

№ 12. ВІДДІЛ ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

УДК 621.3.011+621.3.013+621.355+621.313:62-799

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У НАПРЯМКУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ТА БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ

Н.А. Шидловська, чл.-кор. НАН України, **Ю.М. Васецький**, докт. техн. наук, **М.В. Мислович**, докт. техн. наук, **І.В. Хімюк**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Висвітлюються основні наукові результати, отримані у відділі теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки протягом 2012 року. Бібл. 21, рис. 3, таблиця.

Ключові слова: електричне коло, перемикання, компенсація реактивної потужності, надпровідний індуктивний накопичувач енергії, вібросигнал, рухома частина електричної машини.

У зв'язку з тим, що переважна більшість електроенергетичного обладнання виробила свій паспортний ресурс, постала нагальна потреба подовження ресурсу діючого електроенергетичного обладнання. Ця задача є складовою частиною більш широкої комплексної проблеми – забезпечення надійної та безвідмовної роботи електроенергетичної системи України в цілому.

У 2012 році вчені відділу теоретичної електротехніки продовжували працювати над науковими задачами, спрямованими на вирішення цієї актуальної проблеми. Зокрема, проводилися наукові дослідження згідно з робочими планами за темами «Комплекс-3», «Сигма-ШЗ» та «Об'єкт» у традиційних для тематики відділу напрямках:

- розвиток теорії і створення ефективних аналітичних методів дослідження процесів у нелінійних електричних колах (група під керівництвом члена-кореспондента НАН України Н.А. Шидловської);
- розробка асимптотичних і чисельно-аналітичних методів розрахунку електромагнітних систем (група докт. техн. наук Ю.М. Васецького);
- розвиток теорії і методів практичного використання інформаційно-вимірювальних систем статистичної діагностики електроенергетичного обладнання (група докт. техн. наук М.В. Мисловича);
- розробка математичних моделей та чисельне дослідження зв'язаних електромагнітних та механічних полів у електроенергетичному обладнанні (група канд. техн. наук І.В. Хімюка).

Крім того, було успішно завершено три науково-технічні проекти у рамках комплексних програм наукових досліджень НАН України «Ресурс» і «Об'єднання».

У цій статті коротко викладено основні наукові результати, отримані у вказаних напрямках досліджень за останній рік.

Урахування сталих інтегрування при розрахунку оптимальної кількості перемикаць, необхідних для досягнення усталеного режиму, в пристроях для компенсації реактивної потужності. Одним із методів генерування реактивної потужності є реверсування реактивного елемента в послідовному RLC -колі синусоїдної напруги [15]. Така операція не змінює структури кола, проте стрибкоподібно змінює в момент перемикання початкові умови, що дає змогу використовувати для аналізу зазначених кіл теорії диференціальних рівнянь з імпульсною дією [13]. Оскільки вигляд розв'язку диференціального рівняння, що описує процеси у зазначеному колі теж незмінний, особлива увага приділяється сталим інтегруванням.

Проаналізуємо залежності сталих інтегрування від співвідношення між періодами напруги живлення, керуючого сигналу та періоду власних коливань системи при симетричному

керуванні перемикаваннями у послідовному RLC -колі синусоїдної напруги. Для зменшення громіздкості співвідношень знехтуємо втратами при аналізі коливального режиму у колі з реверсуванням ємності. Розв'язком диференціального рівняння, що описує процеси у зазначеному колі між перемикаваннями, буде

$$q = A_{1n} \cos \omega_0 t + A_{2n} \sin \omega_0 t + \frac{U_m}{L(\omega_0^2 - \omega_1^2)} \sin(\omega_1 t + \varphi_1);$$

$$i = \frac{dq}{dt} = -\omega_0 A_{1n} \sin \omega_0 t + \omega_0 A_{2n} \cos \omega_0 t + \frac{U_m \omega_1}{L(\omega_0^2 - \omega_1^2)} \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (1)$$

де q – заряд на конденсаторі; i – струм; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – власна частота; L – індуктивність; C – ємність; U_m – максимальне значення напруги; ω_1 – кутова частота; φ_1 – початкова фаза; n – номер перемикавання; A_{1n}, A_{2n} – сталі інтегрування.

