



УДК 621.3013

В.А. Глива, д.т.н., професор КНУБА,
С.А. Теренчук, к.ф-м.наук, доцент КНУБА,
Т.М. Перельот аспірант Національного авіаційного університету, м. Київ

МОДЕЛІ І МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

АНОТАЦІЯ. Запропоновані моделі і методи розрахунку параметрів магнітних полів поблизу обладнання, що живиться постійним електричним струмом.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, електромагнітне навантаження, стаціонарні процеси, нестаціонарні процеси, магнітне поле.

ANNOTATION. The models and methods of calculation parameters of magnetic fields near equipment that feeds a constant electric current.

Keywords: electrical equipment, electromagnetic load stationary processes non-stationary processes magnetic field.

Вступ. Основними джерелами формування електромагнітного навантаження у виробничих приміщеннях і будівлях різного призначення є електричні та електротехнічні пристрої, що використовуються у виробничих процесах та у системах життєзабезпечення. Відомо, що електрична складова електромагнітного поля практично повністю екранується металевими матеріалами (металеві рукави електропроводки, корпуси електронного та електричного обладнання тощо), а магнітна складова має високу проникність, особливо це стосується низькочастотних електромагнітних полів. Тому оцінювання електромагнітного навантаження доцільно здійснювати саме за рівнями магнітних полів.

Сучасний стан проблеми. Найбільш надійним методом визначення електромагнітного навантаження є метод натурних вимірювань. Його використання доцільне й ефективне в умовах діючого виробництва за умови забезпечення постійного складу технічних засобів, що перебувають у експлуатації. Визначення електромагнітного навантаження в приміщеннях промислових будівель на стадії проектування виробничих потужностей, первинного монтажу та модернізації обладнання доцільним здійснюється розрахунковими методами.

Прогнозування буде надійним лише у випадку застосування моделей просторових розподілів магнітного поля, які адекватно відображають суперпозицію полів різних технічних засобів, що мають різні випромінювальні характеристики, за умови їх різного взаємного розташування. У роботі [1] отримано двовимірну модель розподілу магнітного поля багатьох джерел у площині перебування працюючих. Розроблене програмне забезпечення дозволяє отримати мапу екіпотенціальних рівнів напруженості магнітного поля в приміщенні, на якій області різних відтінків відповідають певним рівням напруженості магнітного поля. Однак, ця модель передбачає ідентичність джерел поля (персональні комп'ютери).

Задачі моделювання магнітних полів, що генеруються певними видами електричного обладнання присвячені роботі [2-4]. В [2] розглянуто модель зовнішнього магнітного поля трифазної електричної машини, в [3] - модель змінного магнітного поля, що створюється провідником зі струмом. Ці моделі мають локальний характер і цікаві лише з методологічних міркувань. Окрім того, вони використовують занадто складний математичний апарат, що не зовсім прийнятне для розв'язання задач охорони праці. Дослідження [4] присвячене розрахункам просторових розподілів магнітних полів чотириполосних електричних машин. Перевагою роботи є визначення точок та поверхонь нульових рівнів магнітних полів, що дозволяє виявити в приміщеннях місця безпечного

перебування та пересування персоналу. При цьому, актуальною лишається задача визначення математичного апарату, що дозволить здійснювати розрахунок параметрів магнітних полів комплексу будь-якого електричного та електронного обладнання і буде прийнятним для застосування у працезохоронній практиці.

Метою статті є формування математичного забезпечення розрахунків параметрів магнітних полів електротехнічного обладнання промислових будівель для використання у працезохоронній практиці.

Виклад основного матеріалу. Неперервні у просторі та часі процеси, такі як поширення електромагнітних полів, описують диференціальними рівняннями у частинних похідних. Розрізняють стаціонарні (незмінні у часі) та нестаціонарні (такі, що змінюються у часі) процеси.

Стаціонарні процеси описуються еліптичними, а нестаціонарні – гіперболічними та параболічними рівняннями. Проведені в [5] попередні дослідження показали, що рівні магнітних полів навіть потужного електричного обладнання (турбогенераторів) можна вважати стаціонарними. Окрім того, що більшість електротехнічного обладнання живиться електричним струмом промислової частоти 50Гц. Поля, що генеруються таким обладнанням мають таку саму частоту і є квазістаціонарними, тобто з практичних міркувань можуть вважатись стаціонарними [6].

Для моделювання таких полів використовується еліптичне рівняння Лапласа:

$$\Delta\varphi = 0, \quad (1)$$

де Δ – оператор Лапласа, $\Delta = \nabla^2$, де ∇ – оператор Гамільтона.

Цей оператор може бути використаний як для скалярних, так і для векторних функцій. У ортогональній системі координат рівняння Лапласа має вигляд:

$$\Delta^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

де $\varphi(x, y, z)$ – скалярний потенціал магнітного поля.

Якщо електричний пристрій має форму, що наближена до циліндричної, то рівняння (1) у циліндричній системі координат набуває вигляду:

$$\Delta^2\varphi = \frac{1}{R} \frac{\partial^2\varphi}{\partial R^2} \left(R \frac{\partial\varphi}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2\varphi}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (3)$$

де R – відстань від центру пристрою до точки визначення потенціалу; α – кут між напрямком R і віссю x або y .

