

## ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ НА ВТРАТИ АКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ І ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Дмитрієва О. М.

Донецький національний технічний університет

Сидоренко О. О.

ВАТ «Інститут «Донецький Будпроект»

led@dgtu.donetsk.ua

*It is examined the task of influencing of asymmetry of voltage on induction motors and cables. The losses of active power calculate with the use of two-contour scheme of substitution. Reduction of term of service is evaluated.*

**Постановка задачі.** Одним з негативних проявів впливу несиметрії напруг на електрообладнання і електричну мережу є збільшення втрат активної потужності, що призводить до більшого споживання електроенергії та скорочення строку служби внаслідок додаткового нагріву ізоляції. Найбільш поширеними електроприймачами, на які суттєво впливає несиметрія, є асинхронні двигуни.

Звичайно втрати потужності і температуру перевищення розраховують через номінальні дані, а в інженерній практиці використовують осереднені залежності [1, 2]. Запровадження комп'ютерних технологій потребує переходу до більш точного розрахунку параметрів режиму. Метою статті є розробка методів аналізу впливу несиметрії напруг на асинхронні двигуни. Ці методи очевидним чином можуть бути розповсюджені і на синхронні двигуни.

При оцінюванні електромагнітної сумісності (ЕМС), напруга  $U_2$  зворотної послідовності розглядається окремо від прямої, а двигуни і кабелі вважаються однорідними тепловими тілами з нульовими тепловими опорами. Це дозволяє визначати скорочення строку служби через сумарні втрати потужності [3].

Вихідними даними для розрахунків є графік  $U_2(t)$  або тільки його ефективне значення  $U_{2e}$ . Визначенню підлягають середні втрати потужності у двигуні і кабелі, що дозволяє оцінити скорочення їх строку служби від несиметрії. Таку можливість зумовлено наступним. Між векторами напруг прямої і зворотної послідовностей різних фаз кутові зсуви не є однаковими, тому відповідні струми фаз не співпадають, а при розрахунку втрат потужності у фазах потрібно було б враховувати кореляційні залежності між струмами. Однак при підсумовуванні втрат результат буде таким, як і при потресні втрат від прямої і зворотної послідовностей, бо сума кореляційних моментів дорівнює нулю.

**Схема заміщення.** Несиметрія напруг змінюється у невеликому діапазоні, що дозволяє використовувати лінійні схеми заміщення, а ковзання  $s$  вважати незмінним.

Для врахування насичення магнітної системи і витіснення струму ротора застосовують двоконтурну схему заміщення [4], яку приведено на рис. 1, де позначено:  $r_s, r_m, r_r', r_m'$  і  $L_s, L_m, L_r', L_m'$  – активні опори і індуктивності статора, контуру намагнічення, контурів ротора;  $I_s$  – струм статора;  $I_m, I_r', I_m'$  – струми контурів. Параметри схем визначаються через паспортні дані: потужність  $P_n$ , напругу  $U_n$ , фазний струм  $I_{\phi n}$ ,  $\cos\phi_n$ , ККД  $\eta_n$ , ковзання  $s_n$  та кратності  $k$ , – пускового струму,  $m_n$  – пускового моменту,  $m_m$  – максимального моменту.

