

ДЕЯКІ ПИТАННЯ 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

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Висвітлюються основні наукові результати, отримані у відділі теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки протягом 2013 року. Бібл. 15, рис. 8.

Ключові слова: електричне коло, перемикач, компенсація реактивної потужності, надпровідний індуктивний накопичувач енергії, моделювання, вібраційна діагностика, рухома частина електричної машини.

Сучасна електроенергетична система являє собою складний комплекс, що вимагає формування цілісної багаторівневої системи керування, яка б забезпечувала високий рівень автоматизації та надійності всієї системи. Наукові дослідження, спрямовані на досягнення цієї головної мети, можна звести до двох основних напрямків. Перший – це створення високонадійних компонентів, що формують електроенергетичну систему. До нього, в першу чергу, належить різне електротехнічне та електроенергетичне обладнання, призначене як для вироблення та передачі електроенергії, так і для забезпечення її якості на необхідному рівні. Зокрема, останнім часом набувають значного поширення пристрої компенсації реактивної потужності та надпровідні накопичувачі електричної енергії. Другий напрямок полягає у створенні ефективних методів та засобів управління енергосистемою, що вимагає отримання актуальної інформації про фактичний стан кожного енергетичного об'єкта, оскільки саме аналіз цієї інформації та відповідне реагування забезпечують працездатність та підвищення надійності системи в цілому. Важливим джерелом такої інформації серед інших є системи моніторингу та технічної діагностики, призначені для аналізу технічного стану різного обладнання електроенергетичних систем.

У 2013 році вчені відділу теоретичної електротехніки продовжували працювати над науковими дослідженнями в рамках обох вказаних напрямків. Зокрема, проводилися наукові дослідження згідно з робочими планами по темах «Комплекс-3», «Сигма-ШЗ» та «Об'єкт-2» у традиційних для тематики відділу напрямках:

- розвиток теорії та створення ефективних аналітичних методів дослідження процесів у нелінійних електричних колах (група під керівництвом чл.-кор. 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, проводилися дослідження в рамках двох науково-технічних проектів за комплексними програмами наукових досліджень НАН України «Ресурс» і «Об'єднання».

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

Дослідження особливостей перехідних процесів у послідовному RLC -колі з синусоїдним джерелом живлення та реверсуваням ємності у режимах, близьких до резонансних. При створенні джерел реактивної потужності, які є важливою ланкою систем забезпечення належної якості електричної енергії, використовують реверсування реактивного еле-

мента в послідовному RLC -колі синусоїдної напруги [12]. Оскільки при реверсуванні індуктивності або ємності має місце розрив першого роду [1] функції струму або заряду, тому для аналізу процесів у зазначених колах зручно застосувати теорію диференціальних рівнянь з імпульсною дією [8].

Розглянемо послідовне RLC -коло, в якому через певні проміжки часу має місце реверсування ємності [10]. Оскільки внаслідок реверсувань ємності структура кола не змінюється, то диференціальне рівняння, що описує процеси у ньому, незалежно від номера інтервалу між перемиканнями має вигляд

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = \frac{U_m}{L} \sin(\omega_1 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де q – заряд на конденсаторі; R, L, C – параметри активного і реактивних елементів; U_m – амплітуда; ω_1 – частота; φ_0 – початкова фаза напруги джерела живлення.

Розв'язком рівняння (1) буде

$$q = C_{1n} e^{\lambda_1 t} + C_{2n} e^{\lambda_2 t} + \frac{U_m}{L} \alpha \sin(\omega_1 t + \varphi_0 + \delta) \quad (2)$$

і відповідно для струму у колі можемо записати

$$i = C_{1n} \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + C_{2n} \lambda_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{U_m}{L} \alpha \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_0 + \delta), \quad (3)$$

де $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – частота власних коливань; C_{1n}, C_{2n} – перша і друга сталі інтегрування після n -го перемикання;

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + \frac{R^2}{L^2} \omega_1^2}}; \quad (4)$$

$$\delta = \arctg \left(-\frac{\frac{R}{L} \omega_1}{\omega_0^2 - \omega_1^2} \right). \quad (5)$$

При нульовому перемиканні системи в момент часу $t = 0$ початковими умовами є

$$q|_{t=0} = Q_0; \quad i|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

Якщо перемикання відбуваються у моменти часу, коли заряд на конденсаторі досягає певної величини q_* , вирази для сталих інтегрування набувають вигляду

$$\begin{aligned} C_{1n} &= C_{10} + \frac{2\lambda_2 q_*}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(e^{-\lambda_1 t_1} + e^{-\lambda_1 t_2} + \dots + e^{-\lambda_1 t_n} \right), \\ C_{2n} &= C_{20} - \frac{2\lambda_1 q_*}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(e^{-\lambda_2 t_1} + e^{-\lambda_2 t_2} + \dots + e^{-\lambda_2 t_n} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Проаналізуємо процеси у послідовному RLC -колі в режимі, близькому до резонансного [9]. Введемо позначення $\omega_0 = \omega_1 + \Delta$, де Δ – мала величина; $\frac{R}{L} = 2h$, і для спрощення формул припустимо $\varphi_0 = 0$.

