

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ С РАЗЛИЧНЫМИ АЛГОРИТМАМИ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОДНОЙ ОБМОТКИ**

*Мета. Розробка методики і проведення експериментальних досліджень макета системи активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти з різними алгоритмами управління за допомогою однієї обмотки магнітного виконавчого органу. Методика. В ході математичного моделювання визначаються геометричні розміри обмотки магнітного виконавчого органу виходячи з розмірів області, в якій здійснюється захист, а конфігурація обмотки магнітного виконавчого органу визначається виходячи з необхідної рівномірності розподілу магнітного поля. Результати. Проведено експериментальні дослідження розімкнутих, замкнутих і комбінованих систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти з однією обмоткою магнітного виконавчого органу. Наукова новизна. Вперше експериментально підтверджена можливість зменшення рівня індукції техногенного магнітного поля промислової частоти в заданій зоні в 3-5 раз з однією обмоткою магнітного виконавчого органу. Показана можливість зменшення рівня індукції магнітного поля в обмеженій зоні розглянутого простору в 15-20 раз. Практична значимість. На підставі проведених розрахунків був виготовлений макет системи активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти з різними алгоритмами управління за допомогою однієї обмотки магнітного виконавчого органу. Бібл. 12, рис. 10.*

*Ключові слова:* техногенне магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, одна обмотка, алгоритм управління, експериментальні дослідження.

*Цель. Разработка методики и проведение экспериментальных исследований макета системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. Методика. В ходе математического моделирования определяются геометрические размеры обмотки магнитного исполнительного органа исходя из размеров защищаемой области, а конфигурация обмотки магнитного исполнительного органа определяется исходя из требуемой равномерности распределения магнитного поля в защищаемой области. Результаты. Проведены экспериментальные исследования разомкнутых, замкнутых и комбинированных систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с одной обмоткой магнитного исполнительного органа. Научная новизна. Впервые экспериментально подтверждена возможность уменьшения уровня индукции техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданной зоне в 3-5 раз с одной обмоткой магнитного исполнительного органа. Показана возможность уменьшения уровня индукции магнитного поля в ограниченной зоне рассматриваемого пространства в 15-20 раз. Практическая значимость. На основании проведенных расчетов был изготовлен макет системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. Библ. 12, рис. 10.*

*Ключевые слова:* техногенное магнитное поле промышленной частоты, система активного экранирования, одна обмотка, алгоритм управления, экспериментальные исследования.

**Введение.** Магнитное поле техногенного происхождения является одним из экологических факторов, негативно влияющих на биологические объекты, и приводит к раковым заболеваниям. В связи с этим во всем мире проводятся интенсивные исследования и комплекс мероприятий по поддержанию параметров внутреннего магнитного поля на уровне магнитного поля Земли для выполнения экологических норм внутри рабочих помещений энергонасыщенных объектов, а также для создания комфортных условий жизни и работы.

**Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме.** Для уменьшения уровня техногенного магнитного поля разрабатываются системы пассивного активного и интегрированного экранирования [1-9]. Существующие системы активного экранирования техногенного магнитного поля, как правило, являются разомкнутыми. В работах [10-11] рассмотрены вопросы построения замкнутых систем компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей. Однако в этих работах не проведены

экспериментальные исследования эффективности систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты.

В мировой практике [1-4] наиболее широкое распространение получили системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. Потому рассмотрим экспериментальные исследования эффективности макета такой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа с регулируемым током, установленной в зоне, где необходимо поддерживать параметры внутреннего магнитного поля в заданных пределах.

**Целью данной работы** является разработка методики экспериментальных исследований макета системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. **Задачей работы** является прове-

дение экспериментальных исследований макета системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа и оценка эффективности системы активного экранирования магнитного поля.

**Физическая модель и результаты экспериментальных исследований.** Для проведения экспериментальных исследований систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты изготовлены физические макеты трехфазного токопровода для макетирования техногенного магнитного поля и самой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты.