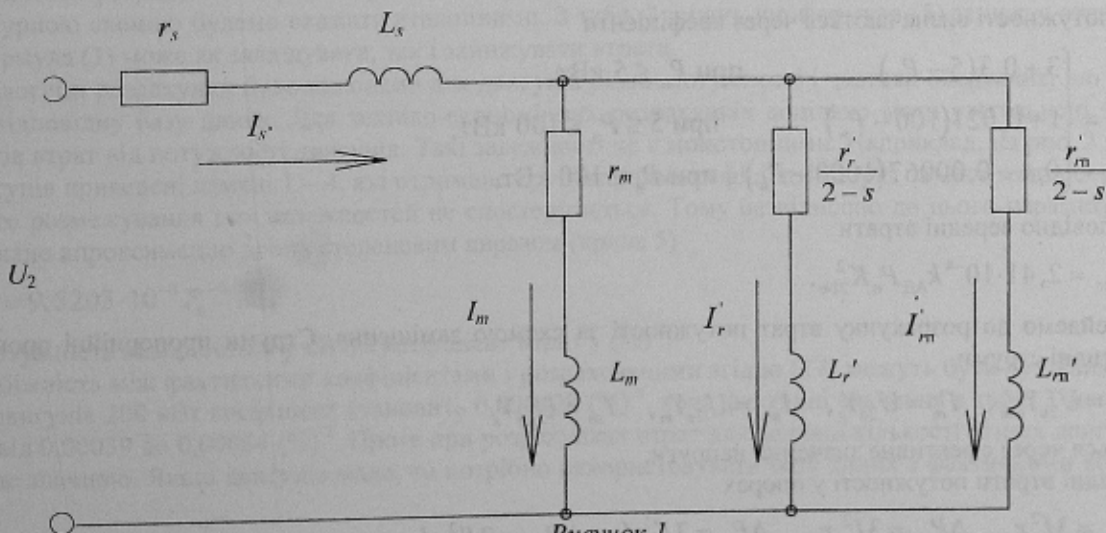


Рисунок 1

Для визначення струмів потрібно знайти еквівалентні провідності  $Y_s, Y_m, Y_r, Y_m$  відповідних лінійних систем «напруга-струм». Позначимо:

$$\begin{aligned} R'_r &= r'_r / (2-s), & R'_{rn} &= r'_{rn} / (2-s), & R_1 &= R'_r + R'_{rn}, & L_1 &= L'_r + L'_{rn}, & R_2^2 &= R'_r R'_{rn}, & L_2^2 &= L'_r L'_{rn}, \\ R_3^3 &= r'_m R_2^2, & L_3^3 &= L_m L_2^2, & L_4^2 &= L_m L_1 + L_2^2, & H_1 &= L'_r R'_{rn} + L'_{rn} R'_r, & H_2^2 &= r'_m L_2 + L_m H_1, \\ H_3 &= r'_m H_1 + L_m R_2^2, & H_4 &= R_1 L_m + r'_m L_1 + H_1, & R_4^2 &= r'_m R_1 + R_2^2, & R_5^3 &= r'_s R_4^2 + R_3^3, & g_s &= R_4^2 / R_5^3, \\ g_m &= R_2^2 / R_5^3, & g_r &= R_3^3 / R_5^3 R'_r, & g_m &= R_3^3 / R_5^3 R'_{rn}, & T_r &= L'_r / R'_r, & T_m &= L'_{rn} / R'_{rn}, & T_1^2 &= L_4^2 / R_4^2, \\ T_2 &= H_4 / R_4^2, & T_3^3 &= (L_3^3 + L_s L_4^2) / R_5^3, & T_4^2 &= (r'_s L_4^2 + L_s H_4 + H_2^2) / R_5^3, & T_5 &= (r'_s H_4 + L_s R_4^2 + H_3) / R_5^3, \\ T_6^3 &= T_m T_r T_m, & T_7^2 &= T_r T_m + T_m T_r + T_m T_m, & T_8 &= T_r + T_m + T_m, \end{aligned}$$

$$W_1(p) = \frac{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}{T_3^3 p^3 + T_4^2 p^2 + T_5 p + 1}, \quad W_2(p) = W_1(p) \frac{T_6^3 p^3 + T_7^2 p^2 + T_8 p + 1}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1},$$

де  $p$  – оператор.

