УДК 538.69.331.45

В.А. Глива[1], К.Д. Ніколаєв[1], Л.О. Левченко[2]

[1] *Національний авіаційний університет, Київ*
[2] *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ*

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОСТЕЙ ЗОВНІШНІХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ РІЗНОРОЗМІРНОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Проаналізована можливість отримання зручного для практичного використання розрахункового методу для визначення змін магнітного поля електричних машин. Показана несиметричність магнітного поля навколо чотириполюсної машини. Отриманий аналітичний та графічний матеріал дозволяє у реальних виробничих умовах обрати місця перебування і шляхи пересування персоналу.

Ключові слова: *магнітне поле, напруженість магнітного поля, електромагнітна безпека.*

Вступ

Визначення закономірностей поширення магнітних полів навколо електротехнічних пристроїв різних конструкцій та надання кількісних значень напруженостей цих полів є важливою проблематикою електромагнітної безпеки та електромагнітної екології. Більшість таких досліджень є експериментальними і стосуються окремих або однотипних пристроїв. Це не дає можливості узагальнити отримані результати та розповсюдити їх на обладнання інших потужностей, розмірів тощо. Розрахункові методи та моделювання магнітних полів у більшості розглядають внутрішні магнітні поля, критичні для робочих характеристик обладнання. Тому доцільно сформувати загальні засади розрахункового визначення структур зовнішніх магнітних полів електричних машин різного призначення з урахуванням його прикладної спрямованості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню електромагнітних полів електротехнічного обладнання розрахунковими методами та здійсненню їх моделювання приділяється багато уваги. У роботі [1] наведено результати визначення поширення електричного і магнітного поля навколо повітряних ліній. Але їх відмінності для різних ліній обумовлені конструкціями і у загальному випадку уніфіковані. Дослідження [2] присвячене визначенню розподілу магнітних полів ліній електропередачі. У ньому лінія розглядається як система магнітних диполів, що значно підвищило точність моделювання. Це ж стосується моделювання та визначення заходів зниження магнітних полів кабельних ліній [3]. Наведені роботи розглядають лінійні джерела. Але найбільш складними є магнітні поля локальних джерел – електричних машин, трансформаторів тощо. Математичний апарат, наведений у роботі [4] щодо зовнішнього магнітного поля електричних машин занадто абстрактний. Це ускладнює його використання для практичних цілей.

Проблема вибору методів і методик моделювання розглянута у [5].Але ця робота оцінює переваги та недоліки різних стандартних пакетів програм, не надаючи конкретних результатів моделювання. Найбільш сучасні підходи до моделювання електротехнічних пристроїв застосовано у роботі [6]. Зокрема показано моделі магнітних полів трансформаторів. Ця робота розглядає таке моделювання з точки зору підвищення функціональних можливостей обладнання. Але з точки зору елемента магнітної безпеки доцільно розглянути поширення магнітного поля у залежності від конструктивних особливостей і формування магнітних полів. Це було започатковано з позиції метрології у [7] і розвинуто у дослідженні [8] щодо забезпечення електромагнітної безпеки і сумісності технічних засобів. Але при проведенні розв’язання рівняння Гауса для скалярного магнітного потенціалу було допущено неточність. Це не дозволило отримати коректний графічний матеріал і оцінити просторові зміни напруженості магнітного поля електричної машини у залежності від рівнів гармонік магнітного поля та відносного розміру машини.

Мета роботи – дослідити просторові зміни магнітного поля електротехнічних пристроїв у залежності від умов його формування, визначити зони мінімальних магнітних полів для електричних машин різних відносних розмірів.

Виклад основного матеріалу

Досвід експериментальних робіт з визначенням напруженостей магнітних полів електротехнічного обладнання свідчить, що ці показники не завжди відповідають номінальним значенням електричних навантажень (потужностей) пристроїв і систем. Так, магнітні поля ліній електропередач залежать від миттєвих значень електричного струму і не є сталими навіть за межами санітарно-захисних зон. Вимірювання магнітних полів поблизу електричних машин великої потужності показали, що напруженості поля навколо машини потужністю 150 МВт менші

© В.А. Глива, К.Д. Ніколаєв, Л.О. Левченко

за показниками на таких же відстанях від машини потужністю 100 МВт.