За початкових умов

$$q|_{t=0} = Q_0; \quad \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

сталі інтегрування для першого включення мають вигляд

$$A_{10} = Q_0 - K_0 \sin \varphi_1; \quad A_{20} = -K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1. \quad (3)$$

Позначимо період власних коливань системи через $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$. Нехай також $\omega_1 > \omega_0$. Тоді період вхідної напруги T буде меншим за T_0 , а отже

$$T = T_0 - \Delta T. \quad (4)$$

Розглянемо рівняння для сталих інтегрування в залежності від співвідношення між періодами вхідної напруги T та керуючого сигналу τ . Оскільки

$$\sin \omega_0 \frac{T}{2} = \sin \omega_0 \left(\frac{T_0}{2} - \frac{\Delta T}{2} \right) = \sin \left(\frac{\omega_0 T_0}{2} - \frac{\omega_0 \Delta T}{2} \right) = \sin \left(\pi - \frac{\omega_0 \Delta T}{2} \right) = \sin \frac{\omega_0 \Delta T}{2};$$

$$\cos \omega_0 \frac{T}{2} = \cos \left(\frac{\omega_0 T_0}{2} - \frac{\omega_0 \Delta T}{2} \right) = \cos \left(\pi - \frac{\omega_0 \Delta T}{2} \right) = -\cos \frac{\omega_0 \Delta T}{2},$$

для сталих інтегрування можемо записати:

при $\tau = 2T$

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin 2\omega_0 \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \cos \omega_0 \Delta T; \\ A_{21} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos 2\omega_0 \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \sin \omega_0 \Delta T; \\ A_{12} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin 2\omega_0 \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \cos 3\omega_0 \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \cos 2\omega_0 \Delta T; \\ A_{22} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos 2\omega_0 \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \sin 3\omega_0 \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \sin 2\omega_0 \Delta T; \\ A_{13} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos 4\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin 4\omega_0 \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \cos 4\omega_0 \Delta T; \\ A_{23} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin 4\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos 4\omega_0 \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \sin 4\omega_0 \Delta T; \\ A_{14} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos 4\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin 4\omega_0 \Delta T - 4K_0 \sin \varphi_1 \cos 4\omega_0 \Delta T; \\ A_{24} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin 4\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos 4\omega_0 \Delta T + 4K_0 \sin \varphi_1 \sin 4\omega_0 \Delta T; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

при $\tau = T$

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \cos \omega_0 \frac{\Delta T}{2}; \\
 A_{21} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \sin \omega_0 \frac{\Delta T}{2}; \\
 A_{12} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \cos \omega_0 \cdot \frac{3}{2} \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \cos \omega_0 \Delta T; \\
 A_{22} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \sin \omega_0 \cdot \frac{3}{2} \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \sin \omega_0 \Delta T; \\
 A_{13} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin 2\omega_0 \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \cos 2\omega_0 \Delta T; \\
 A_{23} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos 2\omega_0 \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \sin 2\omega_0 \Delta T; \\
 A_{14} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin 2\omega_0 \Delta T - 4K_0 \sin \varphi_1 \cos 2\omega_0 \Delta T; \\
 A_{24} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin 2\omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos 2\omega_0 \Delta T + 4K_0 \sin \varphi_1 \sin 2\omega_0 \Delta T;
 \end{aligned} \tag{6}$$

при $\tau = \frac{T}{2}$

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos \omega_0 \frac{\Delta T}{2} + K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \frac{\Delta T}{2} - 2K_0 \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \frac{\Delta T}{4}; \\
 A_{21} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin \omega_0 \frac{\Delta T}{2} + K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \frac{\Delta T}{2} - 2K_0 \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \frac{\Delta T}{4}; \\
 A_{12} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos \omega_0 \frac{\Delta T}{2} + K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \frac{\Delta T}{2} - \\
 &\quad - 2K_0 \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \cdot \frac{3}{4} \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \cos \omega_0 \frac{\Delta T}{2}; \\
 A_{22} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin \omega_0 \frac{\Delta T}{2} + K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \frac{\Delta T}{2} - 2K_0 \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \cdot \frac{3}{4} \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \sin \omega_0 \frac{\Delta T}{2}; \\
 A_{13} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \Delta T - 4K_0 \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \cdot \frac{3}{4} \Delta T - 2K_0 \sin \varphi_1 \cos \omega_0 \Delta T; \\
 A_{23} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \Delta T - 4K_0 \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \cdot \frac{3}{4} \Delta T + 2K_0 \sin \varphi_1 \sin \omega_0 \Delta T; \\
 A_{14} &= (Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \cos \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \sin \omega_0 \Delta T; \\
 A_{24} &= -(Q_0 - K_0 \sin \varphi_1) \sin \omega_0 \Delta T - K_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \cos \varphi_1 \cos \omega_0 \Delta T.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Зазначимо, що рівняння (5)...(7) демонструють суттєву залежність сталих інтегрування від різниці між періодом власних коливань системи та періодом вхідної напруги.