Опускаючи викладки, запишемо кінцеві вирази для провідностей:

$$\begin{aligned} Y_s &= g_s |W_1(j\omega)|, & Y_m &= g_m \frac{|W_2(j\omega)|}{|j\omega T_m + 1|}, \\ Y_r &= g_r \frac{|W_2(j\omega)|}{|j\omega T_r + 1|}, & Y_m &= g_m \frac{|W_2(j\omega)|}{|j\omega T_m + 1|}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\omega = 100\pi$  – кутова частота,  $j = \sqrt{-1}$ .

**Розрахунок втрат потужності і скорочення строків служби.** В [1] для незмінної несиметрії приведено емпіричну формулу

$$\Delta P_{\text{д}} = 2,41 \Delta P_{\text{сн}} k_i^2 (K_{2U}/100)^2 \quad (2)$$

для втрат потужності у асинхронному двигуні, в якій  $\Delta P_{\text{сн}}$  – номінальні втрати потужності у статорі,  $K_{2U}$  – коефіцієнт несиметрії у процентах від номінальної напруги  $U_n$ . Номінальні втрати

$$\Delta P_{\text{сн}} = (1/\eta_n - 1) P_n$$

розраховуються за номінальною потужністю і ККД.

Втрати електроенергії пропорційні середньому значенню втрат потужності, яке пропорційне квадрату ефективного значення  $K_{2Ue}$  коефіцієнта несиметрії. Тому при несиметрії, яка змінюється, середні втрати

$$\Delta P_{\text{дс}} = 2,41 \cdot 10^{-4} \Delta P_{\text{сн}} k_i^2 K_{2Ue}^2 \quad (3)$$

За відсутністю даних щодо  $k_i$  і  $\Delta P_{\text{сн}}$  в [2] рекомендується формула

$$\Delta P_{\text{д}} = 2,41 \cdot k_{\text{Ад}} P_n (K_{2U}/100)^2, \quad (4)$$

де втрати потужності визначаються через коефіцієнти

$$k_{\text{Ад}} = \begin{cases} 3 + 0,3(5 - P_n) & \text{при } P_n \leq 5 \text{ кВт,} \\ 1 + 0,021(100 - P_n) & \text{при } 5 \leq P_n \leq 100 \text{ кВт,} \\ 0,4 + 0,00067(1000 - P_n) & \text{при } P_n \geq 100 \text{ кВт.} \end{cases}$$

Відповідно середні втрати

$$\Delta P_{\text{дс}} = 2,41 \cdot 10^{-4} k_{\text{Ад}} P_n K_{2Ue}^2 \quad (5)$$

Перейдемо до розрахунку втрат потужності за схемою заміщення. Струми пропорційні провідностям, тому ефективні струми

$$I'_{\text{мс}} = U_{2c} Y_{\text{мс}}, \quad I'_{\text{рс}} = U_{2c} Y_r, \quad I_{\text{мс}} = U_{2c} Y_m, \quad I_{\text{сс}} = U_{2c} Y_s \quad (6)$$

визначаються через ефективне значення напруги.

Середні втрати потужності у опорах

$$\Delta P_{\text{сс}} = 3 I_{\text{сс}}^2 r_s, \quad \Delta P_{\text{мс}} = 3 I_{\text{мс}}^2 r_m, \quad \Delta P_{\text{рс}} = 3 I_{\text{рс}}^2 r_r, \quad \Delta P_{\text{мс}} = 3 I_{\text{мс}}^2 r'_m \quad (7)$$

Додаткові середні втрати потужності у двигуні дорівнюють їх сумі:

$$\Delta P_{\text{дс}} = 3U_{2e}^2 (Y_s^2 r_s + Y_m^2 r_m + Y_r^2 r_r + Y_{rn}^2 r_{rn}) = 3 \cdot 10^{-4} K_{2e}^2 U_n^2 (Y_s^2 r_s + Y_m^2 r_m + Y_r^2 r_r + Y_{rn}^2 r_{rn}), \quad (8)$$

Середні втрати потужності у кабелю з опором фази  $r_k$  становлять

$$\Delta P_{\text{кк}} = 3I_{\text{ск}}^2 r_k, \quad (9)$$

Таким чином, розрахунки зводяться до визначення ефективного значення вихідного графіка напруги, якщо воно відразу не задано.

