

СТРУМ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕРЕЖІ ВОДОПОСТАЧАННЯ

В. С. БОЙКО¹, М. І. СОТНИК²

¹ кафедра теоретичної електротехніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", м. Київ, УКРАЇНА

² кафедра прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету, м. Суми, УКРАЇНА
e-mail: vsboiko@bigmir.net

АНОТАЦІЯ. Досліджується характер електромагнітних процесів у електричній моделі електромеханічної системи мережі водопостачання з насосом Д 2000-100. При цьому основну увагу приділено отриманню закономірності зміни струму навантаження моделі, яким моделюється особливості та обсяги руху рідини у спіральному відводі насоса залежно від конструктивних особливостей його вихідної частини. Параметри елементів електричної моделі, побудованої на розробленому авторами способі створення електричної моделі відцентрового насоса, відповідають номінальному робочому режиму системи і використані при числовому розрахунку. Частина кола навантаження електричної моделі, яке моделює спіральний відвід насоса, складається з послідовно з'єднаних активного опору R_1 і індуктивності L_1 , до яких підімкнений паралельно ємнісний елемент C . Проведені дослідження показали, що залежно від співвідношення параметрів зазначених елементів характер перехідного електромагнітного процесу може бути аперіодичним чи коливальним. Коливальний характер процесу свідчить про можливість виникнення вібрацій у електромеханічній системі. Разом з тим показано, що залежно від співвідношення між частотою джерела вібрації і власною частотою вихідної частини електромеханічної системи інтенсивність прояву вібрації різна. Тож основний висновок публікації полягає у тому, що застосування електричних методів моделювання робочих процесів електромеханічних систем можна використати для усунення небажаних режимів роботи технологічного обладнання з метою підвищення енергетичної ефективності процесу водопостачання.

Ключові слова: комутація, електромеханічна система, спіральний відвід, енергія, вібрація, перехідний процес

CURRENT LOADING OF ELECTRICAL MODEL OF ELECTRICAL MECHANICAL SYSTEM OF WATER SUPPLY NETWORK

V. BOIKO¹, M. SOTNYK²

¹ Department of Theoretical Electrical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

² Applied Hydroaeromechanics Department of the Sums State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT. The nature of the electromagnetic process in the scheme of the electrical model of the electromechanical system of a water supply network with a pump D 2000-100 is investigated. In this case, the main attention is focused on the patterns of change in the load current of the model, which simulates the movement of fluid in the spiral outlet of the pump, depending on the design features of its output part. The parameters of the electric model elements, based on the method developed by the authors for creating an electric model of a centrifugal pump, correspond to the nominal operating mode of the system and are used in the numerical calculation. The part of the load circuit of the electric model, which models the spiral outlet of the pump, consists of series-connected resistance R_1 and inductance L_1 , to which the capacitive element C is connected in parallel. Studies have shown that the nature of transients can be aperiodic or oscillatory, depending on the ratio of the parameters of these elements. The oscillatory nature of the process indicates the possibility of vibrations in the electromechanical system. However, it was shown that, depending on the ratio between the frequency of the vibration source and the natural frequency of the output part of the electromechanical system, the intensity of the manifestation of vibration is different. Therefore, the main conclusion of the publication is that the use of electrical methods for modeling the working processes of electromechanical systems can be used to eliminate undesirable equipment operation modes in order to increase the energy efficiency of the water supply process.

Keywords: commutation, electromechanical system, volute, energy, transition process

Вступ

Наведені у [1] результати досліджень електромагнітних процесів у електричній моделі електромеханічної системи (ЕМС) мережі водопостачання з відцентровим насосом Д 2000-100 показали, що характер процесу суттєво залежить від величини ємності кола навантаження моделі. Наявність коливального харак-

теру електромагнітного процесу при певних значеннях ємності фактично є електричним моделюванням процесу вібрації у насосному агрегаті. Дослідження цього процесу здійснено через аналіз закономірності зміни струму навантаження електричної моделі ЕМС, який за своєю формою, кількістю пульсацій за період

та середнім значенням відповідає характеристикам руху рідини у спіральному відводі насосного агрегату.

Вібрація насосних агрегатів викликається причинами механічного, електротехнічного та гідродинамічного походження. Як зазначається у [2], найменш вивчена і прогнозована вібрація гідродинамічного походження, що виникає при роботі насосів на знижених і підвищених подачах. При таких режимах роботи відбувається інтенсивний динамічний вплив на гідравлічну частину насосів і сприймається їх механічною частиною. Власне такі процеси більшої чи меншої інтенсивності відбуваються при будь-якому режимі роботи електромеханічної системи мережі водопостачання.

Гідродинамічними джерелами вібрацій відцентрових насосів вважаються неоднорідність потоку на виході з робочого колеса насоса, утворення вихорів у проточній частині та кавітація [3]. Аналіз руху реальної рідини у відцентровому насосі [4] показує, що основним джерелом збурень, які викликають вібрацію насоса, є нестационарні гідродинамічні сили на лопатках робочого колеса насоса [5].

