

УДК 538:69:331.45

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ РОЗПОДІЛІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН БЕЗПЕЧНОГО ПЕРЕБУВАННЯ ПЕРСОНАЛУ****Л. О. Левченко**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: larlevch@ukr.net**С. В. Сукач**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Первомайська, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: sergvs69@rambler.ru**О. В. Коновалова**Інститут екологічної безпеки Національного авіаційного університету
просп. Космонавта Комарова, 1, 03680, м. Київ, Україна.

Потужне електротехнічне обладнання є джерелом магнітних полів великих потужностей, тому навколо електричних машин спостерігається значне перевищення гранично допустимих рівнів магнітних полів. Моделювання просторового розподілу магнітних полів електротехнічного обладнання дозволяє спрогнозувати електромагнітне навантаження на виробниче середовище і довкілля, а також визначити зони мінімальної напруженості магнітного поля для безпечного перебування експлуатаційників. Розглянуто найбільш поширені електричні машини зі структурою магнітного поля дипольно-квадрупольного типу. Розрахунки рівнів навколо такого обладнання здійснені з урахуванням суттєвих гармонік поля та їх змін залежно від відстані. Результати досліджень свідчать, що існує лінія нульового магнітного поля, якій відповідає просторова зона з мінімальними значеннями магнітного поля. Ці значення є прийнятними або нижчими за гранично допустимі рівні.

Ключові слова: моделювання, електротехнічне обладнання, електромагнітне навантаження, напруженість магнітного поля, просторова зона перебування персоналу.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН БЕЗОПАСНОГО ПРЕБЫВАНИЯ ПЕРСОНАЛА****Л. А. Левченко**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: larlevch@ukr.net**С. В. Сукач**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: sergvs69@rambler.ru**Е. В. Коновалова**Институт экологической безопасности Национального авиационного университета
просп. Космонавта Комарова, 1, 03680, г. Киев, Украина.

Мощное электротехническое оборудование является источником магнитных полей больших мощностей, поэтому вокруг электрических машин наблюдается значительное превышение предельно допустимых уровней магнитных полей. Моделирование пространственного распределения магнитных полей электротехнического оборудования позволяет прогнозировать электромагнитную нагрузку на производственную среду и окружающую среду, а также определить зоны минимальной напряженности магнитного поля для безопасного пребывания эксплуатационников. Рассмотрены наиболее распространенные электрические машины со структурой магнитного поля дипольно-квадрупольного типа. Расчеты уровней вокруг такого оборудования осуществляются с учетом существенных гармоник поля и их изменений в зависимости от расстояния. Результаты исследований свидетельствуют, что существует линия нулевого магнитного поля, которой соответствует пространственная зона с минимальными значениями магнитного поля. Эти значения являются приемлемыми или ниже предельно допустимых уровней.

Ключевые слова: моделирование, электротехническое оборудование, электромагнитная нагрузка, напряженность магнитного поля, пространственная зона пребывания персонала.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Потужне електротехнічне обладнання, наприклад, турбогенератори електростанцій, потужні електродвигуни, є джерелами магнітних полів великих напруженостей. Просторові розподіли цих полів є досить складними, тому експериментальне визначення їх структури та кількісних значень є трудомістким та економічно недоцільним. Найбільш раціональним є моделювання поширення полів навколо такого обладнання, що дозволяє визначити зони мінімальної напруженості магнітного поля, безпечної для експлуатаційників.

Мета роботи – моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечного перебування персоналу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Моделювання структури та амплітудних значень магнітних полів електротехнічного обладнання широко використовується при його розробленні. При цьому головними задачами є підвищення коефіцієнтів корисної дії, експлуатаційного ресурсу тощо [1–3], що обумовлює моделювання полів у внутрішніх зонах обладнання.

Задачі, пов'язані з моделюванням сумісності електротехнічного обладнання, стосуються, в

основному, енергозощадження [4]. В останні роки виконано низку досліджень стосовно просторових розподілів зовнішніх магнітних полів енергетичного обладнання. Втім більшість з них розглядають зони тимчасового перебування працівників: струмопроводи електростанцій [5], відкриті розподільчі пристрої [6], для яких виконання робіт регламентується спеціальними нормативами і не є типовим.

