



Стребков О. А.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПУСКУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

*Представлені результати аналітичного дослідження електромеханічних та теплових перехідних процесів при пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в умовах зниженої напруги. В якості діагностичного параметру режиму роботи електродвигуна в після-пусковий період прийнято імпульс квадрату пускового струму.*

**Ключові слова:** електродвигун, електромеханічний, тепловий, перехідний процес, знижена напруга, пуск.

### 1. Вступ

При живленні фермерських виробничих приміщень часто спостерігається знижена напруга на вводах в будівлю.

Значне зниження напруги при пуску асинхронних електродвигунів робочих машин може привести до затяжних або нездійснених пусків. Тому дослідження електромеханічних та теплових процесів при пуску приводних електродвигунів при зниженій напрузі представляє як теоретичний, так і практичний інтерес, що є задачею даного дослідження.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В даній роботі поставлена науково-технічна задача оцінки ресурсозбереження при пуску асинхронного електродвигуна при зниженій напрузі.

Аналіз робіт в цьому напрямку показує, що це питання частково вирішено для електродвигуна працюючого з перевантаженням взявши за основу показники номінального режиму його роботи [1].

Проведено дослідження ресурсоенергозбереження в асинхронних електродвигунах з позиції конструктивного виконання активних частин останнього [2], методів оптимізації втрат електричної енергії в асинхронному електродвигуні [3, 4], запропоновано новий метод мінімізації розходу ресурсу асинхронного електродвигуна [5]. Розглянуто процес втрат активної потужності в магнітопроводі [6], запропонована конструкція асинхронного електродвигуна з мінімальними втратами [7], знайдено спосіб контролю високих температур [8], з метою дослідження теплового перехідного процесу в електродвигуні запропонована безітераційна методика визначення параметрів схеми заміщення асинхронного електродвигуна [9], запропоновано метод зниження енерговитрат в мобільних агрегатах [10].

Однак залишаються недослідженими до кінця електромеханічні та теплові перехідні процеси при пуску асинхронного електродвигуна при відхиленнях від номінального режиму роботи, зокрема при зниженні напруги.

### 3. Об'єкт, мета і задачі дослідження

Об'єктом дослідження є електромеханічні та теплові перехідні процеси при пусках асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором.

Метою дослідження є підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором при роботі в умовах зниженої напруги шляхом розробки технічних пристроїв діагностування та полегшення експлуатаційних режимів на базі теоретичних положень електромеханічних і теплових перехідних процесів при пусках останніх.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

1. Дослідження електромеханічних перехідних процесів при пуску приводних електродвигунів при зниженій напрузі.
2. Дослідження теплового перехідного процесу при пуску приводного електродвигуна при зниженій напрузі.
3. Аналіз впливу параметрів системи «електродвигун — робоча машина» з незалежною від швидкості механічною характеристикою на електромеханічні і теплові перехідні процеси при пуску двигуна при зниженій напрузі.
4. Дослідження теплового зношення ізоляції в після-пусковий період.

### 4. Електромеханічні перехідні процеси при пуску приводних електродвигунів при зниженій напрузі

Приводні електродвигуни працюють в парі з виробничим обладнанням, яке має різні механічні характеристики, що описуються емпіричною формулою [1]:

$$M_{\text{оп}} = M_0 + (M_{\text{оп.н}} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^x, \quad (1)$$

де  $M_{\text{оп}}$  — поточний момент опору на валу робочої машини, Н·м;  $M_{\text{оп.н}}$  — номінальний момент опору на валу робочої машини при номінальній кутовій швидкості, Н·м;  $M_0$  — момент опору тертя в рухомих частинах робочої

машини, приведений до її валу, Н·м;  $\omega_n$  — номінальна кутова швидкість вала робочої машини рад/с;  $\omega$  — поточна кутова швидкість вала робочої машини, рад/с;  $x$  — коефіцієнт, який характеризує зміну моменту опору при зміні кутової швидкості вала робочої машини.

Розглянемо електромеханічний перехідний процес при пуску приводних електродвигунів привода робочих машин з незалежною від швидкості механічною характеристикою ( $x = 0$ ).

При цьому будемо вважати, що номінальний момент опору на валу робочих машин при повному їх завантаженні дорівнює номінальному моменту приводного електродвигуна, тобто:

$$M_{оп.н} = M_n. \quad (2)$$

Механічну характеристику електродвигуна представимо при зниженій напрузі, лінеаризувавши її окремі ділянки (рис. 1).

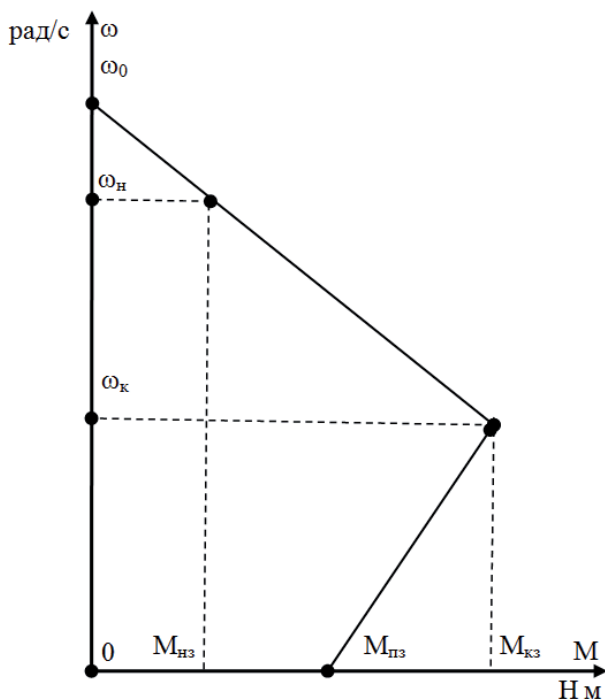


Рис. 1. Лінеаризована механічна характеристика електродвигуна при зниженій напрузі

