

УДК 51.001.57.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ВУЗЛА, ЕЛЕМЕНТАМИ ЯКОГО Є ПРОСТІ БЛОКИ

А. Чабан

*Національний університет "Львівська політехніка"  
вул. Бандери, 12, Львів 79013, Україна  
vtchaban@polynet.lviv.ua*

Запропоновано математичну модель вузла навантаження, елементами якого є прості блоки (турбоагрегат з індивідуальним підвищувальним силовим трансформатором). На підставі цієї моделі запропоновано методику обчислення напруги згаданого вузла навантаження.

*Ключові слова:* турбоагрегат, механічний момент, робочі потокозчеплення, електричний вузол навантаження.

Головним елементом теплової електричної станції є турбоагрегат. Електрична енергія, одержана за допомогою турбогенератора, шляхом подальшої трансформації передається в електроенергетичну систему. Ця трансформація відбувається з використанням підвищувальних силових трансформаторів. Є різні варіанти сполучень генератора з підвищувальним трансформатором [3], однак найпоширеніший – це так званий простий блок, коли кожен генератор працює через індивідуальний трансформатор на збірні шини (рис. 1), утворюючи електричний вузол навантаження. Перевага цієї схеми полягає у порівняно високій надійності, що є головним питанням в електроенергетиці. Зазначимо, що схеми сполучень турбогенераторів з трансформатором у вигляді укрупненого блока [3] дешевші та економічніші в експлуатації, але застосування їх обмежене через нижчу порівняно з простим блоком надійність.

Ми пропонуємо математичну модель електричного вузла навантаження, елементами якого є прості турбоблоки. Одна з головних проблем аналізу такої системи – обчислення напруги згаданого вузла навантаження, особливо це стосується автономних електростанцій, коли напруга вузла не підтримується системою. Обчислення цієї напруги є досить складною задачею, розв'язання якої потребує зображення математичних моделей елементів вузла навантаження в координатах струмів. Нижче запропоновано методику побудови математичних моделей силових трансформаторів, рівняння електромагнітного стану яких записані на підставі теорії нелінійних електромагнітних кіл, та моделей турбоагрегатів, рівняння електромеханічного стану яких записані на підставі теорії нелінійних електромагнітних кіл та теорії нелінійного електромагнітного поля [5, 6]. Рівняння турбогенераторів наведені у фазовій системі координат, що дає

зможу оперувати реальними функціональними залежностями, а також спрощує врахування в математичній моделі всіх можливих несиметрій у статорному колі.

Зазначимо, що сьогодні досконало не розроблено методики обчислення напруги вузла навантаження, елементами якого є прості блоки, особливо в перехідних процесах. Відомі методи дають достовірну інформацію лише за умови колових моделей турбогенераторів [1]. Принципова схема вузла електричного навантаження показана на рис. 1. На схемі відображено уявні позитивні напруги протікання струмів у гілках вузла.

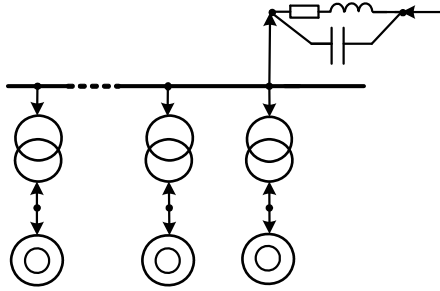


Рис. 1. Принципова схема електричного вузла навантаження.