У роботі [7] розглянуто зовнішні магнітні поля електричних машин і вперше визначено наявність точок нульового поля, але не надано кількісних характеристик щодо рівнів полів за визначених потужностей обладнання. В той же час експериментальні дослідження свідчать, що поблизу електричних машин спостерігається значне перевищення гранично допустимих рівнів магнітних полів [8, 9]. Попередня робота [10] дозволила отримати прийнятний математичний апарат і розробити якісні моделі, які є основою для отримання просторових розподілів магнітних полів дипольного, дипольно-квадрупольного типів.

Експериментальні дослідження свідчать, що електричні машини змінного струму промислової частоти 50 Гц (електродвигуни, генератори) є джерелами магнітних полів гігієнічно значущих рівнів. Так, промислові електродвигуни серії АД генерують магнітні поля напруженостями від 15 до 30 А/м. Електричний привод побутового обладнання (холодильники, пральні машини) генерує магнітні поля індукцією 0,5–1,0 мкТл.

Просторові розподіли цих полів різноманітні залежно від конструкції двигуна (генератора). Залежно від кількості полюсів електричної машини, генеровані нею магнітні поля можуть бути дипольними, квадрупольними тощо. Найбільш поширеними є чотириполюсні електричні машини зі структурою магнітного поля дипольно-квадрупольного типу. Як показано у [11] максимальні напруженості дипольних та квадрупольних полів визначаються зі співвідношень:

$$H_1 = \frac{2m_1}{4\pi R^3}, \quad H_2 = \frac{3m_2}{4\pi R^4},$$

де m_1, m_2 – магнітні моменти, R – відстань до точки визначення напруженості магнітного поля.

Втім, визначення магнітних моментів є окремою задачею, що не завжди зручно у практичній роботі.

Розрахунки щодо фактичних рівнів магнітних полів навколо електричних машин доцільно здійснювати з урахуванням суттєвих гармонік поля та їх змін з відстанню. Найбільш прийнятним є використання рівняння Гауса для скалярного потенціалу.

У сферичних координатах R, θ, φ функція розподілу магнітного поля джерела має вигляд:

$$U = R_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_0}{R}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\varphi + b_{nm} \sin m\varphi) * P_n^m \cos \theta,$$

де R_0 – радіус сфери визначення потенціалу; a_{nm}, b_{nm} – сталі коефіцієнти; $P_n^m \cos \theta$ – поліном Лежандра.

При цьому $R \geq R_0$.

Коефіцієнти a, b є амплітудами сферичних гармонік напруженості магнітного поля на сфері R_0 .

Напруженість (індукція) магнітного поля визначається з наведеного рівняння, виходячи з фундаментальних співвідношень:

$$H = \text{grad}U; \quad B = \mu_0 H;$$

$$H_r = \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \left(\frac{R_0}{R}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\varphi + b_{nm} \sin m\varphi) * \frac{P_n^m * \cos \theta}{\sin \theta};$$

$$H_\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_0}{R}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \sin m\varphi - b_{nm} \cos m\varphi) * \frac{P_n^m * \cos \theta}{\sin \theta};$$

$$H_\theta = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{R_0}{R}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\varphi + b_{nm} \sin m\varphi) * \frac{1}{\sin \theta} [(n-m+1)P_{n+1}^m \cos \theta - (n+1)\cos \theta * P_n^m * \cos \theta].$$

Доцільно розглянути перші сферичні гармоніки, яким відповідає найменше зниження рівня магнітного поля з відстанню. Це дипольна гармоніка ($n = 1$) та квадрупольна гармоніка ($n = 2$).

Радіальна компонента магнітного поля визначається з наведених співвідношень стандартною процедурою з використанням поліномів Лежандра у звичайній формі.