Внешний вид макета обмотки магнитного исполнительного органа и трехфазного токопровода показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид макета обмотки магнитного исполнительного органа и трехфазного токопровода

Наиболее простым магнитным исполнительным органом систем активного экранирования техногенного магнитного поля является одна обмотка, определенным образом расположенная относительно пространства, в котором необходимо уменьшить уровень техногенного магнитного поля промышленной частоты. Наиболее эффективно располагать эту обмотку таким образом, чтобы ее плоскость была ортогональна направлению вектора индукции техногенного магнитного поля, которое необходимо экранировать.

Геометрические размеры обмотки магнитного исполнительного органа определяют размеры защищаемой области [12], а конфигурация обмотки магнитного исполнительного органа определяет требуемую равномерность распределения магнитного поля в защищаемой области. В конструкции рамки предусмотрены держатели для крепления контрольно-измерительных приборов фирмы Lutron и трехкомпонентного измерительного индукционного преобразователя Д4/3-2. Контрольно-измерительные приборы фирмы Lutron моделей EMF-827 и EMF-828 используются для оценочного измерения величины индукции магнитного поля частотой 50 Гц в внутри заданной области пространства. Трехкомпонентный индукционный преобразователями Д4/3-2 используется для измерения величины индукции магнитного поля частотой 50 Гц в месте установки датчика поля и используется для формирования сигналов управления системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований макета такой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа и экспериментально оценим эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля при различных алгоритмах управления.

Наиболее простой системой активного экранирования техногенного магнитного поля по алгоритму управления является разомкнутая система управления, схема которой показана на рис. 2. В этой системе управления (СУ) используется датчик тока токопровода (ДТ), с помощью которого измеряется ток одного токопровода и при предположении о симметрии фазных токов могут быть восстановлены токи других токопроводов. Данные токопроводы являются источниками техногенного магнитного поля, по которому и может быть построена разомкнутая система компенсации этого техногенного магнитного поля – система активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданном пространстве.

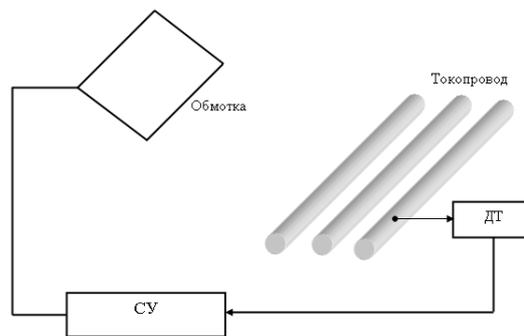


Рис. 2. Схема разомкнутой системы активного экранирования магнитного поля по датчику тока токопровода

Настойка усилителя и фазовращателя разомкнутой системы компенсации выполнена таким образом, что в центре обмотки достигается минимальное значение индукции магнитного поля, оставшегося после компенсации внешнего техногенного магнитного поля.

На рис. 3 показаны поверхности распределения индукции исходного магнитного поля в плоскости рамки и индукции магнитного поля с включенной системой управления обмоткой по датчику тока токопровода.

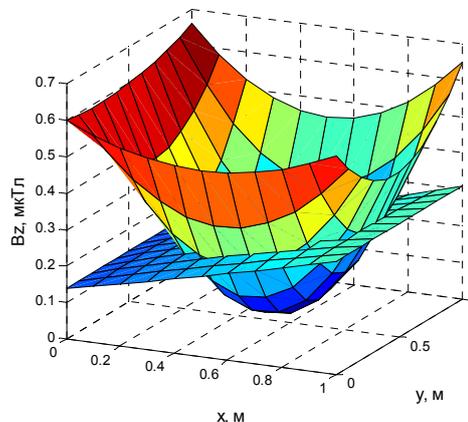


Рис. 3. Поверхности распределения индукции исходного техногенного магнитного поля и магнитного поля с включенной разомкнутой системой активного экранирования

В рассматриваемой разомкнутой системе в центре рамки обеспечивается уменьшение напряженности магнитного поля в 12 раз. Как видно из этого рисунка, система эффективно компенсирует магнитное поле только в центральной области рамки, на которую она настроена, однако по краям рамки система увеличивает уровень индукции магнитного поля почти в 6 раз за счет перекомпенсации.

