

№ 12. ВІДДІЛ ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

УДК 621.3.011.72+621.3.013+621.314: 621.391

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ВУЗЛАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО НАДІЙНОСТІ

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

Протягом 2014 року у відділі теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки НАН України було проведено такі роботи. Розглянуто теоретичні підходи створення сучасних математичних моделей, методів, алгоритмів та апаратних засобів, спрямованих на підвищення безпеки та надійності функціонування електроенергетичного обладнання. Для подальшого підвищення ефективності аналізу та оптимізації перехідних електромагнітних процесів у параметричних колах продемонстровано можливість точного розв'язку диференціального рівняння, яке описує перехідний процес у послідовному RLC-колі для випадку представлення параметричної залежності опору сумою експонент. Отримано точний аналітичний розв'язок задачі розрахунку електромагнітного поля просторового контура зі струмом над плоскою поверхнею відповідного тіла з сильним скін-ефектом. Показано, що в загальному випадку для вихідного контура просторової конфігурації джерелами електромагнітного поля, окрім струму контуру і поверхневого струму є також електричні заряди, поверхнева щільність яких визначається нормальною по відношенню до межі складовою векторного потенціалу початкового струму контура. Наведено загальну структуру багаторівневої системи технічної діагностики і моніторингу стану електричних машин, особливістю якої є відповідність вимогам «інтелектуальних мереж». Система забезпечує вимірювання та передачу діагностичної інформації без необхідності залучення оператора і здійснює виявлення, локалізацію та класифікацію критичності дефектів з урахуванням ієрархічної структури електроенергетичних об'єктів. Описано основні функції компонентів, що виконуються на різних ієрархічних рівнях цієї системи. Описано ключові функції та комплекс програмних засобів для досліду зразка програмного комплексу помічника диспетчера з регулювання рівнів напруги у вузлах об'єднаної енергосистеми з використанням регульованих системних елементів. Бібл. 17, рис. 3.

Ключові слова: електричне коло з параметричним навантаженням, електромагнітне поле просторового контура зі струмом, надійність електроенергетичного устаткування, радник диспетчера.

На сьогодні технічний стан об'єктів електроенергетичного комплексу України характеризується критичним рівнем зношеності основних фондів (від 60 до 70 %), що призводить до суттєвого зниження надійності роботи енергетичних об'єктів. У цих умовах важливим завданням є отримання нових теоретичних та практичних наукових результатів, спрямованих у першу чергу на підвищення ефективності та забезпечення надійної та безвідмовної роботи всіх частин об'єднаної електроенергетичної системи України.

Для розв'язання поставлених задач у відділі теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки НАН України виконуються наукові дослідження у таких основних напрямках: розвиток теорії та створення ефективних аналітичних методів дослідження процесів у нелінійних електричних колах; розробка асимптотичних і чисельно-аналітичних методів розрахунку електромагнітних систем; розвиток теорії і методів практичного використання інформаційно-вимірювальних систем статистичної діагностики електроенергетичного обладнання; розробка математичних моделей та чисельне дослідження зв'язаних електромагнітних та механічних полів у електроенергетичному обладнанні.

Дослідження RLC-кола з параметричним навантаженням. Параметричну залежність еквівалентного електричного опору гетерогенного струмопровідного середовища при протіканні в ньому імпульсного струму на прикладі гранул алюмінію у водопровідній воді розглянуто в роботі [4]. У [14] методом малого параметра було розв'язано диференціальне

рівняння, що описує перехідний процес в RLC -колі з таким навантаженням, що моделює процеси у вихідному колі генератора імпульсів. Для подальшого розвитку теорії параметричних кіл у напрямку підвищення ефективності аналізу та оптимізації перехідних електромагнітних процесів у них розглянемо можливість точного розв'язку диференціального рівняння, що описує перехідний процес у послідовному RLC -колі для випадку представлення параметричної залежності опору сумою експонент.

У ряді випадків об'ємне електроерозійне навантаження доцільно описувати у вигляді [4]

$$R_H = R_0 + A_1 e^{-a_1 t} + A_2 e^{a_2 t} + A_3 e^{a_3 t} = R_0 + R_1 + R_2 + R_3, \quad (1)$$

або $R = R_0 + A_{1*} e^{-a_1(t-t_1)} + A_{2*} e^{a_2(t-t_2)} + A_{3*} e^{a_3(t-t_3)}$, де $A_1, A_2, A_3, a_1, a_2, a_3, A_{1*}, A_{2*}, A_{3*}$ – коефіцієнти; R_0 – постійна складова опору навантаження; R_1, R_2, R_3 – параметричні складові навантаження; t_1, t_2, t_3 – моменти часу, що є початковим для процесів зародження, існування та схлопування плазмового каналу відповідно. Вони вибираються з умови трикратного перевищення значень характеристик поточного процесу над іншими. Зазначимо, що насправді всі процеси протікають одночасно. Виділення точок $t_1 = 0, t_2, t_3$ може бути корисним, якщо при розрахунках перехідних процесів використовується метод припасовування. Однак у багатьох випадках не вдається виділити ці точки, оскільки значення характеристик декількох процесів можуть мати близькі значення.

Розглянемо коло (рис. 1), що представляє собою розрядний контур генератора імпульсів, навантаження в якому носить параметричний характер і описується співвідношенням (1). Тут i, i_H, i_{III} – струми в колах розряду навантаження і шунтуючого опору; C – ємність розрядного конденсатора; L_{II} – індуктивність розрядного контура; R_{III} – опір шунтуючого резистора. Диференціальне рівняння, що характеризує процеси в колі рис. 1, має вигляд [9]

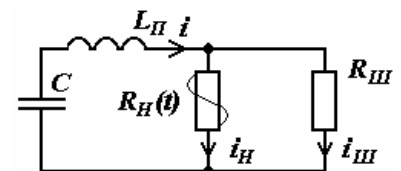


Рис. 1

$$\frac{R_H + R_{III}}{R_H} \cdot \frac{d^2 i_H}{dt^2} + \left\{ \frac{2}{R_{III}} \cdot \frac{dR_H}{dt} + \frac{R_H}{L_{II}} \right\} \cdot \frac{di_H}{dt} + \left\{ \frac{1}{R_{III}} \cdot \frac{d^2 R_H}{dt^2} + \frac{1}{L_{II}} \cdot \frac{dR_H}{dt} + \omega_0^2 \frac{R_H + R_{III}}{R_H} \right\} i_H = 0. \quad (2)$$

Представимо рівняння (2) у такий спосіб:

$$f(t) \frac{d^2 i_H}{dt^2} + g(t) \frac{di_H}{dt} + h(t) i_H = 0,$$

де $f(t) = \frac{1}{R_{III}} (R_0 + R_{III} + A_1 e^{-a_1 t} + A_2 e^{a_2 t} + A_3 e^{a_3 t})$;

$$\frac{R_H + R_{III}}{R_H} \cdot \frac{d^2 i_H}{dt^2} + \left\{ \frac{2}{R_{III}} \cdot \frac{dR_H}{dt} + \frac{R_H}{L_{II}} \right\} \cdot \frac{di_H}{dt} + \left\{ \frac{1}{R_{III}} \cdot \frac{d^2 R_H}{dt^2} + \frac{1}{L_{II}} \cdot \frac{dR_H}{dt} + \omega_0^2 \frac{R_H + R_{III}}{R_H} \right\} i_H = 0; \quad (3)$$

$$h(t) = \frac{1}{CR_{III}L_{II}} \left\{ R_0 R_{III} + (a_1^2 CL_{II} - a_1 CR_{III} + 1) A_1 e^{-a_1 t} + (a_2^2 CL_{II} + a_2 CR_{III} + 1) A_2 e^{a_2 t} + (a_3^2 CL_{II} + a_3 CR_{III} + 1) A_3 e^{a_3 t} \right\}.$$

Оскільки рівняння (3) неможливо продиференціювати безпосередньо, введемо заміну залежної змінної $y(t) = i_H \exp \frac{1}{2} \int \frac{g(t)}{f(t)} dt$ і одержимо з виразу (2) приведену або нормальну форму рівняння [6]:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + yF(t) = 0, \quad (4)$$

$$\text{де } F(t) = \frac{h(t)}{f(t)} - \frac{1}{4} \left(\frac{g(t)}{f(t)} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{g(t)}{f(t)} \right)'$$

Функція $F(t)$ називається інваріантом диференціального рівняння.

