

Л. О. Левченко

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПОШИРЕНЬ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НАДНИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ МНОЖИННИХ ДЖЕРЕЛ

Анотація. У роботі показано, що в умовах ущільнення розташування електротехнічного обладнання у приміщеннях, будівлях та на територіях для забезпечення нормативних рівнів електромагнітної сумісності персоналу і населення доцільно здійснювати попереднє моделювання поширення електромагнітних полів. Враховуючи незначне екранування магнітного поля корпусами обладнання моделювання доцільно здійснювати за магнітною складовою електромагнітного поля. Визначено математичне співвідношення щодо поширення магнітного поля окремих джерел з урахуванням їх дипольної моделі. Моделювання здійснювалося для джерел дипольного та дипольно-квадрупольного типу. З використанням пакету Matlab надано тривимірні моделі джерел з поширенням дипольної, квадрупольної та дипольно-квадрупольної гармонік поля. Розроблено прикладне програмне забезпечення у середовищі C з використанням бази даних SQL-сервер і здійснено моделювання поширення магнітного поля багатьох джерел у визначеній площині. Отриманий результат свідчить, що навіть для електротехнічного обладнання, що перебуває у експлуатації, визначити наведені ізолінії напруженості магнітного поля експериментальним шляхом дуже складно. На стадіях проектування розміщення обладнання моделювання є єдиним інструментарієм прогнозування електромагнітної обстановки, яка визначає електромагнітну сумісність технічних засобів і електромагнітну безпеку персоналу і населення.

Ключові слова: моделювання; електромагнітне поле; електромагнітна сумісність; електромагнітна безпека.

Вступ

В умовах збільшення кількості і номенклатури електротехнічного обладнання, розміщеного в окремих приміщеннях та визначених територіях, підвищення його потужностей постає проблема раціоналізації або оптимізації взаємного розташування обладнання, яке забезпечить максимальні ступені електромагнітної сумісності технічних засобів та безпеки персоналу і населення.

Найбільш надійним методом визначення електромагнітної обстановки є натурні вимірювання у реальних умовах експлуатації обладнання. Але це можливо, наприклад, під час модернізації існуючого обладнання або його окремих одиниць. Навіть за наявності аналогічних пристроїв, за його великої кількості в умовах експлуатації передбачити напруженості електричних та магнітних полів в окремих зонах складно і вимагає дуже великої кількості вимірювань. Найефективнішим методом оцінювання електромагнітної обстановки на стадіях проектування розміщення обладнання та первинного монтажу є моделювання поширення полів за тих чи інших взаємних розташуваннях технічних засобів. Це надасть можливість визначити найбільш прийнятні схеми монтажу обладнання, які мінімізують його взаємний вплив та несприятливий вплив на персонал і населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість робіт з моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів мають прикладну спрямованість. Щодо електромагнітних полів наднизьких частот (промислової та її гармонік), то їх переважна кількість стосується проектування електротехнічного обладнання – підвищення його ефективності (зниження втрат) [1, 2].

Частина досліджень розглядає зовнішні поля технічних засобів. Зокрема, у [3] наведено розрахунки й результати експериментальної перевірки просторово-

го розподілу магнітного поля чотириполосної електричної машини. Показано, що такі об'єкти є джерелами дипольно-квадрупольного поля. Експериментально підтверджено прийнятну збіжність модельованих поширень електричного поля промислової частоти навколо повітряних та кабельних високовольтних ліній електропередачі [4, 5]. Розподілу полів кількох джерел присвячено поодинокі роботи [6, 7], які стосуються високочастотних джерел. Значною мірою це обумовлено їх однотипністю і однаковими законами розподілу випромінювань. У ґрунтовному дослідженні [8] показано, що більшість джерел низькочастотного магнітного поля можна розглядати як системи магнітних диполів. Врахування просторових гармонік дозволяє розрахувати напруженості полів з мінімальними похибками (обираючи кількість гармонік, що враховуються). Але у багатьох випадках для оцінювання електромагнітної обстановки на великих площах висока точність не є критичною. Спрощений розрахунковий апарат, наведений у [9], дозволяє на прийнятному рівні визначити як розподіл напруженостей електричного та магнітного поля, так і контури зон перевищення гранично допустимих рівнів.