Спектр вібрації відцентрового насоса від зазначених факторів лежить в діапазоні звукових частот від 20 Гц до 20 кГц.

У [6] наголошується, що наслідком вібрації може бути інтенсивне абразивне пошкодження проточної частини насосів, зниження їх ККД та погіршення економічних показників системи перекачування рідини в цілому. Найбільш важкими наслідками від гідродинамічної вібрації насосів є не тільки матеріальні втрати від руйнування обладнання та тимчасового припинення транспорту рідини, але і значна шкода навколишній природі від розливу екологічно агресивних рідин зі зруйнованого обладнання і трубопроводів. Значної шкоди підвищена вібрація обладнання несе і обслуговуючому персоналу насосних станцій, оскільки, як показує практика, при виникненні вібрації вона може перевищувати допустимі значення, що передбачаються санітарно-гігієнічними нормами.

Викладене підтверджує актуальність розробки методів дослідження вібраційних процесів у електромеханічних системах з відцентровими насосами.

У [1] зазначається, що проблема є спільною як для електротехнічної науки, так і гідравлічної, про що свідчать публікації як загального плану [7], так і спеціальні, які ґрунтуються на фізичних і математичних [8] напрямках досліджень. Застосування електричного моделювання електромеханічних систем мереж водопостачання є ефективним способом дослідження як гідравлічних, так і енергетичних процесів мережі з метою досягнення максимальної енергоефективності системи в цілому.

Мета роботи

Довести ефективність електричного моделювання процесу вібрації в електромеханічній системі мережі водопостачання, викликаної причинами гідродинамічного походження, із застосуванням електрич-

ної моделі ЕМС та аналізу особливостей електромагнітних процесів у ній залежно від параметрів елементів кола навантаження.

Результати досліджень

Дослідження проведені стосовно електромеханічної системи з насосним агрегатом Д 2000-100, який має шестилопатеве робоче колесо ($m = 6$) і однозавитковий спіральний відвід. Схема його електричної моделі, відповідно до [1], зображена на рис. 1. Адекватність електричного моделювання гідравлічних та електромеханічних процесів мереж водопостачання із застосуванням моделей на основі схем перетворювачів електричної енергії, застосованого у статті, доведено у [9] та [10].

Миттєві значення системи синусоїдних ЕРС джерел окремих віток схеми електричної моделі ЕМС мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= E_m \sin(\vartheta + \pi/3); & e_4 &= E_m \sin(\vartheta - 2\pi/3); \\ e_2 &= E_m \sin \vartheta; & e_5 &= E_m \sin(\vartheta - \pi); \\ e_3 &= E_m \sin(\vartheta - \pi/3); & e_6 &= E_m \sin(\vartheta - 4\pi/3). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $\vartheta = \omega t$ - змінна, у якій виконуються усі розрахунки.

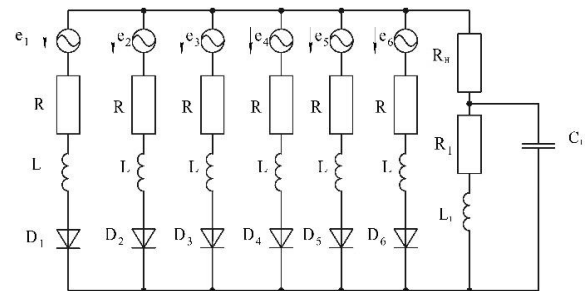


Рис. 1- Схема електричної моделі насосного агрегату ($m = 6$)

За початок першого етапу комутації приймемо момент часу $\vartheta = 0$, коли клапан D1 починає входити в роботу, а клапан D6 – виходить. У контурі, який складається з першої і шостої віток починається перехідний комутаційний процес. Інтервал спільної роботи діодів D1 та D6 і є першим етапом комутації. Йому відповідає схема рис. 2.

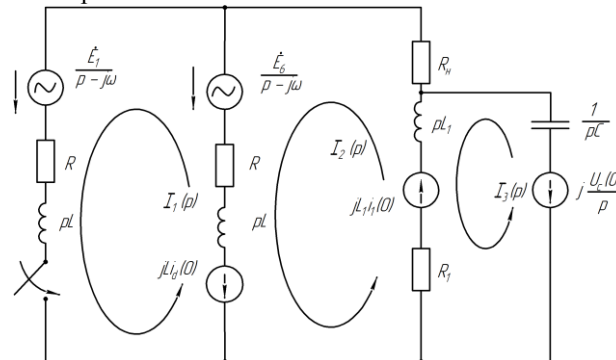


Рис. 2 - Операторна схема I етапу комутації

Дослідження електромагнітних процесів в інтервалі першого етапу комутації проведено традиційним для енергетичної електроніки способом [11] в операторній формі за методом контурних струмів:

