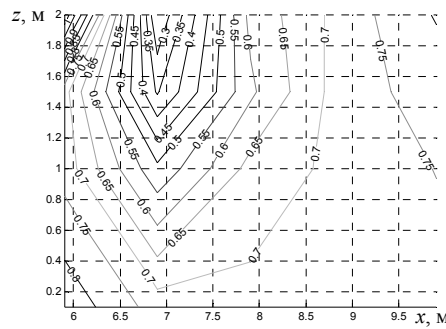
Результаты полевых экспериментальных исследования макета разомкнутой одноконтурной САЭ. Для реализации разомкнутого управления САЭ датчик МП устанавливался в непосредственной близости от проводов ЛЭП и на некотором удалении от зоны экранирования. С помощью такого датчика МП измеряется индукция магнитного поля, создаваемого только ЛЭП, и, следовательно, выходное напряжение такого датчика МП пропорционально току одной из фаз провода ЛЭП, либо их суперпозиции. Таким образом, осуществляется косвенное измерение токов ЛЭП, генерирующих исходное МП, а САЭ на основе такого датчика МП по принципу своего построения является разомкнутой.

На рис. 4 показаны экспериментальные распределения индукции: а) исходного МП, создаваемого группой ЛЭП и б) – в) суммарного МП с включенной САЭ.

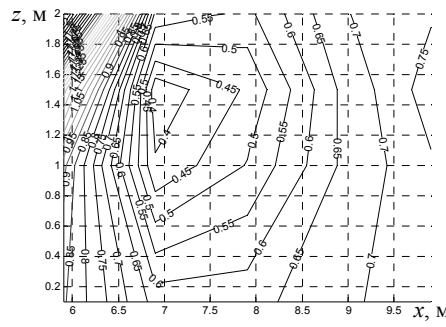
Исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 1,15 мкТл, что более чем в два раза превышает гранично допустимый уровень в 0,5 мкТл [1].



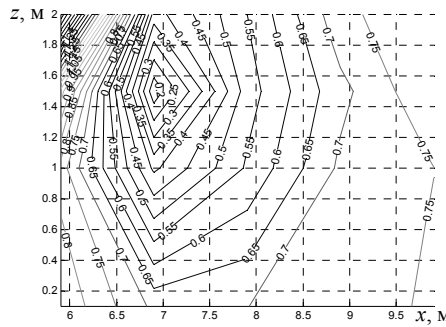
a



б



в

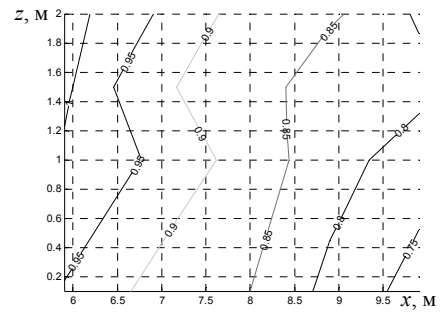


г

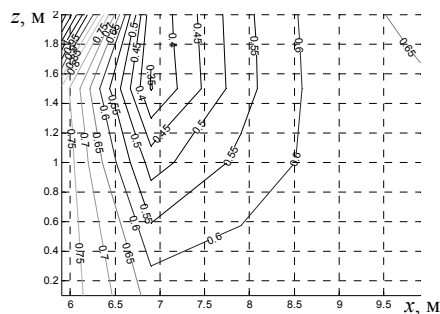
Рис. 4. Линии равного уровня модуля индукции: а) исходного магнитного поля, создаваемого группой ЛЭП и б) – г) суммарного магнитного поля с включенной разомкнутой САЭ

Настройка разомкнутой САЭ выполнялась таким образом, чтобы минимизировать индукцию МП в заданной точке пространства, где необходимо экранировать исходное МП. В частности, на рис 4, б – г показаны распределения суммарного МП с включенной САЭ при ее настройке на различные точки зоны экранирования. Заметим, что в точках настройки САЭ индукция МП имеет минимальное значение, практически одинаковое для любой точки настройки, и составляет 0,2 мкТл.