Для $n = 1$:

$$H_r^{(n=1)} = 2 \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 (a_{10} \cos \theta + a_{11} \cos \varphi \sin \theta + b_{11} \sin \varphi \sin \theta).$$

Для $n = 2$:

$$H_r^{(n=2)} = \frac{3}{4\pi} \left(\frac{R_0}{R}\right)^4 \left(\frac{a_{20}}{2} (3\cos^2 \theta - 1) + 3(a_{21} \cos \varphi + b_{21} \sin \varphi) \sin 2\theta + 12(a_{22} \cos 2\varphi + b_{22} \sin 2\varphi) \sin^2 \theta \right).$$

Чотириполюсна електрична машина, наприклад турбогенератор, є джерелом магнітного поля дипольно-квадрупольного типу [8], тобто джерело, яке має дипольну та квадрупольну сферичні гармоніки поля. Магнітне поле навколо такого джерела характеризується сумою гармонік $H_r^{(n=1)}$ та $H_r^{(n=2)}$:

$$H = \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 a_{11} \cos \varphi \sin \theta + \left(\frac{R_0}{R}\right)^4 a_{22} \cos 2\varphi \sin^2 \theta.$$

Розглядаючи зміну напруженості поля за $\varphi=0$ та $\varphi=\pi$, приймаючи $R_0=1$, отримуємо співвідношення:

$$H_1 = \frac{a_{22}}{R^4} + \frac{a_{11}}{R^3}, \quad H_2 = \frac{a_{22}}{R^4} - \frac{a_{11}}{R^3}.$$

Отриманий результат свідчить, що за умови $\varphi=\pi$ результатом різної швидкості зниження напруженості дипольної та квадрупольної складових

магнітного поля з відстанню існує точка, де $H=0$. Моделювання просторового розподілу магнітного поля з використанням пакету Matlab за $\varphi=\pi$, $R=2$ наведено на рис. 1.

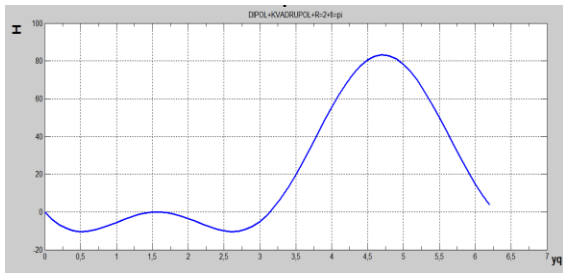


Рисунок 1 – Зміна напруженості магнітного поля поблизу чотирьопольової електричної машини (значення 3,14 відповідає π ; 6,28 відповідно 2π)

За наявності такої точки слід очікувати, що існує сектор або тілесний кут, у межах якого рівень магнітного поля буде прийнятним або нижчим за гранично допустимий рівень, що умовно зображено на рис. 2.

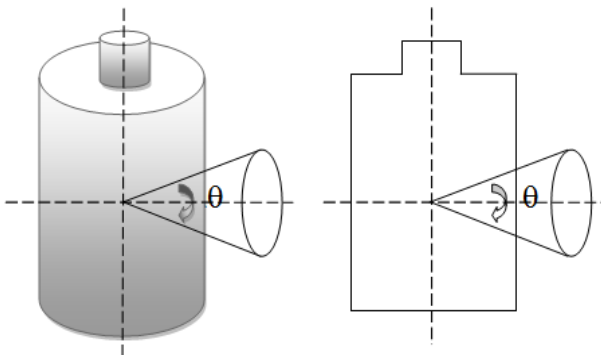


Рисунок 2 – Зона мінімальних значень магнітного поля навколо електричної машини

Отриманий результат дозволяє дійти висновку, що для джерел магнітного поля дипольно-октупольного типу (наприклад, електричні машини постійного струму) існує лінія нульового магнітного поля і просторова зона з його мінімальними значеннями.

Утім, як видно з рис. 1, існують зони значного зростання рівнів магнітних полів. Зниження їх рівнів можливе за рахунок встановлення електромагнітних екранів. Норматив [9] рекомендує матеріали для їх виготовлення: алюміній та його сплави, мідь та її сплави, електротехнічні сталі та пермалой. Відомо, що кольорі та їх сплави є ефективними для екранування височастотних електромагнітних випромінювань. Пермалой вважаються дуже ефективними захисними матеріалами, але мають суттєві недоліки. Головним з них є практично двадцятикратне зниження магнітної проникності (яка прямо пропорційна екранувальним властивостям) за незначної (10 %) деформації. Враховуючи, що екран необхідно виготовляти безпосередньо у виробничих умовах,

уникнути деформацій практично неможливе. Крім того, пермалой мають досить велику вартість.