Перепишемо співвідношення (4), (5) з огляду на введені позначення та формули наближених обчислень [1]:

$$\alpha \approx \frac{1}{2\omega_1 h} - \frac{\Delta^2 (\omega_1 + \Delta)}{4\omega_1^2 h^3}; \quad \delta = -\arctg \frac{h}{\Delta} \approx -\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta}{h}. \quad (8)$$

Скористаємось виразами (8) для запису вимушених складових заряду та струму у співвідношеннях (2), (3):

$$\frac{U_m}{L} \alpha \sin(\omega_1 t + \delta) = \frac{U_m}{L} \left\{ \frac{-\cos \omega_1 t}{2\omega_1 h} + \frac{\Delta \sin \omega_1 t}{2\omega_1 h^2} + \frac{\Delta^2 \cos \omega_1 t}{4\omega_1 h^3} - \Delta^3 \left(\frac{\sin \omega_1 t}{4\omega_1 h^4} - \frac{\cos \omega_1 t}{4\omega_1^2 h^3} \right) + \frac{\Delta^4 \sin \omega_1 t}{4\omega_1^2 h^4} \right\}, \quad (9)$$

$$\frac{U_m}{L} \alpha \omega_1 \cos(\omega_1 t + \delta) = \frac{U_m}{L} \left\{ \frac{\sin \omega_1 t}{2h} + \frac{\Delta \cos \omega_1 t}{2h^2} - \frac{\Delta^2 \sin \omega_1 t}{4h^3} - \Delta^3 \left(\frac{\cos \omega_1 t}{4h^4} + \frac{\sin \omega_1 t}{4\omega_1 h^3} \right) + \frac{\Delta^4 \cos \omega_1 t}{4\omega_1 h^4} \right\}.$$

Враховуючи тільки перший порядок малості по Δ для сталих інтегрування C_{10}, C_{20} , можемо записати

$$C_{10} = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(Q_0 + \frac{U_m}{\omega_1 R} \right) - \Delta \frac{U_m}{(\lambda_1 - \lambda_2) Rh} = C_{10p} - \Delta \frac{U_m}{(\lambda_1 - \lambda_2) Rh};$$

$$C_{20} = -\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(Q_0 + \frac{U_m}{\omega_1 R} \right) + \Delta \frac{U_m}{(\lambda_1 - \lambda_2) Rh} = C_{20p} + \Delta \frac{U_m}{(\lambda_1 - \lambda_2) Rh}.$$

Для заряду на відповідному проміжку маємо

$$q_0(t) = q_{0*}(t) + \frac{\Delta U_m}{Rh} \left\{ \frac{-e^{\lambda_1 t} + e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2} + \frac{1}{\omega} \sin \omega_1 t \right\};$$

$$i_0(t) = i_{0*}(t) + \frac{\Delta U_m}{Rh} \left\{ \frac{-\lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2} + \frac{1}{\omega} \cos \omega_1 t \right\}, \quad (11)$$

$$\text{де } q_{0*} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(Q_0 + \frac{U_m}{\omega_1 R} \right) (-\lambda_2 e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) - \frac{U_m}{\omega_1 R} \cos \omega_1 t; \quad i_{0*} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (-e^{\lambda_1 t} + e^{\lambda_2 t}) + \frac{U_m}{R} \sin \omega_1 t.$$

Розмірковуючи аналогічно, одержимо співвідношення для C_{11}, C_{21} та $q_1(t)$:

$$C_{11} = C_{10p} + \frac{2\lambda_2 q_{0p}(t_1)}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_1 t_1} + \frac{\Delta U_m}{(\lambda_1 - \lambda_2) Rh} \left\{ -\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} + \frac{2\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t_1} + \frac{2\lambda_2}{\omega_1} \sin \omega_1 t_1 \right\};$$

$$C_{21} = C_{20p} - \frac{2\lambda_1 q_{0p}(t_1)}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t_1} - \frac{\Delta U_m}{(\lambda_1 - \lambda_2) Rh} \left\{ \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} - \frac{2\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t_1} + \frac{2\lambda_1}{\omega_1} \sin \omega_1 t_1 \right\},$$

$$i_1(t) = C_{10*} \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + C_{20*} \lambda_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{2\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} q_{0*}(t_1) (e^{\lambda_1(t-t_1)} + e^{\lambda_2(t-t_1)}) + \frac{\Delta U_m}{(\lambda_1 - \lambda_2) Rh} \left\{ -\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \times \right.$$

$$\left. \times (\lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{\lambda_2 t}) + \frac{2\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{\lambda_1(t-t_1)} e^{\lambda_2 t_1} + e^{\lambda_2(t-t_1)} e^{\lambda_1 t_1}) \right\} + \frac{U_m}{R} \sin \omega_1 t + \frac{\Delta U_m}{Rh} \cos \omega_1 t. \quad (13)$$

Зазначимо також, що у виразах (10)...(13) необхідно мати на увазі, що згідно з формулами наближених обчислень [1]

$$\lambda_{1,2} = -h \pm \sqrt{h^2 - \omega_1^2} \mp \Delta b; \quad \lambda_1 - \lambda_2 = 2\sqrt{h^2 - \omega_1^2} - 2\Delta b;$$

$$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \approx \frac{\omega_1 b}{2} + \Delta b + \frac{\Delta b^3}{2} + \Delta^2 \omega_1 b; \quad \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = -\frac{h}{\sqrt{h^2 - \omega_1^2}} - \frac{\Delta b h}{h^2 - \omega_1^2};$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{-h + \sqrt{h^2 - \omega_1^2} - \Delta b}{2\sqrt{h^2 - \omega_1^2} - 2\Delta b}; \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{-h - \sqrt{h^2 - \omega_1^2} + \Delta b}{2\sqrt{h^2 - \omega_1^2} - 2\Delta b},$$

$$\text{де } b = \frac{\omega_1}{\sqrt{h^2 - \omega_1^2}}.$$

Аналізуючи співвідношення (9)...(14), бачимо, що різниця між частотою власних коливань кола та частотою вимушених коливань Δ більше впливає на вільну складову перехідного процесу.

