



Вовк О. Ю.,
Квітка С. О.,
Нестерчук Д. М.,
Стребков О. А.,
Ковальов О. В.

РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ, ЯКИЙ ЗАБЕЗПЕЧУЄ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИЙ ПУСК АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИ ЗНИЖЕНІЙ НАПРУЗІ

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 післяпусковий період прийнято імпульс квадрату пускового струму. Розроблено пристрій діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, електромеханічний та тепловий перехідний процес, знижена напруга, пусковий режим.

1. Вступ

В Україні існує народногосподарська проблема ресурсозбереження приводних електродвигунів у фермерських господарствах. Суть проблеми полягає в тому, що при електропостачанні фермерських виробничих приміщень часто спостерігається знижена напруга на електричних вводах в будівлі. Значне зниження напруги при пусках асинхронних електродвигунів може привести до затяжних або нездійснених пусків, тобто до нераціонального використання ресурсу електродвигунів.

Причини існування проблеми: виробничі навантаження фермерських господарств не були враховані при проектуванні електричних мереж в сільській місцевості, так як фермерський рух з'явився значно пізніше часу, коли виконувалась електрифікація території. Це привело до того, що часто побутові і виробничі навантаження підключені до однієї мережі.

Внаслідок вищезазначеного асинхронні електродвигуни приводу робочих машин піддаються негативним експлуатаційним впливам, в результаті чого вони перегріваються або взагалі не можуть запуститись в умовах зниженої напруги і виходять з ладу.

Значне зниження напруги при пуску асинхронних електродвигунів приводу робочих машин може привести до затяжних або нездійснених пусків. Тому дослідження електромеханічних та теплових процесів при пуску приводних асинхронних електродвигунів при зниженій напрузі та розробка способу діагностування таких процесів представляє як теоретичний, так і практичний інтерес.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – електромеханічні та теплові перехідні процеси при пусках асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором в умовах зниженої напруги.

Одним з найбільш проблемних місць в даних процесах є достатня складність діагностування витрат ре-

сурсу асинхронних електродвигунів при важких пусках в умовах зниженої напруги і своєчасне полегшення таких режимів з метою ресурсозбереження.

Для визначення діагностичних параметрів пускових режимів асинхронних електродвигунів при зниженій живлячій напрузі необхідно виявити залежності тривалості пуску в залежності від параметрів системи «електродвигун – робоча машина», а також їх вплив на теплове зношення ізоляційної конструкції електродвигуна в післяпусковий період. Тому основним напрямком підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів є розробка технічного пристрою діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період.

3. Мета та задачі дослідження

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

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

1. Дослідити електромеханічні перехідні процеси при пуску приводних асинхронних електродвигунів при зниженій напрузі.
2. Дослідити тепловий перехідний процес при пуску приводного асинхронного електродвигуна при зниженій напрузі.
3. Зробити аналіз впливу параметрів системи «електродвигун – робоча машина» на електромеханічні і теплові перехідні процеси при пуску електродвигуна при зниженій напрузі.
4. Дослідити теплове зношення ізоляції в післяпусковий період.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

В даній роботі поставлена науково-технічна задача оцінки пуску асинхронного електродвигуна в умовах зниженої напруги з позиції ресурсозбереження та розробка способу діагностування такого аварійного режиму. Аналіз робіт в цьому напрямку показує, що питання оцінки витрат ресурсу асинхронного електродвигуна частково вирішено для електродвигуна працюючого з перевантаженням при номінальному режимі його роботи [1].

Проведено дослідження ресурсоенергозбереження в асинхронних електродвигунах з позиції конструктивного виконання активних частин останнього [2]. Визначені методи оптимізації втрат електричної енергії в асинхронному електродвигуні [3]. Розроблено спосіб зменшення втрат активної потужності в електродвигуні [4].

Запропоновано новий метод мінімізації витрати ресурсу асинхронного електродвигуна [5]. В [6] розглянуто процес втрат активної потужності в магнітопроводі. В роботі [7] запропонована конструкція асинхронного електродвигуна з мінімальними втратами. Проведено дослідження впливу зниження напруги живлячої мережі на теплове зношення ізоляції асинхронного електродвигуна [8].

В [9] проведено дослідження електромеханічних та теплових перехідних процесів при пуску асинхронних електродвигунів в умовах зниженої напруги, але, при цьому, не була врахована залежність зміни ковзання електродвигуна у функції кратності прикладеної напруги та коефіцієнту завантаження робочої машини. В [10] запропоновано непрямої спосіб вимірювання імпульсу квадрату пускового струму, але, при цьому, не врахована зміна опору кінців термопари при зміні температури, що приводить до значної похибки при діагностуванні.