$$\left. \begin{aligned} I_1(p)Z_{11}(p) + I_2(p)Z_{12}(p) + I_3(p)Z_{13}(p) &= E_{11}(p); \\ I_1(p)Z_{21}(p) + I_2(p)Z_{22}(p) + I_3(p)Z_{23}(p) &= E_{22}(p); \\ I_1(p)Z_{31}(p) + I_2(p)Z_{32}(p) + I_3(p)Z_{33}(p) &= E_{33}(p) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $Z_{11}(p) = 2Z(p) = 2(R + pL)$;

$$Z_{22}(p) = Z(p) + Z_1(p) + R_H = (R + pL) + (R_1 + pL_1) + R_H ;$$

$$Z_{33}(p) = Z_1(p) + 1/pC = (R_1 + pL_1) + 1/pC ;$$

$$Z_{12}(p) = Z_{21}(p) = -Z(p); \quad Z_{13}(p) = 0;$$

$$Z_{23}(p) = Z_{32}(p) = -Z_1(p);$$

$$E_{11}(p) = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_6}{(p - j\omega)} - jLi(0);$$

$$E_{22}(p) = \frac{\dot{E}_6}{(p - j\omega)} + jLi(0) + jL_1i_1(0);$$

$$E_{33}(p) = -jL_1i_1(0) - ju_c(0)/p .$$

Головний визначник системи рівнянь (2):

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} Z_{11}(p) & Z_{12}(p) & Z_{13}(p) \\ Z_{21}(p) & Z_{22}(p) & Z_{23}(p) \\ Z_{31}(p) & Z_{32}(p) & Z_{33}(p) \end{vmatrix} = \quad (3)$$

$$= Z_{11}(p)Z_{22}(p)Z_{33}(p) - Z_{11}(p)Z_{23}(p)Z_{32}(p) - Z_{33}(p)Z_{12}(p)Z_{21}(p).$$

Після підстановки у (3) виразів операторних зображено власних і спільних опорів та проведення низки алгебричних перетворень, остаточно отримано операторне зображення головного визначника

$$\Delta(p) = Z(p)[(Z(p)Z_1(p) + 2Z_1(p)R_H) + (Z(p) + 2R_H + 2Z_1(p))/pC].$$

Алгебричне доповнення для отримання операторного зображення струму навантаження схеми рис. 2 на першому етапі комутації

$$\Delta_2(p) = \begin{vmatrix} Z_{11}(p) & E_{11}(p) & Z_{13}(p) \\ Z_{21}(p) & E_{22}(p) & Z_{23}(p) \\ Z_{31}(p) & E_{33}(p) & Z_{33}(p) \end{vmatrix} = \quad (4)$$

$$= Z_{11}(p)E_{22}(p)Z_{33}(p) - Z_{11}(p)E_{33}(p)Z_{23}(p) - Z_{33}(p)E_{11}(p)Z_{21}(p).$$

Підстановка у (4) виразів операторних зображено контурних ЕРС та власних і спільних опорів, після здійснення низки алгебричних перетворень, дає:

$$\Delta_2(p) = Z(p) \left\{ \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_6}{(p - j\omega)} (1 + pZ_1(p)C) + j[Li(0) + L_1i_1(0) + pZ_1(p)C(Li(0) - 2u_c(0)/p)] \right\}.$$

Операторне зображення струму навантаження на першому етапі комутації, який, згідно позначень на схемі рис. 2, є контурним струмом другого контуру $I_2(p)$, отримано наступним чином:

$$I_2(p) = \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} = \frac{G_2(p)}{H_2(p)}. \quad (5)$$

Вирази чисельника співвідношення (5) після низки алгебричних перетворень запишемо так:

$$G_2(p) = (\dot{E}_1 + \dot{E}_6)(1 + pCR_1 + p^2CL_1) + (p - j\omega)j[Li(0) + 2L_1i_1(0) - 2u_c(0)CR_1 + p(Li(0)CR_1 - 2u_c(0)CL_1) + p^2Li(0)CL_1]. \quad (6)$$

Вираз знаменника співвідношення (5) в операторній формі після низки алгебричних перетворень:

$$H_2(p) = (p - j\omega)[p^3CL_1L + p^2C(R_1L + RL_1 + 2R_HL_1) + p(L + 2L_1 + 2CR_1R_H + CR_1R) + 2(R_H + R_1) + R]. \quad (7)$$

Звернімо увагу, що такий же вираз знаменника в операторній формі отримано у [1] при розрахунку коренів характеристичного рівняння.