Запишемо вирази моментів:

$$M_{пз} = k_U^2 M_n, \quad (3)$$

$$M_{кз} = k_U^2 \mu_k M_n, \quad (4)$$

$$M_{пз} = k_U^2 \mu_n M_n, \quad (5)$$

де  $k_U$  — кратність напруги;  $M_{пз}$ ,  $M_{кз}$ ,  $M_n$  — моменти: номінальний, критичний, пусковий при зниженій напрузі, Н·м;  $\mu_k$ ,  $\mu_n$  — кратності моментів: критичного, пускового.

В основу електромеханічного перехідного процесу покладемо рівняння руху системи «електродвигун — робоча машина», вважаючи момент інерції системи постійним:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + M_{оп}, \quad (6)$$

де  $M$  — момент, який розвиває двигун, Н·м;  $J$  — момент інерції системи «електродвигун — робоча машина», кг·м<sup>2</sup>;  $t$  — поточний час, с;  $\omega$  — кутова швидкість вала електродвигуна, рад/с.

Розглянемо електромеханічний перехідний процес системи «електродвигун — робоча машина» з незалежною від швидкості механічною характеристикою ( $x = 0$ ).

Момент, який розвиває електродвигун на першій ділянці механічної характеристики:

$$M = (M_{кз} - M_{пз}) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right) + M_{пз}, \quad (7)$$

де  $\omega_k$  — критична кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

Підставимо (7) та (2) в (6) і отримаємо рівняння руху системи на першій ділянці розгону електродвигуна:

$$J \frac{d\omega}{dt} - \left( \frac{M_{кз} - M_{пз}}{\omega_k} \right) \omega + M_n - M_{пз} = 0. \quad (8)$$

Перепишемо (8) в наступному вигляді:

$$J \frac{d\omega}{dt} - \left( \frac{k_U^2 \mu_k M_n - k_U^2 \mu_n M_n}{\omega_k} \right) \omega + M_n - k_U^2 \mu_n M_n = 0. \quad (9)$$

Перепишемо рівняння (9) у відносних одиницях:

$$\frac{J}{M_n} \frac{d\omega}{dt} - \frac{k_U^2 \mu_k - k_U^2 \mu_n}{\omega_k} \omega - (1 - k_U^2 \mu_n) = 0. \quad (10)$$

Перетворимо рівняння (10):

$$T_1 \frac{d\omega}{dt} - \omega - \alpha = 0, \quad (11)$$

де:

$$T_1 = \frac{J \omega_k}{M_n k_U^2 (\mu_k - \mu_n)}, \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{k_U^2 \mu_n - 1}{k_U^2 (\mu_k - \mu_n)} \omega_k. \quad (13)$$

Розв'язавши рівняння (11), знаходимо вираз поточної кутової швидкості на першій ділянці розгону електродвигуна:

$$\omega = \alpha e^{\frac{t}{T_1}} - \alpha. \quad (14)$$

Прийнявши при  $t_1 \omega = \omega_k$ , знаходимо з рівняння (14) час розгону електродвигуна на першій ділянці:

$$t_1 = T_1 \ln \frac{\omega_k - \alpha}{\alpha}. \quad (15)$$

Момент, який розвиває електродвигун на другій ділянці розгону:

$$M = (M_{кз} - M_{нз}) \left( \frac{\omega_n - \omega}{\omega_n - \omega_k} \right) + M_{нз}. \quad (16)$$

Підставивши (16) та (2) в (6), отримаємо:

$$J \frac{d\omega}{dt} - \frac{M_{кз} - M_{нз}}{\omega_n - \omega_k} (\omega_n - \omega) = 0. \quad (17)$$

Перепишемо рівняння (17) у відносних одиницях:

$$\frac{J}{M_n} \frac{d\omega}{dt} - \frac{\kappa_{\bar{U}}^2 \mu_k - \kappa_{\bar{U}}^2}{\omega_n - \omega_k} \omega - \frac{\kappa_{\bar{U}}^2 \mu_k - \kappa_{\bar{U}}^2}{\omega_n - \omega_k} \omega_n = 0. \quad (18)$$

Перетворимо рівняння (18):

$$T_2 \frac{d\omega}{dt} + \omega - \omega_n = 0, \quad (19)$$

де:

$$T_2 = \frac{J(\omega_n - \omega_k)}{M_n(\kappa_{\bar{U}}^2 \mu_k - \kappa_{\bar{U}}^2)}. \quad (20)$$

Розв'язавши рівняння (19), знаходимо вираз точної кутової швидкості на другій ділянці розгону електродвигуна:

$$\omega = \omega_n (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}) + \omega_k e^{-\frac{t_2}{T_2}}. \quad (21)$$

Прийнявши при  $t_2 \omega = \kappa \omega_n$  (де  $\kappa < 1$ ), знаходимо з рівняння (21) час розгону електродвигуна на другій ділянці:

$$t_2 = T_2 \ln \frac{1 - \frac{\omega_k}{\omega_n}}{1 - \kappa}. \quad (22)$$

### 5. Тепловий перехідний процес при пуску приводного електродвигуна при зниженій напрузі

Тепловий перехідний процес при пуску приводного електродвигуна швидкоплинний, тому з достатнім ступенем точності можемо прийняти, що він протікає адіабатично.