Для можливості узагальнення результатів розрахунку втрат потужності введемо коефіцієнт

$$c_{\text{д2}} = \Delta P_{\text{дс}} / (P_n K_{2e}^2), \quad (10)$$

який умовно назвемо коефіцієнтом втрат.

З формули (8) знайдемо

$$c_{\text{д2}} = 3 \cdot 10^{-4} U_n^2 (Y_s^2 r_s + Y_m^2 r_m + Y_r^2 r_r + Y_{rn}^2 r_{rn}) / P_n. \quad (11)$$

Формулі (5) відповідають коефіцієнти втрат

$$c_{\text{д2}} = 2,41 \cdot 10^{-4} k_{\text{Ад}}. \quad (12)$$

Середні втрати потужності дозволяють розрахувати середню температуру перевищення

$$\vartheta_{2e} = c_{\text{д9}} \Delta P_{\text{дс}}, \quad (13)$$

двигуна, де коефіцієнт

$$c_{\text{д9}} = \hat{\vartheta}_d / \Delta P_{\text{дс}} = \hat{\vartheta}_d / (1/\eta_n - 1) P_n \quad (14)$$

визначається через допустиму температуру перевищення  $\hat{\vartheta}_d$  при номінальному навантаженні двигуна, номінальну потужність і ККД.

Строк служби двигуна скорочується на величину

$$\Delta z_d = 100(1 - \exp\{-b\vartheta_{2e}\}) \quad (15)$$

у процентах, де згідно [3] коефіцієнт  $b$  для ізоляції класів  $A, E, B, F$  і  $H$  дорівнює 0,0866; 0,0693; 0,065; 0,052 і 0,0416 ( $^{\circ}\text{C}$ ) $^{-1}$ .

Аналогічні формули справедливі і для кабелю:

$$\vartheta_{\text{к2e}} = c_{\text{к29}} \Delta P_{\text{к2e}}, \quad c_{\text{к29}} = \hat{\vartheta}_k / (3\hat{I}_k^2 r_k), \quad \Delta z_k = 100(1 - \exp\{-b\vartheta_{\text{к2e}}\}), \quad (16)$$

де  $\hat{\vartheta}_k$  – допустима температура перевищення при допустимому значенні  $\hat{I}_k$  тривалого навантаження.

**Втрати потужності.** Порівняємо результати розрахунків втрат потужності за різними методами на прикладі двигунів потужністю 200 кВт: серії 4А з  $U_n=380$  В та В4С і В5С з  $U_n=400$  В фірми MarelliMotori (Італія). Паспортні дані двигунів приведено у табл. 1, де  $n_0$  – синхронна частота обертання. Ефективне значення коефіцієнта несиметрії приймемо 2%, що відповідає напрузі  $U_{2e} = 7,6$  В (або 8 В – для двигунів з  $U_n=400$  В). За паспортними даними розрахуємо параметри схеми заміщення у іменованих одиницях, які приведено в табл. 2.

Результати розрахунків втрат потужності і коефіцієнта (10) приведено у табл. 3. Результати розрахунку за двоконтурною схемою будемо вважати еталонними. З табл. 3 видно, що формула (5) занижує втрати потужності, а формула (3) може як завищувати, так і занижувати втрати.

Аналогічні розрахунки було виконано для двигунів різної потужності і частоти обертання, що дозволило створити відповідну базу даних. Для техніко-економічних розрахунків доцільно мати узагальнені залежності коефіцієнтів втрат від потужності двигунів. Такі залежності не є монотонними. Наприклад, на рис. 2 для італійських двигунів приведені ламані 1 – 4, які отримано групуванням коефіцієнтів втрат за частотою обертів двигунів. Чіткого розмежування цих залежностей не спостерігається. Тому безвідносно до цього параметру режиму було виконано апроксимацію даних степеневим виразом (крива 5)

$$c_{\text{д2}} = 9,5203 \cdot 10^{-4} P_n^{-0,1505}, \quad (17)$$

у якому потужність вимірюється у кВт, а коефіцієнт втрат у (%) $^{-2}$ .