**Математична модель системи.** Запишемо А-модель блокового трансформатора за умови з'єднань обмоток:  $Y-0/\Delta-11$  [8]:

$$\frac{di_{1,k}}{dt} = K_{11,k}(u_k - R_{1,k}i_{1,k}) + K_{12,k}(U - R_{2,k}i_{2,k}); \quad (1)$$

$$\frac{di_{2,k}}{dt} = K_{21,k}(u_k - R_{1,k}i_{1,k}) + K_{22,k}(U - R_{2,k}i_{2,k}); \quad (2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_H}(u_H - R_H i_L); \quad u_C = U - u_0; \quad u_H = U - u_0; \quad (3)$$

$$G_k = \frac{1}{\Delta_k} \begin{bmatrix} \alpha_{B,k}\alpha_{C,k} - \alpha_{0,k}^2 & (\alpha_{0,k} - \alpha_{C,k})\alpha_{0,k} & (\alpha_{0,k} - \alpha_B)\alpha_{0,k} \\ (\alpha_{0,k} - \alpha_{C,k})\alpha_{0,k} & \alpha_{A,k}\alpha_{C,k} - \alpha_{0,k}^2 & (\alpha_{0,k} - \alpha_{A,k})\alpha_{0,k} \\ (\alpha_{0,k} - \alpha_{B,k})\alpha_{0,k} & (\alpha_{0,k} - \alpha_{A,k})\alpha_{0,k} & \alpha_{B,k}\alpha_{A,k} - \alpha_{0,k}^2 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\Delta_k = \alpha_{A,k}\alpha_{B,k}\alpha_{C,k} - \alpha_{0,k}^2(\alpha_{A,k} + \alpha_{B,k} + \alpha_{C,k} + 2\alpha_{0,k}); \quad (5)$$

$$i_{mA,k} + i_{mB,k} + i_{mC,k} \neq 0; \quad \Psi_{mA,k} + \Psi_{mB,k} + \Psi_{mC,k} \neq 0; \quad (6)$$

$$P_k = \text{diag}(\rho_{j,k}); \quad \rho_{j,k} = \frac{\partial \varphi_{m,j,k}}{\partial \Psi_{m,j,k}}, \quad j = A, B, C; \quad (7)$$

$$\alpha_{j,k} = \rho_{j,k} + \alpha_{1,j,k} + \alpha_{2,j,k} + \alpha_{0,k}; \quad (8)$$

$$A_{11,k} = \alpha_{1,k}(1 - \alpha_{1,k}G_k) = a_{i,j}; \quad A_{12,k} = A_{21,k} = -\alpha_{1,k}\alpha_{2,k}G_k = b_{i,j}; \quad (9)$$

$$A_{22,k} = \alpha_{2,k}(1 - \alpha_{2,k}G_k) = c_{i,j}; \quad \alpha_{1,k} \equiv \text{diag}(L_{\sigma 1,k}^{-1}); \quad \alpha_{2,k} \equiv \text{diag}(L_{\sigma 2,k}^{-1}); \quad (10)$$

$$K_{11,k} = \begin{bmatrix} a_{11,k} - a_{13,k} & a_{12,k} - a_{13,k} \\ a_{21,k} - a_{23,k} & a_{22,k} - a_{23,k} \end{bmatrix}; K_{12,k} = \begin{bmatrix} b_{11,k} & b_{12,k} & b_{13,k} \\ b_{21,k} & b_{22,k} & b_{23,k} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$K_{21,k} = \begin{bmatrix} b_{11,k} - b_{13,k} & b_{21,k} - b_{23,k} & b_{31,k} - b_{33,k} \\ b_{12,k} - b_{13,k} & b_{22,k} - b_{23,k} & b_{32,k} - b_{33,k} \end{bmatrix}^T; K_{22,k} = A_{22,k}. \quad (12)$$

З урахуванням групи сполучень зв'язок між лінійними і фазними струмами первинної обмотки блокового трансформатора виглядатиме так:

$$i_{L,k} = B i_{1,k}^* \Rightarrow \begin{bmatrix} i_{LA,k} \\ i_{LB,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \\ & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1A,k} \\ i_{1B,k} \\ -i_{1A,k} - i_{1B,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{1A,k} - i_{1B,k} \\ i_{1A,k} + 2i_{1B,k} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де  $k$  – порядковий номер простого блока у вузлі навантаження;  $N$  – кількість генераторів у системі;  $i_{1,k}, i_{2,k}$  – вектори-стовпці струмів фаз первинної та вторинної обмоток трансформаторів, відповідно;  $u_k$  – вектор-стовпець напруг фаз первинних обмоток трансформаторів;  $\alpha_0$  – обернені індуктивності розсіювання, пов'язані з потокозчепленням розсіювання;  $u_0$  – вектор-стовпець напруг електроенергетичної системи;  $R_{1,k}, R_{2,k}$  – матриці опорів первинної і вторинної обмоток;  $u_C$  – напруга батареї;  $P_k$  – матриця диференціальних обернених індуктивностей намагнічення трансформаторів;  $L_{\sigma 1,k}, L_{\sigma 2,k}$  – індуктивності розсіювання первинної і вторинної обмоток;  $R_H, L_H, C_H$  – матриці резистивних опорів, індуктивностей та еквівалентних ємностей навантаження;  $\Phi_{m,j,k}(\Psi_{m,j,k})$ ,  $j = A, B, C$  – магнітна напруга в магнітних системах окремих фаз;  $A, B, C$  – індекси належності до відповідних фазових величин;  $i_{L,k}$  – вектор-стовпець лінійних струмів первинної обмотки трансформатора;  $i_L, i_C$  – вектори-стовпці струмів у гілках з індуктивністю та ємністю, відповідно (див. рис. 1).

У випадку застосування математичної моделі вузла навантаження в автономному режимі  $u_0 = 0$ , а у випадку застосування математичної моделі вузла як елемента моделі електроенергетичної системи  $u_0 \neq 0$ ,  $R_H, L_H, C_H = R^*, L^*, C^*$  – матриці резистивних опорів, індуктивностей та еквівалентних ємностей елементів електроенергетичної системи (див. рис. 1).

Модель турбогенератора у фазових координатах потокозчеплень детально описана в [5, 6]. Рівняння в координатах струмів отримуємо, диференціюючи за часом вирази для обчислення струмів [5, 6]

$$\frac{di_{S,k}}{dt} = \alpha_{S,k} \left( u_{S,k} - R_{S,k} i_{S,k} - \frac{d\psi_{S,k}}{dt} \right); \quad (14)$$

$$\frac{di_{f,k}}{dt} = \alpha_{f,k} \left( u_{f,k} - R_{f,k} i_{f,k} - \frac{d\psi_{f,k}}{dt} \right), \quad (15)$$

де  $i_{S,k}$  – вектори-стовпці струмів фаз статорів;  $i_{f,k}$  – струми збудження генераторів;  $\alpha_{S,k}, \alpha_{f,k}$  – індуктивності розсіяння;  $u_{S,k} = k_{T,k}^{-1} u_k$  – вектор-стовпець напруг на виводах статора турбогенераторів,  $k_{T,k}$  – коефіцієнти трансформації силових трансформаторів;  $u_{f,k}$  – напруга обмоток роторів;  $R_{S,k}, R_{f,k}$  – резистивні опори роторів та статорів, відповідно;  $\psi_{S,k}, \psi_{f,k}$  – вектори-стовпці головних потокозчеплень статорів та роторів, відповідно.

Похідні за часом від головних потокозчеплень розраховуємо, диференціюючи за часом вирази для обчислення головних потокозчеплень [5, 6]:

$$\frac{d\psi_{SA,k}}{dt} = c_k \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left( \frac{dB_{r,k}(R_k, \alpha)}{dt} \cos(\alpha + \gamma_k) - \omega_k B_{r,k}(R_k, \alpha) \sin(\alpha + \gamma_k) \right) d\alpha; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{SB,k}}{dt} = c_k \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left( \frac{dB_{r,k}(R_k, \alpha)}{dt} \cos\left(\alpha + \gamma_k - \frac{2\pi}{3}\right) - \right. \\ \left. - \omega_k B_{r,k}(R_k, \alpha) \sin\left(\alpha + \gamma_k - \frac{2\pi}{3}\right) \right) d\alpha; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{d\psi_{SC,k}}{dt} = -\frac{d\psi_{SA,k}}{dt} - \frac{d\psi_{SB,k}}{dt}; \quad (18)$$

$$\frac{d\psi_{f,k}}{dt} = c_k \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left( \frac{dB_{r,k}(R_k, \alpha)}{dt} \cos \alpha \right) d\alpha, \quad (19)$$

де  $\omega_k, \gamma_k$  – швидкості обертання роторів та кути їхнього повороту, відповідно.