Запишемо рівняння теплового балансу для обмотки статора:

$$Cd\tau = P_0(1 + \alpha\tau)dt, \quad (23)$$

де  $C$  – теплоємність обмотки, Дж/°С;  $P_0$  – втрати активної потужності в обмотці статора при температурі навколишнього середовища, Вт;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу обмотки, 1/°С;  $\tau$  – перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, °С;  $t$  – поточний час, с.

$$C = cG_M, \quad (24)$$

де  $c$  – питома теплоємність матеріалу обмотки, Дж/кг°С;  $G_M$  – маса обмотки, кг.

Перепишемо рівняння (23) в наступному вигляді:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} - \tau - \frac{1}{\alpha} = 0, \quad (25)$$

де:

$$T_n = \frac{C}{\alpha P_0}. \quad (26)$$

Розв'язавши рівняння (25), знаходимо вираз поточного перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища і вираз швидкості зростання температури обмотки:

$$\tau = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{поч}} \right) e^{\frac{t}{T_n}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (27)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T_n} \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{поч}} \right) e^{\frac{t}{T_n}}, \quad (28)$$

де  $\tau_{\text{поч}}$  – початкове перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, °С.

Втрати активної потужності в обмотці при температурі навколишнього середовища:

$$P_0 = 3r_0 I_n^2, \quad (29)$$

де  $r_0$  – активний опір фази обмотки статора при температурі навколишнього середовища, Ом;  $I_n$  – діюче значення сили пускового електричного струму, який протікає по обмотці статора, А.

Активний опір фази обмотки статора при температурі навколишнього середовища:

$$r_0 = r_{20}(1 + \alpha(\vartheta_{\text{сер}} - 20)), \quad (30)$$

де  $r_{20}$  – активний опір фази обмотки статора при температурі 20 °С;  $\vartheta_{\text{сер}}$  – температура навколишнього середовища, °С.

Діюче значення сили пускового електричного струму знайдемо як модуль комплексу діючого значення сили пускового електричного струму, знайденого по Г-подібній схемі заміщення асинхронного електродвигуна (рис. 2):

$$\dot{I} = \frac{\kappa_U \dot{U}}{Z}, \quad (31)$$

де  $\dot{U}$  — комплекс діючого значення напруги, В;  $Z$  — комплекс повного опору кола, Ом.

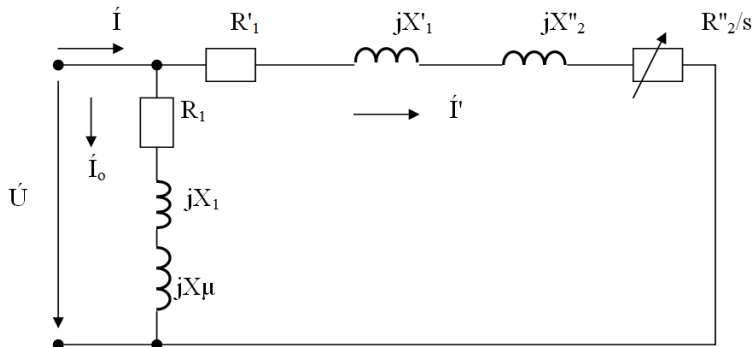


Рис. 2. Схема заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна

Комплекси повних опорів струму у відповідності до схеми заміщення запишемо наступним чином:

$$Z = \frac{Z_0 \cdot Z'}{Z_0 + Z'}, \quad (32)$$

$$Z_0 = R_1 + jX_1 + \frac{R_M \cdot jX_M}{R_M + jX_M}, \quad (33)$$

$$Z' = R'_1 + \frac{R''_2}{s} + j(X'_1 + X''_2), \quad (34)$$

$$Z = \sqrt{\left(R'_1 + \frac{R''_2}{s}\right)^2 + (X'_1 + X''_2)^2}. \quad (35)$$

Як видно з (32)–(35), діюче значення сили пускового електричного струму є функцією ковзання асинхронного електродвигуна і параметрів схеми заміщення.

Підставимо (29) в (26) і отримаємо:

$$T_n = \frac{C}{3\alpha\omega_0 I_n^2}. \quad (36)$$

Знайдемо максимальне перевищення температури обмотки в кінці будь-якої з двох ділянок розгону електродвигуна:

$$\tau_m = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{поч}}\right) e^{\frac{3\alpha\omega_0 I_n^2 t_n}{C}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (37)$$

де  $\tau_m$  — максимальне перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища, °С;  $t_n$  — час розгону електродвигуна на ділянці, с.

