

камера, змонтована на рухомих опорах, завдяки чому вона під час випробувань може переміщатися по напрямному гвинту на необхідну відстань від відкритої пічки (джерело теплового випромінювання). Схема облицювання і розташування датчиків показана в табл. 2.

Результати вогневих випробувань зразків з підкладкою із піскового сірчаного бетону, захищених облицюванням із гіпсокартонних плит показали ось що.

Швидкість прогрівання облицювання на межі її поверхні з підкладкою до температури 100 °С включно, залежить від її товщини і становить: при одинарному (12,5 мм) 10 хв., подвійному (2x12,5 мм) 34 хв.

Ефективність захисту сірчаного бетону можна підвищити завдяки багатошаровим системам, які включають проміжні шари із теплоізоляційних матеріалів, наприклад мінеральних або гісоперлітових плит. В цьому випадку необхідна розробка способів кріплення облицювання до поверхні сірчаного бетону, наприклад за допомогою гісоперлітового або гіпсовермикулітового розчину, а також елементів кріплення із матеріалів з низькою температуропровідністю.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Ивашкевич Б.П. Разработка оптимальных составов серных мастик и исследование воздействий повышенных температур на их свойства: Дис... канд. техн. наук: 05.23.05. – Х., 1991. – 174 с.*
2. *Патуроев М.В. Разработка оптимальных составов серных бетонов и влияние тепловых и огневых воздействий на их свойства: Автореф. Дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / ЛИИЖТ–Л., 1989. – 22 с.*
3. *Орловский Ю.И. Бетоны, модифицированные серой: Дис... д-ра техн. наук: 05.23.05. – Харьков, 1992. – 529 с.*
4. *Беккер К., Пфау Й., Тихельман К. Сухой способ строительства. Основные положения. Области применения. Конструкции. Подробности. 2-е издание.- Дармштадт: Изд-во Р. Мюллер, 1996.*
5. *Циприанович И.В., Старченко А.Ю. Комплексные системы сухого строительства. – К.: Изд-во ОАО «Мастера», 1999. – 192 с.*
6. *Шналь Т.Н. Свойства и оптимизация составов вспучивающихся покрытий для защиты металлических конструкций: Дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05. и 05.26.02. – Харьков, 1995. – 248 с.*

УДК 53.082

*М. Семерак, д.т.н., професор, В. Гудим, д.т.н., доцент (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України),  
О.Вовк, к.т.н., доцент (Львівський державний аграрний університет),  
О.Коваль (ГУ МНСУ в Львівській області)*

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОГО НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ АПАРАТІВ

На основі загальної системи рівнянь просторового електромагнітного поля отримано математичну модель для оцінки вектора напруженості магнітного поля у будь-якій точці ізотропного простору залежно від густини струму у провідниках обмоток довільної конфігурації.

Результати дозволяють дослідити параметри електромагнітного поля та рівень нагрівання металевих конструкцій електромагнітних апаратів, які можуть бути причиною пожеж.

*Вступ.* Часто для прикладних та наукових цілей виникає потреба обчислювати із певною точністю параметри та характеристики просторових магнітних полів, які створюються електричними струмами в обмотках різної конфігурації, оскільки експериментально ці величини виміряти з необхідною точністю важко чи навіть неможливо. Ці параметри і характеристики є визначальними в ході проектування силових електромагнітних приладів та апаратів, зокрема, трансформаторів чи реакторів з несиметричними магнітними системами. Оскільки під час експлуатації можливі зміни конфігурації обмоток, то внаслідок цього виникає перерозподіл характеристик магнітного поля, що призводить до загального чи локального перегрівання металевих конструкцій та, відповідно, охолоджуючих трансформаторних олій. Це може призвести до загорань трансформаторних олій чи погіршення герметичності баків надмірним тиском газів, які утворюються від дії високих температур. Таке поле потрібно знати не лише вздовж осей симетрії, де можливі аналітичні розв'язки, а й в довільних точках простору. Вказані параметри і характеристики (індукція, магнітний потік, напруженість магнітного поля) та зв'язки між ними використовуються під час проектування магнітних фокусувальних чи відхилювальних систем для електронної оптики, силових високовольтних трансформаторів, реакторів та конденсаторів.

*Науково-методичні підстави досліджень.* Розрахунок параметрів тривимірних магнітних полів ускладнюється необхідністю розв'язання диференціальних рівнянь другого порядку (рівняння Пуассона) для векторних величин (векторного потенціалу) у тривимірному координатному просторі. Аналітичні розв'язки отримати не можливо. Задачу дещо вдається спростити, враховуючи симетричні характеристики розрахунків об'єктів у певних системах координат (наприклад циліндрична). Отриманні складні вирази передбачають застосування відповідних чисельних методів котрі легко вдається реалізувати за допомогою комп'ютерної техніки для їх розрахунків.