На рис. 1–6 наведено графіки напруги на ємності та струму через неї в режимах, близьких до резонансних для восьми перемикачів. При цьому період керуючого сигналу вдвічі менший за період вхідної напруги. На всіх рисунках крива 1 відповідає симетричному ($t_2 - t_1 = t_1 - t_0 = 0,005$ с), а криві 2 та 3 – несиметричному керуванню реверсуванням ємності. При цьому для кривих 2 виконуються співвідношення $t_1 - t_0 = 0,001$ с; $t_2 - t_1 = 0,009$ с, а для кривих 3 – $t_1 - t_0 = 0,0025$ с; $t_2 - t_1 = 0,007$ с.

Крива 4 відповідає синусоїді вхідної напруги. Рис. 1–3 відповідають коливальному розряду ємності з параметрами кола: $R = 10^{-11}$ Ом; $C = 5 \cdot 10^{-5}$ Ф; $U_m = 1$ В; $\omega_1 = 100\pi$; $\varphi_0 = \pi/2$, а рис. 4–6 – аперіодичному розряду ($R = 130$ Ом). Зазначимо, що на рис. 1 та 4 зображено криві, відмінність яких від резонансних дуже незначна ($\Delta = 10^{-8}$), при цьому $L = 0,202642368$ Гн. На інших кривих Δ складає 10 % від ω_1 . При цьому для кривих рис. 2 і 5 – у бік збільшення ($\omega_0 = 110\pi$, $L = 0,167473031$ Гн), а для рис. 3 і 6 – у бік зменшення ($\omega_0 = 90\pi$, $L = 0,253302959$ Гн). З рисунків видно, що в аперіодичному режимі розряду ємності процес швидко врівноважується незалежно від того, має місце симетричне чи несиметричне керування реверсуванням ємнісного елемента. У той же час в коливальному режимі роботи кола врівноваження має місце лише при симетричному керуванні перемикачними. Обидва режими роботи характеризуються більшими значеннями напруги на ємності при $\omega_0 > \omega_1$.

Як зазначалось у роботі [11], з параметрами, що забезпечують коливальний режим, і $L = 0,032422778$ Гн при співвідношенні 0,003/0,007 с та 0,007/0,003 с між сигналом та паузою керуючого сигналу має місце розгойдування напруги. При цьому кількість перемикачів, необхідних для досягнення усталеного режиму, сягала кількох тисяч.

З рис. 1–3 видно, що при близькості частот ω_0 і ω_1 аналогічне розгойдування має місце при співвідношенні між сигналом та паузою 0,001/0,009 с. Це доводить, що небезпечні для роботи кола співвідношення між сигналом та паузою керуючого сигналу значною мірою залежать від співвідношення між ω_0 і ω_1 . Зазначимо також, що аперіодичний режим роботи кола є найбільш урівноваженим і характеризується відсутністю розгойдувань напруги.

Надпровідні індуктивні накопичувачі енергії з обмеженою кількістю котушок та механічною утримуючою системою всередині тороїдального об'єму електроенергетичного призначення. В рамках держбюджетних тем „Комплекс-3” та „Об'єкт 2” у 2013 році проводились дослідження у напрямку розробки надпровідних індуктивних накопичувачів енергії (НПН) для їх використання в електроенергетичних системах.