Найбільш прийнятними матеріалами для екранування низькочастотних магнітних полів у виробничих умовах є електротехнічні сталі марок 1211, 1312, 1412 [12]. Необхідну товщину екрана можна розрахувати

$$\tau = \left[\tau_1 - 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{1 - \rho^2} \right) \right] \cdot d,$$

де τ – погонне ослаблення, дБ/мм; τ_1 – ослаблення електромагнітної хвилі, дБ; ρ – коефіцієнт відбиття від зразка при відповідній частоті; d – товщина зразка, мм.

Випробування екрануючих властивостей електротехнічних сталей марок 1211, 1312, 1412 (питомі втрати 13,4–3,9 Вт/кг на частоті 50 Гц, магнітна індукція 1,53–1,46 Тл за напруженості магнітного поля 2500 А/м) наведено на рис. 3.

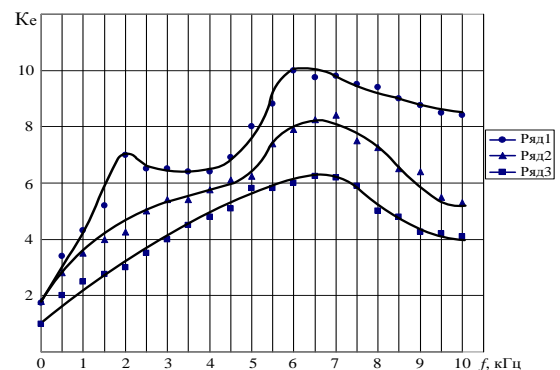


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта екранування магнітного поля електротехнічною сталлю від частоти екранованого поля (товщина листа – 0,5 мм);
1, 2, 3 – сталі типів 1211, 1312, 1412

Як видно з отриманих даних, коефіцієнти екранування різними сталлями залежать як від їх хімічного складу, так і від частоти екранованого поля. При цьому остання залежність досить складна і не може бути описана відомими аналітичними функціями. Таким чином для попереднього з'ясування очікуваного зниження рівня магнітного поля необхідна інформація про коефіцієнти екранування визначеної частоти (або пакету частот). Це дозволить обрати сталь з прийнятними властивостями у даному частотному діапазоні.

Але при практичному впровадженні екранування може виникнути ситуація, коли електромагнітний екран не знижує, а підвищує напруженість магнітного поля. На рис. 4 наведено рівні магнітного поля електричного пристрою перед екраном та за ним у фіксованій точці.

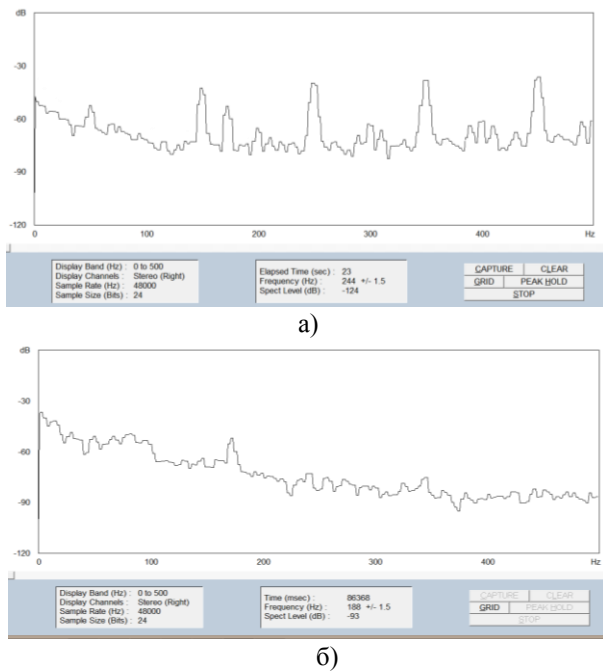


Рисунок 4 – Зміна амплітудних значень магнітного поля електричного пристрою: а) спектр магнітного поля перед екраном; б) спектр магнітного поля за екраном

