

В. Г. Здановський, д-р техн. наук (ДУ «ННДІПБОП»),
В. А. Глива, д-р техн. наук (НАУ), Л. О. Левченко, канд. екон. наук (НТУУ «КПІ»)

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ РОЗПОДІЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

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 уявляється отримання (прогнозування) електромагнітної зупинки 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.

Сучасний стан проблеми. 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, в основному, електромагнітної сумісності технічних засобів і спрямована на пошуки можливостей заощадження електроенергії [3].

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

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 обумовлене тим, що відповідні електричні поля повністю екрануються металевими корпусами електричних машин.

Найбільш поширеними агрегатами, які мають велике значення для функціонування промислового комплексу країни, є електричні машини турбогенераторів електростанцій. Усі вони є чотири полюсними машинами, тобто дипольно-квадрупольними джерелами 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, 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 $R \geq R_0$.

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

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

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

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

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

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

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 $n = 1$:

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

Для $n = 2$:

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

Таким чином, ці радіальні гармоніки знижуються з відстанню від джерела поля пропорційно третьому та четвертому ступеню радіусу.

Чотиріполюсна 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

$$H_r^{(n=1)} \text{ та } H_r^{(n=2)} .$$

У загальному вигляді:

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

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

Наприклад, для $\theta = \frac{\pi}{2}$ ($\sin \theta = 1, \sin^2 \theta = 1$) 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 чотириполюсної електричної машини наведено на рис. 1.

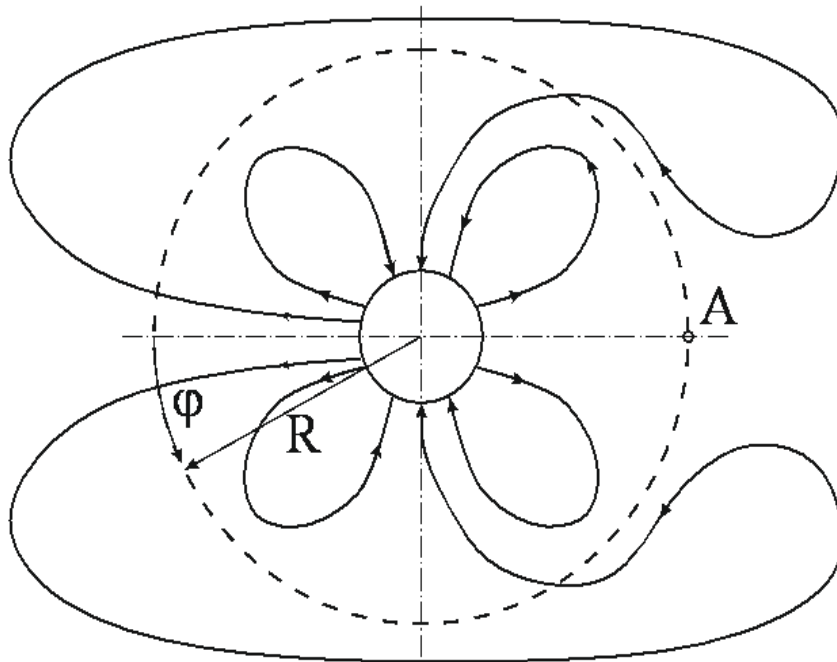
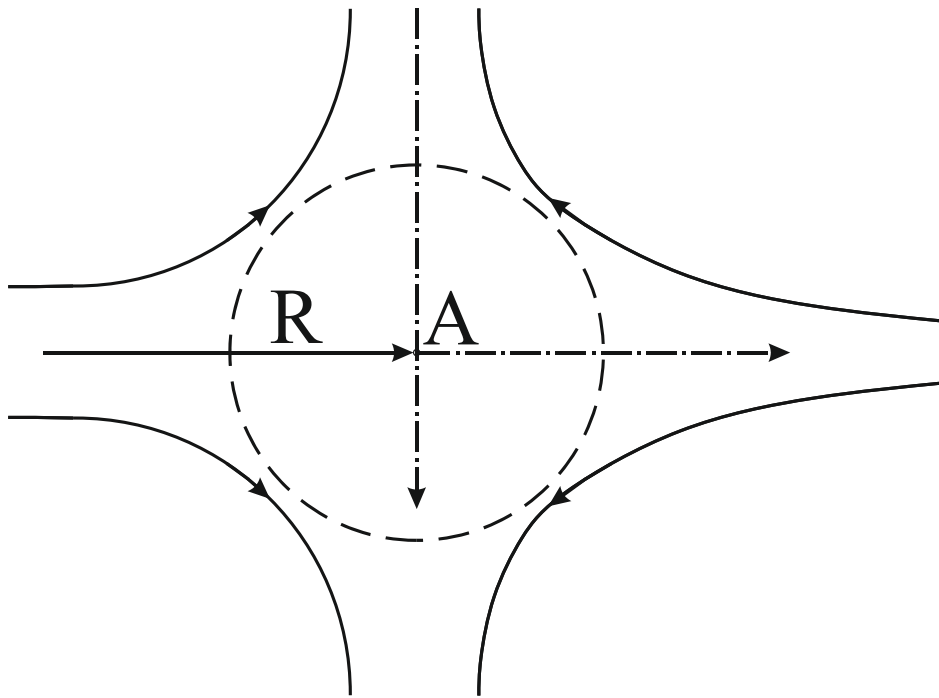