Відповідно до [1] позначимо величину  $I_n^2 t_n$  буквою  $\Pi$  і назовемо імпульсом квадрату діючого значення сили пускового струму, тобто:

$$\Pi = I_n^2 t_n. \quad (38)$$

З урахуванням того, що діюче значення сили пускового струму асинхронного електродвигуна є функція часу, то більш точно імпульс квадрату пускового струму запишемо наступним чином:

$$\Pi = \int_0^{t_n} I_n^2 dt. \quad (39)$$

Тоді рівняння (37) запишеться наступним чином:

$$\tau_m = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{поч}}\right) e^{\frac{3\alpha\omega_0 \Pi}{C}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (40)$$

## 6. Аналіз впливу параметрів системи «електродвигун — робоча машина» з незалежною від швидкості механічною характеристикою на електромеханічні і теплові перехідні процеси при пуску двигуна при зниженій напрузі

Дослідимо залежність електромеханічної постійної часу системи  $T$  та часу пуску електродвигуна  $t$  у функції моменту інерції системи  $J$ , технічних даних електродвигуна:  $M_n$ ,  $\omega_k$ ,  $\omega_n$ ,  $M_n$ ,  $M_k$ ; технічних даних робочої машини:  $\omega_n$ ,  $M_{\text{оп.в}}$ ,  $M_0$ ; кратності прикладеної до електродвигуна напруги  $\kappa_U$ .

Кількісний аналіз проведемо на прикладі електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 з наступними каталожними даними:  $P_{2n} = 4$  кВт;  $\eta_n = 0,865$ ;  $\cos\phi_n = 0,89$ ;  $R'_1 = 1,509$  Ом;  $X'_1 = 1,537$  Ом;  $R''_2 = 1,006$  Ом;  $X''_2 = 2,767$  Ом;  $R_1 = 1,485$  Ом;  $X_1 = 1,513$  Ом,  $X_M = 95$  Ом;  $U_n = 220$  В;  $s_n = 0,033$ ;  $s_k = 0,28$ ;  $s_m = 0,8$ ;  $\mu_{\text{пн}} = 2,0$ ;  $\mu_{\text{мп}} = 1,6$ ;  $\mu_{\text{кп}} = 2,5$ ;  $r_{20} = 1,19$  Ом;  $G_m = 3,78$  кг.

Аналіз виразу електромеханічної постійної часу  $T_1$  на першій ділянці розгону електродвигуна показує, що вона визначається як параметрами двигуна:  $M_n$ ,  $\omega_k$ ,  $\mu_p$ ,  $\mu_k$ , так і параметром системи «електродвигун — робоча машина»  $J/M_n$ , а також кратністю прикладеної до двигуна напруги  $\kappa_U$ .

Дослідимо кількісно залежності електромеханічної постійної часу  $T_1$  та часу розгону електродвигуна на першій ділянці  $t_1$  у функції параметра системи  $J/M_n$  та кратності прикладеної напруги  $\kappa_U$ .

Визначаємо номінальний момент, який розвиває електродвигун, а також критичну кутову швидкість:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n}, \quad (41)$$

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n), \tag{42}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}, \tag{43}$$

$$\omega_k = \omega_0(1 - s_k), \tag{44}$$

де  $n_0$  – синхронна швидкість обертання вала електродвигуна, об/хв.

Підставивши значення фізичних величин, знаходимо:

$$\omega_0 = 314 \text{ рад/с}; \quad \omega_n = 303,6 \text{ рад/с};$$

$$\omega_k = 226 \text{ рад/с}; \quad M_n = 13,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Приймаємо значення параметра  $J/M_n$  в межах від 0,01 до 0,015  $\text{с}^2$  значення коефіцієнта прикладеної напруги  $k_U$  в межах від 1,0 до 0,8. Розраховуємо значення електромеханічної постійної часу  $T_1$  і значення часу розгону електродвигуна на першій ділянці  $t_1$ . Результати розрахунків представляємо графічно (рис. 3, рис. 4).

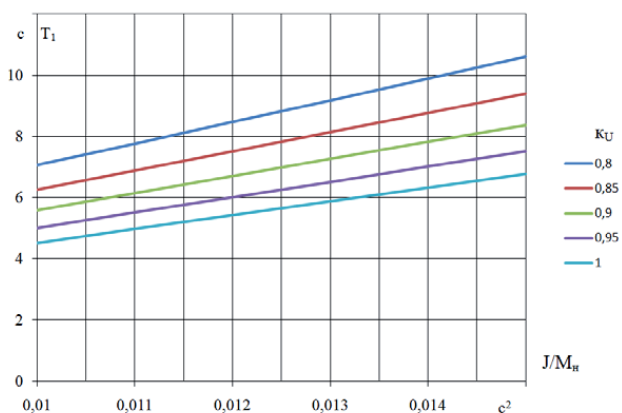


Рис. 3. Залежність електромеханічної постійної часу  $T_1$  у функції  $J/M_n$  при  $k_U$  в межах від 1,0 до 0,8

