

2. БЕЗПЕКА НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

УДК 621.311

БОНДАР О. І. – к.т.н., доцент (ДНУЗТ)

БОНДАР І. Л. – к.т.н., доцент (ДНУЗТ)

ПЕТРОВ А. В. – аспірант (ДНУЗТ)

САБЛІН О. І. – к.т.н., доцент (ДНУЗТ)

РОЗРОБКА МАЛОГАБАРИТНИХ ЕНЕРГООЩАДНИХ РЕАКТОРІВ ДЛЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Статтю представив д.т.н., проф. Костін М. О.

Актуальність теми роботи

Одним зі шляхів підвищення ефективності роботи залізничного транспорту є впровадження ресурсо- та енергозберігаючих технологій. На тягових підстанціях постійного струму ще досі застосовуються громіздкі бетонні реактори, що призначені для сповільнення зростання кривої струму короткого замикання та згладжування вищих гармонік у тягових струмах.

В той же час, як свідчить закордонний досвід, більш ефективним є впровадження малогабаритних реакторів, які виконують щільним намотуванням витків (у вигляді дискової обмотки). Окремі диски накладаються один на другий (з установкою каналів для вентиляції) та з'єднуються між собою. Така конструкція суттєво зменшує масу та габаритні показники реактора, а також втрати електроенергії у ньому.

Впровадження таких реакторів на тягових підстанціях залізниць України значним чином сповільнюється через відставання вітчизняної промисловості у розробці конструкцій реакторів відповідного призначення, отже задача створення малогабаритних струмообмежувальних реакторів для тягових підстанцій Укрзалізниці є важливою. В основі методики проектування мають лежати дослідження електричних, теплових та механічних процесів у реакторі, які можуть бути здійснені на основі математичного та фізичного моделювання. Тому питання розробки математичних моделей зазначених реакторів є актуальними.

Зауважимо також, що поряд з важливістю теоретичних досліджень, вивчення картини розподілу магнітного поля навкруги котушки індуктивності являє значний інтерес для практики.

Магнітні поля розсіяння трансформаторів, реакторів, впливаючи на оточуючі їх металеві предмети (кожухи, арматуру, кріплення, огороження та ін.), визивають їх нагрів внаслідок перемагнічування та наведення вихрових струмів, що супроводжуються втратами електричної енергії. При аварійних режимах, наприклад короткому замиканні, напруженість магнітного поля реактора може збільшитись в 10 разів. При цьому, окрім втрат енергії, істотне значення становлять динамічні зусилля як всередині обмоток, так і у взаємодії з феромагнітними деталями арматури.

Широке впровадження комплектних розподільчих установок (КРУ) на електричних станціях і підстанціях викликає необхідність розташовувати реактори безпосередньо в комірках КРУ. Сьогодні на тягових підстанціях залізниці практикується встановлення реактора у закритій металевій камері.

У цих випадках знання конфігурації та чисельних значень напруженості магнітного поля дозволяє визначити можливі мінімальні відстані огороження та металевих конструкцій до реактора, розрахувати втрати енергії на нагрів та перемагнічування матеріалу цих конструкцій.

Аналіз публікацій

Вивченню магнітного поля реакторів і його впливу на оточуючі феромагнітні тіла, питанню вибору монтажних відстаней при встановленні реакторів відведено значне місце в працях ряду науковців [1-3].

У зазначених роботах ведеться розрахунок магнітного поля циліндричної котушки без феромагнітного осердя.

Розрахункам магнітного поля та індуктивності циліндричної котушки присвячені роботи [4-7]. Однак, вирази для визначення напруженості поля в них представлені складними математичними залежностями: в одних випадках – це складні ряди, в інших – еліптичні функції, що ускладнює практичне використання цих формул.

Поміж тим, застосування електронних обчислювальних машин дозволяє отримати досить точну картину магнітного поля котушок шляхом безпосереднього підрахунку напруженості поля для заданих точок. Сучасним прикладом подібної роботи є [6].

Отже, метою цієї роботи є розробка загальних принципів побудови фізичних та математичних моделей струмообмежувальних малогабаритних енергоощадних реакторів для тягових підстанцій електрифікованих залізниць і прогнозування на їх основі електромагнітних величин у зазначених реакторах.

При фізичному моделюванні явища, що порівнюються, мають однакову природу та відрізняються лише кількісно. Таке моделювання дозволяє поглибити знання про комплекс виникаючих явищ та уточнити математичний опис окремих процесів. Знаходження критеріїв подоби при фізичному моделюванні полегшується тим, що системи, складені з подібних елементів, становляться подібними при збереженні подоби граничних умов.