З рівняння $H_2(p) = 0$ розраховуємо корені знаменника. Для здійснення числового розрахунку задамо параметри елементів електричної моделі електромеханічної системи, які відповідають номінальному режиму роботи насосного агрегату Д 2000-100 з приводним електричним двигуном, що має 980 обертів на хвилину. За зазначених умов, параметри електричної моделі є такими: $f = 16.333$ Гц, $\omega = 102.57$ 1/с, $R = 40$ Ом, $R_1 = 20$ Ом, $R_H = 200$ Ом, $L = 0.1$ Гн, $L_1 = 2$ Гн, $C = (0.001 - 0.000001)$ Ф. Амплітуда джерел синусоїдної ЕРС віток електричної моделі 150 В, а зсув за фазою відповідає (1). Також враховано, що струм навантаження моделі відповідає обсягам подачі насоса, які вимірюються у м³ за секунду (тобто 2000 м³/год відповідає 0.55 м³/с). Виходячи з цього і вибрана величина опору навантаження моделі $R_H = 200$ Ом.

Після підстановки наведених вище числових значень параметрів елементів електричної моделі, співвідношення (7) набуло вигляду:

$$H_2(p) = (p - j\omega)[p^3C0.2 + p^2C882 + p(C8800 + 4.1) + 480]. \quad (8)$$

Прирівнявши останнє рівняння до нуля, отримаємо його корені. Перший множник дає числове значення кореня

$$p_0 = j\omega = j102.57 \text{ (1/с)}, \quad (9)$$

яке відповідає вимушеній складовій струму навантаження електричної моделі $i_2(t)$ на першому етапі комутації. Інші корені, які розраховуються з другого множника співвідношення (8), яке є кубічним рівнянням - вільним складовим цього струму.

Докладно питання щодо характеру зміни коренів характеристичного рівняння кола при різних значеннях ємності кола навантаження розглядалося у [1]. У табл. 1 наведено результат розрахунку коренів P_k характеристичного рівняння для трьох значень ємності кола навантаження.

Таблиця 1 - Результат розв'язку характеристичного рівняння кола на першому етапі комутації

C (Ф)	$P_1(1/c)$	$P_2(1/c)$	$P_3(1/c)$
0.0001	-4354.08	$-27.96 \pm j68.78$	
0.00001	-3887.19	-342.59	-180.22
0.000001	-119.82	$-2145.09 \pm j3927.92$	

З наведених у табл. 1 даних випливає, що зміна ємності кола навантаження призводить до зміни характеру вільного режиму з коливального на аперіодичний і навпаки.

Згідно з формулою розкладання, за якою у операторному методі розраховується оригінал операторного зображення (у даному випадку випрямлений струм електричної моделі, який проходить у опорі R_H), похідна від виразу (7) знаменника:

$$H_2'(p) = [p^3 CL_1 L + p^2 C(R_1 L + RL_1 + 2R_H L_1) + p(L + 2L_1 + 2CR_1 R_H + CR_1 R) + 2(R_H + R_1) + R] + (p - j\omega)[3p^2 CL_1 L + 2pC(R_1 L + RL_1 + 2R_H L_1) + (L + 2L_1 + 2CR_1 R_H + CR_1 R)]. \quad (10)$$

Використовуючи останнє, та числові значення коренів знаменника, закономірність зміни струму навантаження електричної моделі ЕМС на першому етапі комутації $i_{dl}(t)$ запишемо так:

$$i_{dl}(t) = \sum_{k=0}^{k=3} \frac{G_2(p_k)}{H_2'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (11)$$

Після виходу діода Д6 з роботи, починається другий етап комутації. Схема цього етапу наведена на рис. 3.

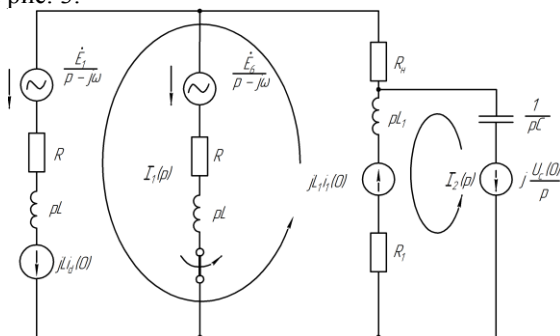


Рис. 3 - Операторна схема II етапу комутації

Як і на попередньому етапі комутації, розрахунок електромагнітного процесу проведено в операторній формі за методом контурних струмів:

$$\begin{cases} I_1(p)Z_{11}(p) + I_2(p)Z_{12}(p) = E_{11}(p); \\ I_1(p)Z_{21}(p) + I_2(p)Z_{22}(p) = E_{22}(p), \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{де } Z_{22}(p) &= Z_1(p) + 1/pC = (R_1 + pL_1) + 1/pC; \\ Z_{11}(p) &= Z(p) + Z_1(p) + R_H = (R + pL) + (R_1 + pL_1) + R_H; \\ Z_{12}(p) &= Z_{21}(p) = -Z_1(p); \\ E_{11}(p) &= \frac{\dot{E}_1}{(p - j\omega)} + jLi(0) + jL_1 i_1(0); \\ E_{22}(p) &= -jL_1 i_1(0) - ju_c(0)/p. \end{aligned}$$