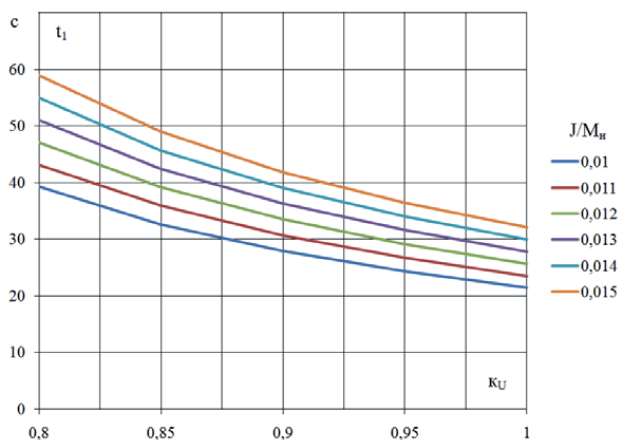


Рис. 4. Залежність часу розгону електродвигуна на першій ділянці у функції  $k_U$  при  $J/M_n$  в межах від 0,01 до 0,015  $\text{с}^2$

Розраховуємо значення електромеханічної постійної часу  $T_2$  по та значення часу розгону електродвигуна на другій ділянці  $t_2$ .

Приймаємо значення параметра  $J/M_n$  в межах від 0,01 до 0,015  $\text{с}^2$  значення коефіцієнта прикладеної напруги  $k_U$  в межах від 1,0 до 0,8. Результати розрахунків представляємо графічно (рис. 5, рис. 6).

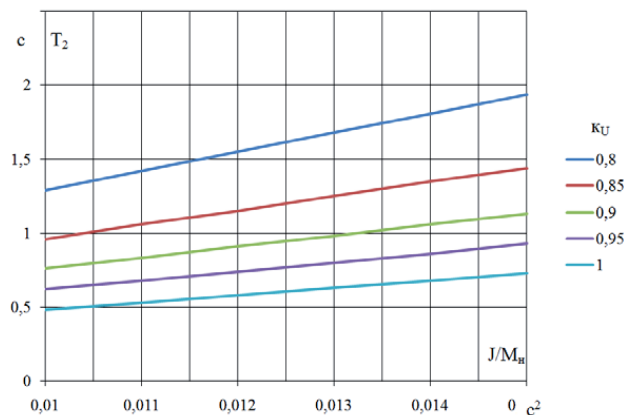


Рис. 5. Залежність електромеханічної постійної часу  $T_2$  у функції  $J/M_n$  при  $k_U$  в межах від 1,0 до 0,8

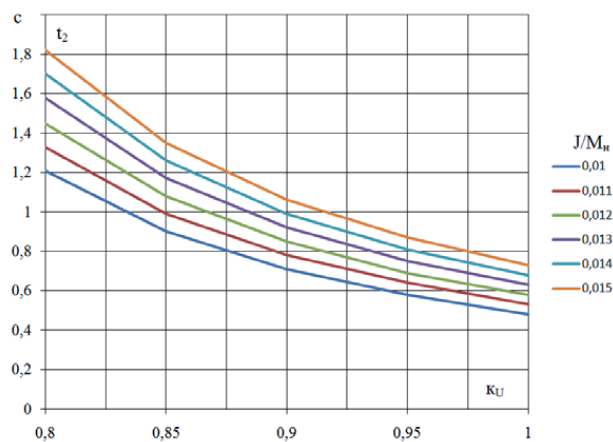


Рис. 6. Залежність часу розгону електродвигуна на другій ділянці у функції  $k_U$  при  $J/M_n$  в межах від 0,01 до 0,015  $\text{с}^2$

### 7. Дослідження теплового зношення ізоляції в післяпусковий період

Враховуючи порівняльну швидкоплинність процесу нагрівання обмотки при пуску, можна прийняти, що обмотка досягає максимального перевищення температури в момент часу  $t = 0$ . В післяпусковий період охолодження обмотки до номінального значення швидкість зміни температури буде невеликою у відповідності до кривої охолодження:

$$\tau = \tau_n(1 - e^{-t/T}) + \tau_m e^{-t/T}, \tag{45}$$

де  $\tau$  – поточне перевищення температури обмотки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  – поточний час, с;  $\tau_n$  – номінальне перевищення температури обмотки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T$  – постійна часу нагрівання електродвигуна, с;  $\tau_m$  – максимальне перевищення температури обмотки в кінці пуску,  $^{\circ}\text{C}$ .

Швидкість теплового зношення ізоляції в післяпусковий період опишеться виразом:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\tau_n(1 - e^{-t_i/T}) + \tau_m e^{-t_i/T} + \vartheta_{\text{сєр}} + 273} \right)}, \quad (46)$$

де  $\varepsilon$  – поточна швидкість теплового зношення ізоляції, бгод/год;  $\varepsilon_n$  – номінальна швидкість теплового зношення ізоляції, бгод/год;  $B$  – параметр, який характеризує клас ізоляції, К;  $T$  – постійна часу нагрівання електродвигуна, с;  $\Theta_n$  – абсолютна номінальна температура ізоляції, К;  $\vartheta_{\text{сєр}}$  – температура навколишнього середовища, °С.

Представимо графіки охолодження обмотки електродвигуна та швидкості теплового зношення ізоляції в післяпусковий період (рис. 7).