Оскільки період джерела живлення чітко визначений $T = const$, можливі такі характерні випадки:

1) $\Delta T = \frac{T_0}{k_1}$, $k_1 = const$. Тоді

$$T = T_0 \left(\frac{k_1 - 1}{k_1} \right); \quad \omega_1 = \frac{k_1}{k_1 - 1}; \quad K_0 = \frac{U_m (k_1 - 1)^2}{L \omega_0^2 (1 - 2k_1)}. \tag{8}$$

2) $\Delta T = \frac{T}{k_2}$, $k_2 = const$. Тоді

$$T = T_0 \left(\frac{k_2}{k_2 + 1} \right); \quad \frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{k_2 + 1}{k_2}; \quad K_0 = \frac{-U_m k_2^2}{L \omega_0^2 (2k_2 + 1)}. \quad (9)$$

3) $\Delta T \rightarrow 0$, $T_0 \rightarrow T$, проте $T_0 \neq T$ – режим, близький до резонансного. Тоді

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta T}{T_0}} \Rightarrow 1; \quad K_0 \approx \frac{-U_m}{2L \omega_0^2 \frac{\Delta T}{T_0}}. \quad (10)$$

Зазначимо, що при $k_1 = k_2 + 1$ перший і другий випадки співпадають.

Отже, змінюючи k_1 , можемо на власний розсуд (у певних межах) вибрати момент досягнення усталеного режиму. Так, для випадку $\tau = T/2$ усталений режим досягається за чотири перемикання (один період вхідної напруги T) при $k_1 = 2$. Зазначимо, що кожному значенню k_1 ставиться у відповідність конкретне значення ω_0 і, як наслідок, параметри кола L і C .

Математичне моделювання кругових котушок з надпровідною обмоткою. У рамках прикладної теми «Об'єкт» та за проектом у рамках комплексної програми наукових досліджень НАН України «Об'єднання» у 2012 р. проводились дослідження у напрямку математичного моделювання обмоток магнітних систем надпровідних індуктивних накопичувачів енергії (НППН) для подальшого використання в галузі електроенергетики.

Індуктивні накопичувачі можуть застосовуватися як пристрої, що забезпечують безперебійне електропостачання найбільш відповідальних споживачів; пристрої, що використовуються для стабілізації напруги, частоти енергосистеми, підвищення динамічної й статичної стійкості електроенергетичних систем, демпфірування низькочастотних коливань навантаження тощо [6].

Магнітні системи з круговими котушками широко застосовуються у надпровідних системах накопичення енергії. Тороїдальні магнітні системи з круговою формою перерізу тора складаються з окремих кругових котушок. Накопичувачі у вигляді прямих соленоїдів є окремою надпровідною круговою котушкою. Зазначимо, що короткі прямі соленоїди мають меншу масу надпровідного матеріалу при однакових значеннях накопичуваної енергії порівняно з тороїдальними індуктивними накопичувачами [5], тому вони розглядаються як найбільш доцільні для систем з дуже великою накопиченою енергією магнітного поля.

При використанні індуктивних накопичувачів в електроенергетиці важливими характеристиками накопичувача вважаються масогабаритні параметри, що в кінцевому рахунку визначають його вартісні показники і доцільність використання таких пристроїв [4]. Серед основних масогабаритних параметрів, перш за все, є розміри магнітної системи (для тороїдальної системи – це великий радіус тора R і поперечний розмір його перетину, який визначається як εR , де ε – безрозмірний параметр; для циліндричного соленоїда – це радіус циліндра R і його висота $h = 2R\varepsilon$), об'єм матеріалу надпровідної обмотки V_{sc} , об'єм конструктивних матеріалів механічної утримуючої системи, елементи якої зазнають напруження розтягу V_t і стиску V_c . Вхідними параметрами при розробці НППН є такі: накопичувана енергія магнітного поля W , властивості надпровідника (максимально допустимі індукція магнітного поля в обмотці B_m та густина струму в провідниках j_m), властивості конструктивного матеріалу утримуючої системи.

Основним напрямком цієї частини роботи є дослідження кругових котушок з надпровідною обмоткою, які припускають створення комбінованих обмоток з різною густиною струму в окремих її частинах, що призводить до зменшення загальної маси матеріалу надпровідної обмотки. Представлено результати дослідження відокремлених котушок, однак

якісно ці результати будуть справедливими і для систем котушок, наприклад, у тороїдальних накопичувачах.

Енергетичні параметри в цьому дослідженні розраховуються з використанням методу струмових ниток [14]. Для соленоїда кругової форми увесь переріз обмотки розбивається на систему кругових ниток, розташованих на однаковій відстані одна від одної в радіальному напрямку і також на однаковій, але необов'язково тій же відстані одна від одної у поздовжньому напрямку.