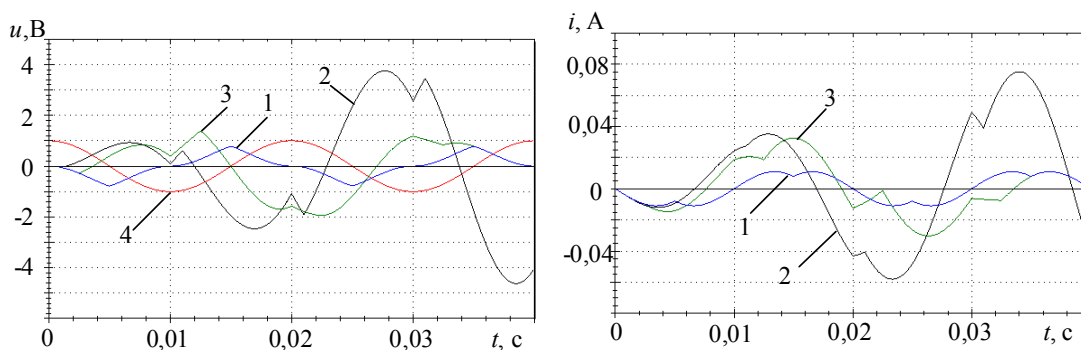


Рис. 1

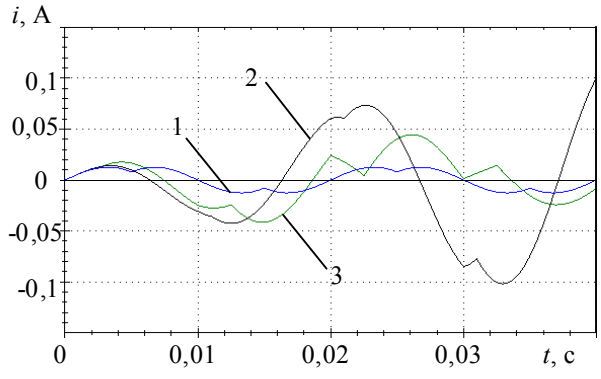
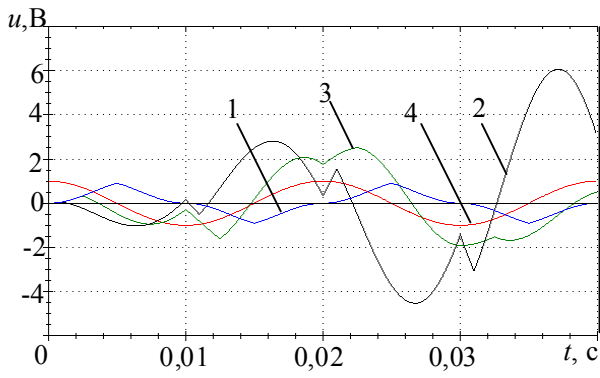


Рис. 2

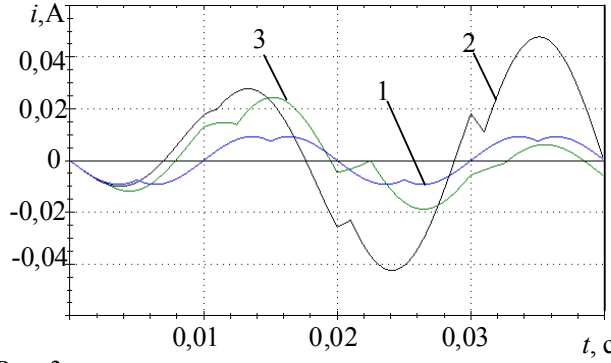
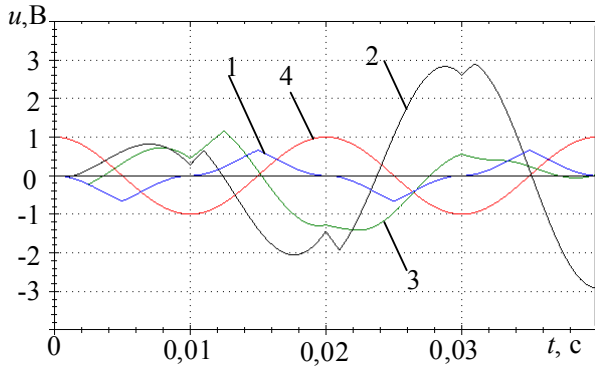


Рис. 3

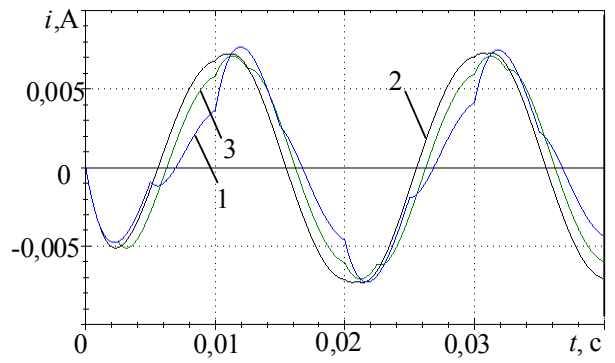
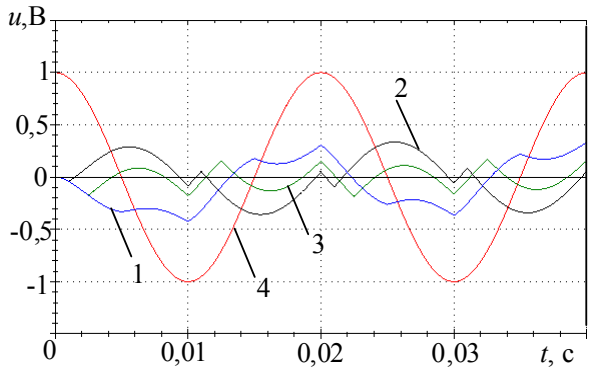


Рис. 4

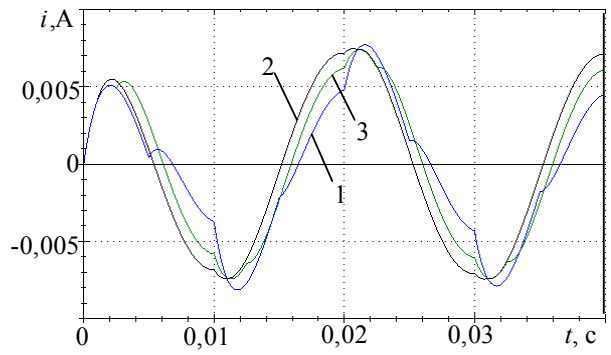
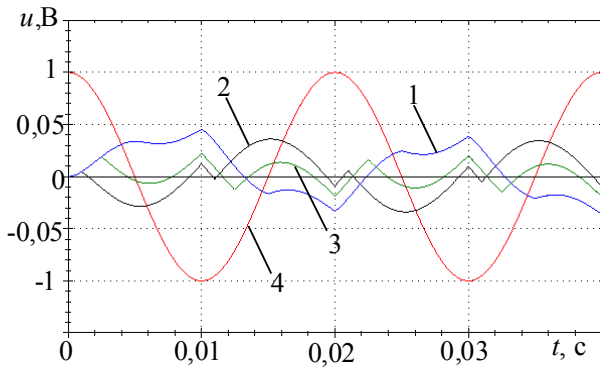