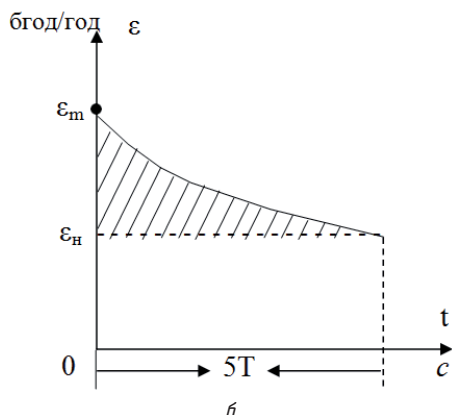
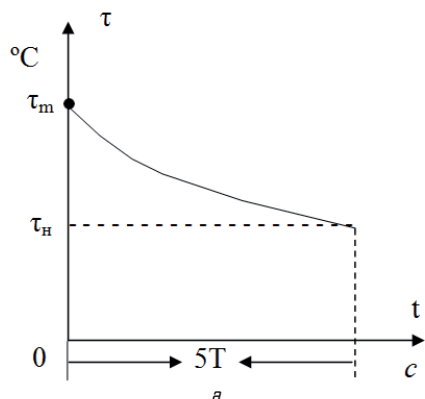


Рис. 7. Графіки охолодження обмотки електродвигуна (а) та швидкості теплового зношення ізоляції (б) в післяпусковий період

Додаткове теплове зношення ізоляції в післяпусковий період відбувається на інтервалі часу від нуля до  $5T$  і може бути знайдено за виразом:

$$E_{\text{дод}} = \int_0^{5T} \varepsilon dt - 5T\varepsilon_n. \quad (47)$$

Як видно з (46) та (47), додаткове теплове зношення ізоляції обмотки  $E_{\text{дод}}$  залежить від значень постійної часу нагрівання електродвигуна  $T$ , максимального перевищення температури обмотки  $\tau_m$  та температури навколишнього середовища, тобто:

$$E_{\text{дод}} = f(T, \tau_m, \vartheta_{\text{сєр}}). \quad (48)$$

Дослідимо залежність додаткового теплового зношення ізоляції обмотки у функції максимального перевищення температури обмотки при заданому значенні постійної часу нагрівання електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3, для якого  $T = 1840$  с. Приймаємо  $\vartheta_{\text{сєр}} = 40$  °С. Ізоляція класу В вказаного електродвигуна характеризується наступними параметрами:  $B = 10200$  К,  $\Theta_n = 403$  К,  $\tau_n = 90$  с,  $\varepsilon_n = 1$  бгод/год. Розбиваємо залежність  $\varepsilon = f(t)$  на 50 ділянок. Приймаємо тривалість кожної ділянки  $t_i = 184$  с. Тоді  $t_i/T = 0,1$ . Введемо позначення:  $e^{-t_i/T} = v$ . Знаходимо значення  $v = 0,9$ . Тоді перевищення температури обмотки на  $i$ -й ділянці дорівнює:

$$\tau_i = \tau_n(1 - v) + \tau_{i-1}v. \quad (49)$$

Для першої ділянки:

$$\tau_1 = \tau_n(1 - v) + \tau_m v. \quad (50)$$

Для другої ділянки:

$$\tau_2 = \tau_n(1 - v) + \tau_1 v. \quad (51)$$

І так далі.

Приймавши з певними припущеннями на кожній ділянці  $\tau_i = \text{const}$ , можемо розрахувати швидкість теплового зношення ізоляції на кожній ділянці  $\varepsilon_i$  за виразом:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n e^{\left( \frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\tau_i + \vartheta_{\text{сєр}} + 273} \right)}. \quad (52)$$

Для вказаного електродвигуна:

$$\tau_i = 9 + 0,9\tau_{i-1}. \quad (53)$$

Кількісний аналіз проведемо на прикладі асинхронно-го електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 з наступними каталожними даними:  $P_{2n} = 4$  кВт;  $\eta_n = 0,865$ ;  $\cos\varphi_n = 0,89$ ;  $R'_1 = 1,509$  Ом;  $X'_1 = 1,537$  Ом;  $R''_2 = 1,006$  Ом;  $X''_2 = 2,767$  Ом;  $R_1 = 1,485$  Ом;  $X_1 = 1,513$  Ом;  $X_\mu = 95$  Ом;  $U_n = 220$  В;  $s_n = 0,033$ ;  $s_k = 0,28$ ;  $s_m = 0,8$ ;  $\mu_{\text{пн}} = 2,0$ ;  $\mu_{\text{мп}} = 1,6$ ;  $\mu_{\text{кп}} = 2,5$ ;  $r_{20} = 1,19$  Ом;  $G_m = 3,78$  кг.

Приймаємо, що вказаний електродвигун працює в парі з робочою машиною з незалежною від швидкості механічною характеристикою, кратність прикладеної напруги дорівнює 0,8.