Розбіжність між фактичними коефіцієнтами і розрахованими згідно (17) можуть бути суттєвими. Наприклад для двигунів 200 кВт коефіцієнт становить 0,000429 (%) $^{-2}$ , хоча фактичні значення в табл. 3 знаходяться у діапазоні від 0,00039 до 0,00054 (%) $^{-2}$ . Проте при розрахунках втрат для великої кількості різних двигунів похибка не буде значною. Якщо двигунів мало, то потрібно використовувати базу даних з фактичними коефіцієнтами втрат.

Таблиця 1

Тип	Схема з'єднання і $U_{\text{лп}}, \text{В}$	$I_{\text{фн}}, \text{А}$	$n_0, \text{об/хв}$	$s_{\text{н}}$	$\eta_{\text{н}}$	$\cos\varphi_{\text{н}}$	$k_i$	$m_{\text{п}}$	$m_{\text{м}}$
4А315М2У3	$\Delta/Y$ 380/660	210,73	3000	0,019	0,925	0,9	7,0	1,0	1,9
4А315М4У3		202,6	1500	0,013	0,94	0,92	6,0	1,3	2,2
4А355М6У3		209,0	1000	0,015	0,94	0,9	6,5	1,4	2,2
В4С315Мd2	$\Delta$ 400	196,3	3000	0,0067	0,954	0,89	6,5	2,2	2,2
В4С315Мd4		203,8	1500	0,01	0,952	0,86	6,5	2,5	2,6
В5С355La6		206,1	1000	0,01	0,953	0,85	6,0	2,1	2,1
В5С355Lb8		211,3	750	0,013	0,952	0,83	5,6	2,0	2,1

Таблиця 2

Тип	$r_s, \text{Ом}$	$r_m, \text{Ом}$	$r_r, \text{Ом}$	$r_{\text{рп}}, \text{Ом}$	$L_s, \text{мГн}$	$L_m, \text{мГн}$	$L_r', \text{мГн}$	$L_{\text{рп}}', \text{мГн}$
4А315М2У3	0,069	1,393	0,034	0,053	0,41	31,49	1,396	0,457
4А315М4У3	0,049	1,287	0,024	0,16	0,498	34,47	1,051	0,639
4А355М6У3	0,055	0,755	0,027	0,114	0,445	25,92	1,11	0,524
В4С315Мd2	0,027	0,534	0,014	0,2	0,499	26,3	1,195	0,443
В4С315Мd4	0,039	0,274	0,021	0,215	0,481	17,99	0,993	0,303
В5С355La6	0,039	0,314	0,02	0,14	0,515	19,323	2,416	0,461
В5С355Lb8	0,049	0,251	0,027	0,208	0,538	16,804	1,281	0,443

Таблиця 3

Тип	$\Delta P_{\text{лс}}, \text{Вт}$			$10^4 c_{\text{д2}}, (\%)^{-2}$		
	формула (3)	(5)	(8)	(3)	(5)	(8)
4А315М2У3	431,2	180,5	275,3	5,39	2,25	3,44
4А315М4У3	208,4	180,5	220,2	2,605	2,25	2,75
4А355М6У3	291,1	180,5	264,0	3,64	2,25	3,3
В4С315Мd2	127,9	180,5	311,6	1,6	2,25	3,9
В4С315Мd4	199,2	180,5	431,3	2,5	2,25	5,4
В5С355La6	171,66	180,5	320,3	2,15	2,25	4,0
В5С355Lb8	204,4	180,5	330,7	2,6	2,25	4,13

Аналогічна залежність отримана і для двигунів серії 4А:

$$c_{\text{д2}} = 7,8345 \cdot 10^{-4} P_{\text{н}}^{-0,1567}, \quad (18)$$

яка для двигунів потужністю 200 кВт дає значення  $0,000342 (\%)^{-2}$ , а фактичні коефіцієнти втрат (табл. 3) знаходяться у діапазоні від  $0,000275$  до  $0,000344 (\%)^{-2}$ .

