

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ, ТЕПЛОВИХ І МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МАЛОГАБАРИТНОМУ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНОМУ РЕАКТОРІ

Представив д.т.н., професор Костін М.О.

Широке застосування комплектних розподільчих установок (КРУ) на електричних станціях та підстанціях викликає необхідність створення малогабаритних струмообмежувальних та згладжуючих реакторів. Вони не потребують окремого приміщення, компактні, мають значно менші втрати, ніж застосовувані досі, наприклад, на тягових підстанціях, бетонні реактори [1].

Дослідження електричних та інших процесів у реакторі, вплив його електромагнітних полів на металеві конструкції та розташовані поблизу апарати, прилади можна значно полегшити, використовуючи фізичне моделювання цих процесів. Створення фізичної моделі реактора дає змогу передбачити особливості конструкції, впливу на суміжні пристрої та обладнання. Розрахунки індуктивностей котушок різної конфігурації наведені в [2].

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, складні з подібних елементів, становляться подібними при дотриманні подоби граничних умов [3].

Вибравши за незалежний коефіцієнт подоби масштаб лінійних розмірів m_ℓ , визначимо масштаби окремих параметрів моделі індуктивної котушки (однієї фази трифазного реактора).

Величини, що стосуються моделі, будемо позначати з індексом "М".

Масштаби індуктивності та омичного опору, виходячи з умови ідентичності конструкції та геометричної подоби, відповідно дорівнюють [4]:

$$m_L = \frac{L_M}{L} = m_\ell; \quad m_r = \frac{r_M}{r} = \frac{\rho_M}{\rho} \cdot \frac{1}{m_\ell}.$$

Тобто ($m = 1/m_\ell$ за умов однакових питомих опорів моделі та оригіналу $\rho_M = \rho$)

При конструюванні реакторів важливим показником є додаткові втрати в обмотці реактора. Вони обумовлені поверхневим ефектом, ефектом близькості та іншими проявами змінного електромагнітного поля. В силу цього коефіцієнти подоби додаткових втрат (або, що те ж саме, масштаби кратності збільшення активного опору) слід визначати на основі аналізу рівнянь електромагнітного поля реактора.

Без урахування струмів зміщення та переносу електромагнітне поле в провідному середовищі описується рівняннями Максвела [5]:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \vec{J}; \\ \vec{J} &= \gamma \vec{E}; \\ \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \vec{B} &= \mu_a \vec{H}; \end{aligned} \quad (1)$$

де γ - питома провідність середовища; μ_a - абсолютна магнітна проникність.

Вводячи в рівняння (1) векторний магнітний потенціал \vec{A} $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$, визначимо напруженість магнітного поля

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_a} = \frac{\text{rot} \vec{A}}{\mu_a} \quad (2)$$

Підставивши останній вираз в перше рівняння системи (1), отримаємо

$$\text{rot} \text{rot} \vec{A} = \mu_a \gamma \vec{E}. \quad (3)$$

Подальші перетворення приводять до виду

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

або

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (5)$$

Підставляючи (5) в (3), отримаємо

$$\text{rot rot } \vec{A} = -\mu_a \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (6)$$

або, з урахуванням кутової частоти змінного поля

$$\text{rot rot } \vec{A} = -\mu_a \gamma \omega \frac{\partial \vec{A}}{\partial(\omega t)}, \quad (7)$$

Це рівняння є вихідним для визначення коефіцієнта подоби кратності активного опору.

При подоби геометричних розмірів моделі та оригіналу котушки мають місце наступні співвідношення [4]:

$$l_M = m_\ell l; \quad \mu_M = m_\mu \cdot \mu; \quad \gamma_M = m_\mu \cdot \gamma;$$

$$\omega_M = m_\mu \cdot \omega.$$

Електромагнітне поле моделі описується рівнянням, аналогічним (7), але з урахуванням відповідних масштабів

$$\frac{1}{m^2 l} \text{rot rot } \vec{A} = -m_\mu m_\gamma m_\omega \mu \gamma \omega \frac{\partial \vec{A}}{\partial(\omega t)},$$

або

$$\text{rot rot } \vec{A} = -m_\mu m_\gamma m_\omega m_\ell^2 \mu \gamma \omega \frac{\partial \vec{A}}{\partial(\omega t)}. \quad (8)$$

З порівняння виразів (7) та (8) витікає, що

$$m_\mu m_\gamma m_\omega m_\ell^2 = 1, \quad (9)$$

Це можливо лише за умови

$$\mu \gamma \omega l^2 = \text{const}, \quad (10)$$

Рівняння (10) і є критеріальним рівнянням подоби електромагнітних полів оригіналу та моделі. Виходячи з (9) та (10), отримаємо масштаб частоти, за якої електромагнітні поля моделі та оригіналу адекватні, а отже, рівні кратності активного опору

$$m_\omega = \frac{1}{m_\mu m_\gamma m_\ell^2}, \quad (11)$$

При однакових електричній провідності та магнітній проникності маємо

$$m_\omega = \frac{1}{m_\ell^2}, \quad (12)$$

Випробовуючи модель при частоті, що відповідає масштабу (12), можна визначити коефіцієнт додаткових витрат оригіналу. Подоби електромагнітних полів можна досягти і без підвищення частоти. З (11) витікає, що критеріальне рівняння задовольняється за промислової частоти при підвищенні провідності матеріалу моделі.