При визначенні власної енергії струму W_{ii} , що протікає через переріз певної форми, необхідно враховувати форму цього перерізу і розподіл по ньому густини струму [3]. Для перерізу прямокутної форми і рівномірної за площею перерізу густини струму при досить малих розмірах перерізу порівняно з розмірами контура струму власна енергія струму визначається подвійним інтегралом за контуром

$$W_{ii} = \frac{\mu_0 I_i^2}{8\pi} \iint_{l_i} \frac{\mathbf{t}_Q \cdot \mathbf{t}_M}{(r^2 + d_g^2)^{1/2}} dl_M dl_Q.$$

У виразі враховано, що осьова лінія контура зі струмом проходить через центр перерізу. Параметр d_g є середнім геометричним розміром перерізу, який для прямокутної області визначається з виразу

$$\ln \frac{2\sqrt{a^2 + b^2}}{d_g} = \frac{25}{12} + \frac{1}{12} \left[\frac{a^2}{b^2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) + \frac{b^2}{a^2} \ln \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{a}{b} \operatorname{arctg} \frac{b}{a} + \frac{b}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{b} \right),$$

де $2a$ і $2b$ – сторони прямокутника.

Для кільцевої нитки струму радіуса R_i вирази для визначення W_{ii} значно спрощуються [3], а для двох кругових соосних контурів радіусів R_i та R_k , що знаходяться на відстані h_{ik} один від одного, взаємна енергія розраховується згідно з роботою [8].

Для визначення магнітного поля, створеного струмом в обмотці кінцевої товщини в довільній точці простору, застосовується метод з використанням системи блоків у вигляді прямокутних паралелепіпедів. У цьому методі використовуються вирази, одержані інтегруванням за формулою Біо-Савара-Лапласа, але не по всій системі замкнених струмів, а у межах прямокутного паралелепіпеда [8].

Результати дослідження представлено для надпровідних котушок прямокутного перерізу (рис. 1). Для прикладу на рис. 2 представлено розподіл індукції магнітного поля вздовж периметра перерізу окремих котушок, які можна розглядати як накопичувачі з такими параметрами: $W = 450$ МДж, $B_m = 5$ Тл, $j_m = 4 \cdot 10^7$ А/м², припустиме значення механічної напруги розтягнення бандажу утримуючої системи $\sigma = 350$ МПа. Показано розподіл індукції для двох соленоїдів $\varepsilon = 0,2$ і $\varepsilon = 0,4$ у напрямку точок $a-b-c-d$. Видно, що максимум індукції досягається необов'язково у точці a . Максимальне значення може бути досягнуто як на внутрішній боковій поверхні поблизу верхнього (нижнього) торця, так і на торці. Розташування точки максимуму індукції визначається співвідношенням розмірів h_1, h_2 і R . Для довгих соленоїдів вже при $\varepsilon = 1$ у точці a реалізується максимум індукції. Але у всіх випадках перевищення індукції порівняно з її значенням у точці a є незначним і для досліджуваних випадків воно не перевищує 4,5 %.

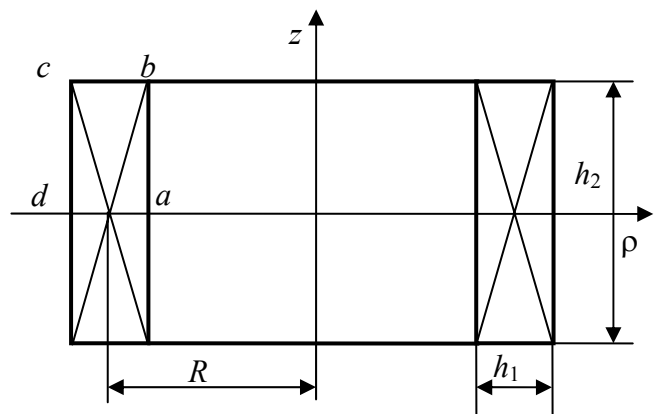


Рис. 1

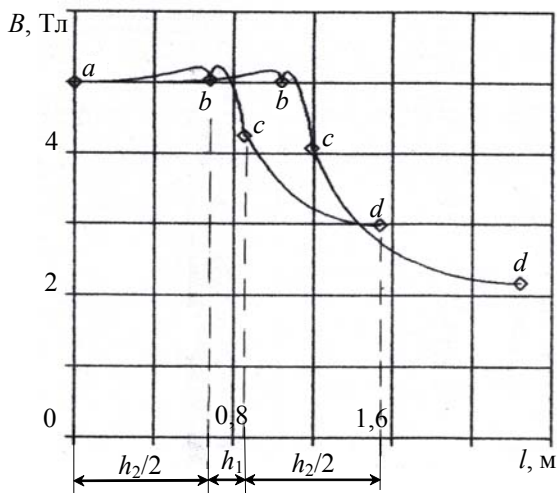


Рис. 2

Треба зазначити, що припустимі значення магнітного поля і густини струму надпровідної обмотки пов'язані одне з одним. При зменшенні індукції поля густина струму може бути збільшена відповідним чином [2]. Магнітне поле по обмотці розподіляється нерівномірно, в той же час параметри накопичувача визначаються, виходячи з максимально припустимого значення індукції магнітного поля, яке реалізується тільки в одній точці [4]. Однак в області обмотки, де індукція магнітного поля є меншою, ніж припустиме значення, можна збільшити густину струму шляхом розміщення додаткової частини обмотки на зовнішній стороні. При цьому для отримання заданого значення енергії накопичувача буде потрібна менша маса надпровідного матеріалу обмотки.