Очевидно, що причиною підвищення напруженості магнітного поля на частотах до 200 Гц є намагнічування екрана, про що, зокрема, свідчить деякий зсув відповідних амплітудних піків за частотою. Отриманий результат свідчить, що при впровадженні електромагнітного захисту, крім властивостей захисного матеріалу слід враховувати геометричні фактори – відстані від технічного засобу до екрана та від екрана до зони перебування людей. Це є доцільним з використанням раніше розробленого пристрою [13] і методики.

Таким чином, виконану роботу не можна вважати повністю завершеною. Становить також інтерес отримання моделей поширення магнітних полів навколо стандартних джерел їх генерації як у виробничих, так й у побутових умовах: лінійних випромінювачів, джерел постійного магнітного поля тощо. Це уявляється перспективним напрямом подальших досліджень.

ВИСНОВКИ.

1. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин є ефективним методом визначення та прогнозування електромагнітного навантаження на виробниче середовище та довкілля.

2. Найбільш прийнятним математичним апаратом для отримання достовірних вихідних даних щодо просторових розподілів магнітних полів є рівняння Гауса для скалярного потенціалу, яке дозволяє враховувати необхідну кількість гармонік магнітного поля.

3. Отримані результати дозволяють визначити зони безпечного перебування людей навколо

електротехнічного обладнання з різними структурами зовнішнього магнітного поля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Многомасштабное моделирование в электротехнике / А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая. – К.: Институт электродинамики НАН України, 2011. – 255 с.

2. Current and voltage excitation for the Eddy Current model / R. Hiptmair, O. Sterz // Intern. J. Numer. Modelling. – 2005. – Vol. 18. – № 1. – PP. 1–21.

3. Моделирование нестационарного электромагнитного поля методом векторных конечных элементов с использованием декомпозиции области / М.В. Пузанов, Э.П. Шурина // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – № 6. – С. 104–117.

4. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В.Г. Кузнецов, Э.Г. Куринный, А.П. Лютый. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.

5. Глива В.А. Критерії вибору захисних матеріалів для екранування електромагнітних полів // Проблеми охорони праці в Україні. – 2011. – Вип. 21. – С. 68–76.

6. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем / В.Н. Дробыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. – Самара: ООО «Содружество», 2009. – 198 с.

7. Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудования / С.А. Волохов, П.Н. Добродеев // Электротехника. – 2006. – № 4. – С. 28–33.

8. Дослідження рівнів магнітних полів енергетичних об'єктів / В.Г. Здановський, В.А. Глива, Х.В. Паньків // Проблеми охорони праці в Україні. – 2013. – Вип. 25. – С. 22–29.

9. ДСанПіН 3.3.6.096–2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. – К.: МОЗ України, 2003. – 16 с.

10. Загальні підходи до моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання / В.Г. Здановський, В.А. Глива, Л.О. Левченко // Проблеми охорони праці в Україні. – 2014. – Вип. 27. – С. 18–24.

11. Гетьман А.В. О нормировании уровня магнитного поля с помощью мультипольных магнитных моментов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5, т. 4. – С. 7–10.

12. Оцінка захисних властивостей магнітом'яких матеріалів / О.І. Запорожець, В.А. Глива, В.І. Клапченко та ін. // Проблеми охорони праці в Україні. – 2007. – Вип. 14. – С. 53–60.

13. Патент України 58604, МПК G01L 9/00. Пристрій контролю захисних властивостей електромагнітних екранів / Глива В.А., Левченко Л.О., Панова О.В., Азнаурян І.О., Подобед І.М. // Оубл. 11.04.2011. Бюл. № 7.

SIMULATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRIC MACHINES MAGNETIC FIELDS FOR ALLOCATION OF THE SAFE ZONE FOR STAFF

L. Levchenko

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”
prosp. Peremohy, 37, Kyiv-56, Ukraine, 03056. E-mail: larlevch@ukr.net

S. Sukach

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: sergvs69@rambler.ru

O. Konovalova

Institute of Ecological Safety of the National Aviation University
prosp. Kosmonavta Komarova, 1, 03680, Kiev, Ukraine.