Постановка завдання. Мета роботи – реалізація методології моделювання поширення електромагнітного поля багатьох джерел та візуалізація результатів моделювання.

Виклад основного матеріалу

Згідно чинним міжнародним та національним нормативам рівні електромагнітних полів частотами до 300 МГц визначаються за напруженостями їх електричної та магнітної складових. Одночасне визначення цих параметрів, принаймні локалізованих у просторі технічних пристроїв (електродвигунів, генераторів, трансформаторів, розподільчих пунктів тощо) недоцільне. Електрична складова повністю або частково екранується металевими корпусами або об-

шивками обладнання. В той же час екранування магнітної складової – мінімальне. Тому моделювання поширення електромагнітних полів низьких частот доцільно здійснювати за магнітними складовими. До того ж, згідно останнім дослідженням, магнітне поле техногенного походження має більш несприятливий вплив на біологічні об'єкти, ніж електричне.

Прикладне програмне забезпечення створюється на основі математичних функцій, які описують поширення магнітного поля. Для здійснення моделювання зручність дипольної моделі магнітного поля джерела полягає у тому, що можливо розглянути диполі різної орієнтації у одному джерелі та різноспрямовані диполі, які характеризують поле одного джерела. Для розроблення концептуальної моделі поширення магнітних полів багатьох джерел та інтегральної напруженості магнітного поля у будь-якій точці площі, яка розглядається, можна обрати довільні магнітні моменти диполів. У відповідності до чинних нормативів рівні електромагнітних полів як у приміщеннях, так і на територіях нормуються на висоті 1,8 м над поверхнею підлоги або землі (крім випадків, коли визначаються зони обмеження забудови за умови впливу джерел електромагнітних випромінювань таких як радіотехнічні об'єкти цивільної авіації). Тому достатньо розглянути радіальну складову магнітного поля кожного диполя

$$H_r = m \cdot \cos \theta / (2\pi \cdot R^3)$$

та кутову складову $H_\theta = m \cdot \sin \theta / (4\pi \cdot R^3)$, де m – магнітний момент диполя, R – відстань від центра диполя до точки визначення напруженості магнітного поля, θ – кут між вектором диполя на напрямком до точки визначення поля, та отримати пласку мапу, що показує напруженість магнітного поля у кожній точці визначеної площини: від одного джерела

$$H = \sqrt{H_R^2 + H_\theta^2}, \text{ та від усіх джерел:}$$

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

За цільного розташування джерел з більш складною структурою поля (наприклад, багатополосні електричні машини) похибки розрахунків необхідно знижувати. У цьому випадку у модель і програмне забезпечення потрібно закладати дещо інше співвідношення з урахуванням принаймні двох просторових гармонік (дипольної і квадрупольної). Розрахунки виконуються для трьох складових магнітного поля у сферичних координатах (H_r , H_θ , H_ϕ) [7].

Моделювання поширення гармонік з різними закономірностями їх розповсюдження у просторі здійснюється з використанням пакету Matlab. Наприклад, найбільш поширені електричні машини – чотириполосні з дипольно-квадрупольним магнітним полем. Поширення дипольної, квадрупольної та дипольно-квадрупольної гармонік наведено на рис. 1.

Для розрахунків необхідних для отримання розподілу поля у площині визначається орієнтація джерела поля з відповідними характеристиками у обраних ко-

ординатах. Для моделювання поширення магнітного поля у визначеній площині було розроблено прикладне програмне забезпечення у середовищі C, при цьому використовувалося управління базою даних SQL-сервер. Результати моделювання наведено на рис. 2.

