

УДК 538:69:331:45

<sup>1</sup>Глива Валентин Анатолійович

Доктор технічних наук, доцент, професор кафедри безпеки життєдіяльності

<sup>2</sup>Левченко Лариса Олексіївна

Кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем

<sup>1</sup>Паньків Христина Володимирівна

Аспірант кафедри безпеки життєдіяльності

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Київ<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ РОЗПОДІЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Анотація.** Розглянуто просторові розподіли магнітних полів навколо електричних машин дипольно-квадрольного типу. Отримано математичні функції змін магнітних полів у просторі та часі залежно від частотних та амплітудних характеристик цих полів. Визначено рівні цих полів з необхідною точністю за рахунок різної кількості гармонік змінного магнітного поля. З'ясовано наявність та розташування точок і поверхонь нульових напруженостей. Це надало можливість розробити рекомендації щодо місць перебування та пересування обслуговуючого персоналу біля цих машин з мінімальним впливом магнітних полів на працюючих.

**Ключові слова:** магнітне поле; електрична машина; просторовий розподіл магнітного поля; моделювання; магнітний диполь

**Аннотация.** Рассмотрены пространственные распределения магнитных полей вокруг электрических машин дипольно-квадрольного типа. Получены математические функции изменений магнитных полей в пространстве и времени в зависимости от частотных и амплитудных характеристик этих полей. Определены уровни этих полей с необходимой точностью за счет разного количества гармоник переменного магнитного поля. Выяснено наличие и расположение точек и поверхностей нулевых напряженностей. Это позволяет разработать рекомендации относительно мест пребывания и передвижения обслуживающего персонала около этих машин с минимальным влиянием магнитных полей на работающих.

**Ключевые слова:** магнитное поле; электрическая машина; пространственное распределение магнитного поля; моделирование; магнитный диполь

**Abstract.** The spatial distributions of magnetic fields around electric machines dipole-quadrupole type have been considered. Mathematical functions of magnetic fields changes in space and time depending on the frequency and amplitude characteristics of these fields have been received. The levels of these fields have been determined with the required accuracy due to various numbers of harmonics of the AC magnetic field. The presence and location of points and surfaces of zero tension have been found out. It has given the possibility to develop recommendations for accommodations and movement of attendants at these machines with minimal exposure to magnetic fields on workers. It has been found that the structure of the magnetic field slightly differ from the calculated in the real production environment. The error of these differences is in the acceptable range. The cause of these differences has been defined, it is metal maintenance grounds for electrical machines. Metal platforms reduce the level of magnetic field due to the effect of mirroring. The reduction of the magnetic field by 15% - 17% has been calculated. Significant decrease of magnetic fields levels in working areas is possible taking into account the spatial orientation of the electric machines poles. The developed software has allowed to simulate the spatial distribution of magnetic fields in production areas in the presence of many sources of alternating magnetic fields. Fulfilled work is the basis for further research on the modelling of spatial distribution of the magnetic fields of various sources types.

**Keywords:** magnetic field; electric machine; magnetic field spatial distribution; simulation; magnetic dipole

## Постановка проблеми

Електромагнітні поля електротехнічних пристроїв великих потужностей мають значні кількісні рівні, що у багатьох випадках може мати низку небажаних наслідків: негативний вплив на обслуговуючий персонал, проблеми щодо електромагнітної сумісності технічних засобів, збої у роботі комп'ютерних мереж та засобів бездротового зв'язку тощо.

Визначення фактичних рівнів цих полів у кожному окремому випадку традиційними методами вимірювань дуже витратне, потребує багато часу і можливе тільки в умовах діючого виробництва. Втім важливим є отримання (прогнозування) електромагнітного середовища під час модернізації обладнання та на стадії проектування його розміщення на виробничих площах. Отримання необхідної інформації можливе за рахунок моделювання просторових розподілів рівнів таких полів навколо окремого агрегату та за наявності визначеної кількості джерел електромагнітних полів.

Моделюванню електромагнітних полів різних джерел приділяється досить багато уваги. Більшість таких досліджень спрямовано на вдосконалення електротехнічного обладнання з метою підвищення його енергоефективності (зниження електроспоживання, теплових втрат тощо). Це обумовлює здійснення моделювання полів у середині агрегатів [1; 2]. Моделювання імовірних процесів у конденсаторних установках, трансформаторах, лініях електропередавання стосується переважно електромагнітної сумісності технічних засобів і спрямоване на пошуки можливостей заощадження електроенергії [3].