При дослідженні магнітного поля поза провідниками котушки частота живлячого струму не має значення, бо напруженість поля прямо пропорційна струмові.

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

$$I_M = m_i I, \quad (13)$$

де $m_i = m_\ell$.

Умову (13) не завжди можна виконати, бо допустимий струм моделі обмежується нагрівом обмотки.

Проте при струмі в моделі, що відрізняється від потрібного за виразом (13), напруженість поля легко перераховується.

Виміряні на моделі за допомогою індукційного датчика [6] значення вертикальної складової напруженості поля у порівнянні з розрахунками наведені на рис.1.

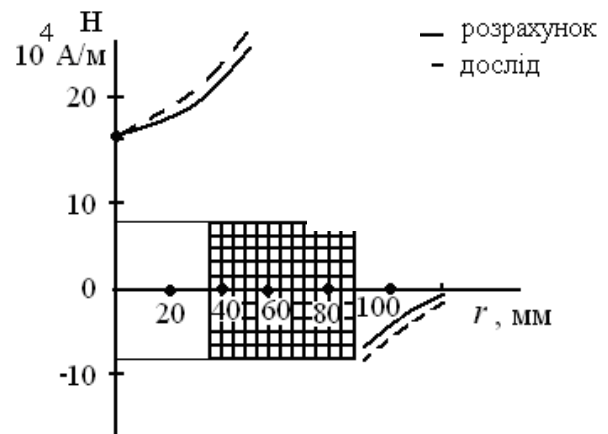


Рис.1. Напруженість магнітного поля моделі реактора

Як вказано в [4], сили взаємодії між окремими дисками (катушками) реактора оригіналу і моделі відносяться як $F_M = m^3 F$, позначаючи коефіцієнт геометричної подоби $m = m_\ell$.

Тоді напруженість в деталях кріплення визначається за масштабом, який можна знайти, наприклад, за деформацією розтягіння

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

$$\sigma_M = \frac{F_M}{S_M} = \frac{m^3 F}{m^2 S} = m\sigma, \quad (14)$$

де S , S_M - площа перерізу деталі, відповідно, оригіналу та моделі.

Відомо, що активний опір за підвищеної частоти по відношенню до омичного можна визначити формулою

$$r = \rho \frac{l}{S} k_d, \quad (15)$$

де k_d - коефіцієнт додаткових втрат.

Активний опір моделі при цьому

$$r_M = \rho_M \frac{l_M}{S_M} k_{dM}, \quad (16)$$

Омичний опір моделі визначається як

$$r_{0M} = \rho \frac{ml}{m^2 S} = \frac{r_0}{m}, \quad (17)$$

Для умови $k_{dM} = k_d$ необхідно, щоб

$$f_M = \frac{f}{m^2}, \quad (18)$$

Цю умову легко виконати, тоді отримаємо, що

$$r_M = \frac{r}{m}, \quad (19)$$

Масштаб індуктивного опору при цьому буде

$$X_M = \omega_M L_M = \frac{\omega}{m^2} mL = \frac{X}{m}, \quad (20)$$

Стала часу електричних перехідних процесів у моделі дорівнює

$$T_{eM} = \frac{L_M}{r_M} = m^2 \frac{L}{r} = m^2 T_e, \quad (21)$$

Так як умову (13) для моделі може виявитись виконати важко, визначимо масштаб струму за умови однакового питомого знімання тепла з одиниці охолоджувальної поверхні

$$\frac{I_M^2 r_M}{S_M} = \frac{I^2 r}{S},$$

звідки

$$I_M = \sqrt{m^3} I, \quad (22)$$

На моделі можна дослідити процеси примусового охолодження реактора. Швидкість охолоджувального повітря в каналах моделі повинна дорівнювати швидкості повітря в натурі, тому що [4]

$$\alpha_v = \alpha_0 (1 + 1,3\sqrt{v}), \quad \alpha_M = \alpha, \quad (23)$$

де α_v - коефіцієнт тепловіддачі вентилязованого тіла, Вт/(°C·см²)

v - швидкість повітряного потоку, м/с;

α_0 - коефіцієнт тепловіддачі тіла в спокійному повітряному середовищі.