Представимо коефіцієнти a_1, a_2, a_3 у вигляді $a_1 = k_1 a_2$; $a_3 = k_3 a_2$ і перетворимо співвідношення (3) до вигляду

$$f(t) = \frac{1}{R_{\text{ш}}} \left(R_0 + R_{\text{ш}} + A_1^{-k_1 a_2 t} + A_2 e^{a_2 t} + A_3 e^{k_3 a_2 t} \right);$$

$$g(t) = \frac{1}{R_{\text{ш}} L_{\text{п}}} \left\{ R_0 R_{\text{ш}} + (R_{\text{ш}} - 2a_1 L_{\text{п}}) A_1 e^{-k_1 a_2 t} + (R_{\text{ш}} + 2a_2 L_{\text{п}}) A_2 e^{a_2 t} + (R_{\text{ш}} + 2a_3 L_{\text{п}}) A_3 e^{k_3 a_2 t} \right\};$$

$$h(t) = \frac{1}{C R_{\text{ш}} L_{\text{п}}} \left\{ R_0 R_{\text{ш}} + (a_1^2 C L_{\text{п}} - a_1 C R_{\text{ш}} + 1) A_1 e^{-k_1 a_2 t} + \right.$$

$$\left. + (a_2^2 C L_{\text{п}} + a_2 C R_{\text{ш}} + 1) A_2 e^{a_2 t} + (a_3^2 C L_{\text{п}} + a_3 C R_{\text{ш}} + 1) A_3 e^{k_3 a_2 t} \right\}.$$

У роботах [4, 14] розглянуто випадки, коли $R_{\text{н}}$ може бути представлено сумою двох експонент і постійної складової. Тоді, домножуючи чисельник і знаменник часток $\frac{g(t)}{f(t)}$ і

$\frac{h(t)}{f(t)}$ на $e^{a_1 t} = e^{k_1 a_2 t}$, маємо

$$\frac{g(t)}{f(t)} = \frac{(R_{\text{ш}} - 2k_1 a_2 L_{\text{п}}) A_1 + R_0 R_{\text{ш}} e^{k_1 a_2 t} + (R_{\text{ш}} + 2a_2 L_{\text{п}}) A_2 e^{(k_1+1)a_2 t}}{L_{\text{п}} (A_1 + (R_0 + R_{\text{ш}}) e^{k_1 a_2 t} + A_2 e^{(k_1+1)a_2 t})}; \quad (5)$$

$$\frac{h(t)}{f(t)} = \frac{(k_1^2 a_2^2 C L_{\text{п}} - k_1 a_2 C R_{\text{ш}} + 1) A_1 + (R_0 + R_{\text{ш}}) e^{k_1 a_2 t} + (a_2^2 C L_{\text{п}} + a_2 C R_{\text{ш}} + 1) A_2 e^{(k_1+1)a_2 t}}{C L_{\text{п}} (A_1 + (R_0 + R_{\text{ш}}) e^{k_1 a_2 t} + A_2 e^{(k_1+1)a_2 t})}.$$

Введемо заміну змінних:

$$x = e^{a_2 t} \Rightarrow dx = a_2 e^{a_2 t} dt \Rightarrow dt = \frac{dx}{a_2 x}, \quad (6)$$

тоді

$$\int \frac{g(t)}{f(t)} dt = \int \frac{(R_{\text{ш}} - 2k_1 a_2 L_{\text{п}}) A_1 + R_0 R_{\text{ш}} x^{k_1} + (R_{\text{ш}} + 2a_2 L_{\text{п}}) A_2 x^{(k_1+1)}}{L_{\text{п}} a_2 x (A_1 + (R_0 + R_{\text{ш}}) x^{k_1} + A_2 x^{(k_1+1)})} dx.$$

Аналіз експериментальних даних показав, що в діапазоні зміни опорних напруг від 140 до 200 В k_1 лежить у межах 0,963...1,089, і ми можемо прийняти його рівним одиниці.

Тоді частка $\frac{g(t)}{f(t)}$ стає інтегрованою.

Дискримінант квадратного рівняння в знаменнику $(R_0 + R_{\text{ш}})^2 - 4A_1 A_2 = \Delta^2$ у цьому випадку більше нуля і лежить у межах 12,351...5,13. Таким чином, [2]

$$\int \frac{g(t)}{f(t)} dt = -\frac{R_{\text{ш}}^2}{2a_2 L_{\text{п}} \Delta} \ln \left| \frac{2A_2 x + R_0 + R_{\text{ш}} - \Delta}{2A_2 x + R_0 + R_{\text{ш}} + \Delta} \right| + 2 \ln |A_2 x^2 + (R_0 + R_{\text{ш}})x + A_1| + \left(\frac{R_{\text{ш}}}{a_2 L_{\text{п}}} - 2 \right) x.$$

Отже,

$$y(t) = i_{\text{н}} \left(\frac{2A_2 e^{a_2 t} + R_0 + R_{\text{ш}} - \Delta}{2A_2 e^{a_2 t} + R_0 + R_{\text{ш}} + \Delta} \right)^{-\frac{R_{\text{ш}}^2}{4a_2 L_{\text{п}} \Delta}} \cdot (A_2 e^{2a_2 t} + (R_0 + R_{\text{ш}}) e^{a_2 t} + A_1)^2 \cdot e^{\left(\frac{R_{\text{ш}}}{2L_{\text{п}}} - a_2 \right) t}.$$

Знайдемо вираз для функції $F(t)$. Враховуючи, що

$$\left(\frac{g(t)}{f(t)} \right)' = \frac{e^{a_2 t} \left\{ a_2 A_2 (R_{\text{ш}}^2 + 2a_2 L_{\text{п}} (R_0 + R_{\text{ш}})) e^{2a_2 t} + 4a_2^2 A_1 A_2 L_{\text{п}} e^{a_2 t} - a_2 A_1 (R_{\text{ш}}^2 + 2a_2 L_{\text{п}} (R_0 + R_{\text{ш}})) \right\}}{L_{\text{п}} (A_1 + (R_0 + R_{\text{ш}}) e^{a_2 t} + A_2 e^{2a_2 t})^2},$$

маємо

$$F(t) = \left[A_1^2 (4L_{\Pi} - CR_{\text{III}}^2) + A_1 \left\{ 4L_{\Pi} (R_0 + R_{\text{III}}) (2a_2^2 CL_{\Pi} + 1) - 2CR_{\text{III}}^2 (a_2 L_{\Pi} + R_0) \right\} e^{a_2 t} + \right. \\ \left. + \left\{ 2A_1 A_2 (4a_2^2 CL_{\Pi}^2 + 4L_{\Pi} + CR_{\text{III}}^2) + 4L_{\Pi} (R_0 + R_{\text{III}})^2 - CR_0^2 R_{\text{III}}^2 \right\} e^{2a_2 t} + \right. \\ \left. + 2A_2 \left\{ 4L_{\Pi} (R_0 + R_{\text{III}}) + CR_{\text{III}}^2 (a_2 L_{\Pi} - R_0) \right\} e^{3a_2 t} + A_2^2 \left\{ 8a_2 CL_{\Pi} R_{\text{III}} + 4L_{\Pi} - CR_{\text{III}}^2 \right\} e^{4a_2 t} \right] \times \\ \times \left\{ 2\sqrt{CL_{\Pi}} \cdot (A_1 + (R_0 + R_{\text{III}}) e^{a_2 t} + A_2 e^{2a_2 t}) \right\}^{-2}.$$

Рівняння (4) заміною змінних $y' = y \cdot z(t)$ перетвориться в рівняння Ріккарті [6]:

$$\frac{dz}{dt} + z^2 = -F(t). \quad (7)$$

Якщо знайдено розв'язок $z(t)$ цього рівняння, то розв'язок рівняння (4) знаходимо з

$$\frac{dy}{dt} - y \cdot z(t) = C_{1*} e^{-\int z dt},$$

де C_{1*} – постійна інтегрування.