Вибравши у якості незалежного коефіцієнта подоби масштаб лінійних розмірів m_l , визначимо масштаби окремих параметрів моделі індуктивної котушки.

Величини, що відносяться до моделі, будемо помічати індексом «М».

Масштаби індуктивності та омичного опору, виходячи з умови ідентичності

конструкції та геометричної подоби, відповідно дорівнюють:

$$m_L = \frac{L_M}{L} = m_l; \quad (1)$$

$$m_r = \frac{r_M}{r} = \frac{\rho_M}{\rho} \cdot \frac{1}{m_l}; \quad (2)$$

$$m_r = \frac{1}{m_l} \quad (\text{при однакових питомих опорах}$$

матеріалу моделі та зразка $\rho_M = \rho$). При моделюванні реакторів дуже важливим показником є додаткові втрати. Вони обумовлені поверхневим ефектом, ефектом близькості та іншими проявами змінного поля. В силу цього коефіцієнти подоби додаткових втрат (або, що те ж саме, масштаби кратності збільшення активного опору) треба визначати на основі аналізу рівнянь магнітного поля реактора.

Без урахування струмів зміщення та переносу електромагнітне поле в провідниковому середовищі описується рівняннями Максвелла:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}, \quad (3)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}, \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}. \quad (6)$$

Вводячи позначення векторного магнітного потенціалу $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$, знайдемо з рівняння (6) напруженість поля:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_a} = \frac{\text{rot } \vec{A}}{\mu_a} \quad (7)$$

Підставляючи отриманий вираз у рівняння (3) та (5), отримаємо

$$\text{rot rot } \vec{A} = \mu_a \gamma \vec{E}. \quad (8)$$

Подальші перетворення приводять до виду:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{A} = \text{rot} \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (9)$$

або

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (10)$$

Підставляючи (8) в (10), маємо

$$\text{rot rot } \vec{A} = -\mu_a \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (11)$$

або, переходячи до частоти обертання,

$$\text{rot rot } \vec{A} = -\mu_a \gamma \omega \frac{\partial \vec{A}}{\partial(\omega t)}. \quad (12)$$

Рівняння (12) є вихідним для визначення коефіцієнта подоби кратності активного опору.

При геометричній подоби моделі та зразка мають місце наступні співвідношення:

$$l_M = m_l \cdot l; \quad \omega_M = m_\omega \cdot \omega. \quad (13)$$

$$\mu_{aM} = m_{\mu_a} \cdot \mu_a; \quad \gamma_M = m_\gamma \cdot \gamma \quad (14)$$

Електромагнітне поле моделі описується рівнянням, аналогічним (12), але з уведенням відповідних масштабів

$$\frac{1}{m_l^2} \text{rot rot } \vec{A} = -m_{\mu_a} \cdot m_\gamma \cdot m_\omega \cdot \mu_a \cdot \gamma \cdot \omega \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial(\omega t)} \quad (15)$$

або

$$\text{rot rot } \vec{A} = -m_{\mu_a} \cdot m_\gamma \cdot m_l^2 \cdot \mu_a \cdot \gamma \cdot \omega \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial(\omega t)}. \quad (16)$$

Із порівняння (12) і (15) витікає, що

$$m_{\mu_a} \cdot m_\gamma \cdot m_\omega \cdot m_l^2 = 1. \quad (17)$$

Це можливо тільки при

$$\mu_a \cdot \gamma \cdot \omega \cdot l^2 = \text{const}. \quad (18)$$

Рівняння (14) і є критеріальним рівнянням подоби електромагнітних полів зразка та моделі. Виходячи з (17) та (18), отримаємо масштаб частоти, при якій електромагнітні поля моделі та оригінала адекватні

$$m_\omega = \frac{1}{m_{\mu_a} \cdot m_\gamma \cdot m_l^2}. \quad (19)$$

При однакових електричній провідності та магнітній проникності матеріалу оригіналу та моделі маємо

$$m_\omega = \frac{1}{m_l^2}. \quad (20)$$

Випробовуючи модель при частоті, що відповідає масштабу (20), можна визначити коефіцієнт додаткових втрат зразка. Подоба електромагнітних полів може бути досягнута і без збільшення частоти. Із (20) виходить, що критеріальне рівняння задовольняється при промисловій частоті при збільшенні провідності матеріалу моделі.