Виходячи з такої постановки, проведемо дослідження розподілу індукції магнітного поля по об'єму надпровідної обмотки з різною відносною довжиною від $\varepsilon = 0,1$ до $\varepsilon = 1$ та вхідними параметрами $W = 630$ МДж, $B = 5$ Тл, $j = 4 \cdot 10^7$ А/м², $S = 350$ МПа й отримаємо основні масогабаритні параметри і значення індукції магнітного поля в точках перерізу обмотки, які представлено в таблиці. Символом # позначено точки, між якими індукція магнітного поля досягає максимального значення $B = 5$ Тл. Додатковим параметром у таблиці є відношення площі перерізу, при якій індукція не перевищує 2,5 Тл по відношенню до всієї площі перерізу. Видно, що доля цієї площі перерізу є досить великою, а для вдвічі меншої індукції поля можна суттєво збільшити густину струму в цій ділянці, використовуючи додаткову частину обмотки.

Параметр	Значення вихідних параметрів			
	0,1	0,2	0,4	1,0
I , А	$7,738 \cdot 10^6$	$1,003 \cdot 10^7$	$1,348 \cdot 10^7$	$2,104 \cdot 10^7$
R , м	5,521	4,123	3,073	2,156
h_1 , м	0,1751	0,152	0,137	0,122
h_2 , м	1,104	1,649	2,458	4,311
V_{sc} , м ³	6,706	6,495	6,501	7,123
V_a , м ³	2,373	2,531	2,743	3,146
$S_{2,5} / S$	-	0,471	0,527	0,535
Точки	Значення індукції, Тл			
	2	3	6	8
2	4,571	#4,749	#4,946	3,371
3	4,492	#4,799	#4,916	2,725
6	4,631	#4,853	#4,869	2,045
8	5,0	4,705	4,602	1,068
9	4,232	4,149	4,036	3,717

На рис. 3 проілюстровано, що при $\varepsilon = 1$ для ліній однакової індукції з зовнішньої сторони крива, яка обмежує область з $B \leq 2,5$ Тл, практично виділяє прямокутну область, де може бути розміщена додаткова обмотка.

Проведені дослідження розподілу індукції магнітного поля по об'єму систем зі зменшеною величиною густини струму $j = 2,3 \cdot 10^7$ А/м² та $j = 2 \cdot 10^7$ А/м² при зазначених вище вхідних параметрах і $\varepsilon = 0,2$ свідчать, що частки площини перерізу, в яких індукція не

перевищує певне задане значення, при однакових відносних довжинах соленоїдів мають надпровідні обмотки з більшим припустимим значенням густини струму.

Таким чином, можна зробити висновок, що зі збільшенням довжини соленоїда зростає також і частка площини перерізу з меншою індукцією поля. З точки зору можливості розміщення на зовнішній стороні соленоїда додаткової частини обмотки з більшим значенням густини струму також перевагу мають соленоїди з більшим відношенням довжини до радіуса. Оскільки, з одного боку, використання додаткової обмотки з більшим значенням густини струму призводить до зменшення маси надпровідного матеріалу, а з іншого, це можливо при досить значній відносній довжині соленоїда, геометрія якої пов'язана зі збільшенням тієї ж маси, то, напевно, існує оптимальна відносна довжина по відношенню до маси надпровідного матеріалу. Ця обставина у випадку конкретних розробок має бути детально досліджена.

Надалі плануються розробка математичної моделі і проведення розрахунків розподілу магнітного поля всередині обмоток надпровідних котушок з використанням асимптотичних методів, що враховують як конфігурацію осьових ліній, так і реальний переріз котушок. Це дасть змогу значно зменшити обсяг необхідних обчислень і розробити ефективні алгоритми розрахунку.

Прототип інформаційно-вимірювальної системи вібродіагностики електричних машин з бездротовою передачею інформації, вимірюваної на їх рухомих вузлах. При побудові електричних машин (ЕМ) використовуються останні досягнення в усіх сферах науки та техніки, що дають змогу підвищити надійність їх функціонування. Ефективними методами досягнення високих параметрів надійності вузлів ЕМ виступають не лише ефективні конструкційні рішення, але й сучасні системи діагностики, що базуються на передових методах обробки діагностичних сигналів та використовують новітню елементну базу.