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження і моделювання зовнішніх електромагнітних полів виконуються також з метою діагностування [4], тобто присвячені розв'язанню зворотної задачі магнітостатики.

Робота [5] присвячена дослідженню розподілу електромагнітних полів у приміщеннях, втім необхідність моделювання випромінювань відеотракту персональних комп'ютерів та монітора викликає сумніви.

У дослідженні [6] розроблено математичний апарат щодо розрахунку рівнів та просторових розподілів магнітних полів навколо засобів обчислювальної техніки, покладений в основу моделювання електромагнітного середовища за наявності багатьох джерел поля [7].

Втім, практично усі засоби обчислювальної техніки та периферійні пристрої (монітори, системні

блоки, джерела безперебійного живлення) мають просторові конфігурації електричних та магнітних полів, подібних полям відповідних диполів. У той же час більшість електричних машин (турбогенератори, електродвигуни тощо) є джерелами дипольно-квадрупольного і навіть дипольно-октупольного полів [8]. Розрахунки зовнішніх полів таких джерел мають суттєві відмінності і потребують врахування принаймні кількох сферичних гармонік [9]. При цьому для отримання адекватної моделі щодо кількісних значень та просторових розподілів електромагнітних полів кількох джерел необхідно визначити межі наближень та прийнятні припущення, які дозволять отримати задовільну збіжність експериментальних та розрахункових даних.

## Мета статті

Метою роботи є розроблення адекватної моделі просторових розподілів електромагнітних полів основних типів електричних машин змінного струму та розроблення засад прогнозування електромагнітного середовища в умовах впливу кількох джерел.

## Виклад основного матеріалу

Розрахунки щодо кількісних характеристик та просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання доцільно здійснювати за визначенням магнітної складової змінного електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц. Це зумовлене тим, що відповідні електричні поля повністю екрануються металевими корпусами електричних машин.

Найбільш поширеними агрегатами, які мають велике значення для функціонування промислового комплексу України, є електричні машини турбогенераторів електростанцій. Усі вони чотириполюсні машини, тобто дипольно-квадрупольні джерела магнітного поля. Схематично структура такого поля визначена у попередній роботі [8], де надано засади розрахунку його кількісних характеристик на основі визначення поля окремого магнітного диполя. Втім, як показано у [9], точне визначення змін рівня магнітного поля з відстанню доцільне з використанням рівняння Гауса для скалярного магнітного потенціалу. У сферичних координатах  $R$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  функція розподілу магнітного поля джерела має вигляд:

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

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

При цьому  $R \geq R_0$ .

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

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

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

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

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

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

Наведені співвідношення свідчать, що напруженість магнітного поля знижується з відстанню, причому це зниження пропорційне збільшенню показника гармоніки  $n$ .

Таким чином, виходячи з поставлених задач, 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 [10].

Для  $n = 1$ :

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

Для  $n = 2$ :

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

Ці радіальні гармоніки знижуються з відстанню від джерела поля пропорційно третьому та четвертому ступеню радіусу.

Чотирипольна електрична машина, у даному випадку – 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  $H_r^{(n=2)}$ .

У загальному вигляді:

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

Таким чином, залежність напруженості поля від відстані для різних кутів сферичних координат буде суттєво відрізнятися.

Наприклад, для  $\theta = \frac{\pi}{2}$  ( $\sin \theta = 1, \cos \theta = 0$ ) у напрямку  $\varphi = 0$  дипольна та квадрупольна гармоніки додаються, а у напрямку  $\varphi = \pi$  – віднімаються.

Отриманий результат уявляється важливим з точки зору забезпечення електромагнітної безпеки персоналу, що перебуває поблизу електрогенераторів. Це пояснюється тим, що за умови  $\varphi = \pi$  існує точка, де  $H = 0$ , тобто у межах цього кута сумарні рівні полів незначні. Уточнену модель просторового розподілу магнітного поля навколо чотирипольної електричної машини наведено на рис. 1.