Головний визначник системи рівнянь (12):

$$\Delta_1(p) = \begin{vmatrix} Z_{11}(p) & Z_{12}(p) \\ Z_{21}(p) & Z_{22}(p) \end{vmatrix} = Z_{11}(p)Z_{22}(p) - Z_{12}(p)Z_{21}(p).$$

Після підстановки в останнє виразів операторних зображено власних і спільних опорів та проведення низки алгебричних перетворень, остаточно отримано операторне зображення головного визначника

$$\Delta_1(p) = Z_1(p)(Z(p) + R_H) + (Z(p) + R_H + Z_1(p))/pC.$$

Алгебричне доповнення для отримання операторного зображення струму навантаження схеми рис. 3 на другому етапі комутації

$$\begin{aligned} \Delta_{11}(p) &= \begin{vmatrix} E_{11}(p) & Z_{12}(p) \\ E_{22}(p) & Z_{22}(p) \end{vmatrix} = \\ &= E_{11}(p)Z_{22}(p) - E_{22}(p)Z_{12}(p). \end{aligned} \quad (13)$$

Операторне зображення струму навантаження на другому етапі комутації, який, згідно позначень на схемі рис. 3, є контурним струмом першого контуру $I_1(p)$, отримано наступним чином:

$$I_1(p) = \frac{\Delta_{11}(p)}{\Delta_1(p)} = \frac{G_1(p)}{H_1(p)}. \quad (14)$$

Вирази чисельника співвідношення (14) після низки алгебричних перетворень запишемо так:

$$\begin{aligned} G_1(p) &= \dot{E}_1(1 + pCR_1 + p^2 CL_1) + \\ &+ (p - j\omega)[Li(0) + L_1 i_1(0) - u_c(0)CR_1 + \\ &+ p(Li(0)CR_1 - u_c(0)CL_1) + p^2 Li(0)CL_1]. \end{aligned} \quad (15)$$

Підстановка у (14) виразів операторних зображено контурних ЕРС та власних і спільних опорів, після здійснення низки алгебричних перетворень, дає вираз знаменника операторного зображення струму $I_1(p)$:

$$H_1(p) = (p - j\omega)\{p^3 CL_1 L + p^2 C[R_1 L + (R + R_H)L_1] + p[L + L_1 + C(R_1 R_H + R_1 R)] + (R_H + R_1 + R)\}. \quad (16)$$

Підставивши у рівняння $H_1(p) = 0$ параметри елементів електричної моделі електромеханічної системи (такі ж як і на першому етапі комутації), отримуємо:

$$H_1(p) = (p - j\omega)[p^3 0.2C + p^2 482C + p(4800C + 2.1) + 260] = 0 \quad (17)$$

Розв'язок рівняння (17) з першого множника дає корінь $p_0 = j\omega = j102.57$ (1/c), тобто такий же, як і на першому етапі комутації. Числові значення коренів кубічного рівняння (у квадратних дужках) при різній величині ємності C кола навантаження електричної моделі ЕМС мережі водопостачання представлені у табл. 2.

Таблиця 2 - Результат розв'язку характеристичного рівняння кола на другому етапі комутації

C (Ф)	P_1 (1/c)	P_2 (1/c)	P_3 (1/c)
0.0001	-2357.62	-26.19 ± j69.49	
0.00001	-1873.88	-317.87	-218.25
0.000001	-127.02	-1141.02 ± j2988.48	

Як бачимо, ситуація з чергуванням коливального і аперіодичного режимів така ж, як і на першому етапі комутації, але числові значення коренів вільного режиму інші.

Похідна від виразу знаменника формули (14):

$$H_1'(p) = [p^3 CL_1 L + p^2 C(R_1 L + RL_1 + R_H L_1) + p(L + L_1 + CR_1 R_H + CR_1 R) + R_H + R_1 + R] + (p - j\omega)[3p^2 CL_1 L + 2pC(R_1 L + RL_1 + R_H L_1) + (L + L_1 + CR_1 R_H + CR_1 R)]. \quad (18)$$

Використовуючи останнє, та числові значення коренів знаменника, закономірність зміни струму навантаження електричної моделі ЕМС на другому етапі комутації $i_{ан}(t)$ запишемо так:

$$i_{ан}(t) = \sum_{k=0}^{k=3} \frac{G_1(p_k)}{H_1'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (19)$$

Обговорення результатів

З викладеного випливає, що при ємності кола навантаження електричної моделі $C=0.00001$ Ф, електромагнітний процес на першому і другому етапах комутації має аперіодичний характер. Крива струму навантаження електричної моделі за зазначеної умо-

ви на половині періоду (три пульсації), наведена на рис. 4.