Рис. 5

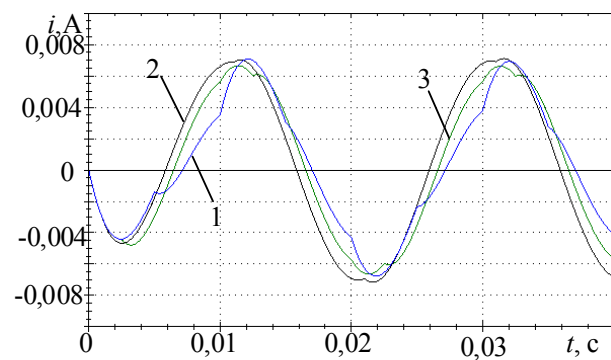
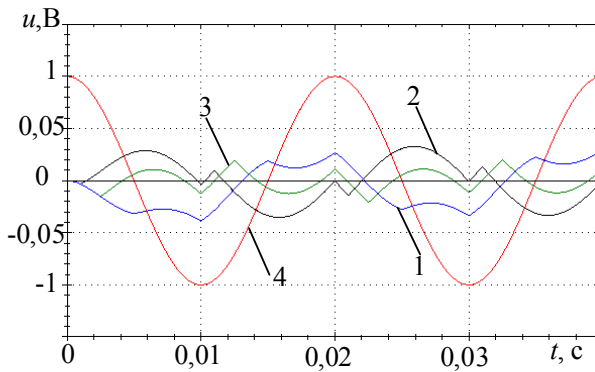


Рис. 6

Дослідження тороїдальних соленоїдів з котушками різної конфігурації та розміщенням механічної утримуючої системи всередині тора показали, що вони володіють рядом переваг з точки зору механічних властивостей системи [2, 14, 15]. У таких індуктивних накопичувачів для компенсації електродинамічних сил використовуються стяжки і опорні конструкції, у яких відсутні згинальні механічні моменти і вони дозволяють досягнути однакового максимально допустимого значення механічних напружень в елементах конструкції. Внаслідок цього об'єм утримуючої системи значно знижується і не перевищує відповідний об'єм для більш геометрично складних безмоментних D -подібних тороїдальних накопичувачів, що використовують в електроенергетиці.

Отримання точних масогабаритних показників НППН має важливе значення, оскільки вони впливають на кінцеву вартість пристрою. Математична модель у вигляді суцільної струмової поверхні дає можливість, в більшості випадків за допомогою аналітичних виразів, знайти наближене значення усіх розмірних енергетичних і силових параметрів, а також значення магнітного поля на обмотці та всередині тора. Зі збільшенням товщини обмотки необхідно враховувати її вплив на параметри накопичувача енергії [7]. Тому метою дослідження було визначення розподілу магнітних полів, отримання значень параметрів тороїдальних магнітних систем з обмеженою кількістю котушок залежно від відносної величини перерізу, кількості та взаємного розміщення котушок.

Для дослідження магнітних систем з визначеною кількістю котушок, окрім великого радіуса $R = (\rho_1 + \rho_2)/2$ і відносної величини його перерізу $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_1 + \rho_2)$, вводяться додаткові геометричні параметри: кількість котушок N , найменша відстань між ними h_b , а також розміри перерізу обмотки котушок: товщина Δ та ширина h_c (рис. 7).

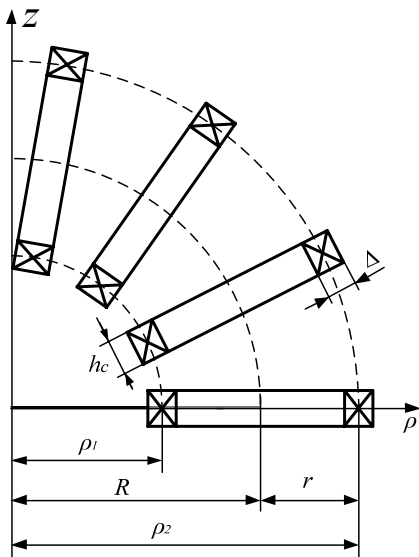


Рис. 7

Відстань h_b при заданій ширині котушок h_c не є незалежною величиною, причому h_c можна виразити через значення безрозмірного коефіцієнта стикування k_{cm} , як $h_c = h_{cn} k_{cm}$. Звичайно при конструюванні намагаються розташовувати котушки якомога ближче одна до одної, коли $k_{cm} \approx 1$.

Основними масогабаритними параметрами індуктивних накопичувачів енергії є: розміри індуктивного накопичувача (великий радіус тора R), маса і об'єм надпровідної обмотки V_{sc} , маса і об'єм V_t та V_c матеріалу механічної утримуючої системи, що сприймають відповідно сили розтягу і стиску.

Згадані вихідні параметри залежать окрім конфігурації магнітної системи (відносної величини перерізу тора ε) також від властивостей надпровідного матеріалу обмотки: допустимого значення густини струму j_m , індукції B_m ; матеріалу механічної утримуючої системи: припустимих значень механічних напруг розтягу σ_t і стиску σ_c .

Вплив дискретності обмотки проявляється залежно від кількості котушок N , відносної величини перерізу тора ε , а також від способу взаємного розміщення котушок, що відображає коефіцієнт стикування k_{cm} .