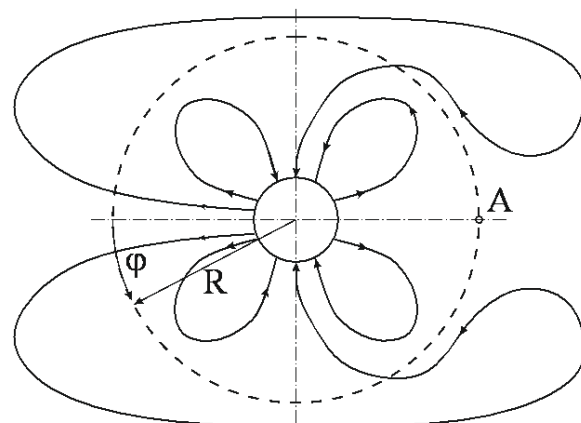


Рис. 1. Просторовий розподіл магнітного поля чотирипольної електричної машини:  
 A – точка нульового поля

Просторовий розподіл магнітного поля біля точки, де поле дорівнює нулю, наведено на рис. 2.

Діаметри турбогенераторів складають 2-3 м, тобто точки нульового поля для  $R=2R_0$  перебувають на висоті 1-1,5 м та на такій же відстані від корпусу генератора.

Виходячи з цього, перебування працюючих у цій зоні є безпечним з точки зору дії електромагнітного поля.

Крім того, у реальних виробничих умовах структура поля дещо інша. Як правило, підлога майданчика обслуговування, де розміщуються турбогенератори, – металева. У цьому випадку на форму та напруженість магнітного поля впливає ефект віддзеркалювання, кількісно оцінений у роботі [7].

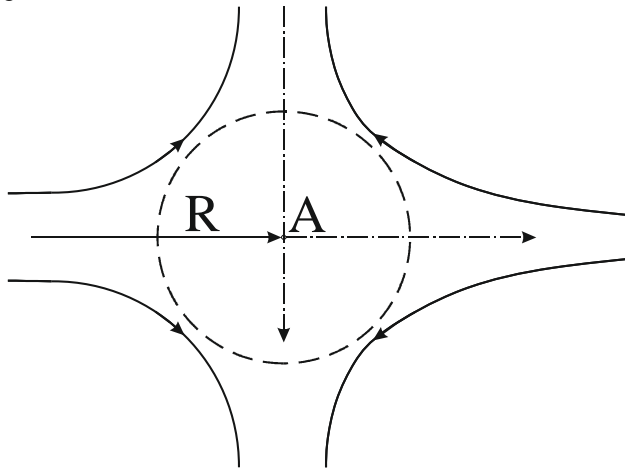


Рис. 2. Просторовий розподіл магнітного поля біля точки  $A$  ( $R = 2, \varphi = \pi$ )

Зниження напруженості магнітного поля дорівнює:

$$H(\%) = \frac{a^3 - r^3}{a^3} (100\%),$$

де  $r$  – відстань від джерела поля до точки його визначення;  $a$  – відстань від точки визначення до уявного джерела поля.

У даному випадку уявним джерелом поля є його дзеркальне відбиття відносно металевої поверхні майданчика обслуговування.

Попередні розрахунки показали, що у таких умовах можливе зниження напруженості магнітного поля до 15-17%.

Такий результат у поєднанні з іншими заходами з електромагнітної безпеки дає можливість знизити рівні магнітних полів у зонах перебування обслуговуючого персоналу до нормативних та навіть нижчих за них.

У реальних виробничих умовах в одній машинній залі (цеху) розташовано декілька потужних електроагрегатів (турбогенераторів). При цьому орієнтація одного відносно іншого різна – як по одній прямій, так і паралельно

та перпендикулярно один до одного. Це робить інтегральний розподіл магнітного поля у машинній залі досить складним. Визначення сумарної напруженості магнітного поля у кожній точці, (навіть у частотних діапазонах, що мають однакові гранично допустимі рівні) зі співвідношення, закладеного у норматив [10] викликає сумніви:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}.$$

Таке визначення сумарної напруженості поля слушне з фізичної точки зору, але на біологічний об'єкт кожне джерело впливає незалежно, що обумовлене принциповою некогерентністю цих електромагнітних полів.