Частинний розв'язок рівняння (7) зручно представити у вигляді

$$z_1 = \frac{D_0 + D_1 e^{a_2 t} + D_2 e^{2a_2 t}}{B_0 + B_1 e^{a_2 t} + B_2 e^{2a_2 t}}, \quad (8)$$

тоді, враховуючи, що

$$z_1' = \frac{a_2 (B_0 D_1 - D_0 B_1) e^{a_2 t} + 2a_2 D_2 (B_0 - A_0) e^{2a_2 t} + a_2 (B_1 D_2 - D_1 B_2) e^{3a_2 t}}{(B_0 + B_1 e^{a_2 t} + B_2 e^{2a_2 t})^2}; \\ z_2' = \frac{D_0^2 + 2D_0 D_1 e^{a_2 t} + (D_1^2 + 2D_0 D_2) e^{2a_2 t} + 2D_1 D_2 e^{3a_2 t} + D_2^2 e^{4a_2 t}}{B_0^2 + 2B_0 B_1 e^{a_2 t} + (B_1^2 + 2B_0 B_2) e^{2a_2 t} + 2B_1 B_2 e^{3a_2 t} + B_2^2 e^{4a_2 t}},$$

можемо записати

$$\frac{dz_1}{dt} + z_1^2 = \left[D_0^2 + (a_2 (B_0 D_1 - D_0 B_1) + 2D_0 D_1) e^{a_2 t} + (2a_2 (B_0 D_2 - D_0 B_2) + D_1^2 + 2D_0 D_2) e^{2a_2 t} + \right. \\ \left. + (a_2 (B_1 D_2 - D_1 B_2) + 2D_1 D_2) e^{3a_2 t} + D_2^2 e^{4a_2 t} \right] \times \left\{ B_0 + B_1 e^{a_2 t} + B_2 e^{2a_2 t} \right\}^{-2} = -F(t).$$

Таким чином, розв'язуючи систему рівнянь

$$D_0^2 = A_1^2 (CR_{\text{III}}^2 - 4L_{\Pi}); \\ a_2 (B_0 D_1 - D_0 B_1) + 2D_0 D_1 = A_1 \left\{ -4L_{\Pi} (R_0 + R_{\text{III}}) (2a_2^2 CL_{\Pi} + 1) + 2CR_{\text{III}}^2 (a_2 L_{\Pi} + R_0) \right\}; \\ 2a_2 (B_0 D_2 - D_0 B_2) + D_1^2 + 2D_0 D_2 = -2A_1 A_2 (4a_2^2 CL_{\Pi}^2 + 4L_{\Pi} + CR_{\text{III}}^2) - 4L_{\Pi} (R_0 + R_{\text{III}})^2 + CR_0^2 R_{\text{III}}^2; \\ a_2 (B_1 D_2 - D_1 B_2) + 2D_1 D_2 = -2A_2 \left\{ 4L_{\Pi} (R_0 + R_{\text{III}}) + CR_{\text{III}}^2 (a_2 L_{\Pi} - R_0) \right\}; \\ D_2^2 = A_2^2 \left\{ CR_{\text{III}}^2 - 8a_2 CL_{\Pi} R_{\text{III}} - 4L_{\Pi} \right\}; \\ B_0 = 2A_1 \sqrt{CL_{\Pi}}; \quad B_1 = 2\sqrt{CL_{\Pi}} (R_0 + R_{\text{III}}); \quad B_2 = 2A_2 \sqrt{CL_{\Pi}},$$

можемо знайти відповідні коефіцієнти для частинного розв'язку (8). Зауважимо, що частинний розв'язок такого вигляду для рівняння (7) раніше в літературі не зустрічався.

Тоді, користуючись властивістю рівняння Ріккарті [6], його загальний розв'язок будемо шукати у вигляді

$$z(t) = z_1(t) + \frac{1}{\chi(t)}. \quad (9)$$

Підставивши (9) у рівняння (7), одержимо

$$\frac{d\chi}{dt} - 2z_1 \chi = 1. \quad (10)$$

Представимо $\chi(t)$ у вигляді добутку двох функцій $n(t) \times m(t)$ і перепишемо рівняння (10) у такий спосіб:

$$m'n + m(n' - 2z_1 n) = 1. \quad (11)$$

Згідно з методом розв'язку диференціального рівняння за допомогою підстановки Бернуллі [6] покладемо $n' - 2z_1 n = 0$ і перетворимо рівняння (11) у систему

$$\begin{cases} n' = 2z_1 n; \\ m' n = 1. \end{cases} \quad (12)$$

Розв'язком першого рівняння системи (12) буде

$$\ln n = 2 \int z_1 dt = \frac{2}{a_2} \int \frac{z_1(x)}{x} dx.$$

Тут заміна незалежної змінної відбувається відповідно до (6). Таким чином,

$$n(t) = \left(\frac{2A_2 e^{a_2 x} + R_0 + R_{\text{ш}} - 2L_{\text{п}} \sqrt{C\Delta}}{2A_2 e^{a_2 x} + R_0 + R_{\text{ш}} + 2L_{\text{п}} \sqrt{C\Delta}} \right)^{\frac{2A_1 A_2 D_1 - (R_0 + R_{\text{ш}})(A_1 D_2 - A_2 D_0)}{4a_2 A_1 A_2 C L_{\text{п}}^2 \Delta}} \times \quad (13)$$

$$\times \left(A_2 e^{2a_2 t} + (R_0 + R_{\text{ш}}) e^{a_2 t} + A_1 \right)^{\frac{A_1 D_2 - A_2 D_0}{a_2 A_1 A_2 \sqrt{C L_{\text{п}}}}} \cdot e^{\frac{a_2 D_0}{A_2} t}.$$

Тоді, відповідно до (12), $dm = \frac{dt}{n}$, отже,

$$m = \int \frac{dt}{n(t)} + C_*, \quad (14)$$

де C_* – постійна інтегрування.

Вирази (13) і (14) можна записати таким чином: $n = e^{2 \int z_1 dt}$; $m = \int e^{-2 \int z_1 dt} dt + C_*$.

Тоді $\chi = m \cdot n = e^{2 \int z_1 dt} \left\{ \int e^{-2 \int z_1 dt} dt + C_* \right\}$.

Зазначимо, що вирази для n , m і χ багато в чому залежні від можливості інтегрування функцій $z_1(t)$ і $n(t)$, що, в свою чергу, визначається параметрами елементів кола і напругою на навантаженні. Слід зазначити також, що вид розв'язку $z_1(t)$ визначається виглядом $F_1(t)$, який залежить від вибору функції, що апроксимує залежність опору навантаження від часу. Для знаходження розв'язку вихідного диференціального рівняння (3) необхідно наведені вище заміни змінних зробити у зворотному порядку.

Скористаємося запропонованим алгоритмом розв'язку диференціального рівняння зі змінними коефіцієнтами для аналізу процесів у колі (рис. 1) з наступними параметрами: $C = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$, $L_{\text{п}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $R_{\text{ш}} = 3 \text{ Ом}$ і значенням опорної напруги 140 В. При цьому будемо апроксимувати навантаження сумою двох експонент і постійної складової з коефіцієнтами апроксимації: $R_0 = 3,11 \text{ Ом}$; $A_1 = 25,52 \text{ Ом}$; $a_1 = 10700 \text{ 1/с}$; $A_2 = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $a_2 = 11100 \text{ 1/с}$. Похибка від прирівнювання коефіцієнтів $a_1 \approx a_2$ становить 3,6 %, отже, частка $\frac{g(t)}{f(t)}$ (5) може бути проінтегрована.

Для знаходження постійних інтегрування запишемо початкові умови

$$i|_{t=0} = 0; \quad i_{\text{н}}|_{t=0} = 0; \quad \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{U_0}{L_0}, \quad (15)$$

де U_0 – напруга на конденсаторі в початковий момент часу.