Радіальні  $B_{r,k}(r, \alpha)$  та кутові  $B_{\alpha,k}(r, \alpha)$  компоненти векторів магнітної індукції знаходимо за значеннями аксіальних компонентів векторних потенціалів електромагнітних полів  $A_k$  у поперечних перерізах масивів роторів [6]:

$$B_{r,k}(r, \alpha) = r^{-1} \frac{\partial A_k}{\partial \alpha}; \quad B_{\alpha,k}(r, \alpha) = -\frac{\partial A_k}{\partial r}. \quad (20)$$

Рівняння вектора-потенціалу електромагнітного поля в роторах виглядають так [2]:

$$\frac{\partial A_k}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_{E,k}} \left( v_{\alpha,k} \frac{\partial^2 A_k}{\partial r^2} + \frac{v_{r,k}}{r^2} \frac{\partial^2 A_k}{\partial \alpha^2} + \left( \frac{\partial v_{\alpha,k}}{\partial r} + \frac{v_{\alpha,k}}{r} \right) \frac{\partial A_k}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \alpha} \frac{\partial A}{\partial \alpha} \right), \quad (21)$$

де  $v_{\alpha,k}, v_{r,k}$  – кутовий та радіальний компоненти магнітних релактивностей тіла роторів;  $\gamma_{E,k}$  – еквівалентні питомі електропровідності тіла роторів. Методику обчислення цих параметрів детально описано в [5, 6].

Продиференціюємо за часом перший вираз у (20) та змінимо черговість диференціювання (часова та просторова координати незалежні), отримаємо

$$\frac{dB_r}{dt} = R^{-1} \frac{d}{dt} \frac{\partial A}{\partial \alpha} = R^{-1} \frac{\partial}{\partial \alpha} \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (22)$$

Знаходження крайових умов для (21) описано в [5, 6]. Крайові умови для (22) визначаємо на підставі симетрії вектора-потенціалу електромагнітного поля

відносно осі ротора ( $A(R, \alpha) = -A(R, \alpha + \pi)$  [5]), диференціюючи згаданий вираз за часом,

$$\frac{dA(R, \alpha)}{dt} = -\frac{dA(R, \alpha + \pi)}{dt}. \quad (23)$$

Вираз для обчислення електромагнітного моменту турбоагрегатів такий [5]:

$$M_{E,k} = \sqrt{3} p_{0,k} (\psi_{SA,k} i_{SB,k} - \psi_{SB,k} i_{SA,k}), \quad (24)$$

де  $p_{0,k}$  – кількість пар магнітних полюсів генераторів.

Доповнимо систему рівнянь електромагнітного стану рівняннями руху, записаними на підставі рівняння Лагранжа другого роду за умови абсолютно штивних роторів:

$$\frac{d\omega_k}{dt} = M_{T,k} - M_{E,k}; \quad \frac{d\gamma_k}{dt} = \omega_k. \quad (25)$$

Напругу вузла навантаження обчислимо двома методами залежно від наявності чи відсутності в схемі (див. рис. 1) конденсаторної батареї. Усі параметри та функціональні залежності стосовно силових трансформаторів (але не турбогенераторів) зведемо за кількістю витків до вторинних обмоток (вузла вищої напруги) з коефіцієнтами трансформації  $k_{T,k}$ .