5. Методи дослідження

Для дослідження електромеханічних та теплових перехідних процесів при пуску приводних асинхронних електродвигунів при зниженій напрузі були використані дані наукових праць [8, 9]. На їх основі отримані залежності для кількісної оцінки цих процесів з позиції ресурсозбереження.

На базі проведеного аналізу впливу параметрів системи «електродвигун – робоча машина» на електромеханічні і теплові перехідні процеси при пуску електродвигуна при зниженій напрузі та даних наукових праць [1, 10] було розроблено структурну схему пристрою діагностування додаткового теплового зношення асинхронного електродвигуна в післяпусковий період.

При дослідженні були використані наступні наукові методи: метод аналізу та метод математичного моделювання.

6. Результати дослідження

6.1. Електромеханічні перехідні процеси при пуску приводних електродвигунів при зниженій напрузі. Як було показано вище, в [9] проведено дослідження електромеханічних і теплових перехідних процесів при пуску асинхронних електродвигунів в умовах зниженої напруги. При цьому, механічна характеристика асинхронного електродвигуна була лінеаризована на двох ділянках: від нуля до критичної кутової швидкості та від критичної кутової швидкості до номінальної. При цьому, при зменшенні напруги живлення була врахована лише

зміна моменту, який розвиває електродвигун, а значення критичної та номінальної кутової швидкості прийнято за постійну величину.

З урахуванням зазначених недоліків, було проведено дослідження електромеханічних перехідних процесів при пуску приводних асинхронних електродвигунів привода робочих машин з механічними характеристиками наступних категорій:

- незалежними від швидкості ($x = 0$);
- лінійно-зростаючими ($x = 1$);
- нелінійно-зростаючими ($x = 2$).

При цьому механічна характеристика асинхронного електродвигуна була лінеаризована на трьох основних ділянках: від нуля до мінімальної швидкості, від мінімальної швидкості до критичної і від критичної до номінальної (рис. 1).

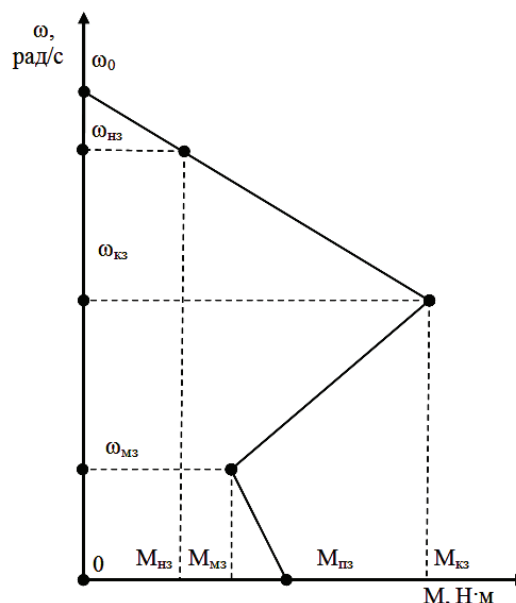


Рис. 1. Лінеаризована механічна характеристика електродвигуна при зниженій напрузі

Крім того, було враховано як зміну моменту, який розвиває електродвигун при зниженні рівня напруги, так і залежність відповідного значення кутової швидкості електродвигуна у функції кратності прикладеної напруги і коефіцієнту завантаження електродвигуна.

Запишемо вирази моментів:

$$M_{пз} = \kappa_U^2 M_n, \tag{1}$$

$$M_{кз} = \kappa_U^2 \mu_k M_n, \tag{2}$$

$$M_{нз} = \kappa_U^2 \mu_n M_n, \tag{3}$$

де κ_U – кратність напруги; $M_{пз}$, $M_{кз}$, $M_{нз}$ – моменти: номінальний, критичний, пусковий при зниженій напрузі, Н · м; μ_k , μ_n – кратності моментів: відповідно критичного, пускового.

Запишемо вирази кутової швидкості:

$$\omega_{пз} = \omega_0 (1 - s_{пз}), \tag{4}$$

$$\omega_{кз} = \omega_0 (1 - s_{кз}), \tag{5}$$

$$\omega_{нз} = \omega_0 (1 - s_{нз}), \tag{6}$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад/с; $\omega_{н3}$, $\omega_{к3}$, $\omega_{м3}$ – кутова швидкість: відповідно номінальна, критична, мінімальна при зниженій напрузі, рад/с; $s_{н3}$, $s_{к3}$, $s_{м3}$ – ковзання: відповідно номінальне, критичне, мінімальне при зниженій напрузі.