Очевидно, що напруженості магнітних полів пов'язані не тільки з потужністю обладнання, а й з іншими чинниками. Для електричних машин це розташування полюсів та їх кількість, наявність та інтенсивність вищих просторових гармонік магнітного поля, що ускладнює інструментальний контроль рівнів магнітних полів.

Головною задачею електромагнітної безпеки є визначення напруженості магнітного поля у будь-який точці навколо електротехнічного пристрою.

Для її коректного вирішення необхідно визначення достатньої кількості просторових гармонік для характеристики поля у заданій області з потрібною (заданою) точністю.

Отримані результати доцільно представити у графічному вигляді для зручності у практичному використані. При цьому такі дані повинні бути узагальнені і не стосуватися обладнання конкретної марки або моделі.

Як показано у [8], врахування гармонік магнітного поля доцільне за рахунок розв'язання рівняння Гауса для скалярного потенціалу.

За результатами стандартної процедури розв'язання магнітне поле чотириполюсної електричної машини характеризується сумою дипольної (*n=1*) і квадрупольної (*n=2*) гармонік.

Для n = 1:

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

Для n = 2:

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

де, R, θ, φ, полярні координати, *a* – амплітуди відповідних гармонік.

Загальна напруженість поля:

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

Співвідношення наведені у сферичних координатах, тому вважаємо, що радіус самої електричної машини R_0. Найбільш показовими є значення магнітного поля з протилежних боків машини.

Розглядаючи зміну напруженості поля за φ = 0 та φ = π, приймаючи $R_0 = 1$, отримуємо співвідношення:

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

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

Як видно, закономірності змін напруженості магнітного поля для цих двох кутів різні. Для випадку, коли магнітні поля двох гармонік додаються це наведено на рис. 1.

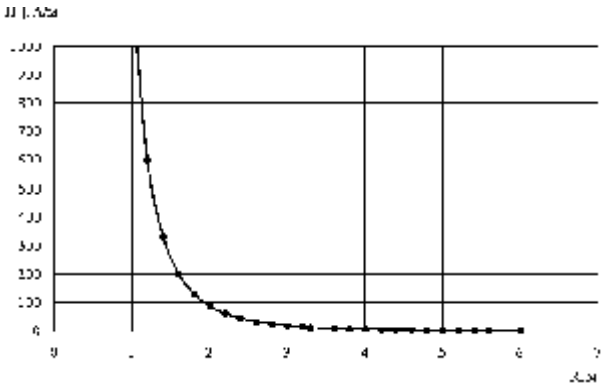

Рис. 1. Зміна магнітного поля електричної машини з відстанню за φ = 0

Цей результат можна вважати очікуваним. Інша картина спостерігається за φ = π.

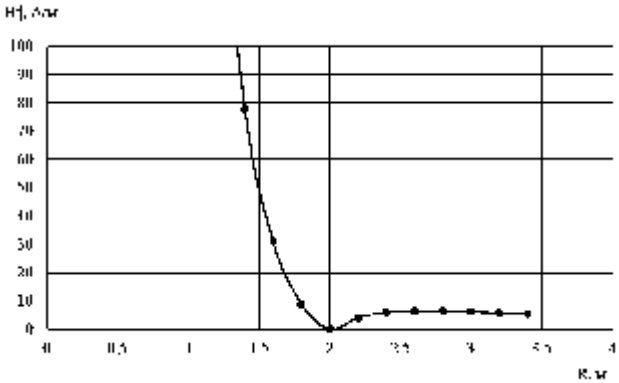

Рис. 2. Зміна магнітного поля електричної машини з φ = π

Напруженість магнітного поля за модулем розглядається через те, що після нульового значення цей показник стає від'ємним. Але з точки зору електромагнітної безпеки спрямованість вектора напруженості магнітного поля значення не має.

Отриманий результат – зниження магнітного поля до нуля і його зростання з відстанню можна пояснити різними закономірностями затухання поля дипольної та квадруполуної гармоніками.

Аналогічний підхід можна застосувати для аналізу структури і зміни магнітного поля інших джерел. більшість електронного (джерела безперебійного живлення, системні блоки комп'ютерів, моніторів) та електричного (трансформатори) обладнання мають форми магнітних та електричних

полів, притаманні магнітному та електричному диполям.