Рис. 1. Просторовий розподіл магнітного поля чотириполюсної електричної машини: А – точка нульового поля

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.

Таким чином, перебування працюючих у цій зоні є найбільш безпечним з точки зору електромагнітної безпеки.



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

Крім того, у реальних виробничих умовах структура поля дещо інша. Як правило, підлога рівнів обслуговування, де розміщуються турбогенератори, – металева. У цьому випадку на форму та напруженість магнітного поля впливає ефект віддзеркалювання, кількісно оцінений у роботі [11].

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 нашому випадку уявним джерелом поля є його дзеркальне відбиття відносно металевої поверхні рівня обслуговування.

Попередні розрахунки показали, що за такого явища можливо очікувати зниження напруженості магнітного поля до 15...17%.

Такий результат, у поєднанні з іншими заходами з електромагнітної безпеки надає можливість знизити рівні магнітних полів у зонах перебування персоналу з експлуатації енергетичного обладнання до нормативних та навіть нижчих за них.

У реальних виробничих умовах в одній машинній залі, цеху розташовано кілька потужних агрегатів (наприклад, турбогенераторів). При цьому їх орієнтація один відносно іншого різна – як на одній прямій, так і паралельно та перпендикулярно один одному. Це робить інтегральний розподіл магнітного поля у приміщенні досить складним.

Визначення сумарної напруженості магнітного поля у кожній точці, навіть у частотних діапазонах, які 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 є слушним з фізичної точки зору; втім, на біологічний об'єкт кожне джерело впливає незалежно, що обумовлено принциповою некогерентністю цих електромагнітних полів.

За таких умов доцільне моделювання просторового розподілу магнітних полів багатьох джерел з використання аналогічного 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 використане спеціальне програмне забезпечення, розроблене у середовищі *Turbo Delphi* з використанням системи управління базою даних *Microsoft SQL Server 5*, що дозволяє отримати загальну картину розподілу рівнів магнітних полів у приміщеннях і площині розташування обладнання та незалежно від його кількісного та якісного складу. Програмне забезпечення також дозволяє автоматично враховувати не тільки розміри приміщення, а й розміри джерел магнітного поля.

Висновки

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

2. Значне зниження рівнів магнітних полів у робочих зонах можливе за рахунок потрібної орієнтації полюсів електричних машин. Шляхи пересування працівників слід визначити поблизу точок нульового поля з одного боку від них.

3. Наявність провідних поверхонь рівнів обслуговування турбогенераторів дозволяє додатково знизити рівні магнітних полів у необхідних місцях.

Виконану роботу не можна вважати повністю завершеною. Кількісні характеристики розглянутих магнітних полів залежать від конкретних геометричних розмірів електричної машини, її потужності на момент проведення контролю, електромагнітного оточення тощо.

Представляє також інтерес рівні високочастотних полів, генерованих колекторними вузлами. Це є предметом подальших досліджень, які мають на меті отримання інтегральної моделі щодо формування електромагнітної обстановки на енергетичних об'єктах.

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'янчиков, 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.

Дата подання статті до збірника – 24.03.2014