Знайдемо початкові умови для $\frac{di_{\text{н}}}{dt}$, виходячи з виразів (15):

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{di_{\text{н}}}{dt} \right|_{t=0} + \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{ш}}} \left. \frac{di_{\text{н}}}{dt} \right|_{t=0} + \frac{i_{\text{н}}}{R_{\text{ш}}} \left. \frac{dR_{\text{н}}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{R_0 + R_{\text{ш}} + A_1 + A_2}{R_{\text{ш}}} \left. \frac{di_{\text{н}}}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{U_0}{L_{\text{п}}}.$$

Виконуючи наведені вище перетворення, знаходимо остаточний вираз для $i_{\text{н}}$:

$$i_H = -\frac{U_0 R_{ш} (1+k_1)^6 \cdot t}{L_n (R_0 + R_{ш} + A_1 + A_2)} (e^{a_2 t} + k_1)^{-6} e^{-111a_2 t}. \quad (16)$$

Вигляд співвідношення (16) схожий на вираз для струму в колі розряду конденсатора в граничному випадку критичного затухання [9], що відповідає реальності, оскільки через складність процесів аперіодичний розряд не прямує асимптотично до нуля, а точно досягає його значення.

Таким чином, показано принципову можливість знаходження точного розв'язку диференціального рівняння, що описує процеси в колі (рис. 1) з параметричним навантаженням вигляду (1). На етапі аналітичного розв'язку методична похибка відсутня, тому загальна похибка такого підходу визначається похибками вимірювання, апроксимації та округлювання в результаті обчислень. До недоліків підходу слід віднести значну громіздкість і евристичність при знаходженні $z_1(t)$.

Електромагнітне поле просторового контура зі струмом над плоскою поверхнею провідного тіла із сильним скін-ефектом. У багатьох додатках джерелом зовнішнього змінного поля є струми, що протікають уздовж контурів у загальному випадку довільної просторової конфігурації. При швидкоплинних імпульсних або височастотних процесах в електропровідних тілах проявляється сильно виражений скін-ефект, при якому електромагнітне поле в об'ємі тіла відсутнє, а струм у ньому протікає в тонкому поверхневому шарі.

У квазістаціонарному наближенні [5] у випадку сильного скін-ефекту в розрахунках для знаходження поля поза провідним тілом необхідно розв'язувати відповідну стаціонарну задачу для ідеально провідного тіла тієї ж форми. При заданому розподілі щільності струму джерел формулювання крайової задачі розрахунку поля зводиться до завдання рівнянь Максвелла для напруженості магнітного поля та умов відсутності нормальної складової поля на поверхні:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (17)$$

де \mathbf{n} – одинична зовнішня нормаль до поверхні електропровідного тіла.

Крайова задача (17) цілком визначає існування єдиного розв'язку. Як видно з першого рівняння (17), щільність струму джерел повинна задовольняти умові безперервності $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$, що у випадку лінійного струму відповідає умові замкненості контура зі струмом.

Для аналізу електромагнітного поля в поверхневому шарі провідного тіла справедливою зазвичай є відома модель дифузії плоского поля в провідний півпростір. У такій моделі вихідною величиною виступає тангенціальна складова напруженості поля на межі \mathbf{H}_τ , локальне значення якої для тіла довільної форми знаходиться з розв'язку зовнішньої задачі (17). Поверхнева щільність струму \mathbf{j}_s в електропровідному тілі визначається величиною тангенціальної складової поля \mathbf{H}_τ і має задовольняти умові неперервності:

$$\mathbf{j}_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H}, \quad \operatorname{div} \mathbf{j}_s = 0. \quad (18)$$

У додатках для систем із сильним скін-ефектом зазвичай аналізу підлягають наступні характеристики: поверхнева щільність струму \mathbf{j}_s , магнітний тиск $p = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H_\tau^2$, вектор Умова-Пойнтинга на поверхні поділу середовищ $\mathbf{\Pi} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}_\tau$, нормальна компонента якого дає

щільність потоку електромагнітної потужності через поверхню. Розподіл двох останніх величин визначається розподілом квадрата напруженості магнітного поля на межі поділу середовищ або квадрата поверхневої щільності струму.

Мета досліджень полягала в тому, щоб на прикладі тіла з плоскою межею представити точний аналітичний розв'язок задачі з джерелами вихідного поля у вигляді струму контура довільної просторової конфігурації та показати, що при розрахунку електромагнітного поля коректний розв'язок одержується при врахуванні струму всього замкнутого контура. Крім того, у рамках представлень про вторинні джерела, розташовані на межі поділу середовищ, метою роботи було формулювання крайової задачі для скалярного потенціалу у випад-

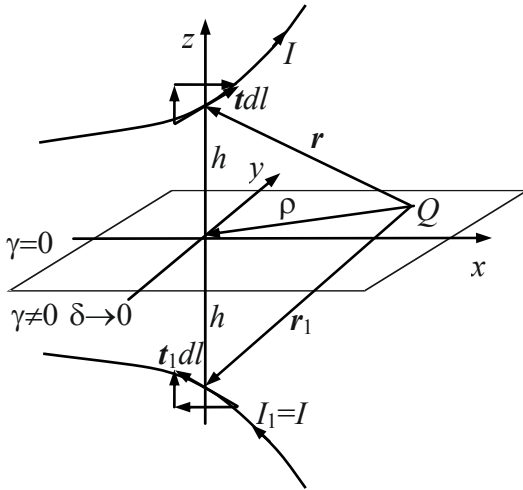


Рис. 2

ку вихідного контура просторової конфігурації та визначення розподілу поверхневої щільності електричного заряду [1].

Розв'язком задачі (17) для плоскої межі поділу середовищ буде магнітне поле над поверхнею електропровідного тіла при $z > 0$, створене струмом I вихідного контура і струмом дзеркально відбитого контура зі струмом I_1 (рис. 2).

На рисунку напрямок елементів вихідного контура tdl і дзеркально відбитого контура t_1dl погоджено з напрямком струмів у них, де t і t_1 – одиничні дотичні вектори до контурів, dl – довжина елементів контурів. З рисунка видно, що проекції векторів, дотичних на вертикальну вісь t_z , однакові за величиною і напрямком, а проекції на площину

поділу середовищ $t_{||}$ і $t_{1||} = -t_{||}$ мають однакову довжину і протилежні напрямки: $t = t_z e_z + t_{||}$, $t_1 = t_z e_z - t_{||}$, де e_z – одиничний вектор уздовж вертикальної осі.

Напруженість поля H в довільній точці Q ($z > 0$), створена двома контурами зі струмом, є

$$H = \frac{1}{\mu_0} \text{rot} A = -\frac{I}{4\pi} \int_l \left(\frac{t \times r}{r^3} + \frac{t_1 \times r_1}{r_1^3} \right) dl, \quad (19)$$

де A – векторний потенціал.

Враховуючи, що в точках спостереження Q на плоскій поверхні поділу середовищ вектори, які з'єднують довільну точку Q з елементами контурів tdl і t_1dl , є $r = \rho + h e_z$, $r_1 = \rho - h e_z$, напруженість поля може бути представлена через координати тільки вихідного контура у вигляді

$$H(z=0) = \frac{I}{2\pi} e_z \times \int_l \frac{e_z \times (t \times r)}{r^3} dl = \frac{I}{2\pi} e_z \times \int_l \frac{h t_{||} - \rho t_z}{r^3} dl. \quad (20)$$

З виразу (20) безпосередньо видно, що нормальна компонента напруженості поля відсутня $H \cdot e_z = 0$, і це свідчить, що (19) є розв'язком сформульованої задачі (17) для плоскої межі поділу середовищ.

Представлений аналітичний розв'язок (20) є суперпозицією магнітних полів двох контурів зі струмом, для знаходження яких застосовується закон Біо-Савара-Лапласа. У цьому зв'язку представляється, що застосування для задачі, яка розглядається, більш складних і громіздких підходів, таких як метод інтегральних перетворень, що використовується в ряді досліджень, має бути, принаймні, обґрунтовано.