$$Z_0 = \sqrt{(1,509' + 1,006''/1)^2 + (1,537' + 2,767'')^2} = 4,98 \text{ Ом},$$

$$Z_1 = \sqrt{(1,509' + 1,006''/0,28)^2 + (1,537' + 2,767'')^2} = 6,67 \text{ Ом},$$

$$I_{\text{П0}} = \frac{0,8 \cdot 220}{4,98} = 35,31 \text{ А},$$

$$I_{\text{П1}} = \frac{0,8 \cdot 220}{6,67} = 26,37 \text{ А},$$

$$\Pi_1 = \frac{35,31^2 + 26,37^2}{2} \cdot 39,27 = 38126,4 \text{ А}^2\text{с},$$



$$r_0 = 1,19(1 + 0,004(40 - 20)) = 1,285 \text{ Ом},$$

$$C = 380 \cdot 3,78 = 1436,4 \text{ Дж/К},$$

$$\tau_{m1} = \left( \frac{1}{0,004} + 0 \right) e^{\frac{3 \cdot 0,004 \cdot 1,285 \cdot 38126,4}{1436,4}} - \frac{1}{0,004} = 126,46 \text{ К},$$

$$Z_2 = \sqrt{(1,509' + 1,006''/0,033)^2 + (1,537' + 2,767'')^2} = 32,28 \text{ Ом},$$

$$I_{П2} = \frac{0,8 \cdot 220}{32,28} = 5,45 \text{ А},$$

$$П_2 = \frac{26,37^2 + 5,45^2}{2} \cdot 1,21 = 439,41 \text{ А}^2\text{с},$$

$$\tau_{m2} = \left( \frac{1}{0,004} + 126,46 \right) e^{\frac{3 \cdot 0,004 \cdot 1,285 \cdot 439,41}{1436,4}} - \frac{1}{0,004} = 128,24 \text{ К},$$

$$\tau_1 = 9 + 0,9 \cdot 128,24 = 124,42 \text{ К},$$

$$\epsilon_1 = 1 \cdot e^{10200 \left( \frac{1}{403} - \frac{1}{124,42 + 40 + 273} \right)} = 7,33 \text{ бгод/год},$$

$$E_1 = 7,33 \cdot 184/3600 = 0,37 \text{ бгод},$$

$$\tau_2 = 9 + 0,9 \cdot 124,42 = 120,98 \text{ К},$$

$$\epsilon_2 = 1 \cdot e^{10200 \left( \frac{1}{403} - \frac{1}{120,98 + 40 + 273} \right)} = 0,31 \text{ бгод/год},$$

$$E_2 = 0,31 \cdot 184/3600 = 0,37 \text{ бгод}.$$

І так далі, в результаті розрахунків отримуємо:

$$E_{\Sigma} = 4,58 \text{ бгод},$$

$$E_{\text{лод}} = 2,02 \text{ бгод}.$$

Як показує автор статті з проведеного аналізу додаткове теплове зношення ізоляції залежить від постійної часу нагрівання електродвигуна, максимального перевищення температури в кінці пуску та температури навколишнього середовища.

Залежності додаткового теплового зношення ізоляції для електродвигуна типорозміру 4А100S2У3 у функції відношення моменту інерції системи «електродвигун — робоча машина» до номінального моменту електродвигуна при кратності напруги живлення  $\kappa_U = 0,8-1,0$  наведені на рис. 8.

Дослідимо також залежність додаткового теплового зношення ізоляції у функції імпульсу квадрату пускового струму електродвигуна (рис. 9).

Таким чином, в якості критерію оцінювання розходу ресурсу ізоляції електродвигуна в післяпусковий період можна прийняти додаткове теплове зношення ізоляції.

Отримана залежність додаткового теплового зношення ізоляції від імпульсу квадрату сили електричного струму електродвигуна дозволяє вибрати уставку імпульсу квадрату пускового струму пропонованого пристрою, який буде полегшувати пусковий режим електродвигуна.

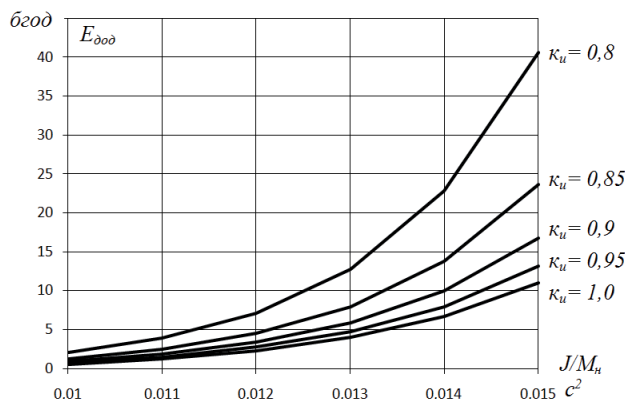


Рис. 8. Залежності додаткового теплового зношення ізоляції у функції відношення моменту інерції системи «електродвигун — робоча машина» до номінального моменту електродвигуна при кратності напруги живлення  $\kappa_U = 0,8-1,0$

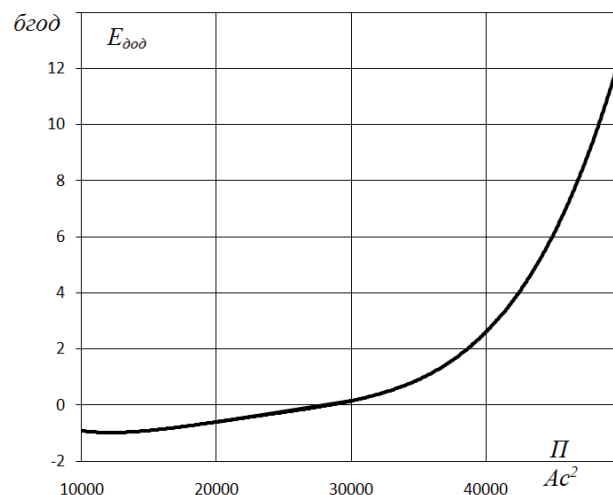


Рис. 9. Залежність додаткового теплового зношення ізоляції у функції імпульсу квадрату пускового струму електродвигуна