Однією з таких систем є інформаційно-вимірювальна система (ІВС) вібродіагностики, для розробки лабораторного зразка якої використовувався принцип модульності створеної системи з метою забезпечення можливості модифікації ІВС з урахуванням конкретних потреб користувача та сучасних досягнень в області мікросхемотехніки.

ІВС діагностики має блоки, що забезпечують вимірювання, перетворення та бездротову передачу інформації (технічні засоби), та блоки, які реалізують програмне управління ІВС, статистичну обробку вимірюваних сигналів та побудову вирішуючих правил з визначення технічного стану обладнання, що діагностується (програмні засоби).

Система включає в себе: блок сенсорів, що розташовується безпосередньо на об'єкті діагностики, та блок приймання й обробки інформації, в якості якого може виступати будь-яка ПЕОМ, до якої підключений Bluetooth приймач-передавач. Головною частиною цього блока є програмне забезпечення, що використовується для обробки вимірюваних сигналів.

З точки зору ширини частотного діапазону та максимальної амплітуди вимірюваного сигналу в якості вимірювальних перетворювачів у блоці сенсорів оптимальним є використання групи акселерометрів ADXL001 виробництва компанії Analog Devices.

Вібраційний сигнал, вимірюваний на рухомому вузлі ЕМ, що діагностується, на виході сенсора представляється в аналоговому вигляді. Частота вібраційного сигналу, що вимірюється акселерометром ADXL001, може бути встановлена в межах від 0,01 Гц до 22 кГц, максимальна амплітуда вимірюваного сигналу $\pm 500 g$ (де g – прискорення вільного падіння).

Акселерометр ADXL001 – одновісна система вимірювання прискорення, представлена на єдиній монолітній інтегральній схемі. Блок вимірювання прискорення в аналоговому вигляді побудовано на принципі зміни ємності вимірюючого елемента, яка виникає внаслідок

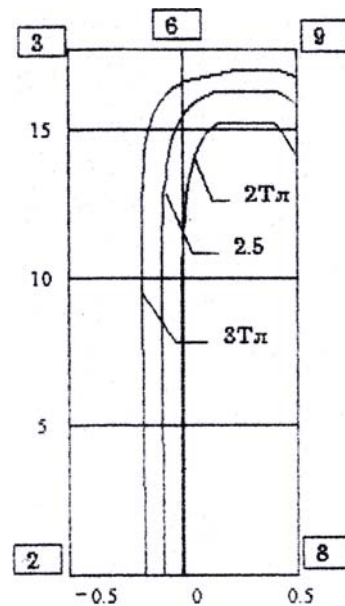


Рис. 3

док фізичного переміщення частини вимірюючого елемента під дією прискорення, що вимірюється. Далі вимірний сигнал проходить через модулятор, диференціальний сенсор, демодулятор і, нарешті, надходить до блока підсилення аналогового сигналу. Модуль диференціального сенсора використовується для порівняння показань двох значень віброприскорення, що вимірюється окремими частинами одного сенсора для досягнення більшої точності вимірювання. При цьому використовуються спеціальні алгоритми, згідно з якими сигнал спочатку перетворюється в інший вигляд за допомогою модулятора, а після отримання остаточного значення вимірюваного віброприскорення сигнал надходить до демодулятора та блока вихідного підсилювача, на виході якого отримуємо аналогове значення вимірюваного параметра.

Отриманий аналоговий сигнал надходить до входу дванадцятибітного АЦП мікроконтролера блока сенсорів, де він перетворюється у цифровий сигнал для подальшої передачі за допомогою радіоканалу стандарту Bluetooth до блока приймання та обробки інформації.

Цифровий сигнал за командою з блока приймання та обробки інформації або періодично через визначені проміжки часу передається в ПЕОМ, де здійснюється статистична обробка прийнятих з блока сенсорів інформаційних сигналів, за результатами якої діагностується технічний стан обертових вузлів ЕМ.

У блоці сенсорів використовується мікроконтролер з архітектурою ARM виробництва компанії ST Microelectronics, що має вбудований температурний сенсор, дані з якого дають змогу визначати дефекти рухомих вузлів, котрі проявляються через зміну температури.

Програмне забезпечення ІВС – ключовий елемент, необхідний для функціонування системи та виконання нею поставлених задач. До його складу входять:

- програми управління мікроконтролером, що дають змогу реалізовувати задані режими функціонування блока сенсорів, а також задавати необхідні параметри (такі як частоту передачі даних, потужність радіосигналу, обсяг вибірки);

- програми вводу-виводу вимірної інформації та керуючих команд. Взаємодія блока сенсорів з ПЕОМ для виконання функцій передачі вимірних даних та сигналів управління реалізована у вигляді віртуального СОМ-порта (послідовний порт). Тобто з точки зору роботи в операційній системі дані з блока сенсорів надходять за інтерфейсом RS-232;

- модуль інтерфейсу роботи з користувачем. При розробці цього блока програм були поставлені такі цілі: зручність інтерфейсу оператора, надійність функціонування при вирішенні задач моніторингу, контролю та діагностики, можливість адаптації до потреб користувача. З урахуванням сформульованих вимог для створення модуля інтерфейсу роботи з користувачем було використано засіб розробки LabVIEW компанії National Instruments, орієнтований на використання в автоматизованих системах наукових досліджень.