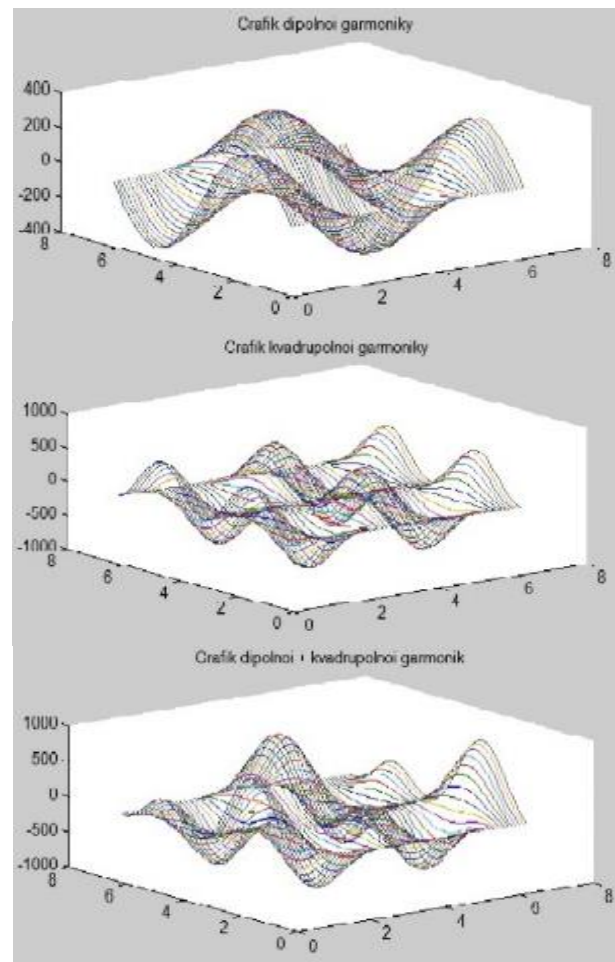


Рис. 1. Розподіл напруженості магнітного поля дипольної, квадрупольної та дипольно-квадрупольної гармонік, напруженість поля H , А/м на осі Z

(Fig. 1. Distribution of magnetic field strength of dipole, quadrupole and dipole-quadrupole harmonics)

Очевидно, що визначити конфігурації наведених на рис. 2 ізоліній, навіть для обладнання, яку перебуває у експлуатації, експериментальним шляхом практично неможливо. Наявність моделі дозволяє провести її верифікацію у найбільш критичних точках методом натурних вимірювань та внести необхідні корективи з огляду на те, що завжди існують чинники, які важко або неможливо врахувати при реалізації моделювання. У першу чергу це стосується вихідних даних щодо фактичних технічних характеристик джерел електромагнітних полів.

Висновки

1. Моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів багатьох джерел дозволяє оцінити ступені електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності в окремих приміщеннях та на визначених територіях на стадіях проектування розміщення електротехнічного обладнання.