### 8. Обговорення результатів дослідження електромеханічних та теплових перехідних процесів при пуску асинхронних електродвигунів

В результаті проведених досліджень знайшла подальший розвиток теорія перехідних електромеханічних і теплових процесів в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором при пусках в умовах зниженої напруги. Вперше запропоновано параметр оцінки пускового режиму системи «асинхронний електродвигун — робоча машина» — відношення моменту інерції системи до номінального моменту асинхронного електродвигуна. Отримані результати проведеного дослідження можуть бути використаними при оцінюванні пускових режимів асинхронних електродвигунів в умовах зниженої напруги з позиції ресурсозбереження.

Вперше обґрунтовано параметр діагностування перехідних теплових процесів при пусках асинхронного електродвигуна в умовах зниженої напруги — додаткове теплове зношення ізоляції в післяпусковий період.

В результаті дослідження теплового зношення ізоляції обмотки асинхронного електродвигуна в після-

пусковий період було встановлено, що в якості діагностичного параметру режиму роботи електродвигуна в післяпусковий період можна прийняти імпульс квадрату пускового струму.

## 9. Висновки

В результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Отримані вирази для розрахунку часу пуску асинхронного електродвигуна у функції запропонованого параметру системи «асинхронний електродвигун — робоча машина» — відношення моменту інерції системи до номінального моменту асинхронного електродвигуна при різних значеннях прикладеної напруги, які дозволяють оцінити пусковий режим з позиції ресурсозбереження.

2. В якості діагностичного параметру режиму роботи електродвигуна в післяпусковий період можна прийняти імпульс квадрату пускового струму.

3. Додаткове теплове зношення ізоляції в післяпусковий період є функцією відношення моменту інерції системи «електродвигун — робоча машина» до номінального моменту електродвигуна і кратності прикладеної напруги.

4. Отримана залежність додаткового теплового зношення ізоляції від імпульсу квадрату сили електричного струму електродвигуна дозволяє вибрати уставку імпульсу квадрату пускового струму запропонованого пристрою, який буде полегшувати пусковий режим електродвигуна.

## Література

1. Овчаров, В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В. В. Овчаров. — Киев: УСХА, 1990. — 168 с.
2. Sun, D. S. Research on Voltage-Chopping and Energy-Saving Controlling Technology for Three-Phase AC Asynchronous Motor [Text] / D. S. Sun // Advanced Materials Research. — 2012. — Vol. 433–440. — P. 1033–1037. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.1033
3. Hung, N. T. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses [Text] / N. T. Hung, N. C. Thien, T. P. Nguyen, V. S. Le, D. A. Tuan // Lecture Notes in Electrical Engineering. — 2014. — P. 497–507. doi:10.1007/978-3-642-41968-3\_50
4. Grouni, S. Novel Loss Optimization in Induction Machines with Optimum Rotor Flux Control [Text] / S. Grouni, R. Ibtouen,

M. Kidouche, O. Touhami // International Journal of Systems Control. — 2010. — Vol. 1, № 4. — P. 163–169.

5. Dhaoui, M. A New Method for Losses Minimization in IFOC Induction Motor Drives [Text] / M. Dhaoui, L. Sbita // International Journal of Systems Control. — 2010. — Vol. 1, № 2. — P. 93–99.
6. Alssa, K. Vector Control Using Series Iron Loss Model of Induction Motors and Power Loss Minimization [Text] / K. Alssa, K. D. Eddine // World Academy of Science, Engineering and Technology. — 2009. — Vol. 52. — P. 142–148.
7. Kosmodamianskii, A. S. Induction motor drives with minimal power losses [Text] / A. S. Kosmodamianskii, V. I. Vorob'ev, A. A. Pugachev // Russian Electrical Engineering. — 2012. — Vol. 83, № 12. — P. 667–671. doi:10.3103/s1068371212120073
8. Yang, Y. Improvement of Electric Submersible Pump in High Temperature [Text] / Y. Yang // China Science and Technology Fortune. — 2010.
9. Островский, А. В. Безитерационная методика определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя [Текст] / А. В. Островский // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. — 2012. — Вип. 12, Т. 2. — С. 66–72.
10. Овчаров, С. В. Пути снижения энергозатрат в мобильных агрегатах [Текст] / С. В. Овчаров, А. Ю. Вовк // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. — 2013. — Вип. 13, Т. 4. — С. 21–26.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Представлены результаты аналитического исследования электромеханических и тепловых переходных процессов при пуске асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в условиях пониженного напряжения. В качестве диагностического параметра режима работы электродвигателя в послепусковой период принят импульс квадрата пускового тока.

**Ключевые слова:** электродвигатель, электромеханический, тепловой, переходный процесс, пониженное напряжение, пуск.

*Сребков Александр Андрійович, аспірант, кафедра електротехніки і електромеханіки, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, Україна, e-mail: sashko@yandex.ru.*

*Сребков Александр Андреевич, аспирант, кафедра електротехніки і електромеханіки, Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь, Украина.*

*Strebkov Alexandr, Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Ukraine, e-mail: sashko@yandex.ru*