Стала часу теплових процесів моделі за розгляду нагрівання котушки як однорідного тіла дорівнює

$$T_{TM} = \frac{c_{0M} G_M}{\alpha_M S_M}, \quad (24)$$

де c_{0M} - питома теплоємність;

G_M - маса моделі.

Оскільки модель виконується з тих же матеріалів, що й натурний зразок, і $\alpha_M = \alpha$, то

$$T_{TM} = \frac{c_0 G_M}{\alpha S_M} = \frac{c_0 m^3 G}{\alpha m^2 S} = m T_T, \quad (25)$$

Суттєвою власною характеристикою реактора є його частотна характеристика

$$X(\omega) = (X_L - X_C) f(\omega).$$

Вигляд частотної характеристики реактора подано на рис. 2.

Резонансна кутова частота обмотки реактора (індуктивної котушки) з урахуванням міжвиткової ємності визначається з умови резонансу

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C},$$

тобто

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Як було вказано раніше, для моделі

$$L_M = mL,$$

а ємність (між двома плоскими електродами)

$$C = \epsilon_a \frac{S}{d},$$

де ϵ_a - абсолютна діелектрична проникність середовища (ізоляції);

S - площа електродів

d - відстань між електродами.

Тоді ємність моделі

$$C_M = \varepsilon_a \frac{S_M}{d_M} = \varepsilon_a \frac{m^2 S}{md} = mC, \quad (26)$$

а)

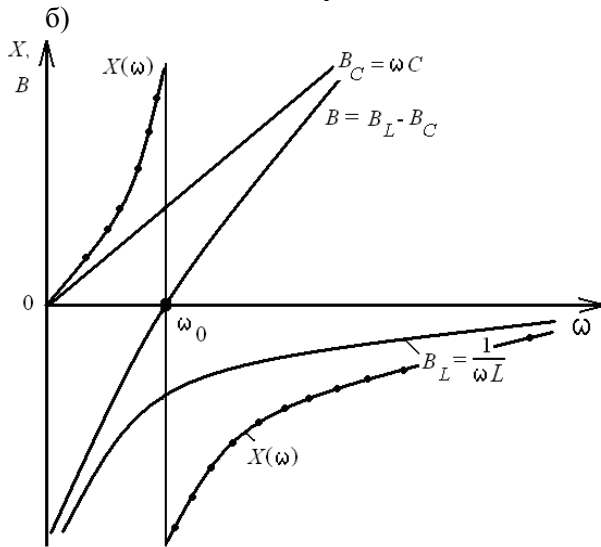
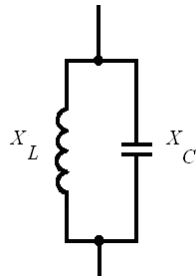


Рис. 2. Частотна характеристика реактора:
а) заступна схема; б) залежності реактивних опорів та провідностей від частоти

А резонансна кутова частота моделі

$$\omega_{0M} = \frac{1}{\sqrt{mL \cdot mC}} = \frac{\omega_0}{m}, \quad (27)$$

За формулами, наведеними в [4], виконано розрахунок малогабаритного реактора оптимальних розмірів. Індуктивність реактора прийнята 5 мГн, номінальний струм – 6,5 кА.

Витрати металу та втрати електроенергії в малогабаритному реакторі менші приблизно на 30%, ніж в стандартному бетонному РБА. При цьому геометричні розміри зменшуються в 1,5 – 2 рази.

За допомогою фізичного моделювання досліджуються магнітні поля, електричні, теплові та інші фізичні процеси в реакторі [4, 6]. Це дозволяє виконати перевірку розрахунків, знайти найбільш вдалі конструктивні рішення при підготовці серійного випуску індуктивних котушок та реакторів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Почаевец В. С. Электрические подстанции: Учебник для техникумов / В.С.Почаевец. – М: Желдориздат, 2001. – 268 с.
2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – М: Энергия, 1985.– 488 с.
3. Веников В. А. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. –М: Госэнергоиздат, 1949. – 167 с.
4. Ансберг Г. А. Проектирование малогабаритных реакторов и дросселей/ Труды ДИИТ, вып.77. – М: Транспорт, 1968. –С. 3 – 21.
5. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники часть 3. Теория электромагнитного поля. – М: Энергия, 1975. – 208 с.
6. Рязанов Г. А. Электрическое моделирование с применением вихревых полей./ Г. А. Рязанов. – М: Наука, 1969 – 336 с.

Ключові слова: моделювання, малогабаритний реактор, струмообмеження.

Ключевые слова: моделирование, малогабаритный реактор, токоограничение.

Keywords: modeling, small-sized reactor, current limit.