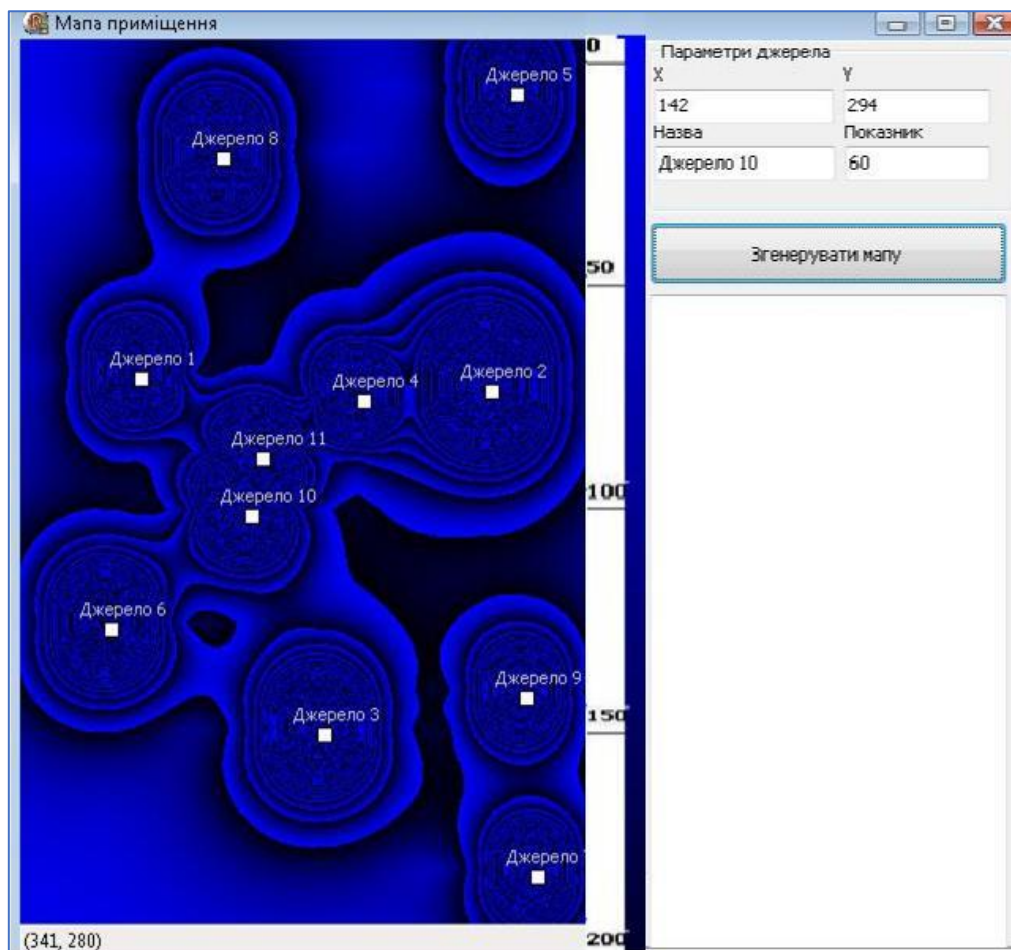


Рис. 2. Моделювання просторового поширення багатьох джерел різної орієнтації. Розміри площини – X, Y (м), шкала індукції магнітного поля – праворуч (мкТл)
(Fig. 2. Modeling of spatial distribution of many sources of different orientation)

2. Для достовірності отриманих моделей необхідним є застосування коректних функцій щодо просторових поширень окремих складових поля з прийнятними спрощеннями й припущеннями.

3. Для локалізованих у просторі технічних засобів здійснення моделювання поширення полів над-

низьких частот слід реалізовувати, виходячи з того факту, що поля більшості з них можна характеризувати як поля комбінації магнітних диполів. Отримані результати дозволяють скоротити час і вартість проектних робіт з розміщення електротехнічного обладнання у будівлях та територіях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розов В. Ю. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 4. С. 56–61.
2. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Техническая электродинамика*. 2015. № 2. С. 3–15.
3. Левченко Л. О., Сукач С. В., Коновалова О. В. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечного перебування персоналу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 6 (89), Ч. 1. С. 27–31.
4. Розов В. Ю., Реуцкий С. У., Пелевин Д. Е. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*. 2012. №1. С. 3–9.
5. Пелевин Д. Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 14–16.
6. Koppel T, Ahonen M, Carlberg M, Hedendahl L.K, Hardell L. Radiofrequency radiation from nearby mobile phone base stations-a case comparison of one low and one high exposure apartment. *Oncol Lett*. 2019. № 18(5). PP. 5383–5391. DOI: <https://doi.org/10.3892/ol.2019.10899>.
7. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM. *Доклады БелГУ информатики и радиоэлектроники*. 2013. № 7. С. 44–50.
8. Гетьман А.В. Аналіз та синтез структури магнітного поля технічних об'єктів на основі просторових гармонік: дис. ...д-ра техн. наук, 05.09.05. Харків, 2019. 316 с.
9. Ходаковський О. В., Левченко Л. О., Колумбет В. П., Козачук А. Д., Кужавський Д. С. Розрахунковий апарат моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5. № 1. С. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>.