При дослідженні магнітного поля зовні провідників котушки частота живлячого струму не має значення, бо напруженість поля прямо пропорційна струму.

Щоб напруженість поля моделі дорівнювала напруженості поля оригіналу $H_M = H$, необхідно забезпечити умову:

$$I_M = m_l \cdot I, \quad (21)$$

де $m_l = m_l$.

Ця умова (21) не завжди виконувана, бо допустимий струм моделі обмежується нагрівом обмотки.

Однак при струмі в моделі, що відрізняється від потрібного за виразом (21), напруженість поля легко перераховується на потрібний струм.

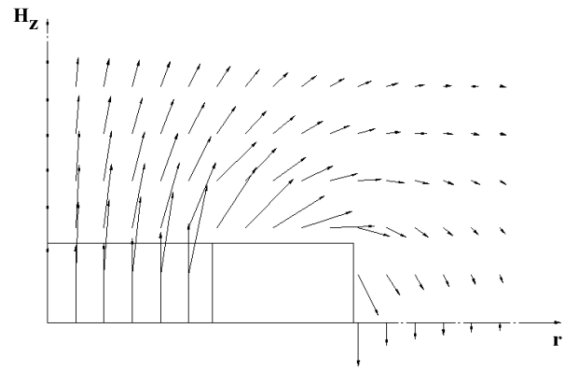


Рис. 1. Розподіл векторів напруженості магнітного поля котушки кінцевої товщини

Магнітне поле котушки такої моделі розраховане при співвідношеннях $h = \frac{1}{3}D, b = 0,3D$. Вектори напруженості магнітного поля навколо котушки зображені на рис. 1.

Криві вертикальної (осьової) складової напруженості магнітного поля, що визначені

на середній лінії котушки по радіусу, приведені на рис. 2.

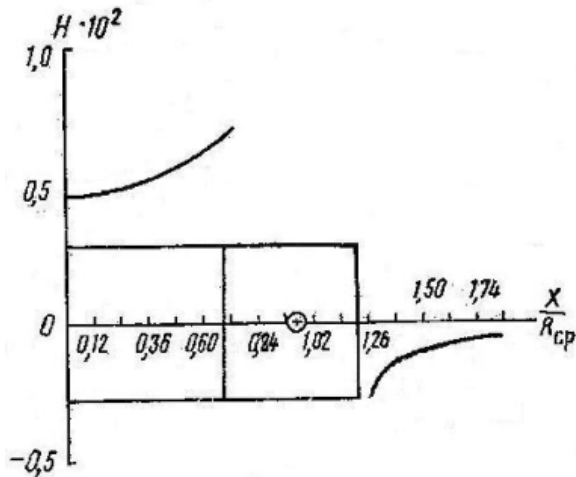


Рис. 2. Розподіл вертикальної складової векторів напруженості магнітного поля котушки кінцевої товщини

Ще одним питанням, яке дуже часто лишається поза увагою дослідників, є визначення його частотної характеристики. Під час її розрахунку слід враховувати ємність між дисками реактора – у кожній паралельній вітті три ємності увімкнені поспіль. Відповідно еквівалентна ємність, яка увімкнена паралельно реактору, дорівнює

$$C_{\text{екв}} = \frac{4}{3} \cdot C_0, \quad (22)$$

де
$$C_0 = \varepsilon \cdot \frac{F}{h_k}, \quad (23)$$

$$F = \pi \cdot D_{\text{cp}} \cdot d. \quad (24)$$

У формулі (24) D_{cp} – середній діаметр обмотки реактора, d – її ширина.

Наведену на рис.3 частотну характеристику малогабаритного реактора обчислено для наступних параметрів $L = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн, $C = 6,468 \cdot 10^{-8}$ Ф. Як бачимо, у цьому випадку резонансна кутова частота реактора ω_0 складає $5,561 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$, що відповідає резонансній частоті $f_0 = 8,85 \cdot 10^3$ Гц. Отже таке значення є достатньо віддаленим від частот присутніх у спектрі тягових струмів, а отже, безпечним.