Для визначення вектору-потенціалу магнітного поля доцільним є використання рівняння Пуассона, яке у випадку ізотропного середовища зі сталою магнітною проникністю ($\mu_x = \mu_y = \mu_z = const$) має вигляд:

$$\nabla^2 A = -\mu_a J \quad (4)$$

де A – векторний магнітний потенціал; J – вектор густини електроструму; μ_a – абсолютна магнітна проникність середовища ($\mu_a = \mu\mu_0$, μ – відносна магнітна проникність, μ_0 – магнітна стала). Для скалярних значень вектору-потенціалу використовують співвідношення:

$$\nabla^2 A_x = -\mu_a J_x, \nabla^2 A_y = -\mu_a J_y, \nabla^2 A_z = -\mu_a J_z \quad (5)$$

Значення векторного магнітного потенціалу отримуються інтегруванням:

$$A = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{JdV}{R} \quad (6)$$

Визначення фактичної індукції магнітного поля здійснюється з співвідношення:



$$B = \text{rot}A \quad (7)$$

Напруженості магнітного поля, у циліндричних координатах розраховують:

$$\begin{aligned} \text{rot}_r H &= \frac{1}{R} \frac{\partial H_z}{\partial \alpha} - \frac{\partial H_\alpha}{\partial z} \\ \text{rot}_\alpha H &= \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial R} \\ \text{rot}_z H &= \frac{1}{R} \left[\frac{\partial(RH_\alpha)}{\partial R} - \frac{\partial H_r}{\partial \alpha} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Для отримання частинних розв'язків рівнянь Лапласа і Пуассона необхідно задати граничні умови. На межі, якою є поверхня електротехнічного пристрою, у загальному випадку, для точок з координатами (x, y, z) що належать границі можуть бути задані граничні умови [7]:

- 1) *першого роду* – на границі надається значення функції $\varphi = f_1(x, y, z)$;
- 2) *другого роду* – надається приріст функції за напрямом нормалі \vec{n} до границі, тобто $d\varphi/dn = f_2(x, y, z)$;
- 3) *третього роду* – $d\varphi/dn + f_3(\varphi) = f_4(x, y, z)$.

На границі моделі можуть бути задані змішані граничні умови, тобто комбінація умов першого, другого та третього роду. Умови $\varphi = 0$ та $d\varphi/dn = 0$ є умовами однорідності.

Слід зауважити, що застосування граничних умов не є обов'язковим для більшості задач, які пов'язані з оцінкою безпеки. Це пояснюється достатнім віддаленням працюючих від обладнання. Винятком є електротехнічні пристрої великих розмірів.

Обговорення результатів. Порівняння результатів розрахунків рівнів магнітних полів за описаними методами, згідно яких урахується їх нестационарність [8], довели, що припущення стаціонарності (квазістаціонарності) цілком прийнятне для розв'язання задач, пов'язаних з електромагнітною безпекою магнітних полів електротехнічного обладнання в промислових будівлях. Однак, при плануванні та здійсненні розрахунків слід враховувати, що надані моделі не завжди дають прийнятні результати. Згідно [4], якщо електротехнічне обладнання є джерелом магнітного поля дипольного, квадрупольного та октупольного типів, то для коректних розрахунків рівнів магнітних полів необхідно враховувати відповідні гармоніки магнітного поля промислової частоти.

Висновки

1. Запропоновані моделі і методи розрахунку параметрів магнітних полів електротехнічних пристроїв повністю придатні для використання у працезохоронній практиці для визначення електромагнітного навантаження поблизу обладнання, яке живиться постійним електричним струмом.

2. Припущення щодо стаціонарності магнітних полів промислової частоти суттєво не впливає на результати розрахунків їх рівнів при вирішенні задач електромагнітної безпеки.

3. Для розрахунку рівнів магнітних полів у безпосередній близькості до електротехнічних пристроїв та при потребі моделювати просторове поширення магнітних полів необхідно враховувати відповідні граничні умови.

4. Для визначення електромагнітного навантаження поблизу джерел магнітного поля дипольного, квадрупольного та октупольного типів припущення стаціонарності неприйнятне через необхідність урахування відповідних гармонік магнітного поля.

Література

1. Глива В.А. Принципи моделювання просторових розподілів електромагнітних полів багатьох джерел у робочих приміщеннях / В.А.Глива // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво». – 2009. – Вип.18. – С.130-135..
2. Степанов А.Н. Моделирование внешнего магнитного поля трехфазной электрической машины / А.Н.Степанов // Ученые записки КАГТУ. – 2011. - № 3. – С. 14 – 20.
3. Моделирование переменного магнитного поля, создаваемого токопроводом низковольтного распределительного устройства / М.Н.Токарев, В.С.Лужков, О.А.Гелярговская [и др.] // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 28. – С. 44 – 49.
4. Здановський В.Г. Загальні підходи до моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання / В.Г.Здановський, В.А.Глива, Л.О.Левченко // Проблеми охорони в Україні. – 2014. – Вип. 27. – С. 18 – 24.
5. Здановський В.Г. Дослідження рівнів магнітних полів енергетичних об'єктів / В.Г. Здановський, В.А. Глива, Х.В. Паньків // Проблеми охорони в Україні. – 2014. – Вип. 25. – С. 22 – 29.
6. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1997. – 736 с.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
8. Кирпанев А.В. Электромагнитное поле: теория идентификации и ее применение / А.В. Кирпанев, В.Я. Лавров. – М.: Вузовская книга, 2012. – 278 с.