Заданное пространство, в котором необходимо экранировать техногенное магнитное поле промышленной частоты с помощью системы активного экранирования, может быть образом расположено на различном расстоянии и различно ориентировано относительно токопроводов, являющихся источниками техногенного магнитного поля промышленной частоты. В рассмотренной системе обмотка магнитного исполнительного органа расположена на расстоянии – 3 м от токопровода. Проведем теперь экспериментальные исследования системы для случая, когда обмотка магнитного исполнительного органа расположена ближе к токопроводу – на расстоянии 1,2 м. По аналогии с ранее рассмотренной системой, выполним настройку усилителя и фазовращателя разомкнутой системы активного экранирования техногенного магнитного поля в заданном пространстве таким образом, чтобы минимальное значение индукции магнитного поля, оставшейся после активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля, в достигало в центральной части обмотки магнитного исполнительного органа.

На рис. 4 показаны поверхности распределения индукции исходного магнитного поля в плоскости рамки и индукции магнитного поля с рассматриваемой включенной системой управления.

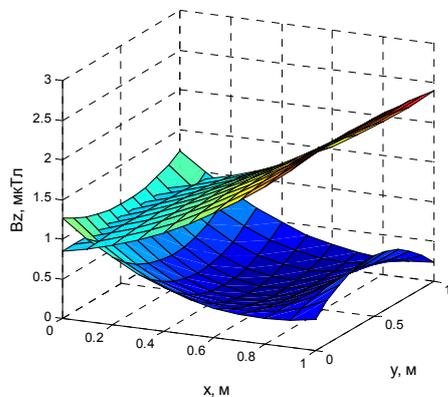


Рис. 4. Поверхности распределения индукции исходного техногенного магнитного поля и магнитного поля с включенной разомкнутой системой активного экранирования

Как видно из рис. 4, напряженность магнитного поля, оставшаяся после активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля, уменьшилась примерно в 20 раз в центральной части обмотки, на которую и настраивалась система активного экранирования техногенного магнитного поля в заданном пространстве. Система управления эффективно экранирует уровень магнитного поля в центральной части обмотки и в области, расположенной ближе к токопроводу, однако в области пространства, удаленной от токопровода, система не значительно увеличивает уровень индукции исходного магнитного поля за счет

перекомпенсации. Такое распределение поля системы активного экранирования обусловлено ее настройкой на минимальное значение уровня индукции в центральной части рассматриваемой области, а само явление перекомпенсации, а в ряде случаев и весьма существенное, известно из многих работ [7].

Для построения замкнутой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты необходимо иметь датчик, измеряющий индукцию магнитного поля непосредственно в рассматриваемой области пространства, где необходимо экранировать внешнее техногенное магнитное поле. Этот датчик магнитного поля может быть установлен в различных точках рассматриваемой области пространства, где необходимо экранировать внешнее техногенное магнитное поле. Вначале рассмотрим замкнутую систему по датчику магнитного поля, который расположен в центре обмотки. Схема такой системы показана на рис. 5.

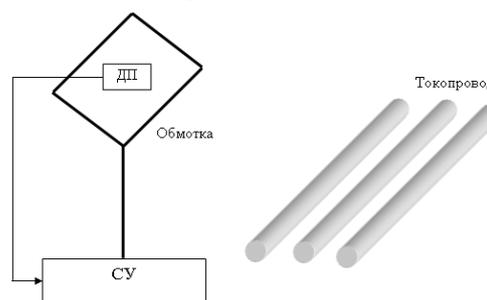


Рис. 5. Схема замкнутой системы по датчику поля, расположенному в центре обмотки

На рис. 6 показаны поверхности распределения магнитного поля в плоскости рамки в ее центральной части разомкнутой и замкнутой системы управления. Высокая эффективность компенсации в 5 раз уровня магнитного поля замкнутой системы проявляется только в зоне расположения датчика поля и по правому краю в 3 раза, а по левому краю рамки замкнутая система не только не компенсирует, а даже усиливает уровень магнитного поля.