Коефіцієнт стикування залежить від найменшої відстані між сторонами котушок на радіусі $\rho'_1 = \rho_1 - \Delta/2$ (рис. 7) і може бути визначений як $k_{cm} = h_{cn}/h_c$, де h_c, h_{cn} – ширина котушок при точному стикуванні та при наявності незаповненого обмоткою проміжку між котушками відповідно, тобто при збільшенні параметра k_{cm} ширина котушок, з яких складається тор, збільшується.

У цьому дослідженні вхідними параметрами вважаються: енергоємність W , властивості матеріалів B_m , j_m , σ_c , σ_t , а також параметри, які визначають геометричну конфігурацію магнітної системи – N , ε , k_{cm} . Вихідними параметрами є, насамперед, масогабаритні параметри індуктивного накопичувача, а також геометричні параметри надпровідної обмотки: її товщина Δ та ширина h_c .

За допомогою чисельних методів розрахунку виконано розрахунок параметрів тороїдальних надпровідних магнітних систем з котушками круглої форми і утримуючою системою у вигляді кілець найменшого радіуса. Дослідження проведено для реального індуктивного накопичувача з наступними вхідними параметрами: енергії $W = 450$ МДж, максимальна індукція на обмотці $B_m = 5$ Тл, густина струму $j_m = 4 \cdot 10^7$ А/м². Ці параметри відповідають накопичувачу з надпровідною обмоткою з низькотемпературного надпровідника NbTi і дають змогу забезпечити виконання важливих функцій в електроенергетиці. Результати отриманих розрахунків з допомогою математичної моделі у вигляді дискретних котушок порівнюються з раніше отриманими даними при розрахунку з допомогою моделі у вигляді суцільної струмової поверхні.

Встановлено, що для тороїдальних магнітних систем з обмоткою кінцевої товщини безрозмірні параметри (ті, що характеризують вплив конфігурації магнітної системи на максимальну величину магнітного поля, енергетичні та силові характеристики, а також на масогабаритні параметри) лише наближено з певною похибкою є незалежними від загальної накопиченої енергії поля і властивостей надпровідної обмотки – допустимих максимальних значень індукції та густини струму.

Дослідження впливу енергії магнітного поля на величину безрозмірних параметрів показало, що в широкому діапазоні енергоємності пристроїв, призначених для можливого використання в електроенергетиці, зміна величини безрозмірних параметрів не перевищує 10 %. Це свідчить про можливість використання з певною похибкою ідеалізованої моделі і при врахуванні кількості та реальних розмірів перерізу котушок.

Дискретність надпровідної обмотки більш суттєво впливає на величину радіального розміру магнітної системи, ніж на величину об'єму надпровідника. В цілому дослідження показали, що похибка, з якою визначено параметри магнітної системи за допомогою простішої ідеалізованої математичної моделі, при вибраному значенні енергії не перевищує 10 %, тобто може використовуватися з достатньою точністю на першому етапі розробки надпровідного пристрою.

Як показали дослідження, найбільший вплив дискретності магнітної системи спостерігається для об'єму опорної системи. Для значної кількості котушок значення об'єму опорної системи наближаються до отриманих з допомогою простішої математичної моделі у вигляді суцільної струмової поверхні. Вибір котушок меншої ширини, тобто при $k_{cm} < 1$, призводить до послаблення взаємодії між ними. В результаті сили, що діють на опорний циліндр, зменшуються, максимальне по модулю значення відхилення об'єму опорної системи становить $|\beta_{Qc}| \approx 60\%$ при $\varepsilon = 0,2$. Таким чином, запропонована математична модель тороїдальної магнітної системи з обмеженою кількістю котушок дає змогу визначити вплив дискретності реальної надпровідної обмотки на параметри магнітної та механічної утримуючої системи індуктивного накопичувача.

В цілому дискретний характер обмотки найбільше впливає на параметри механічної утримуючої системи, причому в найбільшому ступені на величину об'єму опорної системи, ніж на об'єм конструктивних елементів, що знаходяться під дією напруження розтягу. Це, насамперед, пов'язано з тим, що котушки більш розходяться на зовнішньому радіусі тора, ніж на внутрішньому.

Дослідження слід продовжити у напрямку вибору ефективних асимптотичних методів для розрахунку магнітних полів і параметрів тороїдальних індуктивних накопичувачів енергії з обмеженою кількістю котушок, оскільки обсяг розрахунку суттєво залежить від кількос-

ті елементів дискретизації обмотки. Проведені розрахунки чисельними методами показують, що для отримання точних значень параметрів необхідний значний час, що найбільш суттєво проявляється при визначенні параметрів механічної утримуючої системи.

Особливості моделювання вібраційних процесів рухомих вузлів електроенергетичного обладнання з метою їх застосування у системах технічного вібродіагностування. Однією з ключових задач при створенні методів та засобів для визначення технічного стану вузлів електроенергетичного обладнання (ЕО) є побудова математичних моделей фізичних процесів, які супроводжують роботу цих вузлів. Очевидно, що для досягнення високої достовірності результатів діагностування вони мають якомога точніше описувати фізичні процеси, на основі аналізу котрих приймаються діагностичні рішення. Характерною особливістю фізичних процесів, які відбуваються під час роботи ЕО змінного струму, а також ЕО, що містить рухомі (оберткові) вузли, є, з одного боку, їхня циклічність (регулярність), а з іншого – вплив додаткових чинників випадкової природи, що виникають безпосередньо у вузлах працюючого обладнання. Так, шихтовані магнітопроводи трансформаторів піддаються дії змінного магнітного поля, викликаного періодичними струмами, що протікають в обмотках; підшипники роторних машин знаходяться під впливом циклічно змінних механічних сил, викликаних обертанням валів; тиск у циліндрах дизель-електричних агрегатів змінюється згідно з робочим процесом двигуна тощо. При цьому значення таких процесів не повторюються точно (в математичному розумінні) у кожному циклі (періоді), а мають стохастичний характер. Отже, математична модель діагностичних процесів повинна враховувати одночасно як циклічність, так і стохастичність досліджуваних фізичних процесів.