**Перший метод: батареї нема.**

Запишемо рівняння на підставі законів Кірхгофа для електромеханічної системи (див. рис. 1) без батареї:

$$i_{2,1} + i_{2,2} + \dots + i_{2,N} + i_L = 0 \quad ; \quad u_{2,1} = u_{2,2} = \dots = u_H + u_0 = U. \quad (26)$$

Продиференціюємо за часом перший вираз у (26), врахуємо умову

$$u_k = k_{T,k} C u_{S,k} = k_{T,k} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} u_{S,k} \quad (27)$$

та розв'яжемо спільно з (2), (3), отримаємо

$$\sum_{k=1}^N (K_{21,k} (k_{T,k} C u_{S,k} - R_{1,k} i_{1,k}) + K_{22,k} (U - R_{2,k} i_{2,k})) + L_H^{-1} (U - R_H i_L - u_0) = 0. \quad (28)$$

Звідки

$$U = \left( \sum_{k=1}^N K_{22,k} + L_H^{-1} \right)^{-1} \left( \sum_{k=1}^N (K_{22,k} R_{2,k} i_{2,k} - K_{21,k} (k_{T,k} C u_{S,k} - R_{1,k} i_{1,k})) + L_H^{-1} (R_H i_H + u_0) \right). \quad (29)$$

Реальну напругу (не зведену за кількістю витків трансформаторів) на виводах якоря кожного з генераторів шукаємо, диференціюючи рівняння зв'язку для вузлів нижчої напруги за часом:  $k_{T,k} i_{L,k} + i_{S,k} = 0$ , та розв'язуючи одержаний результат спільно з (14) та (30):

$$\frac{di_{L,k}}{dt} = N_{1,k} (u_k - R_{1,k} i_{1,k}) + N_{2,k} (U - R_{2,k} i_{2,k}); \quad (30)$$

$$N_{1,k} = \begin{bmatrix} a_{11,k} - a_{21,k} - a_{13,k} + a_{23,k} & a_{12,k} - a_{22,k} - a_{13,k} + a_{23,k} \\ a_{11,k} - a_{13,k} + 2(a_{21,k} - a_{23,k}) & a_{12,k} - a_{13,k} + 2(a_{22,k} - a_{23,k}) \end{bmatrix}; \quad (31)$$

$$N_{2,k} = \begin{bmatrix} b_{11,k} - b_{21,k} & b_{12,k} - b_{22,k} & b_{13,k} - b_{23,k} \\ b_{11,k} - 2b_{21,k} & b_{12,k} - 2b_{22,k} & b_{13,k} - 2b_{23,k} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Цю напругу остаточно обчислюємо так [7]:

$$u_{S,k} = \left( k_{T,k}^2 N_{1,k} C + \alpha_{S,k} \right)^{-1} \left( k_{T,k} (N_{1,k} R_{1,k} i_{1,k} + N_{2,k} R_{2,k} i_{2,k}) - k_{T,k} N_{2,k} U + \alpha_{S,k} \left( R_{S,k} i_{S,k} + \frac{d\psi_{S,k}}{dt} \right) \right) = 0. \quad (33)$$

Розв'язуємо сумісно (29) та (33), знаходимо остаточно вектор-стовпець напруг електричного вузла навантаження

$$U = \left( 1 - \left( \sum_{k=1}^N K_{22,k} + L_H^{-1} \right)^{-1} \sum_{k=1}^N k_{T,k}^2 K_{21,k} C \left( k_{T,k}^2 N_{1,k} C + \alpha_{S,k} \right)^{-1} N_{2,k} \right)^{-1} \times \\ \times \left( \sum_{k=1}^N K_{22,k} + L_H^{-1} \right)^{-1} \left[ \sum_{k=1}^N \left( \left( K_{21,k} - k_{T,k}^2 K_{21,k} C \left( k_{T,k}^2 N_{1,k} C + \alpha_{S,k} \right)^{-1} N_{1,k} \right) R_{1,k} i_{1,k} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( K_{22,k} - k_{T,k}^2 K_{21,k} C \left( k_{T,k}^2 N_{1,k} C + \alpha_{S,k} \right)^{-1} N_{2,k} \right) R_{2,k} i_{2,k} - \right. \right. \\ \left. \left. - k_{T,k} K_{21,k} C \left( k_{T,k}^2 N_{1,k} C + \alpha_{S,k} \right)^{-1} \alpha_{S,k} \left( R_{S,k} i_{S,k} + \frac{d\psi_{S,k}}{dt} \right) \right] + L_H^{-1} (R_H i_L + u_0). \quad (34)$$