Результати експериментальних досліджень з використанням розробленого лабораторного зразка ІВС діагностики, що базується на радіоканалі стандарту Bluetooth для передачі вимірних діагностичних сигналів, довели ефективність цього пристрою для діагностики рухомих вузлів ЕМ. Використаний математичний апарат та створене програмне забезпечення надає можливість виконувати діагностику рухомих вузлів ЕМ із заданою точністю та достовірністю. Застосування модульної архітектури ІВС надало можливість створити відносно недорогий, ефективний та уніфікований зразок системи діагностики, який можна досить просто модифікувати залежно від конкретної поставленої задачі.

Дослідження магнітопружних деформацій елементів потужного енергетичного устаткування. Робота багатьох електротехнічних пристроїв супроводжується підвищеним звуковим навантаженням, що має шкідливий вплив на оточення. Одним з важливих джерел шуму, зокрема, силових трансформаторів та електричних реакторів є віброактивність магнітних систем (МС) за рахунок магнітострикції електротехнічної сталі МС у змінному магнітному полі. Механічні коливання МС через охолоджуюче масло, конструктивні елементи та бак трансформатора чи реактора передаються в оточуюче середовище. Шум трансформаторів та реакторів відображає якість застосованих матеріалів, інтенсивність електромагнітних навантажень, їх технічний стан. За інтенсивністю і частотним аналізом звукового випромінювання визначають діагностичні показники роботи потужного енергетичного обладнання в

цілому або його окремих елементів. На цей час магніострикція та явища, що її супроводжують (вібрації, шум), в основному вивчаються експериментально. Тому розробка математичних моделей та проведення чисельних досліджень магнітопружних деформацій можуть бути основою для подальшого дослідження вібрацій та шумів у потужному електроенергетичному устаткуванні. За останній період проблемі впливу ефекту магніострикції на магнітопружні деформації в елементах енергетичного обладнання присвячена досить велика кількість робіт [16 – 21]. Ґрунтовний огляд наукових розробок з цього напрямку наведено у роботі [20]. Основна частина робіт носить суто теоретичний характер, що дає змогу детального вивчення ефекту магніострикції та практичного застосування запропонованих підходів та ідей у практичних цілях при розробці потужного енергетичного устаткування. Проведений аналіз вказує на доцільність досліджень, розробки алгоритмів та проведення чисельного моделювання магнітопружних деформацій МС потужного електроенергетичного устаткування на основі спільного розв'язку задачі механіки та магнітного поля. Спільна задача механіки та магнітного поля має вигляд [1, 7, 9–12]

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}; \quad \operatorname{div} \sigma = \vec{F}, \quad (11)$$

де \vec{H} – вектор напруженості магнітного поля; \vec{J} – вектор густини струму; σ – тензор напружень; \vec{F} – вектор об'ємної сили.

Систему (11) необхідно доповнити відомими співвідношеннями для магнітного та механічного полів:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}), \quad (12)$$

де \vec{B} – вектор магнітної індукції; ε_{ij} – тензор деформацій; u – зміщення.

Для системи рівнянь (11), (12) граничні умови мають бути двох типів – «магнітні» та «механічні»:

$$\vec{B} \cdot \vec{n} = 0; \quad \vec{H} \times \vec{n} = 0; \quad (13)$$

$$\sigma \cdot \vec{n} = f; \quad u = 0. \quad (14)$$

У виразі (14) f – густина поверхневої сили. У крайовій задачі (11)...(14)

$$\vec{H} = \vec{H}(\vec{B}, \varepsilon); \quad \sigma = \sigma(\vec{B}, \varepsilon). \quad (15)$$

Для лінійного середовища залежності (15) мають вигляд [19]

$$\vec{H} = \nu_{ij} \vec{B} + \alpha_{ikl} \varepsilon; \quad \sigma = C_{ijkl} + \alpha_{ikl}^T \vec{B}, \quad (16)$$

де $\nu_{ij} = \frac{\partial \vec{H}_i}{\partial \vec{B}_j}$ – питомий магнітний опір; C_{ijkl} – пружні коефіцієнти; $\alpha_{ikl} = \frac{\partial \vec{H}_i}{\partial \varepsilon_{kl}} = \frac{\partial \sigma_{kl}}{\partial \vec{B}_i}$ – магнітно-пружні коефіцієнти.