На сьогодні широко використовуються, особливо у вібродіагностиці, математичні моделі на основі стаціонарних випадкових процесів. Але такі моделі не враховують циклічність досліджуваних процесів. Тому задача розробки нових математичних моделей, більш адекватних досліджуваним фізичним процесам, є актуальною.

Головною метою наукових досліджень, які проводилися у цьому напрямку, була розробка на базі класу лінійних випадкових процесів узагальненої математичної моделі вібраційних процесів, що супроводжують роботу рухомих вузлів ЕО, з метою подальшого використання цієї моделі при створенні нових методів та технічних засобів діагностування такого обладнання.

Для побудови стохастичних математичних моделей різних фізичних процесів, що супроводжують роботу вузлів ЕО, в ряді робіт було використано теорію лінійних випадкових процесів (ЛВП). Це дало можливість отримувати повні ймовірнісні характеристики досліджуваних процесів (наприклад, моменти будь-якого порядку) у загальному випадку [6]. У свою чергу це дозволило встановити найбільш інформативні діагностичні ознаки і таким чином підвищити точність, надійність та достовірність діагностування технічного стану рухомих вузлів ЕО. Разом з тим у більшості робіт досліджувалися стаціонарні ЛВП, що внаслідок сказаного вище обмежує їх застосування при діагностиці оберткових вузлів ЕО.

У ході досліджень, що проводились у відділі, було розглянуто питання побудови та практичного використання математичних моделей лінійних періодичних випадкових процесів (ЛПВП) [5] для опису вібраційних процесів, що супроводжують роботу електричних машин (ЕМ). Використання цих моделей при дослідженні різних типів діагностичних сигналів дає змогу побудувати ефективні алгоритми їх аналізу та класифікації дефектів ЕМ.

Зазначимо, що для побудови математичної моделі вібрацій необхідно виділити вузол або елемент, який діагностується. Основний інтерес являють вібрації саме цього вузла, які мають розглядатись як діагностичний сигнал. Вібрації, що породжуються іншими збуджувальними силами, повинні розглядатись як завади. Отже, припустимо, що необхідно провести визначення стану пресування шихтованого магнітопроводу ротора ЕМ.

Відповідно до поставленої у даній роботі задачі, вимірювання вібрацій здійснюється під час роботи ЕМ за допомогою акселерометра, що розташований у торцевій частині ротора ЕМ [3, 4]. У точці вимірювання з певною інтенсивністю спостерігаються вібрації, які зумовлені різними збуджувальними силами, що супроводжують роботу ЕМ. Серед них можна виді-

лити такі основні фактори [13]: $\xi_{EM}(t)$ – електромагнітні сили; $\xi_{\Pi}(t)$ – підшипники кочення; $\xi_{\text{Щ}}(t)$ – щітково-колекторний вузол; $\xi_{AD}(t)$ – аеродинамічні сили; $\xi_{BB}(t)$ – шихтований магнітопровід. Вібраційні процеси, зумовлені цими збуджуючими силами, зароджуються у різних місцях досліджуваної ЕМ і поширюються в точку вимірювання різними шляхами, зазнаючи при цьому певних перетворень (внаслідок поглинання їхньої енергії в тілі досліджуваної ЕМ, часової затримки тощо). Акселерометр, встановлений у точці вимірювання, фіксує

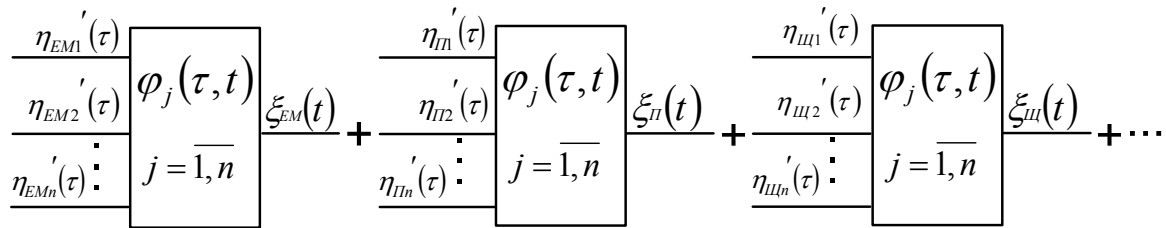


Рис. 8

сумарний вплив вібрацій від усіх факторів.

Розглянутий процес можна умовно зобразити схемою, представленою на рис. 8, де прямокутниками зображені багатовходові лінійні системи, які моделюють процеси проходження вібрацій від точок, у яких вони породжуються, до точки вимірювання.