*Результати досліджень.* Напруженість магнітного поля  $\vec{H}$  можна виразити через потенціал  $\vec{A}$ .

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A}, \quad (1)$$

який задовольняє рівняння Пуассона

$$\Delta A = -\mu \vec{j}, \quad (2)$$

де  $\mu$  - магнітна проникність середовища,  $\vec{j}$  - густина струмів провідності [1,2].

Розв'язок цього диференціального рівняння у циліндричній системі координат в загальному випадку можна записати у вигляді:

$$A(r, \theta, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \dot{r}_n(a, b, \theta') \vec{j}(R, \theta, z') R dR d\theta' dz', \quad (3)$$

$$\text{де } \dot{r}_n(a, b, \theta - \theta') = (a + b \cos(\theta - \theta'))^{-n-\frac{1}{2}} \quad \text{і} \quad a = r^2 + R^2 + (z - z')^2; \quad b = -2rR. \quad (4)$$

Розкладаємо вираз (4) у ряд Фур'є за кутом  $(\theta - \theta')$  косинус складових, оскільки він є парною функцією. Методика обчислення коефіцієнтів розкладу функціоналів  $\dot{r}_n^m(a, b,)$  розроблена [3].

Запишемо векторний потенціал і вектор густини струму через їх компоненти у циліндричній системі координат, у вигляді

$$\vec{j}(R, \theta, z') = j(\theta') \vec{e}_\theta.$$

Виконуємо певне перетворення системи координат із застосуванням розкладу в ряд Фур'є, отримуємо три інтегральні вирази для компонент векторного потенціалу у циліндричній системі. Розглянемо найяскравіший випадок сідлоподібної обмотки. Для кільцевих витків такої обмотки відмінною від нуля буде лише  $\theta'$ -компонента густини струму.

Через векторний потенціал [4,5] за формулою (1) отримуємо вирази для компонент напруженості магнітного поля кільцевих витків, у вигляді:

$$\begin{aligned}
 H_r(r, \theta, z) &= \sum_{m=0}^{\infty} a_m \int_{z_1}^{z_2} \int_0^d dR' dz' (R' + R)(z - z') \dot{r}_1^m(a_1, b_1) \{ I_{m_+} \sin m_+ \theta + I_{m_-} \sin m_- \theta \}; \\
 H_\theta(r, \theta, z) &= \sum_{m=0}^{\infty} a_m \int_{z_1}^{z_2} \int_0^d dR' dz' (R' + R)(z - z') \dot{r}_1^m(a_1, b_1) \{ I_{m_+} \cos m_+ \theta + I_{m_-} \cos m_- \theta \}; \quad (5) \\
 H_z(r, \theta, z) &= \sum_{m=0}^{\infty} a_m \int_{z_1}^{z_2} \int_0^d dR' dz' (R' + R) \left[ \frac{1}{r} \dot{r}_0^m(a_1, b_1) - r \dot{r}_1^m(a_1, b_1) + \frac{(R' - R)}{2} (\dot{r}_1^{m_+}(a_1, b_1) + \right. \\
 &\quad \left. + \dot{r}_1^{m_-}(a_1, b_1)) \right] \{ I_{m_+} \sin m_+ \theta + I_{m_-} \sin m_- \theta \} - \frac{1}{r} \dot{r}_0^{m_-}(a_1, b_1) \{ m_+ I_{m_+} \sin m_+ \theta - m_- I_{m_-} \sin m_- \theta \};
 \end{aligned}$$

де 
$$a_m = \frac{1}{8(1 + \delta_{0m})}; m_+ = m + 1; m_- = m - 1 \quad i \\
 a_1 = r^2 + (R' + R)^2 + (z - z')^2; \quad b_1 = -2r(R' + R).$$

Фур'є-компоненти густини струму  $j(\theta')$  вираховуються за формулою

$$I_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} j(\theta') \sin m \theta' d\theta'. \quad (6)$$