Струм у гілці навантаження ( $i_H$ ) шукаємо на підставі першого та третього виразів у (3) за умови  $i_L = i_H$ . Тепер сумісному інтегруванню підлягає така система: (1)–(3), (14), (15), (21), (25) за умови (4)–(13), (16)–(19), (23), (24), (31)–(34).

Другий метод: **батарея наявна**.

За наявності конденсаторної батареї у вузлі електричного навантаження обчислення напруги зводиться до досить простої процедури. Запишемо закони Кірхгофа для вузла вищої напруги за наявності батареї:

$$i_{2,1} + i_{2,2} + \dots + i_{2,N} + i_L + i_C = 0 \quad ; \quad u_{2,1} = u_{2,2} = \dots = u_C + u_0 = U. \quad (35)$$

Напругу на конденсаторі знаходимо у звичайний спосіб [6] з урахуванням першого виразу в (28)

$$\frac{du_C}{dt} = - \frac{i_{2,1} + i_{2,2} + \dots + i_{2,N} + i_L}{C} \equiv - \frac{1}{C} \left( \sum_{k=1}^N i_{2,k} + i_L \right). \quad (36)$$

Струм у гілці навантаження ( $i_j$ ) шукаємо так:  $i_j = i_L + i_C$  за першим виразом у (28). Тепер сумісному інтегруванню підлягає така система: (1)–(3), (14), (15), (21), (25), (36) за умови (4)–(13), (16)–(19), (23), (24), (31)–(33), (35). Нагадаємо, що рівняння (21), (22) потребують просторової дискретизації за методом прямих [5, 6].

**Результати комп'ютерної симуляції.** Комп'ютерну симуляцію виконують для електричного вузла навантаження, елементами якого є два прості блоки та симетричне  $R$ - $L$ -навантаження (батареї нема та  $u_0 = 0$ ). Запуск турбогенераторів виконано за схемою, описаною в [5, 6]. Для комп'ютерної симуляції моделі

використано такі елементи вузла: два модельні турбогенератори [4] типу ТВВ-165 з параметрами  $P_H = 165$  МВт,  $\cos\varphi_H = 0,85$ ,  $U_H = 18$  кВ,  $p_0 = 1$ , два силові трансформатори типу ТДЦ-200000/110 з паспортними даними  $S_H = 200$  МВА,  $U_{НВ} = 121$  кВ,  $U_{НН} = 20$  кВ, а також навантаженням  $R_H = 0,89$  Ом,  $L_H = 0,27$  мГн. На виводи обмотки збудження першого турбогенератора подають номінальну напругу, а на обмотку збудження другого – напругу, що дорівнює 50% від номінальної. Зазначимо, що порядок системи є досить високим – понад 1700 нелінійних диференціальних рівнянь, причому рівняння є нежорсткими [5], тому інтегрування рівнянь стану системи виконано явним методом Ейлера з кроком  $h = 0,01 / 360$ . Результати комп'ютерної симуляції відтворені на рис. 2, 3.

На рис. 2 показано напругу вузла навантаження як функцію часу. Тут видно всі три стани вузла: стан неробочого ходу  $t \in [0; 4]$ , навантаження  $t \in [4; 8]$  та короткого замикання. Під час збудження генератори відімкнені від вузла навантаження, тому й напруга вузла дорівнює нулю. У момент часу  $t = 4$  с до вузла приєднано навантаження. Після досягнення усталеного процесу  $t = 8$  с зроблено симетричне трифазне коротке замикання шин вузла навантаження [6], очевидно, що за таких умов напруга вузла навантаження дорівнюватиме нулю. Максимальне значення напруги вузла навантаження в усталеному процесі становить до  $U_{\max} = 68$  кВ.