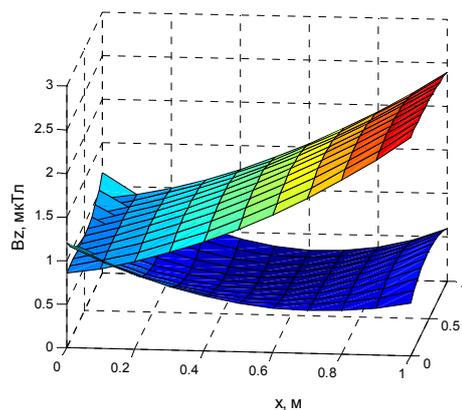


Рис. 6. Поверхности распределения индукции исходного техногенного магнитного поля и индукции магнитного поля с замкнутой системой активного экранирования по датчику поля, расположенному в центре обмотки

Рассмотрим теперь замкнутой системы, когда датчик магнитного поля расположен не в центре обмотки, а в некоторой точке рассматриваемого

пространства, удаленной от обмотки магнитного исполнительного органа системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданном пространстве. Схема такой системы показана на рис. 7.

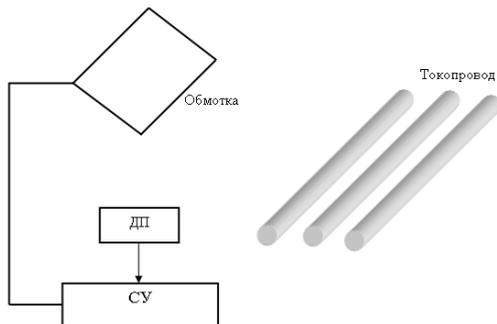


Рис. 7. Схема замкнутой системы компенсации магнитного поля по датчику, расположенному в стороне от обмотки

На рис. 8. показаны поверхности распределения в плоскости установки датчика поля индукции исходного магнитного поля и индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования поля по датчику, расположенному в стороне от обмотки.

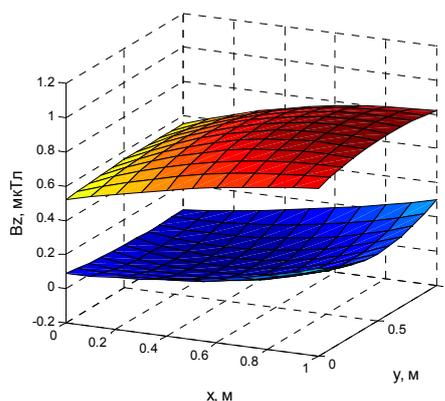


Рис. 8. Поверхности распределения индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования в плоскости установки датчика поля

Эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля в плоскости установки датчика поля составляет около 5 во всей области.

Рассмотри теперь замкнутую систему активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты по датчику поля, в качестве которого используется измерительная обмотка, намотанная на исполнительную обмотку. Схема такой системы показана на рис. 9.

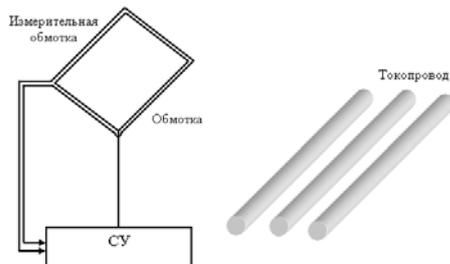


Рис. 9. Схема замкнутой системы активного экранирования с датчиком поля в виде измерительной обмотки

На рис. 10. показаны поверхности распределения индукции магнитного поля в центре рамки исходного техногенного магнитного поля и индукции магнитного поля, оставшегося после включения такой замкнутой системы. Эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля в плоскости рамки составляет 1,6.