За таких умов доцільне моделювання просторового розподілу магнітних полів багатьох джерел з використанням аналогічного математичного апарата, наведеного вище, та у роботі [8]. З точки зору захисту працюючих таке моделювання достатньо здійснити у площині постійного або тимчасового перебування персоналу (1,0 – 1,5 м над підлогою). Враховуючи великі обсяги обчислень, для отримання моделей було використано спеціальне програмне забезпечення, розроблене у середовищі *Turbo Delphi* з використанням системи управління базою даних *Microsoft SQL Server 5*. Воно дає змогу отримати загальну картину розподілу рівнів магнітних полів у приміщеннях і площині розташування електрообладнання незалежно від його кількісного та якісного складу. Програмне забезпечення також дозволяє автоматично враховувати не тільки розміри приміщення, а й розміри джерел магнітного поля.

Приклад такого моделювання наведено на рис. 3. Різні відтінки кольору відповідають різним напруженостям магнітного поля.

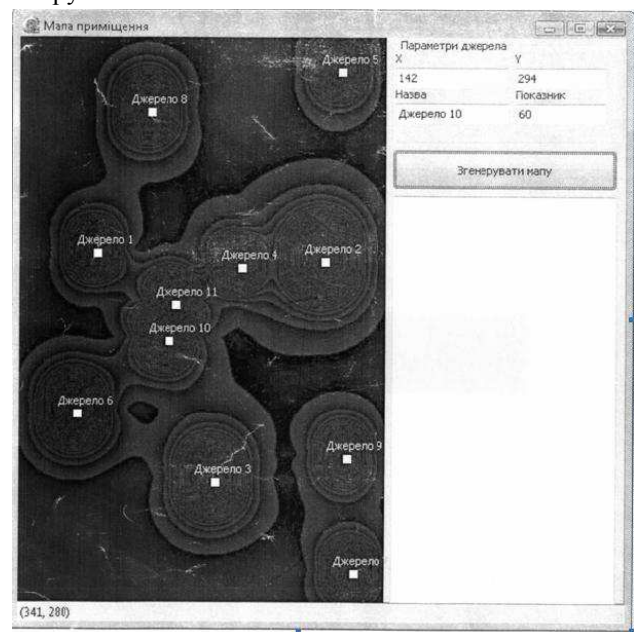


Рис. 3. Моделювання розподілу рівнів магнітного поля множинних джерел у приміщенні

Кількісні значення магнітного поля визначаються за спеціальною градувальною шкалою, на якій кожному відтинку відповідає значення напруженості магнітного поля.

Градування здійснюється за допомогою попередніх натурних вимірювань рівнів поля у кількох точках приміщення. Найбільш прийнятним за точністю є спосіб попереднього визначення випромінювальних властивостей кожного з електричних приладів, які експлуатуються у приміщенні. Поширення поля при цьому визначається з використанням математичних функцій, виходячи з характеру джерела.

У даній роботі розглядалися джерела дипольно-квадрупольного типу. Представляє інтерес моделювання поширення полів навколо інших джерел магнітного поля: від лінійних до октупольних. Це є предметом подальших досліджень.

### Висновки

1. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричного обладнання (чотириполюсних турбогенераторів) дозволяє визначити місця безпечного перебування персоналу.

2. Значне зниження рівнів магнітних полів у робочих зонах можливе з урахуванням орієнтації полюсів електричних машин. Маршрути пересування працівників слід визначити поблизу точок нульового поля з одного боку від турбогенераторів.

3. Наявність металевих майданчиків обслуговування турбогенераторів дозволяє додатково знизити рівні магнітних полів уздовж маршрутів пересування обслуговуючого персоналу.

Виконану роботу не можна вважати повністю завершеною. Кількісні характеристики розглянутих магнітних полів залежать від конкретних геометричних розмірів електричної машини, її потужності під час проведення контролю, а також електромагнітного оточення.

Має сенс також дослідити рівні високочастотних полів, генерованих колекторними вузлами турбогенераторів. Це має бути предметом подальших досліджень, що дозволять отримати інтегральні моделі формування електромагнітного середовища енергетичних об'єктів.