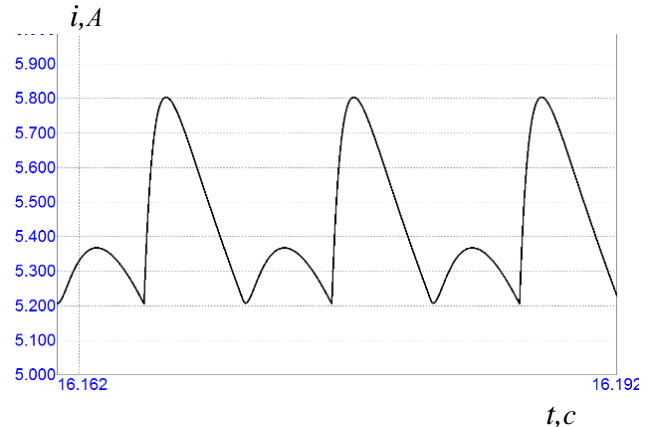


Рис. 4 - Струм навантаження електричної моделі при $C = 0.00001$ Ф

Крива рис. 4 отримана при схемотехнічному моделюванні електромагнітного процесу ЕМС при ємності кола навантаження $C = 0.00001$ Ф і підтверджує аперіодичний характер процесу відповідно до результатів теоретичного дослідження. На цьому рисунку і на усіх наступних числові значення струму, відкладені на осі ординат, збільшені на порядок.

Результати моделювання електромагнітного процесу ЕМС при ємності кола навантаження $C=0.0001$ Ф представлені на рис. 5.

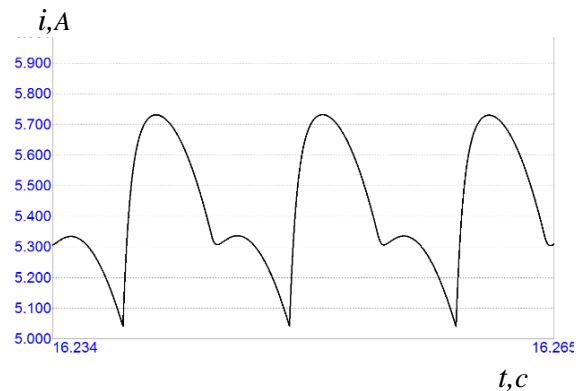


Рис. 5 - Струм навантаження електричної моделі при $C = 0.0001$ Ф

Згідно даних теоретичних досліджень і числових значень коренів характеристичного рівняння, електромагнітний процес у електричній моделі при ємності $C = 0.0001$ Ф є коливальним, однак, наведена на рис. 5 крива випрямленої напруги, цього не підтверджує.

Це можна пояснити, порівнявши частоту вимушених коливань, які створюються джерелами енергії моделі та частоти вільних коливань, яка залежить від параметрів елементів електричної моделі. Згідно наведених вище даних, насос Д 2000-100, що входить у склад ЕМС, має швидкість обертання робочого колеса 980 об/хв, або 16.333 об/с. Це відповідає кутовій частоті джерел живлення електричної моделі

$\omega = 102.57$ 1/с, яка і використовувалась при теоретичних дослідженнях.

Частота вільних коливань електромагнітного процесу електричної моделі, згідно даних табл. 1 та табл. 2, складає 68.81/с та 69.5 1/с відповідно. Вона досить близька до частоти джерел живлення, і, що важливо, менша за неї. Тож крива випрямленого струму електричної моделі електромеханічної системи мережі водопостачання при $C = 0.0001$ Ф за своєю формою близька до зображеної на рис. 4, яка характеризує аперіодичний характер електромагнітного процесу.

Інша справа, коли ємність кола навантаження електричної моделі ЕМС набагато менша і дорівнює $C = 0.000001$ Ф. У цьому випадку частота вільних коливань електромагнітного процесу у моделі, яка на першому етапі комутації складає майже 4000 1/с, а на другому - близько 3000 1/с, є значно вищою за частоту вимушених коливань. Цей факт досить яскраво проглядається на кривій струму навантаження, зображеній на рис. 6.

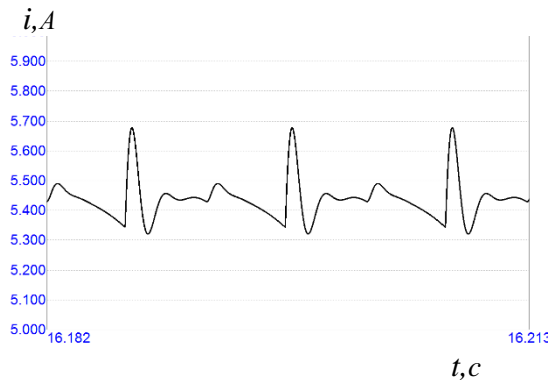


Рис. 6 - Струм навантаження електричної моделі при $C = 0.000001$ Ф

Модель має ті ж параметри елементів, що і у попередніх дослідженнях, за винятком величини ємності кола навантаження.