З (20) знаходимо поверхневу щільність струму:

$$j_s = e_z \times H(z=0) = e_z \times \left[-\frac{I}{2\pi} \int_l \frac{t \times r}{r^3} dl \right] = \frac{2}{\mu_0} e_z \times \text{rot} A_0, \quad (21)$$

де A_0 – векторний потенціал поля вихідного струму. Легко показати, що для поверхневої щільності струму виконується умова безперервності.

Розглянемо ще одне питання методичного характеру, пов'язане з джерелами поля. У рамках представлень про вторинні джерела на межі поділу середовищ не тільки протікає поверхневий електричний струм, але на цій межі може бути розподілений електричний заряд з певною поверхневою щільністю σ . Всі джерела: вихідний контур зі струмом I , поверхнева щільність струму j_s та розподілений поверхневий заряд σ разом створюють електромагніт-

не поле у всьому просторі, включаючи і область $z < 0$, де сумарне поле дорівнює нулю. Простий аналітичний розв'язок задачі, що розглядається, дає змогу одержати ясне уявлення про формування обох вторинних джерел, які беруть участь у створенні поля.

Дотепер розглядалося тільки магнітне поле над поверхнею електропровідного тіла при $z > 0$, для визначення якого досить було ввести «фіктивний» струм дзеркального відбитого контура. У дійсності струм, крім вихідного контура, протікає тільки по поверхні електропровідного тіла. Поверхнева щільність струму не містить компоненти, перпендикулярної до межі поділу середовищ. У результаті векторний магнітний потенціал всієї такої системи струмів у всьому просторі, включаючи і область $z < 0$, буде мати вигляд

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_s = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{\mathbf{t}}{r} dl + \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}_s}{r} dS. \quad (22)$$

Напруженість магнітного поля при $z < 0$ дорівнює нулю $\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \mathbf{A}' = 0$, звідки ви-

пливає, що в цій області векторне поле \mathbf{A}' є потенціальним, і для нього може бути введений скалярний потенціал $\mathbf{A}' = -\text{grad } \varphi'$. В силу умови $\text{div } \mathbf{A}' = 0$ скалярний потенціал φ' задовольняє рівнянню Лапласа, а його нормальна похідна на межі поділу середовищ $z = 0 - 0$ визначається нормальною компонентою векторного потенціалу. Звідси видно, що для скалярного потенціалу φ' при $z < 0$ справедлива задача Неймана, розв'язок якої існує і визначається з точністю до довільної сталої:

$$\begin{cases} z < 0: & \Delta \varphi' = 0, \\ z = 0 - 0: & \frac{\partial \varphi'}{\partial z} = -A_{0z}. \end{cases} \quad (23)$$

Електромагнітне поле, крім напруженості магнітного поля \mathbf{H} , характеризується також напруженістю електричного поля $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } \varphi$, де φ – скалярний потенціал, що у цьому випадку визначається електричними зарядами на поверхні.

Напруженість електричного поля, як і напруженість магнітного поля, в області $z < 0$ дорівнює нулю $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}'}{\partial t} - \text{grad } \varphi = 0$. Виконуючи для останнього виразу операцію div і знову враховуючи $\text{div } \mathbf{A}' = 0$, знаходимо, що скалярний потенціал φ теж задовольняє рівнянню Лапласа. Відсутність електричного поля дає змогу, аналогічно попередньому, сформулювати крайову задачу для скалярного потенціалу φ :

$$\begin{cases} z < 0: & \Delta \varphi = 0, \\ z = 0 - 0: & \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{\partial A_{0z}}{\partial t}. \end{cases} \quad (24)$$

Введені скалярні потенціали пов'язані між собою простою залежністю $\varphi' = \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ і мають однаковий просторовий розподіл, що по суті, є наслідком відсутності напруженості як електричного, так і магнітного полів у електропровідному середовищі при $z < 0$.

Розглянемо тепер з позиції вторинних джерел векторний і скалярний потенціали в області над межею поділу середовищ $z > 0$, де протікає вихідний струм I по контуру, що у загальному випадку має просторову конфігурацію.

Векторний потенціал в області $z > 0$ визначається сумою (22). Оскільки $\mathbf{A}_s(x, y, z) = \mathbf{A}_s(x, y, -z)$, то векторний потенціал над провідною поверхнею можна представити у такому вигляді:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_s = \mathbf{A}_0(x, y, z) + \mathbf{A}_0(x, y, -z) - \text{grad } \varphi'|_{x, y, -z}. \quad (25)$$

де кожний з доданків вважається відомим.

Скалярний потенціал φ обумовлений електричними зарядами, розподіленими на граничній поверхні, тому він задовольняє рівнянню Лапласа не тільки в області провідного тіла, але й при $z > 0$. У цій області нормальна до межі поділу середовищ складова напруженості електричного поля, створеного поверхневим зарядом $E_{\sigma z}^+ = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}$, дорівнює і протилежна за знаком вертикальній складовій поля електричних зарядів на межі під поверхнею, де вона компенсується напруженістю індукованого електричного поля:

$$E_{\sigma z}^+ = -E_{\sigma z}^- = -\frac{\partial A_{0z}}{\partial t}. \quad (26)$$

Звідси в області $z > 0$ для скалярного потенціалу електричних зарядів маємо крайову задачу Неймана:

$$\begin{cases} z > 0: & \Delta \varphi = 0, \\ z = 0+0: & \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial A_{0z}}{\partial t}. \end{cases} \quad (27)$$

Останньою характеристикою електромагнітного поля, яка з позицій вторинних джерел характеризує систему, що розглядається, є поверхнева щільність електричного заряду σ .

Її величина легко визначається з граничної умови $\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = E_{\sigma z}^+ - E_{\sigma z}^-$. З врахуванням (11) маємо

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = -2 \frac{\partial A_{0z}}{\partial t}. \quad (28)$$

З останнього виразу видно, що поверхнева щільність електричного заряду з'являється в тому випадку, якщо нормальна компонента векторного потенціалу вихідного струму на межі поділу середовищ відмінна від нуля, тобто, як зазначалося вище, коли контур зі струмом має просторову конфігурацію або, якщо він плоский, але лежить у площині, некомпланарній граничній поверхні.

Багаторівневі системи технічної діагностики електричних машин. Сучасна електроенергетика вимагає формування цілісної багаторівневої системи керування, яка забезпечує високий рівень автоматизації та надійності всієї системи [15]. При цьому важливе місце посідає отримання актуальної інформації про фактичний стан кожного енергетичного об'єкта та обмін цією інформацією між всіма учасниками ринку електроенергії, що в сукупності забезпечує підвищення надійності системи в цілому [16]. Тому постає таке важливе завдання: розробка методів та технічних засобів моніторингу стану та технічного діагностування, які б здійснювали глибоку діагностику стану окремих електроенергетичних пристроїв у реальному масштабі часу, забезпечували узагальнення такої діагностичної інформації, виділення з великого масиву даних тієї інформації, що є критичною для системи в цілому, та передачу її на вищий рівень ієрархії [10, 11]. Реалізувати цю мету можна шляхом створення інтелектуальної розподіленої багаторівневої системи моніторингу стану та діагностики електроенергетичних об'єктів (ЕЕО). Впровадження такої системи дасть можливість забезпечити точне та своєчасне виявлення дефектів усіх критичних пристроїв ЕЕО за рахунок постійного глибокого діагностування їх стану; своєчасне інформування обслуговуючого персоналу про місце та вид дефекту; передачу узагальненої інформації про фактичний стан об'єкта діагностування на вищий рівень ієрархії для швидкого реагування [10]. У кінцевому результаті, це дасть можливість підвищити надійність роботи енергосистеми в цілому, забезпечити високий рівень якості електричної енергії, що є важливою передумовою інтеграції енергосистеми України в об'єднану європейську систему.

Сучасні засоби моніторингу стану та діагностики ЕЕО повинні розроблятися з урахуванням основних вимог концепції Smart Grid, яка передбачає, що обслуговування та ремонт мають здійснюватися за фактичним станом [10, 15, 16]. Для цього значна частина обладнання повинна бути охоплена системами забезпечення надійності, які мають здійснювати постійний чи періодичний контроль його фактичного технічного стану. Крім того, самі ці сис-

теми повинні мати більше можливостей, а саме: забезпечувати двосторонній обмін інформацією на всіх рівнях, віддалений моніторинг стану, прогнозування відмов, планування необхідності у запасних частинах, оцінку залишкового ресурсу тощо. Важливу роль у забезпеченні цих можливостей відіграє розподіл обчислювальних ресурсів між частинами системи.