Для повздовжніх відігнутих витків  $R = R(z')$ , виконуючи відповідні перетворення, отримуємо вирази для напруженості магнітного поля:

$$\begin{aligned}
 H_r(r, \theta, z) &= \sum_{m=0}^{\infty} 2a_m \int_{z_1}^{z_2} \int_0^d dR' dz' (R' + R(z')) \left\{ -\frac{m}{r} \dot{r}_0^m(a', b') J_{m_+} \sin m \theta \cos \varphi(z') + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin \varphi(z') (z - z') \dot{r}_1^m(a', b') [J_{m_-} \sin m_- \theta - J_{m_+} \sin m_+ \theta] \right\}; \\
 H_\theta(r, \theta, z) &= \sum_{m=0}^{\infty} a_m \int_{z_1}^{z_2} \int_0^d dR' dz' (R' + R(z')) \left\{ \sin \varphi(z') (z - z') \dot{r}_1^m(a', b') [J_{m_+} \cos m_+ \theta + J_{m_-} \cos m_- \theta] + \right. \\
 &\quad \left. + 2 \cos \varphi(z') \left[ -r \dot{r}_1^m(a', b') + \frac{R' + R(z')}{2} (\dot{r}_1^{m_+}(a', b') + \dot{r}_1^{m_-}(a', b')) \right] J_m \cos m \theta \right\}; \quad (7) \\
 H_z(r, \theta, z) &= \sum_{m=0}^{\infty} a_m \int_{z_1}^{z_2} \int_0^d dR' dz' (R' + R(z')) \sin \varphi(z') \left\{ \left[ \frac{1}{r} \dot{r}_0^m(a', b') - r \dot{r}_1^m(a', b') + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{R' + R(z')}{2} (\dot{r}_1^{m_+}(a', b') + \dot{r}_1^{m_-}(a', b')) \right] (J_{m_-} \sin m_- \theta - J_{m_+} \sin m_+ \theta) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{R} \dot{r}_0^{m_-}(a', b') [m_+ J_{m_+} \sin m_+ \theta + m_- J_{m_-} \sin m_- \theta] \right\};
 \end{aligned}$$

де Фур'є-компонента густини струму має вигляд:

$$J_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} j(\theta') \cos m \theta' d\theta' \quad (8)$$

а коефіцієнти  $a'$  та  $b'$  обчислюються з виразів

$$a' = r^2 + (R' + R(z'))^2 + (z - z')^2; \quad b' = -2r(R' + R(z')).$$

У формулах (5 і 7)  $d$ -товщина обмотки;  $z_1, z_2, R, \varphi$  - геометричні параметри обмотки. Для Фур'є – компонентів густини струму (6, 8) можна отримати аналітичні вирази, беручи інтеграл залежного від симетрії густини струму. Досягнення певної точності розрахунків передбачає чисельне визначення двократного інтегралу (наприклад, за методом Гауса) і обмеження кількості членів ряду, який є швидкозбіжним [2,4].

*Висновки.* Компонуючи системи позитивних і кільцевих витків, можемо отримати довільну струменеву обмотку для різних магнітних систем: фокусувальну (соленоїд), відхиляльну (тороїдальну чи сідлоподібну). Використовуючи формули (5, 7), можемо отримати розрахункові вирази для напруженості магнітного поля різноманітних електромагнітних пристроїв та апаратів.

Цей метод дозволяє досліджувати вплив товщини обмотки, величини її нерівномірності розподілу густини струму в багатошаровій обмотці та окремому витку на напруженість магнітного поля. Напруженість магнітного поля вираховується у довільній точці тривимірного простору в околі магнітної системи.

Отриманні співвідношення між параметрами магнітного поля електромагнітних апаратів дозволять на розрахунковому рівні оцінити зміни, які можуть виникати внаслідок дії передбачених значень координат аварійних запитів. Це дозволяє вчасно здійснити профілактику силового електрообладнання і тим самим запобігти виникнення надзвичайних ситуацій.

Методика розрахунку параметрів магнітного поля у випадку магнітних систем із феромагнітним осердям наведена у [6].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Нейман Л.Р. и Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники Т. 1,2. Л.: Энергоиздат, 1981, 536 с (Т. 1), 416 с. (Т. 2).
2. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ М.Г. Александрова, А.Н. Белянин, В.Брюкнер. Под ред. Л.В. Данилова и Е.С. Филипова – М.: Радиосвязь, 1983, 344с.
3. Вовк О.М., Попов О.Я. К расчету поля магнитных отклоняющих систем. ЖТФ АН СССР, т. XLIV, Лен.: Наука, 1974, с.2428-2429.
4. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений – М.: Изд-во АН СССР, 1948, 727с.
5. Монтгомери Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов – М.: Мир, 1971, 359с.
6. Семерак М.М., Вовк О.М. Проектування систем передпосівної обробки та зберігання сільськогосподарської продукції. Львів: Вісник ЛДАУ, Агроінженерні дослідження №5, 2001, с.4-9.