### Список літератури

1. Hiptmair R. *Current and voltage excitation for the Eddy Current model* / R. Hiptmair, O. Sterz // *Intern. J. Numer. Modelling*. – 2005. – Vol. 18. – № 1. – P. 1-21.
2. Пузанов М.В. *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.
3. Кузнецов В.Г. *Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения* / В.Г. Кузнецов, Э.Г. Куринный, А.П. Лютый. – Донецк. – Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
4. Примин М.А. *Математические модели, методы и алгоритмы пространственно-временного анализа магнитных полей и их применение в системах диагностики и обнаружения: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06* / М.А. Примин. – К., 2000. – 395 с.
5. Маслов М.Ю. *Исследование электромагнитных полей в помещениях для целей электромагнитной и информационной безопасности: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07* / М.Ю. Маслов. – Самара, 2003. – 240 с.
6. Глива В.А. *Засоби підвищення безпечної експлуатації сучасного комп'ютерного обладнання* / В.А. Глива, А.В. Лук'яничков, Л.О. Левченко та ін. // *Проблеми охорони праці в Україні*. – 2008. – Вип. 15. – С. 98-105.
7. Глива В.А. *Принципи моделювання просторових розподілів електромагнітних полів багатьох джерел у приміщеннях* / В.А. Глива // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. – 2005. – Вип. 18. – С. 130-135.
8. Здановський В.Г. *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. Волохов С.А. *Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудования* / С.А. Волохов, П.Н. Добродеев // *Электротехника*. – 2006. - № 4. – С. 28-33.
10. Тихонов А.Н. *Уравнения математической физики* / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1997. – 864 с.
11. Глива В.А. *Моніторинг та нормалізація фізичних факторів виробничого середовища при експлуатації автоматизованих систем: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.01* / Глива Валентин Анатолійович. – К., 2012. – 320 с.
12. ДсанПіН 3.3.6.096-2002. *Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів*. – К.: МОЗ України, 2003. – 16 с.

## References

1. Hiptmair, R. (2012). *Current and voltage excitation for the Eddy Current model* / R. Hiptmair, O. Sterz // *Intern. J. Numer. Modelling*, 18(1), 1-21.
2. Puzanov, M. V. (2005). *Simulation of nonstationary electromagnetic field*. – Т. 11 – № 6., 104-117.
3. Kuznetsov, V. G., Chicken, E. G., & Fierce, A. P. (2005). *Electromagnetic compatibility. Asymmetry and distorted voltage*. Donetsk, Ukraine : Nord-Press, 250.
4. Primin, M. A. (2000). *Mathematical Methods, Models and algorithms for spatial-temporal analysis of magnetic fields and their use in diagnostic and detection systems: dis. ... Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
5. Maslov, M. (2003). *Investigation of electromagnetic fields in the premises for the purpose of electromagnetic and information security: dis. ... Candidate's thesis*. Samara [in Russian].
6. Glyva, V. A. (2005). *Means to improve the safe operation of modern computer equipment* / V. A. Glyva, A. V. Luryanchikov, L. O. Levchenko // *Problems of safety in Ukraine*, 15, 98-105.
7. Glyva, V. A. (2005). *Principles of modeling spatial distribution of electromagnetic field sources in many areas*. *Journal of NTU "KPI". A series of "Mining"*, 18, 130-135.
8. Zdanovskyy V.G.(2013). *Study level magnetic fields of energy facilities* / V.G. Zdanovskyy, V.A. Glyva, K.V. Pankiv // *Problems of safety in Ukraine*, 25, 22-29.
9. Volohov, S. A. (2006). *Patterns of distribution of an external magnetic field of electrical* / S.A. Volohov, P.N. Dobrodeev // *Electrical Engineering*, 4, 28-33.
10. Tikhonov, A. N. & Samarsky, A. A. (1997). *Equations of mathematical physics*. Moscow, Russia: Nauka, 864.
11. Glyva, V. A. (2012). *Monitoring and normalization of physical environment factors in the operation of automated systems: dis. ... Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
12. DSanPin 3.3.6.096-2002. *State sanitary rules and regulations when dealing with sources of electromagnetic fields*. - Kyiv: Ministry of Health of Ukraine, 2003. – 16 p.

Стаття надійшла до редколегії 20.10.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.І. Запорожець, Національний авіаційний університет, Київ.