У випадку лінійних пружних властивостей середовища (коефіцієнти пружності – постійні величини) і нелінійних магнітних властивостей середовища тензор напружень має вигляд

$$\sigma(\vec{B}, \varepsilon) = C_{ijkl} \varepsilon + \sigma^0(\vec{B}), \quad (17)$$

де $\sigma^0(\vec{B})$ – коерцитивна складова тензора напружень, зумовлених індукцією \vec{B} .

Чисельний розв'язок задачі (11), (12) у 2D постановці стосовно визначення деформацій бака потужного трансформатора наведено у роботі [19]. На цей час з використанням енергетичного методу розроблено розрахункову модель, основні алгоритми та схему розв'язку задачі (11), (12) з врахуванням умов (17) для одного з типів шунтуючого реактора.

1. Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах. – М.-Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1951. – 254 с.
2. Брехна Г. Сверхпроводящие магниты // Сверхпроводящие машины и устройства: Пер. с англ. / Под ред. С. Фонера, Б. Шварца. – М.: Мир, 1977. – С. 161–237.

3. *Васецкий Ю.М.* Асимптотические методы решения задач электродинамики в системах с массивными криволинейными проводниками. – К.: Наук. думка, 2010. – 271 с.
4. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л., Аристов Ю.В.* Параметры сверхпроводящих тороидальных магнитных систем малого поперечного сечения с наклонными катушками // Техн. электродинамика. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 4. – С. 3–6.
5. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л., Павлюк А.В.* Параметры сверхпроводящих магнитных систем с удерживающими элементами внутри тороидального объема // Техн. электродинамика. – 2011. – № 5. – С. 36–47.
6. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л., Павлюк А.В.* Застосування надпровідних індуктивних накопичувачів (НПІН) для демпфування нерегулярних коливань перетоку потужності // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 43–44.
7. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
8. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
9. *Качанов Л. М.* Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория упругости. – М.: Наука, 1965. – 202 с.
11. *Лейбензон Л. С.* Курс теории упругости. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – 464 с.
12. *Поливанов К. М.* Теоретические основы электротехники. Ч. 3 – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
13. *Самойленко А.М., Кривошея С.А., Перестюк Н.А.* Дифференциальные уравнения: примеры и задачи. – М.: Высш. шк., 1989. – 383 с.
14. *Том Р., Тарр Дж.* Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 270 с.
15. *Шидловский А.К., Федий В.С.* Частотно-регулируемые источники реактивной мощности. – К.: Наук. думка, 1980. – 304 с.
16. *Besbes M., Ren Z., Razek A.* Finite element analysis of magneto mechanical coupled phenomena in magnetostriction materials // IEEE Trans. Magn., May 1996. – Vol. 32. – P. 1058–1061.
17. *Coulomb J.L.* A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application quantities to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness // IEEE Trans. Magn., July 1983. – Vol. 19. – P. 2514–2519.
18. *Gros L., Reyne G., Body C., Meunier G.* Strong coupling magneto mechanical methods applied to model heavy magnetostrictive actuators // IEEE Trans. Magn., Sept. 1998. – Vol. 34. – P. 3150–3153.
19. *Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I.* Modeling of magnetoelastic deformations of magnetic materials in electro-energy devices // Przegląd Elektrotechniczny. – 2010. – № 1. – P. 152–154.
20. *Lundgren A.* On measurement and modelling of 2D magnetization and magnetostriction of SiFe sheets. – Stockholm, 1999. – 199 p.
21. *Ren Z., Razek A.* Local force computation in deformable bodies using edge elements // IEEE Trans. Magn., March 1992. – Vol. 28. – P. 1212–1215.

УДК 621.3.011+621.3.013+621.355+621.313:62-799

Н.А. Шидловская, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.М. Васецкий**, докт. техн. наук, **М.В. Мыслович**, докт. техн. наук, **И.В. Химюк**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Развитие научных исследований в направлении обеспечения надежности и безотказности работы электроэнергетических систем и их элементов

Излагаются основные научные результаты, полученные в отделе теоретической электротехники Института электродинамики на протяжении 2012 года. Библ. 21, рис. 3, таблица.

Ключевые слова: электрическая цепь, переключение, компенсация реактивной мощности, сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии, вибросигнал, движущаяся часть электрической машины.

N.A. Shydlovska, Yu.M. Vasetsky, M.V. Myslovysh, I.V. Khimjuk

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Development of scientific researches in direction of reliability and faultness of power electrical systems and their components

The mail scientific results are discusses which were obtained in the department of theoretical electrical engineering of the Institute of electrodynamics in year 2012. References 21, figures 3, table.

Key words: electrical circuit, switching, reactive power compensation, superconductive inductive energy storage unit, vibration signal, moving part of electrical machine.

Надійшла 8.04.2013

Received 8.04.2013