Складний технічний об'єкт практично завжди можна розглядати у вигляді деякої ієрархічної структури [2, 6, 12]. Зокрема, при діагностиці окремих вузлів електричних машин можна виділити наступні рівні.

На першому розміщені елементи конструкції електричних машин. Цей рівень визначає, які дефекти можливі в обладнанні, що розглядається. Глибоке вивчення елементів, розміщених на першому рівні ієрархії, дає всю необхідну інформацію про види, причини виникнення та прояви дефектів. У результаті такого аналізу будують діагностичні моделі, вибирають діагностичні сигнали та параметри [8, 12].

Другий рівень – це вузли машин, які є конструктивно єдиним цілим. Сюди можна віднести обмотки ротора та статора обертових машин, магнітопроводи, підшипникові вузли, корпус, станину, фундамент, систему охолодження тощо.

Третій рівень – електрична машина в цілому: генератори, двигуни власних потреб, трансформатори, насоси тощо.

Розробка системи діагностування електричних машин, що повністю охоплює всі можливі дефекти і їх комбінації, виявляється надзвичайно складною технічною задачею. Вартість такої системи діагностики може перевищити вартість основного обладнання, в результаті чого розробка системи діагностування взагалі може втратити сенс з економічної точки зору. Тому виникає важливе питання, що потребує вирішення при розробці системи діагностування: які елементи об'єкта, що діагностується, є критичними для його правильного функціонування, а які – ні. Ще на етапі розробки структури системи необхідно чітко окреслити перелік дефектів, які повинна виявляти система діагностики, та визначити ті вузли обладнання, у яких можлива поява цих дефектів.

Очевидно, що будь-яка система діагностування повинна обов'язково виявляти катастрофічні дефекти, оскільки вони повністю порушують працездатність об'єкта діагностування. Разом з тим деякі некатастрофічні чи часткові дефекти можна залишити поза увагою системи. Такий підхід до розробки системи дає можливість спростити її структуру, зменшити обсяги інформації, що обробляються в системі та передаються між її ієрархічними рівнями. За рахунок цього система може бути здешевлена, а наявні обчислювальні ресурси можна перерозподілити на виконання більш критичних функцій.

Розглянемо основні компоненти системи діагностування та їхні функції [7, 17]. Перш за все, до складу системи необхідно включити сенсори тих фізичних величин, які вимірюються. В залежності від об'єкта діагностування це можуть бути: термометри чи терморезистори – для вимірювання температури; акселерометри – для вимірювання параметрів вібрацій; вимірювальні мікрофони – для визначення рівня акустичних шумів; різноманітні датчики електричних величин (вимірювальні трансформатори, шунти, лічильники) – для визначення електричних параметрів та обліку електроенергії.

Сучасні системи діагностування будуються на основі цифрових обчислювальних засобів (мікроконтролерів, персональних комп'ютерів, промислових робочих станцій). Для системи діагностування, яка повинна відповідати основним принципам концепції Smart Grid, ця вимога є обов'язковою, оскільки в рамках інтелектуальних мереж обмін інформацією здійснюється в цифровій формі. Таким чином, виміряні сигнали повинні перетворюватися в цифрову форму з метою подальшої обробки обчислювальними засобами. Для цього сигнали від первинних перетворювачів мають проходити певну первинну обробку: приводитися до деякого уніфікованого рівня за напругою, а також до вибраної смуги частот.

В окремих випадках (в основному для забезпечення сумісності з уже встановленими на енергетичному об'єкті системами діагностування попередніх поколінь) може виявитися раціональним розділення функцій між різними пристроями: відбір та попередню обробку даних організувати безпосередньо в точках вимірювання, а перетворення в цифрову форму – в

єдиному блоці з комутацією аналогових каналів.

Разом з тим у більшості випадків при розробці систем діагностування на основі сучасних компонентів усі перелічені вище функції доцільно об'єднати в одному функціонально завершеному пристрої, який має цифровий інтерфейс для двостороннього обміну інформацією. На вхід він повинен приймати управляючі команди, а на вихід подавати реалізацію вимірюваного діагностичного сигналу в деякій стандартизованій формі. Цей зовнішній інтерфейс може бути як дротовим (на основі стандартів RS232, Ethernet, USB тощо), так і бездротовим (на основі стандартів Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee тощо).

Для подальшого аналізу інформації та прийняття діагностичних рішень виміряні та перетворені в цифрову форму сигнали передаються в обчислювальне ядро системи, яке залежно від конкретної потреби може являти собою як малопотужний мікроконтролер, так і сучасний швидкодіючий комп'ютер.

Для відображення результатів діагностування в структуру системи необхідно включити відповідні засоби, які, зокрема, повинні забезпечувати авторизацію користувачів системи, розділення прав доступу, захист інформації.

У системах діагностування складних об'єктів може вимірюватися значна кількість діагностичних сигналів, що призводить до обміну величезними обсягами інформації між компонентами системи. Для зменшення навантаження на канали зв'язку (особливо, коли використовуються бездротові канали передачі даних) необхідна децентралізація обчислювальних ресурсів, що є одним з принципів концепції Smart Grid. Це реалізується таким чином: вимірювана реалізація діагностичного сигналу не передається в обчислювальне ядро системи безпосередньо, а піддається спрощеній обробці у тому модулі, що відповідає за її вимірювання. Далі, залежно від результатів такого проміжного аналізу цей модуль вирішує, яку інформацію надавати в обчислювальне ядро:

– взагалі не передавати ніякої інформації – якщо не було виявлено жодних відхилень від нормального стану;

– подати попереджувальний сигнал – якщо було виявлено несуттєві відхилення;

– надати вимірювану реалізацію в обчислювальне ядро для проведення повного аналізу – якщо виявлені відхилення можна вважати суттєвими;

– подати аварійний сигнал для негайного реагування при критичних відхиленнях.

Очевидно, що для виконання таких функцій модуль вимірювання та обробки діагностичних сигналів повинен мати власне обчислювальне ядро та алгоритмічне забезпечення.

Слід зазначити, що врахування ступеня критичності дефектів на етапі розробки системи дає можливість спростити її структуру, зменшити обсяги інформації, що обробляються в системі та передаються між її ієрархічними рівнями, і в кінцевому результаті, знизити вартість системи при збереженні її функцій на достатньому рівні.

Розподіл функцій між ієрархічними рівнями доцільно організувати таким чином:

Рівень I первинний відбір та підготовка діагностичних сигналів (вимірювання діагностичних сигналів, підсилення, аналогова фільтрація, перетворення в цифрову форму);

Рівень II попередня математична обробка і прийняття проміжних діагностичних рішень (прості алгоритми, реалізація яких не вимагає значних обчислювальних ресурсів, розділення інформації за ступенем критичності дефектів); сигналізація на вищий рівень при наявності дефектів; накопичення незначних обсягів вимірювальної інформації та передача її на вищий рівень (при відповідному запиті);

Рівень III накопичення, повноцінна обробка і глибокий аналіз даних, швидке реагування на аварійні сигнали з нижчого рівня, прийняття діагностичних рішень по об'єкту діагностики в цілому, архівація статистичних даних, прогнозування надійності та оцінка залишкового ресурсу обладнання, планування ремонтних робіт; відображення даних.

З урахуванням наведених вище міркувань, структуру системи діагностування електричних машин можна деталізувати так, як це показано на рис. 3, де позначено: ОД – об'єкт діагностики; ВП – вимірювальний перетворювач; БУ – блок узгодження; К – комутатор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; БП – блок перетворення; МК – мікроконтролер;

ЗБЗ – засоби бездротового цифрового зв'язку; ЕОМ – електронна обчислювальна машина; ППП – пакет прикладних програм для аналізу даних, прийняття діагностичних рішень, оцінки залишкового ресурсу; LAN – локальна мережа.