Висновки

1. Елементи (R_l , L_l , C) вихідної вітки електричної моделі електромеханічної системи мережі водопостачання моделюють конструктивні особливості відповідної частини насосного агрегату [12], а їх співвідношення суттєво впливає на характер електромагнітних процесів у моделі.

2. Коливальний характер електромагнітних процесів у електричній моделі мережі водопостачання свідчить про можливість вібрацій у механічній частині ЕМС, що є небажаним з погляду на економічні показники її функціонування.

3. Коливальний характер електромагнітних процесів активно проявляється при частотах вільних коливань, більших від частоти коливань вимушених. Тож результати електричного моделювання потрібно враховувати при конструюванні спіральних відводів насосів [7], особливо у випадках, коли а електромеха-

нічній системі передбачається регулювання технологічного процесу частотно-регульованим електроприводом.

Список літератури

1. **Бойко В. С.** Вплив ємності кола навантаження електричної моделі на характер електромагнітних процесів / **В. С. Бойко, М. І. Сотник** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях* - Харків: НТУ «ХПІ». - 2018. - №26 (1302). - Т. 1. - С. 19 – 24, doi: 10.20998/2413-4295.2018.26.03.
2. **Неня В. Г.** Оцінка втрат енергії, пов'язаних зі нестационарною роботою відцентрового насоса / **В. Г. Неня, С. О. Хованський** // *Вісник НТУ «ХПІ»* - Харків: НТУ «ХПІ». - 2010. - №44. - С. 25 – 29.
3. **Xie S. F., Wang Y., Liu Z. C.** Optimization of centrifugal pump cavitation performance based on CFD // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 72. 2012. pp. 1-6.
4. **Fatsis A., al E.** Three-Dimensional Unsteady Flow and Forces in Centrifugal Impellers with Circumferential Distortion of the Outlet Static Pressure // *Transactions of the ASME, J. of Turbomachinery*. Jan. 1997. Vol. 119. pp. 1-9.
5. **Derakhshan S., Pourmahdavi M.** Optimal design of centrifugal pump impellers // *4th International conference on computational methods (ICCM 2012)*. Gold Coast (Australia). 2012.
6. **Голиков В. А.** Программные комплексы для расчета течения и автоматизированного проектирования лопастных гидромашин / **В. А. Голиков, А. А. Жарковский, Г. И. Топаж** // *НТБ СПбГИУ. Серия: Наука и образование* - 2012. - №1 (142). - С. 199 - 206.
7. **Косторной С. Д.** Проектирование спиральных отводов центробежных насосов трапецеидальной формы со скругленными углами / **С. Д. Косторной, А. А. Чаплыгин** // *Вісник Сумського державного університету. Серія: технічні науки. Т1.* -2010. - № 3. - С. 105-115.
8. **Hedi L., Hatem K., Ridha Z.** Numerical flow simulation in a centrifugal pump // *International renewable energy congress. Sousse, Tunisia*. 2010. pp. 300-304.
9. **Бойко В.С.** Адекватність електричного моделювання робочих процесів у відцентровому насосі / **В. С. Бойко, М. І. Сотник** // *Технічна електродинаміка.* -Київ. - 2013. -№5 - С. 90 - 96.
10. Регулирование частоты вращения насосного оборудования. Руководство для успешного применения. - М.: Издво ООО "СофтКом", 2011. - 200 с. Перевод с английского и публикация русской версии выполнены Российской ассоциацией производителей насосов (РАПН) с ограниченного разрешения Гидравлического института и Европамп.
11. **Размадзе Ш. М.** *Преобразовательные схемы и системы.* - Москва. "Высшая школа" - 1987. - 527 с.
12. **Ji C., Wang Y., Yao L.** Numerical analysis and optimization of the volute in a centrifugal compressor // *International conference on power engineering.* Hangzhou, China. 2007. pp. 1353-1356.

References (transliterated)

1. **Boiko, V. S., Sotnik, N. I.** Vplyv yemnosti kola navantashenniy elektrichnoyi modeli na harakter elektromagnitnyh procesiv. *Visnik NTU «HPI». Seriya: Novi rishenniy v sychasnyh tehnologiyh* Harkiv: NTU «HPI». 2018. 26 (1302). 1. 19-24, doi: 10.20998/2413-4295.2018.26.03.