На рис. 3 дано порівняння залежностей: 1 – за формулою (18), 2 – (17) і 3 – (12). Крива 3 лише в зоні малих потужностей наближається до кривих 1 і 2. Двигуни серії 4А мають менші втрати, ніж італійські двигуни, хоча втрати від прямої послідовності у них більші.

Слід відзначити, що якщо живлення двигуна виконувалося б трьома одножильними кабелями, то до вихідних даних треба було б додати ще і кути  $\varphi_{12}$  зсуву між векторами струмів симетричних складових. Дійсно, фактичні втрати потужності у кожному кабелю становлять [3]:

$$\Delta P_{\text{лс}} = (I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos\varphi_{12}) r_{\text{к}},$$

де  $I_1, I_2$  – модулі векторів струмів,  $l$  – індекс фази (А, В або С). Додаткові втрати від зворотної послідовності не можна приймати рівними  $I_2^2 r_{\text{к}}$ , бо потрібно ще врахувати і долю від третього доданку, яка визначається відносно суми квадратів модулів струмів симетричних складових [5]:

$$\Delta P_{2l} = \left( 1 + \frac{2}{I_1^2 + I_2^2} I_1 I_2 \cos \varphi_{12l} \right) I_2^2 r_k.$$

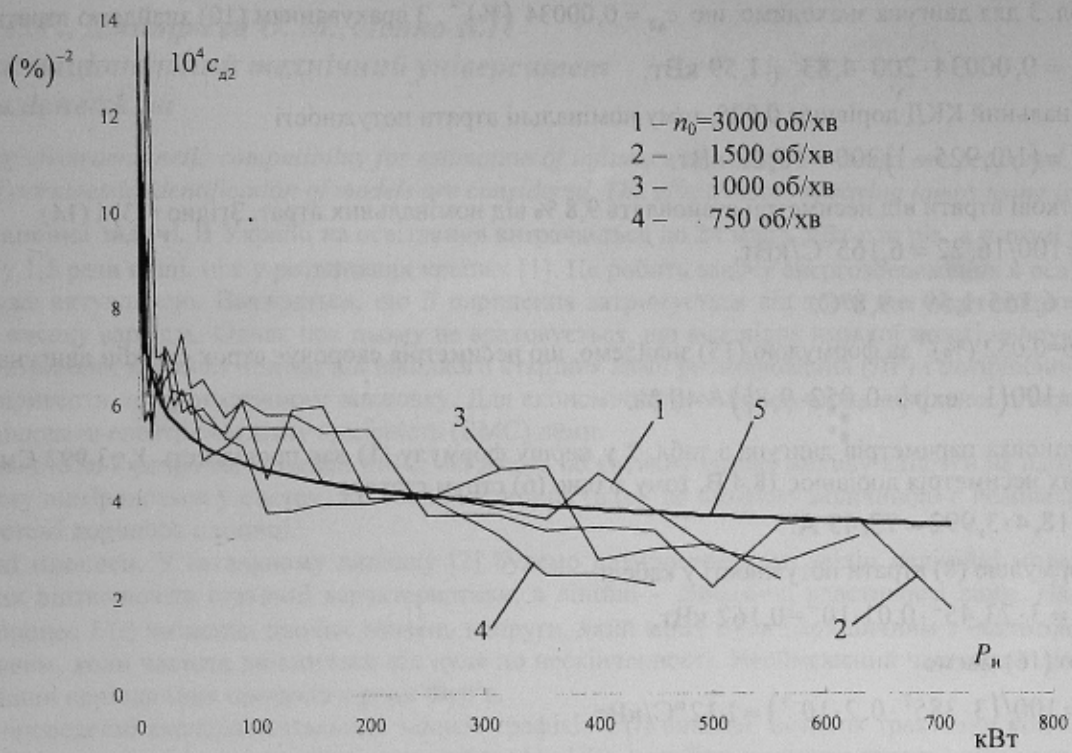


Рисунок 2

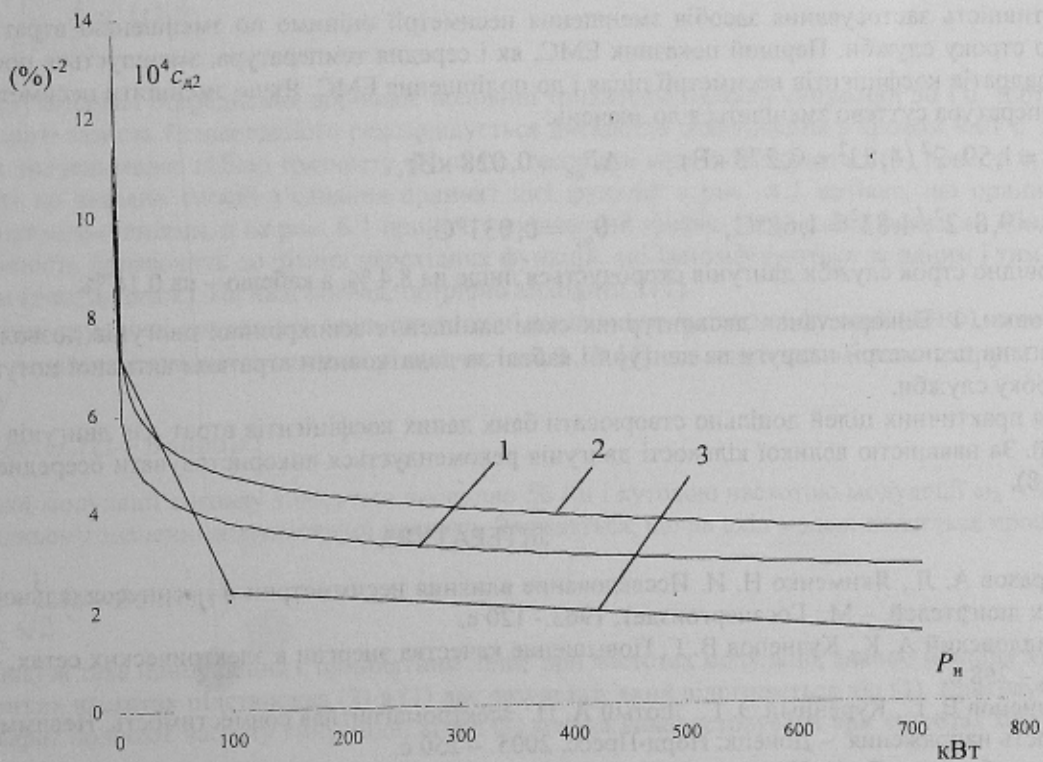


Рисунок 3

Однак сумарні додаткові втрати складають  $3I_2^2 r_k$ , бо сума косинусів кутів зсуву трьох фаз дорівнює нулю.

**Приклад.** Двигун 4А315М2У3 (200 кВт, 380 В) отримує живлення від підстанції металургійного заводу, на шинах якої  $U_{2c}=4,83\%$  (за даними приклада 1 з [2]). Кабель, що здійснює живлення, має активний опір 0,01 Ом і допустимий струм 385 А. Допустима температура ізоляції класу F становить  $100^{\circ}\text{C}$ . Оцінити вплив несиметрії на двигун і кабель, а також ефективність зменшення несиметрії до значення 2 %, що нормується.