Системи технічного діагностування, контролю та моніторингу стану можуть забезпечити підвищення надійності та керованості всіх елементів електричної мережі

як визначальних чинників, необхідних для забезпечення високої якості електричної енергії, що постачається споживачам. Для цього системи технічного діагностування повинні забезпечувати двосторонній інформаційний обмін з іншими елементами мережі, а також децентралізацію обчислювальних та інформаційних ресурсів. Виконання цих вимог можливо за умови, що структура діагностичних систем побудована за ієрархічним принципом і відповідає описаній вище структурі.

Розробка дослідного зразка програмного комплексу помічника диспетчера з регулювання рівнів напруги у вузлах енергосистеми з використанням регулювальних системних елементів. Оперативно-диспетчерське управління режимами роботи як регіональних енергосистем, так і в цілому об'єднаної енергосистеми (ОЕС), має забезпечувати споживачів електричної енергії не тільки необхідною кількістю електроенергії, а й відповідної якості, у тому числі підтримувати необхідні рівні напруги у споживачів. Для забезпечення надійності, стійкості та економічності режимів роботи ОЕС та регіональних енергосистем оперативний персонал постійно контролює підтримання заданих рівнів напруги в контрольних точках.

Значне зниження напруги погіршує роботу електричного обладнання, спричинює перегрівання електродвигунів, зниження частоти їх обертів (для синхронних двигунів) і продуктивність механізмів. Зниження напруги також негативно позначається на роботі електроенергетичної системи. Зменшуються потужність генераторів та трансформаторів, запаси стійкості, збільшуються втрати електроенергії в електричних мережах. Підвищення напруги понад встановлені граничні рівні прискорює старіння ізоляції та створює загрозу пошкодження генераторів, трансформаторів та іншого електричного обладнання.

Одним із критеріїв вибору оптимального рівня напруги та компенсації реактивної потужності у споживачів є забезпечення мінімальних втрат електроенергії в електричних мережах.

Регулювання напруги в основній мережі здійснює диспетчерський персонал шляхом підтримання балансу реактивної потужності в енергосистемі й окремих вузлах, перерозподілу потоків реактивної потужності в електромережах за рахунок генерувальних потужностей, використання положення перемикаючих пристроїв поздовжнього регулювання (РПН) потужних автотрансформаторів, вмикання та вимикання шунтуючих реакторів, батарей статичних конденсаторів. Питання регулювання напруги в електричних мережах енергосистем значною мірою є локальним завданням, що в першу чергу визначається неможливістю передачі реактивної потужності на більш-менш значну відстань. Спроба компенсувати дефіцит реактивної потужності в окремому енергорайоні за рахунок віддаленого джерела реактивної потужності, як правило, приречена на поразку. Такий режим буде характеризуватись великими втратами реактивної потужності в елементах електричних мереж, а також додатковими втратами й активної потужності з низькою ефективністю підвищення напруги в дефіцитному енергорайоні. Останнім часом в електроенергетиці зростає незбалансованість регіонів, що в першу чергу визначається збільшенням генерації АЕС за рахунок великих блоків. В умовах суттєвого зменшення споживання електричної енергії зростання потужності АЕС призвело до роботи теплових електростанцій мінімальним складом генерувальних блоків, а відтак з обмеженим діапазоном генерування реактивної потужності.

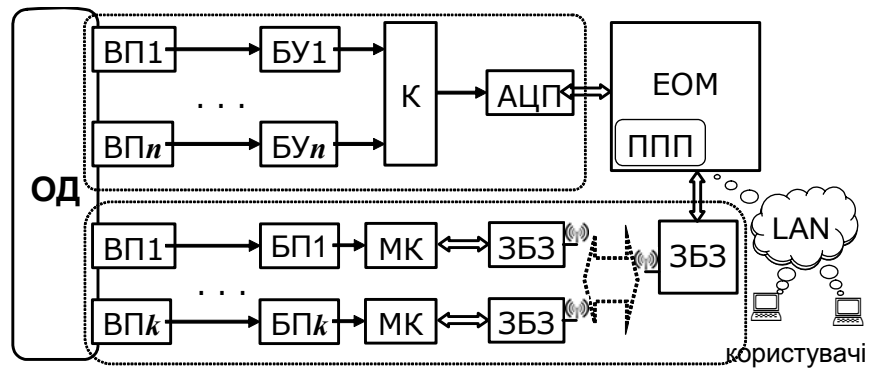


Рис. 3

Проблема регулювання напруги як для забезпечення надійності та стійкості енергосистеми, так і для забезпечення допустимих рівнів напруги у споживачів з часом тільки ускладниться і поступово пошириться на всі регіональні енергосистеми. Останнім часом на окремих найбільш проблемних підстанціях 330/110 кВ встановлюють не тільки батареї статичних конденсаторів, але і шунтуючі реактори на шинах 35, 10 кВ. Відставання впровадження локальних засобів регулювання напруги ускладнює підтримання допустимих рівнів напруги у споживачів. Наявність в ОЕС в окремих режимах, у тому числі в ремонтних (післяаварійних) режимах проблемних підстанцій свідчить про дефіцит регулюючих можливостей на даних підстанціях. У таких випадках вимагається залучення регулюючих можливостей регулювання напруги на прилеглих підстанціях з відповідною ефективністю, а відтак актуальною є задача визначення найбільш ефективних засобів регулювання напруги.

Виходячи з того, що проблемні підстанції з точки зору допустимих рівнів напруги можуть бути у будь-якому регіоні залежно від реальних режимів роботи енергосистем та можливих ремонтних (післяаварійних) схем, виникає необхідність для кожного вузла розрахункової схеми (підстанції, електростанції) визначити засоби та обсяги можливостей регулювання напруги.

При формуванні переліку підстанцій (електростанцій) розрахункової електричної моделі ОЕС, засобів регулювання, які можуть бути залучені до регулювання напруги для кожної підстанції, необхідно: визначити наявний склад генерувальних блоків, а відтак уточнити регулювальний діапазон за реактивною потужністю; уточнити стан роботи шунтуючих реакторів; з'ясувати фактичне значення коефіцієнта трансформації РПН на трансформаторах поперечно-го регулювання напруги (ТПР), виявити можливість та доступний діапазон регулювання.

Таким чином, помічник диспетчера має виконувати в основному такі функції:

- вести моніторинг на відповідність допустимим значенням рівнів напруги на підстанціях та електростанціях ОЕС;
- давати за вимогою рекомендації щодо регулювання напруг при виявленні відхилення останніх від допустимих меж у так званих проблемних вузлах у поточному нормальному режимі (і, можливо, у післяаварійних);
- допомагати технологу складати рекомендації диспетчерському персоналу щодо ведення режиму мережі за напругою при плановому виведенні в ремонт електротехнічного обладнання (автотрансформаторів, ліній високої напруги і т.п.).

Отже, помічник диспетчера має такий комплекс програмних засобів:

- алгоритм та програму формування переліку проблемних підстанцій;
- алгоритм та програму формування переліку підстанцій (електростанцій), засобів регулювання, які можуть бути залучені до регулювання напруги для кожної підстанції;
- базу даних регулювальних можливостей підстанцій та електростанцій;
- методику та програмне забезпечення формування файлу регулюючих діапазонів та ступенів регулювання напруги;
- методику та керуючий програмний модуль для забезпечення послідовного виконання розрахунків усталених режимів відповідно до визначеного переліку підстанцій.
- програмний модуль формування спільної таблиці з ранжируванням переліком підстанцій та засобів регулювання напруги для забезпечення допустимих рівнів напруги [13].

Розрахунки усталених режимів виконано послідовно, в першу чергу з залученням засобів регулювання на більш віддалених підстанціях (електростанціях). Дано оцінку ефективності та економічності залучення засобів регулювання напруги на тій чи іншій підстанції. На кінцевому етапі технологу або черговому диспетчеру має бути запропоновано ранжируваний перелік підстанцій з засобами регулювання напруги для підтримання необхідних рівнів на проблемній підстанції.

Розроблені алгоритми та програми базуються на реалізації інженерних методів достовірності, підкріплені багатолітнім досвідом балансування електричних режимів і повністю виключають ручну роботу при обробці результатів телевимірювань.