2. **Nenja, V. G., Hovans'kij, S. O.** Ocinka vtrat energii, pov'jazanih zi nestacionarnuju robotuju vidcentrovogo nasosa. *Visnik NTU «HPI»*. 2010. **44**. 25 – 29.
3. **Xie S.F., Wang Y., Liu Z.C.** Optimization of centrifugal pump cavitation performance based on CFD // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 72. 2012. 1-6.
4. **Fatsis A., al E.** Three-Dimensional Unsteady Flow and Forces in Centrifugal impellers with Circumferential Distortion of the Outlet Static Pressure // *Transactions of the ASME, J. of Turbomachinery*. Jan. 1997. Vol. 119. 1-9.
5. **Derakhshan S., Pourmahdavi M.** Optimal design of centrifugal pump impellers // *4th International conference on computational methods (ICCM 2012)*. Gold Coast (Australia). 2012.
6. **Golikov, V. A., Zharkovskij, A. A., Topazh, G. I.** Programmnye komplekсы dlja rascheta techenija i avtomatizirovannogo proektirovanija lopastnyh gidromashin. *NTV SPbGPU. Serija: Nauka i obrazovanie* 2012. **1** (142). 199-206.
7. **Kostornoj, S. D., Chaplygin, A. A.** Proektirovanie spiral'nyh otvodov centrezhnyh nasosov trapeceidal'noj formy so skruglennymi uglami. *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Serija: tehnicni nauki*. 2010. **3**, T. 1. 105-115.
8. **Hedi, L., Hatem, K., Ridha, Z.** Numerical flow simulation in a centrifugal pump // *International renewable energy congress. Sousse, Tunisia*. 2010. 300-304.
9. **Boiko, V. S., Sotnik, M. I.** Adekvatnist' elektrichnogo modeljuvanija robochih procesiv u vidcentrovomu nasosi. *Tehn. jelektrodinamika*. 2013. **5**. 90-96.
10. Hydraulic Institute and Europamp. (2011). Regulirovanie chastoty vrashhenija nasosnogo oborudovanija. Rukovodstvo dlja uspehnogo primenenija [Control of rotation speed of the pump equipment. Guidelines for successful application]. (Russian Association of Pump Manufacturers (RPMA), Trans). Moscow: OOO "SoftKom".
11. **Razmadze Sh.M.** Preobrazovatel'nye shemy i sistemy. *M.: Izd-vo "Vysshaja shkola"*, 1987. 527.
12. **Ji, C., Wang, Y., Yao, L.** Numerical analysis and optimization of the volute in a centrifugal compressor // *International conference on power engineering*. Hangzhou, China. 2007. 1353-1356.

Відомості про авторів / About the Authors

Бойко Валерій Степанович - доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", професор кафедри теоретичної електротехніки, м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1018-0642>; e-mail: vsboiko@bigmir.net

Valeriy Stepanovich Boiko - doctor of technical sciences, professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute" Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, Kyiv, UKRAINE; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1018-0642>; e-mail: vsboiko@bigmir.net.

Сотник Микола Іванович - доктор технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-24761-8161>; e-mail: ni.sotnik@gmail.com.

Mykola Ivanovych Sotnyk - doctor of technical sciences, Docent, Sumy State University, Associate Professor of the Department of Applied Hydroaeromechanics, Sumy, UKRAINE; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-24761-8161>; e-mail: ni.sotnik@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бойко, В. С. Ток нагрузки электрической модели электромеханической системы сети водоснабжения / **В. С. Бойко, Н. И. Сотник** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 28-34. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.04.

Please cite this article as:

Boiko, V., Sotnyk, M. Current loading of electrical model of electrical mechanical system of water supply network. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 28-34, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.04.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бойко, В. С. Струм навантаження електричної моделі електромеханічної системи мережі водопостачання / **В. С. Бойко, М. І. Сотник** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 28-34. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.04.

АННОТАЦИЯ. Исследуется характер электромагнитного процесса в схеме электрической модели электромеханической системы сети водоснабжения с насосом Д 2000-100. При этом основное внимание уделено закономерности изменения тока нагрузки модели, которым моделируется движение жидкости в спиральном отводе насоса в зависимости от конструктивных особенностей его выходной части. Параметры элементов электрической модели, основанной на разработанном авторами способе создания электрической модели центробежного насоса, соответствуют номинальному рабочему режиму системы и использованы при численном расчете. Часть цепи нагрузки электрической модели, которая моделирует спиральный отвод насоса, состоит из последовательно соединенных активного сопротивления R_1 и индуктивности L_1 , к которым подключен параллельно емкостной элемент C . Проведенные исследования показали, что в зависимости от соотношения параметров указанных элементов, характер переходных процессов может быть аперiodическим или колебательным. Колебательный характер процесса свидетельствует о возможности возникновения вибраций в электромеханической системе. Вместе с тем показано, что в зависимости от соотношения между частотой источника вибрации и собственной частотой выходной части электромеханической системы интенсивность проявления вибрации разная. Поэтому основной вывод публикации заключается в том, что применение электрических методов моделирования рабочих процессов электромеханических систем можно использовать для устранения нежелательных режимов работы технологического оборудования с целью повышения энергетической эффективности процесса водоснабжения.

Ключевые слова: коммутация, электромеханическая система, спиральный отвод, энергия, вибрация, переходной процесс

Надійшла (received) 23.06.2019