Аналітично сигнал, що вимірюється акселерометром, можна представити співвідношенням

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^n a_j \xi_{EMj}(t) + \sum_{j=1}^n a_j \xi_{\Pi j}(t) + \sum_{j=1}^n a_j \xi_{\text{Щ}j}(t) + \sum_{j=1}^n a_j \xi_{ADj}(t) + \sum_{j=1}^n a_j \xi_{BBj}(t), \quad t \in (-\infty, \infty),$$

де n – деяке додатне число, яке визначається конструктивними, технологічними та експлуатаційними характеристиками вузла і задає число входів системи; a_j – вагові коефіцієнти, які враховують згасання у відповідному каналі, $a_j > 0$;

$$\xi_{EMj}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(\tau, t) d\eta_{EM}(\tau), \quad \xi_{\Pi j}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(\tau, t) d\eta_{\Pi}(\tau), \quad \xi_{\text{Щ}j}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(\tau, t) d\eta_{\text{Щ}}(\tau),$$

$$\xi_{ADj}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(\tau, t) d\eta_{AD}(\tau), \quad \xi_{BBj}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(\tau, t) d\eta_{BB}(\tau), \quad j = \overline{1, n},$$

де $\varphi_j(\tau, t)$, $j = \overline{1, n}$ – вектор імпульсних перехідних функцій системи, що розглядається, причому $\varphi(\tau, t) = \varphi(\tau, t + T)$, T – деяке фіксоване число, період процесу $\xi(t)$; $\{\eta(\tau), P\{\eta(0) = 0\} = 1, \tau \in (-\infty, \infty)\}$ – процес з незалежними приростами і безмежно подільною характеристичною функцією (ХФ) приростів.

Процес $\eta(\tau)$, ймовірнісні характеристики якого значною мірою обумовлені технічним станом вузла, що досліджується, може бути заданий за допомогою ХФ. При цьому відомі з робіт [5, 6] співвідношення дають змогу отримати вираз для n -вимірної ХФ значень процесу $\xi(t)$, а також його моментів. Таким чином, можна отримати аналітичні вирази для всіх ймовірнісних характеристик вібраційного процесу, що дозволяє будувати ефективні методи вібродіагностики досліджуваного ЕО.

Таким чином, створено узагальнену математичну модель вібрацій, що супроводжують роботу рухомих вузлів роторних ЕМ, яка враховує як періодичність вібраційного процесу, так і вплив на нього окремих джерел вібрації, що мають різну фізичну природу і просторову локалізацію. Розробка на основі створеної моделі систем технічного діагностування вузлів ЕМ дозволить проводити діагностування рухомих вузлів ЕМ з заданими точністю і достовірністю.

1. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
2. *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.
3. *Гижко Ю.И., Мислович М.В.* Деякі питання практичної реалізації та застосування інформаційно-вимірювальних систем діагностики обертових частин роторних енергетичних машин // Техн. электродинамика. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки." – 2008. – Ч. 4. – С. 53–58.
4. *Гижко Ю.И., Мислович М.В.* Особливості побудови інформаційно-вимірювальних систем діагностики рухомих частин електротехнічного обладнання // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, – 2007. – №2 (17). – С. 107–115.
5. *Марченко Б.Г.* Лінійні періодичні процеси // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 1999. – С. 172–185.
6. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – К.: Наук. думка, 1992. – 195 с.
7. *Павлюк А.В.* Магнітні поля і параметри надпровідних тороїдальних систем з обмеженою кількістю котушок // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – Вип. 34. – С. 94–105.
8. *Самойленко А.М., Кривошея С.А., Перестюк Н.А.* Дифференциальные уравнения: примеры и задачи. – М.: Высш. шк., 1989. – 383 с.
9. *Шидловська Н.А.* Особливості перехідних процесів в послідовному RLC -колі з синусоїдним джерелом живлення та реверсуваням ємності у режимах, близьких до резонансних // Техн. электродинамика. – 2013. – № 6. – С. 9–13.
10. *Шидловская Н.А.* Процессы в RLC -цепи синусоидального напряжения с управляемым реверсированием емкости // Техн. электродинамика. – 2011. – № 1. – С. 3–11.
11. *Шидловська Н.А., Фастова С.С.* Про особливості несиметричного керування реверсуваннями реактивних елементів у послідовному RLC -колі // Техн. электродинамика. – 2011. – № 3. – С. 3–9.
12. *Шидловский А.К., Федий В.С.* Частотно-регулируемые источники реактивной мощности. – К.: Наук. думка, 1980. – 304 с.
13. *Шубов И.Г.* Шум и вибрация электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
14. *Pavlyuk A.* Toroidal superconducting magnets with support structure placed inside torus // Abstract book, The 6-th IEEE magnetism society summer school, June 9-14, 2013, Assisi, Italy. – CD-диск.
15. *Vasetsky Yu.M., Mazurenko I.L., Pavlyuk A.V.* Comparison of superconducting magnets with mechanical support elements placed inside torus // Техн. электродинамика. – №4. – 2013. – С. 13–21.

УДК 621.3.011.74.005+621.3.013+621.355+ 621.314: 621.391

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

Некоторые вопросы обеспечения надежной и безотказной работы электроэнергетических систем и их элементов

Излагаются основные научные результаты, полученные в отделе теоретической электротехники Института электродинамики на протяжении 2013 года. Библ. 15, рис. 8.

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

N.A. Shydlovska, Yu.M. Vasetsky, M.V. Myslovych

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Some questions of reliability and faultness of power electrical systems and their components

The main scientific results are discussed which were obtained in the department of theoretical electrical engineering of the Institute of electrodynamics in year 2013. References 15, figures 8.

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

Надійшла 31.03.2014

Received 31.03.2014