З табл. 3 для двигуна знаходимо, що  $c_{д2} = 0,00034 (\%)^{-2}$ . З врахуванням (10) знайдемо втрати

$$\Delta P_{2c} = 0,00034 \cdot 200 \cdot 4,83^2 = 1,59 \text{ кВт.}$$

Номінальний ККД дорівнює 0,925, тому номінальні втрати потужності

$$\Delta P_{н} = (1/0,925 - 1)200 = 16,22 \text{ кВт.}$$

Додаткові втрати від несиметрії становлять 9,8 % від номінальних втрат. Згідно (13) і (14)

$$c_{д8} = 100/16,22 = 6,165^{\circ}\text{C/кВт},$$

$$\vartheta_{2c} = 6,165 \cdot 1,59 = 9,8^{\circ}\text{C}.$$

При  $b=0,052 (\%)^{-1}$  за формулою (15) знайдемо, що несиметрія скорочує строк служби двигуна на

$$\Delta z_{д} = 100(1 - \exp\{-0,052 \cdot 9,8\}) = 40 \%.$$

Підстановка параметрів двигуна з табл. 2 у першу формулу (1) дає провідність  $Y_s=3,992 \text{ См}$ . У іменованих одиницях несиметрія дорівнює 18,4 В, тому згідно (6) струм статора

$$I_{se} = 18,4 \cdot 3,992 = 73,45 \text{ А.}$$

За формулою (8) втрати потужності у кабелі

$$\Delta P_{kc} = 3 \cdot 73,45^2 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} = 0,162 \text{ кВт.}$$

Згідно (16) маємо

$$c_{к29} = 100 / (3 \cdot 385^2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}) = 1,12^{\circ}\text{C/кВт},$$

$$\vartheta_{к2c} = 1,12 \cdot 0,162 = 0,18^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta z_{к} = 100(1 - \exp\{-0,052 \cdot 0,18\}) = 0,932 \%.$$

Ефективність застосування засобів зменшення несиметрії оцінимо по зменшенню втрат потужності й підвищенню строку служби. Перший показник ЕМС, як і середня температура, зменшується пропорційно відношенню квадратів коефіцієнтів несиметрії після і до поліпшення ЕМС. Якщо зменшити несиметрію до 2 %, то втрати і температура суттєво зменшаться до значень:

$$\Delta P_{2c} = 1,59 \cdot 2^2 / 4,83^2 = 0,273 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{kc} = 0,028 \text{ кВт},$$

$$\vartheta_{2c} = 9,8 \cdot 2^2 / 4,83^2 = 1,68^{\circ}\text{C}, \quad \vartheta_{kc} = 0,031^{\circ}\text{C}.$$

Відповідно строк служби двигунів скорочується лише на 8,4 %, а кабелю – на 0,16 %.

**Висновки.** 1. Використання двоконтурних схем заміщення асинхронних двигунів дозволяє об'єктивно оцінювати вплив несиметрії напруги на двигуни і кабелі за додатковими втратами активної потужності та скороченню строку служби.

2. Для практичних цілей доцільно створювати банк даних коефіцієнтів втрат для двигунів різних типів і потужностей. За наявності великої кількості двигунів рекомендується використовувати осереднені залежності виду (17), (18).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Церазов А. Л., Якименко Н. И. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности на работу асинхронных двигателей. – М.: Госэнергоиздат, 1963.- 120 с.
2. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
3. Кузнецов В. Г., Куренный Э. Г., Лютый А. П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
4. Сивокобыленко В. Ф., Қостенко В. И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. – Донецк: ДПИ, 1979. – 110 с.
5. Дмитрієва О.М., Левшов О.В. Оцінювання пайовою участі споживачів у втратах електроенергії. – Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика», 2003, вип. 67. – С. 49-52.

*Рекомендовано проф., д. т. н. Курінним Е. Г.*