REFERENCES

1. Rozov, V. Yu. (2015), "Investigation of the magnetic field of three-phase cable lines from single-core cables with double-sided grounding of their screens", *Electrotechnics and Electromechanics*, No. 4, pp. 56–61.
2. Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N. (2015), "Multiphysical modeling of electrical devices", *Technical electrodynamics*, No. 2, pp. 3–15.
3. Levchenko, L.O., Sukach, S.V. and Konovalova, O.V. (2014), "Modeling of spatial distributions of magnetic fields of electric machines for definition of zones of safe stay of personnel", *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrogradsky National University*, Is. 6 (89), part 1, pp. 27–31.
4. Rozov V. Yu., Reutskiy S. U., Pelevin D. Ye. et al. (2012), "Research of the magnetic field of high-voltage AC power lines", *Technical electrodynamics*, No. 1, pp. 3-9.
5. Pelevin D.E. (2015), "Methods for reducing the magnetic field of overhead power transmission lines outside the security zones", *Technical electrodynamics*, No. 5. pp. 14-16.
6. Koppel T, Ahonen M, Carlberg M, Hedendahl L.K, Hardell L. (2019), "Radiofrequency radiation from nearby mobile phone base stations-a case comparison of one low and one high exposure apartment", *Oncol Lett*, № 18(5), pp. 5383–5391.
7. Mordachev V. I., Svistunov A. S. (2013), "Necessary and sufficient power level of electromagnetic radiation of base stations of the GSM network", *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, No. 7, pp. 44–50.
8. Getman A.V. Analysis and synthesis of the structure of the magnetic field of technical objects on the basis of spacious harmonics: dis. ... dr. tech. sciences, 05.09.05. Kharkiv, 2019. 316 p.
9. Khodakovskiy O.V., Levchenko L.O., Columbet V.P., Kozachuk A.D., Kuzhavskiy D.S. (2021), "Computational apparatus for modeling the propagation of electromagnetic fields of dissimilar sources", *Advanced Information Systems*, Vol. 5., No. 1, pp. 34 – 38, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>.

Received (Надійшла) 15.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;
Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky KPI", Kyiv, Ukraine;
 e-mail: larlevch@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-9472>.

Моделирование пространственных распространённых магнитных полей сверхнизкой частоты множественных источников

Л. А. Левченко

Аннотация. Показано, что в условиях уплотнения расположения электротехнического оборудования в помещениях, зданиях и на территориях для обеспечения нормативных уровней электромагнитной совместимости персонала и населения целесообразно осуществлять предварительное моделирование распространения электромагнитных полей. Учитывая незначительное экранирование магнитного поля корпусами оборудования, целесообразно осуществлять моделирование по магнитной составляющей электромагнитного поля. Определено математическое соотношение распространения магнитного поля отдельных источников с учетом их дипольной модели. Моделирование осуществлялось для источников дипольного и дипольно-квадрупольного типа. С использованием пакета Matlab предоставлены трехмерные модели источников с распространением дипольной, квадрупольной и дипольной-квадрупольной гармоник поля. Разработано прикладное программное обеспечение в среде C с использованием базы данных SQL-сервер и осуществлено моделирование распространения магнитного поля многих источников в определенной плоскости. Полученный результат показывает, что даже для электротехнического оборудования, находящегося в эксплуатации, определить приведенные изолинии напряженности магнитного поля экспериментальным путем очень сложно. На стадиях проектирования размещения оборудования моделирование является единственным инструментарием прогнозирования электромагнитной обстановки, которое определяет электромагнитную совместимость технических средств и электромагнитную безопасность персонала и населения.

Ключевые слова: моделирование; электромагнитное поле; электромагнитная совместимость; электромагнитная безопасность.

Modeling the spatial distribution of magnetic fields of low frequency multiple sources

Larysa Levchenko

Abstract. The work is show that in conditions of dense the location of electrical equipment in the premises, buildings and on territories to ensure the regulatory levels of electromagnetic compatibility of personnel and the population, it is advisable to carry out preliminary modeling of the propagation of electromagnetic fields it is advisable. Considering the insignificant shielding of the magnetic field by the equipment cases, it is advisable to carry out modeling based on the magnetic component of the electromagnetic field. The mathematical ratio of the propagation of the magnetic field of individual sources, taking into account their dipole model, has been determined. The modeling was carried out for sources of the dipole and dipole-quadrupole types. Three-dimensional models of sources with the propagation of dipole, quadrupole and dipole-quadrupole harmonics of the field are provided, using the Matlab package. Application software has been developed in the C environment, using the SQL server database, and modeling of the propagation of the magnetic field of many sources in a certain plane has been carried out. This result is show that even for electrical equipment that operates to determine the reduced magnetic field isolines experimentally very difficult. At the design stages of equipment placement, modeling is the only tool for predicting the electromagnetic environment, which determines the electromagnetic compatibility of technical equipment and the electromagnetic safety of personnel and the public.

Keywords: modeling; electromagnetic field; electromagnetic compatibility; electromagnetic safety.