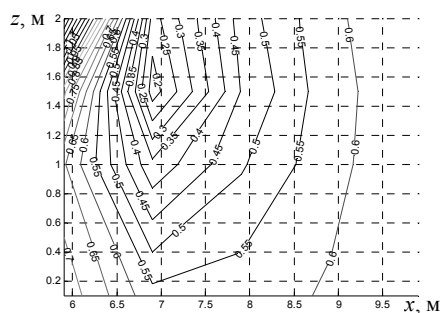
Полевые экспериментальные исследования макета замкнутой одноконтурной САЭ. Для реализации замкнутого управления датчик МП устанавливался непосредственно в зоне экранирования.



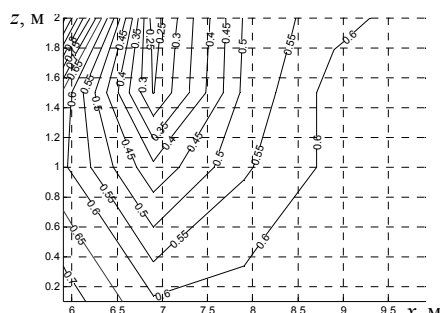
a



б



в



г

Рис. 5. Линии равного уровня модуля индукции: а) исходного магнитного поля, создаваемого группой ЛЭП и б) – г) суммарного магнитного поля с включенной замкнутой САЭ

При этом с помощью такого датчика МП измеряется индукция суммарного МП, создаваемого в зоне экранирования проводами ЛЭП и компенсационной обмоткой, а сама САЭ на основе такого датчика по принципу своего построения становится замкнутой.

На рис. 5 показаны распределения индукции: а) исходного МП, создаваемого группой ЛЭП и б) – г)

суммарного МП с включенной замкнутой САЭ при различном положении датчика МП. С помощью замкнутой САЭ минимизируется индукция МП в точке установки датчика МП. При этом минимальное значение индукции в рассматриваемых трех вариантах составляет 0,2 мкТл, однако распределение магнитного поля в зоне экранирования существенно зависит от положения датчика МП.

Исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 0,95 мкТл, а при включенной замкнутой САЭ уровень индукции магнитного поля не превосходит 0,4 мкТл.

Отметим, что эффективность замкнутой системы зависит от места расположения в зоне экранирования датчика МП. Более того, при одной компенсационной обмотке, важным вопросом является также пространственная ориентация этого датчика МП, при которой обеспечивается максимальная эффективность замкнутой системы.

В целом, замкнутая САЭ минимизирует уровень магнитного поля в месте установки датчика МП. Поэтому, одним из возможных подходов к вопросу определения места установки датчика МП является его размещение в такой точке пространства, в которой расчетное при синтезе САЭ значение индукции МП принимает минимальное значение. В этом случае замкнутая САЭ обеспечивает максимальную эффективность экранирования в заданном пространстве.

Преимуществом замкнутой САЭ является также возможность компенсации как внешнего МП, генерируемого ЛЭП, так и внутреннего МП, генерируемого, например, бытовыми электроприборами, расположенными вблизи зоны экранирования, электрополами и т.д. Кроме того, при изменении параметров замкнутой САЭ, ее эффективность изменяется незначительно, т.е. замкнутая система обладает большей робастностью по сравнению с разомкнутой системой. Однако, при значительных изменениях параметров, замкнутая система может потерять устойчивость и, следовательно, стать неработоспособной. Кроме того, измерение магнитного поля в точке, в которой уровень суммарного МП имеет минимальное значение, приводит к повышению шумов измерения a , следовательно, и к ухудшению эффективности работы замкнутой системы.

Преимуществом разомкнутой САЭ является использование датчика МП, размещенного вблизи проводов ЛЭП, где уровень индукции исходного МП имеет достаточно большое значение и, следовательно, может быть измерено с высоким отношением сигнал / шум. Потому в разомкнутой системе уровень шумов может быть существенно меньшим по сравнению с шумами измерения МП в замкнутой системе. Кроме того, в разомкнутой системе при изменении параметров системы всегда обеспечивается ее устойчивая работа, хотя при этом эффективность ее работы может снижаться за счет недокомпенсации либо перекомпенсации исходного МП.