Тому для розрахунків рівнів магнітних полів таких джерел доцільно використовувати співвідношення:

$$H = \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 a_{11} \cos\phi \sin\theta.$$

Для отримання конкретних кількісних даних достатньо визначення амплітуд сферичних гармонік на базовій сфері, тобто напруженості магнітного поля безпосередньо біля електричної машини. Їх співвідношення у багатьох випадках відомі.

Наприклад, у зовнішньому магнітному полі багатополюсної електричної машини окрім власної просторової гармоніки з показниками n=p (де p – кількість пар полюсів машини) є перша (дипольна) просторова гармоніка. Біля поверхні машини напруженість її магнітного поля скла дає приблизно 0,2 напруженості поля власної гармоніки.

Наведене надає можливість максимально точно визначити напруженості магнітного поля електричних машин (як експериментально, так і аналітично). Крім того, отриманий графічний матеріал надає можливість визначити шляхи пересування працівників маршрутами, де рівні магнітних полів мінімальні. Особливо актуально це для умов обмежених просторів, наприклад біля електрогенераторів річковик та морських суден.

Висновки

1. Визначення розподілів та напруженостей магнітних полів електротехнічного обладнання (як експериментальне, так і аналітичне) доцільне з урахуванням наявності просторових гармонік магнітного поля.

Розрахункове визначення напруженостей магнітних полів доцільне використання рівняння Гауса для скалярного магнітного потенціалу у полярних координатах.

Отримані результати і графічний матеріал дають можливість визначити зони мінімальних значень магнітного поля електричних машин, що дозволяє в умовах обмежених площ позначити шляхи безпечного пересування працівників.

Список літератури

1. *Dezelak K., Stumberger G., Jak F. Arrangements of Overhead Power Line Conductors // Electric Power Systems Research. – 2011. – Vol. 81, № 12. – P. 2164-2170.*
2. *Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока / В.Ю. Розов, С.У. Реуцкий, Д.Е. Пелевин и др. // Технічна електродинаміка. – 2012. – №1. – С. 3– 9.*
3. *Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов / В.Ю. Розов А.А. Квицинский, П.Н. Добродеев ҳта ін.ї // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – № 4. – С. 56 – 61*
4. *Степанов А.Н. Моделирование внешнегомагнитного поля трехфазной электрической машины / А.Н. Степанов // Ученые записки, Комсомольского-на-Амуре ГТУ, – 2011. – № III-1 (7). – С. 13 – 20.*
5. *Моррис Д. Моделирование электромагнитных полей – как выбрать лучший метод / Д. Моррис // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – № 3 (00117). – 2012. – С. 124 – 129.*
6. *Подольцев А.Д. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств / А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая // Техническаяэлектродинамика, 2015. – № 2. – С. 3 – 15.*
7. *Волохов С.А. Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудований / С.А. Волохов, П.Н. Добродеев // Электротехника, 2006. – № 4. – С.28 – 33.*
8. *Глива В.А. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання / В.А. Глива, Л.О. Левченко, Х.В. Паньків // Управління розвитком складних систем. – 2014. Вип. 20. – С. 174 – 179.*

Надійшла до редколегії 25.07.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАЗНОРАЗМЕРНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.А. Глива, К.Д. Николаев, Л.А. Левченко

Проанализирована возможность получения удобного, для практического использования расчетного метода определения изменений магнитного поля электрических машин. Показана несимметричность магнитного поля вокруг четырехполюсные машины. Полученный аналитический и графический материал позволяет в реальных производственных условиях выбрать места пребывания и пути передвижения персонала.

***Ключевые слова**: магнитное поле, напряженность магнитного поля, электромагнитная безопасность.*

INVESTIGATION OF THE INTENSITY OF EXTERNAL MAGNETIC FIELDS OF VARIOUS SIZES OF ELECTROTECHNICAL EQUIPMENT

V.A. Glyva, K.D. Nikolaev, L.O. Levchenko

The possibility of obtaining a convenient, practical use of the calculated method for determining the changes in the magnetic field of electric machines, was analyzed. The asymmetry of a magnetic field around a four-pole machine is shown. The analytical and graphic material that has been obtained allows us to choose the places of residence and the way of movement of personnel in real production conditions.

***Key words:** magnetic field, magnetic field strength, electromagnetic safety.*