Відповідне ковзання s в залежності від кратності прикладеної напруги k_U і коефіцієнта завантаження k_3 для різних типів робочих машин визначається наступними залежностями [8]:

$$s = \frac{k_3}{k_U^2} s_n; \quad (7)$$

– для робочої машини з незалежною від швидкості механічною характеристикою ($x=0$) ця залежність буде наступною:

$$s = \frac{m_0 + \frac{1-m_0}{1-s_n}}{\frac{k_U^2}{k_3 s_n} + \frac{1-m_0}{1-s_n}}, \quad (8)$$

де m_0 – відносний початковий момент опору робочої машини;

– для робочої машини з нелінійно-зростаючою (параболічною) механічною характеристикою ($x=2$) ця залежність буде наступною:

$$s = \frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1 K_3}}{2K_1}, \quad (9)$$

де

$$K_1 = k_3 s_n (1 - m_0), \quad (10)$$

$$K_2 = -2K_1 - k_U^2 (1 - s_n)^2, \quad (11)$$

$$K_3 = k_3 s_n (1 - m_0 + m_0 (1 - s_n)^2). \quad (12)$$

В результаті проведеного дослідження були отримані вирази для розрахунку часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» на кожній з трьох ділянок розгону.

Для електродвигуна працюючого з робочою машиною з незалежною від швидкості механічною характеристикою:

$$t_1 = T_1 \ln \frac{\alpha}{\alpha + \omega_0 (1 - s_{м3})}, \quad (13)$$

де

$$T_1 = \frac{J \omega_0 (1 - s_{м3})}{M_n k_U^2 (\mu_n - \mu_m)}, \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\omega_0 (1 - s_{м3}) (k_3 - k_U^2 \mu_n)}{k_U^2 (\mu_n - \mu_m)}. \quad (15)$$

$$t_2 = T_2 \ln \frac{\omega_0 (1 - s_{к3}) + \beta}{\omega_0 (1 - s_{к3}) - \beta}, \quad (16)$$

де

$$T_2 = \frac{J \omega_0 (s_{м3} - s_{к3})}{M_n k_U^2 (\mu_k - \mu_m)}, \quad (17)$$

$$\beta = \omega_0 (1 - s_{м3}) + \frac{\omega_0 (s_{м3} - s_{к3}) (k_3 - k_U^2 \mu_m)}{k_U^2 (\mu_k - \mu_m)}. \quad (18)$$

$$t_3 = T_3 \ln \frac{\omega_0 (1 - s_{н3}) - \gamma}{k \omega_0 (1 - s_{н3}) - \gamma}, \quad (19)$$

де

$$T_3 = \frac{J \omega_0 (s_{к3} - s_{н3})}{M_n k_U^2 (\mu_k - 1)}, \quad (20)$$

$$\gamma = \omega_0 (1 - s_{н3}) - \frac{\omega_0 (s_{к3} - s_{н3}) (k_3 - k_U^2)}{k_U^2 (\mu_k - 1)}. \quad (21)$$

Для електродвигуна працюючого з робочою машиною з лінійно-зростаючою механічною характеристикою:

$$t_1 = T_1 \ln \frac{\alpha}{\alpha + \omega_0 (1 - s_{м3})}, \quad (22)$$

де

$$T_1 = \frac{J \omega_0 (1 - s_{м3})}{M_n (m' - m_0 + k_U^2 (\mu_n - \mu_m))}, \quad (23)$$

$$\alpha = \frac{(m_0 - k_U^2 \mu_n) (1 - s_{м3}) \omega_0}{m' - m_0 + k_U^2 (\mu_n - \mu_m)}. \quad (24)$$

$$t_2 = T_2 \ln \frac{\omega_0 (1 - s_{м3}) - \beta}{\omega_0 (1 - s_{к3}) - \beta}, \quad (25)$$

де

$$T_2 = \frac{J \omega_0 (s_{м3} - s_{к3})}{M_n (m'' - m' - k_U^2 (\mu_k - \mu_m))}, \quad (26)$$

$$\beta = \frac{\omega_0 (s_{м3} - s_{к3}) \left(\frac{m'' - m' + k_U^2 (\mu_k - \mu_m)}{\omega_0 (s_{м3} - s_{к3})} \omega_0 (1 - s_{м3}) - m' + k_U^2 \mu_m \right)}{m'' - m' - k_U^2 (\mu_k - \mu_m)}. \quad (27)$$

$$t_3 = T_3 \ln \frac{s_{н3} - s_{к3}}{(1 - s_{н3}) (k - 1)}, \quad (28)$$

де

$$T_3 = \frac{J \omega_0 (s_{к3} - s_{н3})}{M_n (k_U^2 \mu_k - m'')}. \quad (29)$$