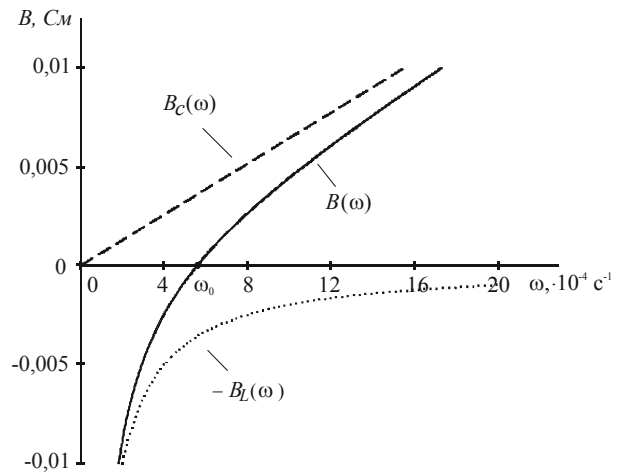


Рис. 3. Частотна характеристика малогабаритного реактора та її складові

Таким чином, запропонована вдосконалена методика розробки малогабаритних струмообмежувальних реакторів, призначених для тягових підстанцій постійного струму полягає в наступному

1. Спочатку за заданим робочим струмом реактора обирають переріз проводу та виконують його розподіл на паралельні вітки.

2. Потім визначають коефіцієнт заповнення, приймаючи висоту вентиляційних каналів 15-20 мм, товщину виткової ізоляції 1-2 мм, секційної – 0,5 мм.

3. Далі обчислюють індуктивність котушки та знаходять оптимальні параметри для неї.

4. Після цього уточнюють розміри котушки за конструктивними міркуваннями.

5. Додатково проводять фізичне (або математичне) моделювання з метою визначення розподілу магнітного поля реактора, що розробляється.

6. Також визначають втрати потужності у реакторі.

7. Нарешті виконують розрахунок механічної міцності, охолодження реактора, за необхідності коригуючи його розміри.

8. Наприкінці розраховують частотну характеристику запроєктованого пристрою.

Викладена вище методика базується на співвідношеннях запропонованих в [8-10], але відрізняється від існуючих раніше методик передусім наявністю пунктів 5 та 8, виконання яких дозволяє, по-перше, врахувати аспекти електромагнітної сумісності майбутнього пристрою, а також перекона-

тись у відсутності небезпечних резонансних режимів при його роботі у складі системи тягового електропостачання.

Крім цього, на основі математичної моделі розробленого реактора, можливо в подальшому вдосконалити методику визначення його індуктивності, суттєво підвищуючи точність такого розрахунку.

Бібліографічний список

1. Тозони, О. В. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах [Текст]: научное издание / О. В. Тозони. – К.: Техніка, 1967. – 252 с.

2. Колесников Э. В. Квазистационарные электромагнитные поля в осесимметричной системе с кольцевым полем тока [Текст] / Э. В. Колесников // Известия вузов. Электромеханика. – 1971. – № 1. – С. 3-12.

3. Стернин В. Г. Токоограничивающие реакторы [Текст]: / В. Г. Стернин, А. К. Карпенский. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 256 с.

4. Мاستрюков Л. А. Электромагнитное экранирование мощных реакторов без стали [Текст] / Л. А. Мастрюков // Электричество. – 1968. – №1. – С. 39-46.

5. Демирчян, К. С. Машинные расчеты элект-ромагнитных полей [Текст] / К. С. Демирчян, В. Л. Чечурин. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.

6. Ковалев, О. Ф. Комбинированные методы моделирования магнитных полей в электромагнитных устройствах [Текст]: науч. изд-ие / О. Ф. Ковалев. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 220 с.

7. Ткачев, А. Н. Комбинированные методы моделирования квазистационарного электромагнитного поля в нелинейных анизотропных ферромагнитных средах [Текст]: дис... докт. техн. наук. / А. Н. Ткачев. – Новочеркасск: НГТУ – 1998.-491 с.

8. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей [Текст]: Справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1986. – 488 с.

9. Ансберг Г. А. Переходные процессы в вы-прямительных установках электровозов [Текст] / Г.А. Ансберг. – М.: Транспорт, 1966. – 143 с.

10. Ансберг Г.А. Проектирование малогабаритных реакторов и дросселей [Текст] / Г. А. Ансберг // Тр. ДИИТа. – 1968. – вып.77. –С. 3-21.

Ключові слова: електромагнітні процеси, математична модель, проектування, енергоощадні реактори.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, математическая модель, проектирование, энергосберегающие реакторы.

Key words: electromagnetic processes, mathematical model, designing, power saving reactors.

Надійшла до редколегії 14.09.2011.

Прийнята до друку 15.09.2011.