Сравнение результатов распределения МП синтезированной одноконтурной САЭ, приведенных на рис. 2, в, с экспериментальными распределениями МП разомкнутой и замкнутой одноконтурной САЭ, пока-

занных на рис 4, б-г и рис 5, б-г, показало, что они различаются не более чем на 20 %.

Выводы.

1. Разработан полномасштабный макет одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого в зоне экранирования группой воздушных линий электропередачи, с учетом ограничений на пространственное расположение и геометрические размеры компенсирующей обмотки.

2. Проведены полевые экспериментальные исследования макета одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля с разомкнутым и замкнутым алгоритмами управления. Показано, что эффективность разомкнутой и замкнутой системы примерно одинакова и составляет более 4 единиц.

3. Сравнение результатов экспериментальных и расчетных значений индукции магнитного поля в зоне экранирования показывает, что их разброс не превышает 20 %, что подтверждает адекватность разработанного метода синтеза макета системы активного экранирования и возможность его использования при создании реальных систем активного экранирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rozov V., Grinchenko V. Simulation and analysis of power frequency electromagnetic field in buildings closed to overhead lines // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – Kyiv, Ukraine. – pp. 500-503. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100538.
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/visn2017.07.064.
3. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
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 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. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка – 1996. – №1. – С. 3-9.
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.

11. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.1. – pp. 16-20. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.03.
12. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №5. – С. 11-13.

REFERENCES

- Rozov V., Grinchenko V. Simulation and analysis of power frequency electromagnetic field in buildings closed to overhead lines. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, pp. 500-503. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100538.
- 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/vsn2017.07.064.
- Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Shydlovskiy A.K., Rozov V.Yu. The system of automatic compensation of external magnetic fields of energy-objects. *Technical electrodynamic*, 1996, no.1, pp. 3-9. (Rus).
- Rozov V.Y., Assyirov D.A. Method of external magnetic field active shielding of technical objects. *Technical electrodynamic. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2006, chapter 3, pp. 13-16. (Rus).
- 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 electrodynamic*, 2016, no.4, pp. 8-10. (Rus).
- Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 16-20. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.03.
- Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Technical electrodynamic*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

Поступила (received) 15.12.2017

Кузнецов Борис Иванович¹, д.т.н., проф.,
Никитина Татьяна Борисовна², д.т.н., проф.,
Бовдуй Игорь Валентинович¹, к.т.н., н.с.,
Волошко Александр Валерьевич¹, 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: tatjana55555@gmail.com

B.I. Kuznetsov¹, T.B. Nikitina², I.V. Bovdyj¹, A.V. Voloshko¹, 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.

Development and investigation of layout of active screening system of the magnetic field generated by group of overhead transmission lines.

Purpose. Development and field experimental research of layout of the single-circuit active screening system of the magnetic field generated by group of high voltage transmission lines in residential area is given. **Methodology.** Mathematical model of magnetic field, generated by group of high voltage transmission lines in residential area, based of the experimental values of magnetic field flux density in given points on the basis of optimization problem solving is improved. The objective of the synthesis of the single circuit 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 magnetic flux density at the points of the protected space. Synthesis of the full-scale model of active screening 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 the Maxwell equations solutions in the quasi-stationary approximation. The problem is solved by a stochastic multiswarm multi-agent particles optimization. **Results.** The single-circuit active screening system synthesis results for reduction of a magnetic field generated by group of high voltage transmission lines in residential area is given. Field experimental researches of the single-circuit active screening system of the magnetic field generated by group of high voltage transmission lines in residential area with various control algorithms is given. **Originality.** For the first time out the development and field experimental studies of the single-circuit active screening system of the magnetic field generated by group of high voltage transmission lines in residential area are carried out. **Practical value.** Practical recommendations on reasonable choice of the spatial arrangement of compensating cables of single-circuit active screening systems of the magnetic field generated by group of high voltage transmission lines is given. Results of field experimental investigations of the single-circuit active screening system of the magnetic field generated by group of high voltage transmission lines in residential area are given. References 12, figures 5.

Key words: overhead transmission lines, power frequency technogenic magnetic field, layout of single-circuit active screening system, field experimental investigations.