Powerful electrotechnical equipment is a source of high power magnetic fields that is why around electric machines there is a significant excess of the maximum permissible levels of magnetic fields. Simulating the spatial distribution of the magnetic fields of electrical equipment allows predicting the electromagnetic load on the working environment and the environment in general, as well as identifying areas of the minimum magnetic field strength for the safe work of operating managers. In this paper we describe the most common electrical machines with the magnetic field structure of the dipole-quadrupole type. The calculations of levels around such equipment are carried out taking into account the significant field harmonics and their changes, depending on the distance. Research shows that there is a line of zero magnetic field, which corresponds to the spatial area with minimum values of the magnetic field. These values are acceptable or are below the maximum permissible levels.

Key words: simulation, electrical equipment, electromagnetic load, magnetic field strength, safe zone of the staff location.

REFERENCES

1. Podoltsev, A.D., Kucherjavaja, I.N., (2011) *Mnogomasshtabnoe modelirovanie v elektrotekhnike* [Multiscale modeling in electrical engineering], The Institute of Electrodynamics of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
2. Hiptmair, R., Sterz, O. (2005) “Current and voltage excitation for the Eddy Current model”, *Intern. J. Numer. Modelling*, vol. 18, no. 1, pp. 1–21.
3. Puzanov, M.V., Shurina E.P. (2006) “Simulation of nonstationary electromagnetic field by vector finite element method using domain decomposition”, *Computing Technologies*, vol. 11, no. 6, pp. 104–117.
4. Kuznetsov, V.G., Kurinny, E.G., Ljuty, A.P. (2005) *Elektromagnitnaja sovместimost. Nesimmetrija i nesinusoidalnost naprjazhenija* [Electromagnetic compatibility. Asymmetry and non-sinusoidal voltage], Nord-Press, Donetsk, Ukraine.
5. Glyva, V.A., (2011) “Criteria for selection of protective materials for shielding of electromagnetic fields”, *Occupational health and safety issues in Ukraine*, vol. 21, pp. 68–76.
6. Drobyshev, V.N., Maslov M.Ju., Spodobaeв, Ju.M., (2009) *Elektromagnitnaja bezopasnost elementov energeticheskikh system* [Electromagnetic safety of energy systems elements], OOO “Sodruzhestvo”, Samara, Russia.
7. Volokhov, S.A., Dobrodeev, P.N., (2006) “Patterns of distribution of an external magnetic field of electrical”, *Electrical Engineering*, vol. 4, pp. 28–33.
8. Zdanovski, V.G., Glyva, V.A., Pankiv, Kh.V. (2013) “Research of the levels magnetic fields of power objects”, *Occupational health and safety issues in Ukraine*, vol. 25, pp. 22–29.
9. DSanPin 3.3.6.096–2002. (2002) “State sanitary rules and regulations at working with sources of electromagnetic fields”, Ministry of Health of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
10. Zdanovski, V.G., Glyva, V.A., Levchenko, L.O. (2014) “General approaches to modeling the spatial distribution of the electromagnetic fields of electrical equipment”, *Occupational health and safety issues in Ukraine*, vol. 27, pp. 18–24.
11. Getman, A.V. (2011) “On the standardization of level of the magnetic field by means of a multipole magnetic moments”, *Eastern European journal of enterprise technologies*, vol. 5, pp. 7–10.
12. Zaporozhets, O.I., Glyva, V.A., Klapchenko V.I. (2007) “Evaluation of the protective properties of magnetic soft materials”, *Occupational health and safety issues in Ukraine*, vol. 14, pp. 53–60.
13. Glyva, V.A., Levchenko, L.O., Panova, O.V., Aznaurjan, I.O., Podobed, I.M., Ukraine Patent 58604, МПК G01L 9/00, “Control device protective properties of electromagnetic screens”, Published 11.04.2011, Bull. № 7.

Стаття надійшла 12.11.2014.