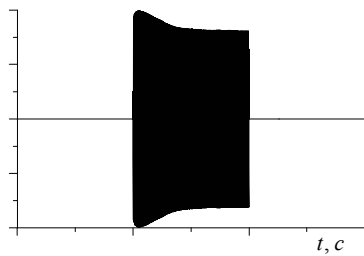


Рис. 2. Напруга вузла.

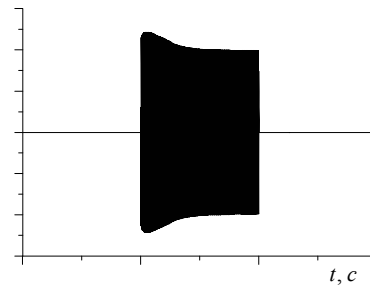


Рис. 3. Струм у гілці навантаження.

На рис. 3 зображено струм у гілці навантаження як функцію часу за тих самих станів вузла електричного навантаження, що й на рис. 2. Згадані процеси повністю відображені, оскільки характер струму майже відповідає характеру напруги (див. рис. 2). В усталеному процесі струм у вузлі становить понад  $I_{\max} = 2$  кА.

Отже, математичні моделі електромеханічних пристроїв з рухомими масивними струмо- та магнітопроводами доцільно будувати у фазових кордінатах струмів. Така методика дає змогу оперувати реальними функціональними залежностями, а також, з погляду алгоритмічно-програмної реалізації, числовий розв'язок рівнянь стану математичної моделі в координатах струмів є стійкішим, ніж аналогічний розв'язок у координатах потокозчеплень.

Обчислення напруги вузла навантаження в перехідних станах можливе за умови подання всіх математичних моделей елементів вузла в координатах струмів (часові похідні узагальнених швидкостей).

Запропонований підхід до побудови математичної моделі вузла навантаження дає змогу уникнути складної процедури зведень рівнянь електромеханічного стану турбогенераторів за кількістю витків до вторинних обмоток блокових трансформаторів.

Для аналізу будь-яких станів згаданого вузла достатньо оперувати двома фазними струмами генератора.

1. Куцик А. Об'єктно-орієнтовна математична модель синхронної машини // Теор. електротехніка. 2005. № 58. С. 120–129.
2. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория поля. М.: Энергия, 1973. 504 с.
3. Электротехнический справочник / Под ред. И. Н. Орловой. Т. 3. Кн. 1. М.: Энергоиздат, 1982. 656 с.
4. Хуторецкий Г. М. Проектирование и расчет современных двухполюсных турбогенераторов. Л.: ЛПИ, 1962. 150 с.
5. Чабан А. Алгоритм розрахунку ударних струмів та моментів синхронного турбогенератора в режимі короткого замикання на виводах якоря // Техн. електродинаміка. 2005. №5. С. 54–58.
6. Чабан А. Математичне моделювання електромеханічних коливних процесів на прикладі системи парова турбіна–турбогенератор // Електротехніка і електромеханіка. 2006. Т. 4. С. 37–41.
7. Чабан А. Математичне моделювання двовузлової електромашинної системи // Вісн. НУ “Львів. політехніка”. 2005. №544. С. 155–160.
8. Чабан В. Математичне моделювання електромеханічних процесів. Львів, 1997. 344 с.

#### MATHEMATICAL MODEL OF KNOT OF LOADING, THAT CONSISTS OF SIMPLE BLOCKS

**A. Tchaban**

*Lviv Polytechnic National University  
Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine  
vtchaban@polynet.lviv.ua*

The mathematical model of knot of loading the elements of which there are simple blocks is offered (turbogenerator with a step-up power transformer). On the basis of this model the method of calculation of tension of the mentioned knot of loading is offered.

*Key words:* turbogenerator, mechanical moment, electric knot of loading.

Стаття надійшла до редколегії 10.11.2006

Прийнята до друку 30.12.2006