Висновки. Розвинуто теорію щодо визначення параметрів і характеристик електромагнітних процесів, котрі супроводжують роботу електроенергетичного обладнання та містять

у собі інформацію про надійність та безпечність його функціонування. Запропоновано, спроектовано та виготовлено зразки інформаційно-вимірювальних систем, що дають змогу отримувати кількісні оцінки запропонованих параметрів і характеристик, за якими визначається технічний стан вузлів електроенергетичного обладнання.

1. *Васецкий Ю.М.* Электромагнитное поле пространственного контура с током над плоской поверхностью проводящего тела с сильным скин-эффектом // *Электричество*. – 2014. – № 3. – С. 55–61.
2. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
3. *Гуляев В.А.* Вычислительная диагностика. – К.: Наук. думка, 1992. – 232 с.
4. *Захарченко С.Н., Шидловская Н.А.* Моделирование сопротивления гранулированных токопроводящих сред параметрическими зависимостями // *Электронное моделирование*. – 2012. – Т. 34. – № 5. – С. 91–102.
5. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1965. – 704 с.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 624 с.
7. *Мыслович М.В., Сисак Р.М.* Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об'єктів // *Техн. електродинаміка*. – 2015. – № 1. – С. 78–85.
8. Надежность и эффективность в технике: Техническая диагностика. – Т.9. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
9. *Поливанов К.М.* Физические основы электротехники. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 558 с.
10. *Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П.* Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // *Техн. електродинаміка*. – 2010. – № 6. – С. 44–50.
11. *Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П.* Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні // *Техн. електродинаміка*. – 2012. – № 5. – С. 52–67.
12. *Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко и др.; Под общ. ред. В.В.Клюева.* – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
13. *Твердяков В.В.* Помічник диспетчера з регулювання рівнів напруги у вузлах енергосистем з використанням регульованих системних елементів // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – № 24. – С. 32–37.
14. *Шидловская Н.А., Захарченко С.Н.* Моделирование процессов в цепи разряда конденсатора на искроэрозийную нагрузку // *Электронное моделирование*. – 2012. – Т. 34. – № 6. – С. 73–81.
15. *A Ventyx Whitepaper: Utility Asset Management Strategy in the Smart Grid Era*, Ventyx, 2011.
16. *Moslehi K., Kumar R.* Smart Grid – a reliability perspective, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010. – IEEE. – 2010. – PP. 1–8.
17. *Myslovych M., Sysak R.* Design peculiarities of multi-level systems for technical diagnostics of electrical machines // *Computational Problems of Electrical Engineering*. – 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 47–50.

УДК 621.3.011.72+621.3.013+621.314: 621.391

Н.А. Шидловская, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.М. Васецкий**, докт. техн. наук, **М.В. Мыслович**, докт. техн. наук, **В.В. Твердяков**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Исследование электромагнитных процессов в узлах электроэнергетического оборудования и его использование для повышения его надежности

На протяжении 2014 года в отделе теоретической электротехники Института электродинамики НАН Украины была проведена следующая работа. Рассмотрены теоретические подходы создания современных математических моделей, методов, алгоритмов и аппаратных средств, направленных на повышение безопасности и надежности функционирования электроэнергетического оборудования. Для дальнейшего повышения эффективности анализа и оптимизации переходных электромагнитных процессов в параметрических цепях продемонстрирована возможность точного решения дифференциального уравнения, которое описывает переходный процесс в последовательной RLC-цепи для случая представления параметрической зависимости сопротивления суммой экспонент. Получено точное аналитическое решение задачи расчета электромагнитного поля пространственного контура с током над плоской поверхностью проводящего тела с сильным скин-эффектом. Показано, что в общем случае для исходного контура пространственной конфигурации источниками электромагнитного поля, помимо тока контура и поверхностного тока являются также электрические заряды, поверхностная плотность которых определяется нормальной к границе составляющей векторного потенциала исходного контура. Приведена общая структура многоуровневой системы технической диагностики и мониторинга состояния электрических машин, особенностью которой является соответствие требованиям «интеллектуальных сетей». Система обеспечивает измерение и передачу диагностической информации без необходимости привлечения оператора и осуществляет выявление, локализацию и классификацию критичности дефектов с учетом иерархической структуры электроэнергетических объектов. Описаны основные функции компонентов, выполняющиеся на разных иерархических уровнях этой системы. Описаны ключевые функции и комплекс программных средств опытного образца программного комплекса помощника диспетчера по регулированию уровней напряжения в узлах объединенной энергосистемы с использованием регуляторных системных элементов. Библ. 17, рис. 3.

Ключевые слова: электрическая цепь с параметрической нагрузкой, электромагнитное поле пространственного контура с током, надежность электроэнергетического оборудования, советчик диспетчера.

N.A. Shydlovska, Yu.M. Vasetsky, M.V. Myslovich, V.V. Tverdiakov
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Investigation of electromagnetic processes in the parts of electric power equipment and its use for improving of the equipment reliability

Theoretical approaches of creation of modern mathematical models, methods, algorithms and hardware aimed at improving the safety and reliability of an electric power equipment are considered. To further improve the efficiency of the analysis and optimization of transient electromagnetic processes in parametric circuits, it was demonstrated that the exact solution exists for the differential equation which describes the transition process in a series RLC-circuit for the case when parametric dependence of the resistance is represented by a sum of exponentials. An exact analytical solution is received for the electromagnetic field calculation problem of the spatial current loop located above the flat surface of the conductive body with a strong skin effect. It is shown that in the general case for the initial contour of the spatial configuration the sources of electromagnetic fields, in addition to the loop current and surface current, are also electrical charges, the surface density of which is determined by the component of the vector potential which is normal to the boundary of the initial contour. The general structure of a multilevel system of technical diagnostics and status monitoring of electrical machines is described. The peculiarity of this system is its compliance to "smart grid" requirements. The system provides the measurement and transmission of diagnostic information without the need for the operator and provides detection, classification and localization of critical defects while accounting for the hierarchical structure of electric power facilities. The main functions of the system components are described, which are performed on different hierarchical levels of the system. The key features and software for prototype of dispatcher advisor system are described. The advisor system will help dispatcher in regulation of the voltage levels at the nodes of the interconnected power system with usage of adjustment elements. References 17, figures 3.

Key words: electrical circuit with a parametric load, electromagnetic field of a spatial current loop, reliability of electric power equipment, dispatcher advisor.

Надійшла 14.04.2015
Received 14.04.2015

№ 14. ВІДДІЛ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

УДК 621.311.13

ОБМЕЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ДО ЛІНІЇ НЕНАВАНТАЖЕНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА

В.Г. Кузнецов, чл.-кор. НАН України, **Ю.І. Тугай**, докт. техн. наук, **О.Г. Шполянський**, канд. техн. наук, **І.Ю. Тугай**, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський**, магістр, **В.А. Мельничук**, магістр
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна
e-mail: shpolyanskyy@ied.org.ua

Наведено нові наукові результати досліджень, спрямованих на удосконалення методів аналізу аномальних режимів у магістральних електричних мережах для обмеження резонансних перенапруг, що проводились у відділі оптимізації систем електропостачання ІЕД НАН України у 2014 році. Удосконалено імітаційну модель системи електропередачі, яка включає в себе повітряну лінію електропередачі 750 кВ з розподіленими параметрами, шунтувальні реактори, вимикачі з пристроями керованої комутації та автотрансформатор з нелінійною вольт-амперною характеристикою. Проведено серію розрахунків можливих перенапруг при підключенні ненавантаженого автотрансформатора для різних значень середньогометричних відстаней між фазами та проводами в фазі лінії. Виконано дослідження впливу кута включення вимикача на рівні резонансних перенапруг. Для ліній різної довжини вперше отримано значення кута включення вимикача, які дають змогу обмежити перенапруги такого класу або зовсім уникнути їх. Досліджено умови появи ферорезонансних процесів та розглянуто заходи по їх попередженню та обмеженню в сучасних електричних мережах. Бібл. 10, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: резонансні перенапруги, керована комутація, підключення ненавантаженого автотрансформатора, ферорезонансний процес.