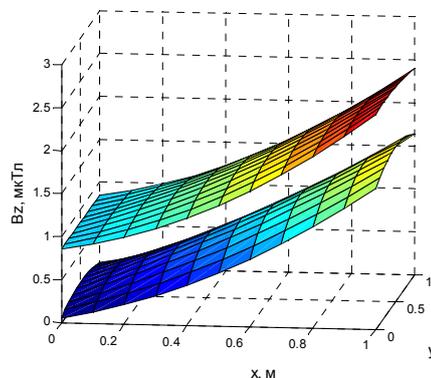


Рис. 10. Поверхности распределения индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования в плоскости установки датчика поля

### Выводы.

1. Проведены экспериментальные исследования разомкнутых, замкнутых и комбинированных систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с одной обмоткой магнитного исполнительного органа.

2. Экспериментально подтверждена возможность уменьшения уровня индукции техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданной зоне в 3-5 раз с одной обмоткой магнитного исполнительного органа. Показана возможность уменьшения уровня индукции магнитного поля в ограниченной зоне рассматриваемого пространства в 15-20 раз.

3. Для дальнейшего повышения эффективности систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты необходимо синтезировать дополнительные обмотки магнитного исполнительного органа системы активного экранирования, с помощью которых потенциально можно достигнуть заданного уровня экранирования магнитного поля с помощью системы активного экранирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
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). – 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.
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.
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.
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.
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 // IEEE Transactions on Fundamentals and Materials. – 2005. – Vol. 125. – Issue 2. – pp. 99-106.
10. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 13-16.
11. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Технічна електродинаміка. – 2008. – №4. – С. 97-100.
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

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

10. Rozov V.Yu., Assyirov D.A. Method of external magnetic field active shielding of technical objects. *Tekhnichna elektrody-namika – Technical electrody-namics*, 2006, no.3, pp. 13-16. (Rus).
11. Rozov V.Yu., Assyirov D.A., Reyskiy S.Yu. Technical objects magnetic-field closed loop compensation systems with different feed-backs forming. *Tekhnichna elektrody-namika – Technical electrody-namics*, 2008, no.4, pp. 97-100. (Rus).
12. Rozov V.Yu., Reyskiy S.Yu., Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Tekhnichna elektrody-namika – Technical electrody-namics*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

Поступила (received) 20.11.2014

Кузнецов Борис Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Никитина Татьяна Борисовна<sup>2</sup>, д.т.н., проф.,  
 Бовдуй Игорь Валентинович<sup>1</sup>, к.т.н., н.с.,  
 Волошко Александр Валерьевич<sup>1</sup>, к.т.н., н.с.,  
 Виниченко Елена Владимировна<sup>1</sup>, м.н.с.,  
 Котляр Денис Александрович<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: tatjana5555@gmail.com

B.I. Kuznetsov<sup>1</sup>, T.B. Nikitina<sup>2</sup>, I.V. Bovdij<sup>1</sup>, A.V. Voloshko<sup>1</sup>, E.V. Vinichenko<sup>1</sup>, D.A. Kotliarov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

#### Experimental research of the power frequency technogenic magnetic field active screening in system with different control algorithms and with a single coil.

**Purpose.** Development of methodology and experimental studies of the layout of the active screening of technogenic power frequency magnetic fields with different control algorithms with a single coil magnetic executive body. **Methodology.** In the course of mathematical modeling to determine geometrical size of the magnetic coil executive body based on the size of the protected area, and the configuration of the coil magnetic executive body is determined based on the required uniformity of the magnetic field distribution in the protected area. **Results.** Experimental studies of open, closed and combined systems of active screening of technogenic power frequency magnetic fields with a single coil magnetic executive body. **Originality.** For the first time experimentally confirmed the possibility of reducing the level of induction of man-made power frequency magnetic fields in a given area 3-5 times with a single coil magnetic executive body.. The possibility of reducing the level of the magnetic field in a limited area of the space by 15-20 times **Practical value.** On the basis of the calculations the layout of active screening of technogenic power frequency magnetic fields with different control algorithms with a single coil magnetic executive body has been made. References 12, figures 10.

**Key words:** power frequency technogenic magnetic field, active screening in system, single coil, control algorithms, experimental investigations.