Для електродвигуна працюючого з робочою машиною з нелінійно-зростаючою механічною характеристикою:

$$t_1 = T_1 \ln \frac{\alpha}{\alpha + \omega_0 (1 - s_{м3})}, \quad (30)$$

де

$$T_1 = \frac{J \omega_0 (1 - s_{м3})}{M_n (m' - m_0 + k_U^2 (\mu_n - \mu_m))}, \quad (31)$$

$$\alpha = \frac{(m_0 - k_U^2 \mu_n) (1 - s_{м3}) \omega_0}{m' - m_0 + k_U^2 (\mu_n - \mu_m)}. \quad (32)$$

$$t_2 = T_2 \ln \frac{\omega_0 (1 - s_{м3}) - \beta}{\omega_0 (1 - s_{к3}) - \beta}, \quad (33)$$

де

$$T_2 = \frac{J\omega_0(s_{M3} - s_{K3})}{M_n(m'' - m' - k_U^2(\mu_K - \mu_M))}, \quad (34)$$

$$\beta = \frac{\omega_0(s_{M3} - s_{K3}) \left(\frac{m'' - m' + k_U^2(\mu_K - \mu_M)}{\omega_0(s_{M3} - s_{K3})} \omega_0(1 - s_{M3}) - (-m' + k_U^2\mu_M) \right)}{m'' - m' - k_U^2(\mu_K - \mu_M)}. \quad (35)$$

$$t_3 = T_3 \ln \frac{s_{H3} - s_{K3}}{(1 - s_{H3})(k - 1)}, \quad (36)$$

$$T_3 = \frac{J\omega_0(s_{K3} - s_{H3})}{M_n(k_U^2\mu_K - m'')}. \quad (37)$$

Отримані вирази часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» на кожній з трьох ділянок механічної характеристики електродвигуна дозволяють оцінити електромеханічний перехідний процес при пуску останнього з позиції ресурсозбереження.

6.2. 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 адиабатично.

В [9] отримано вираз максимального перевищення температури обмотки в кінці розгону електродвигуна:

$$\tau_m = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{поч} \right) e^{\frac{\omega_0 I_n^2 t_n}{c}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (38)$$

де τ_m – максимальне перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища, °C; t_n – час розгону електродвигуна, с.

Відповідно до [9], позначимо величину $I_n^2 t_n$ буквою Π і дамо назву – імпульс квадрату діючого значення сили пускового струму, тобто:

$$\Pi = I_n^2 t_n. \quad (39)$$

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

$$\Pi = \int_0^{t_n} I_n^2 dt. \quad (40)$$

Тоді рівняння (38) запишеться наступним чином:

$$\tau_m = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{поч} \right) e^{\frac{\omega_0 \Pi}{c}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (41)$$

6.3. Аналіз впливу параметрів системи «електродвигун – робоча машина» на електромеханічні і теплові перехідні процеси при пуску двигуна при зниженій напрузі. Проведемо кількісний аналіз на прикладі асинхронного електродвигуна типорозміру 4A132M2У3 з наступними каталожними даними:

$P_{2H} = 11$ кВт; $\eta_H = 0,88$; $\cos\phi_H = 0,9$; $R'_1 = 0,418$ Ом; $X'_1 = 0,638$ Ом; $R'_2 = 0,261$ Ом; $X''_2 = 1,255$ Ом; $R_1 = 0,412$ Ом; $X_1 = 0,629$ Ом; $X_\mu = 43,9$ Ом; $U_H = 220$ В; $s_H = 0,023$; $s_K = 0,19$; $s_M = 0,75$; $\mu_{HP} = 1,7$; $\mu_{KP} = 1,5$; $\mu_{KL} = 2,8$; $r_{20} = 0,341$ Ом; $G_M = 6,06$ кг.

Здійснимо дослідження кількісної залежності часу розгону електродвигуна на кожній ділянці у функції параметра системи J/M_n , кратності прикладеної напруги k_U та коефіцієнту завантаження робочої машини k_3 .

Приймаємо, що електродвигун працює в парі з робочою машиною з незалежною від швидкості механічною характеристикою. Значення параметра J/M_n знаходиться в межах від 0,01 до 0,015 с². Значення коефіцієнта прикладеної напруги k_U – в межах від 1,0 до 0,8. Значення коефіцієнта завантаження k_3 змінюється від 0,5 до 1,0. Розраховуємо значення часу розгону електродвигуна на кожній ділянці та визначимо загальний час розгону системи «електродвигун – робоча машина». Результати досліджень представлені графічно (рис. 2–4).

Проведений аналіз показав, що час пуску електродвигуна суттєво зростає при зменшенні прикладеної напруги. При цьому, пуск електродвигуна з повним завантаженням ($k_3 = 1$) можливий тільки при значенні кратності прикладеної напруги не нижче 0,9, а при подальшому зниженні електродвигун взагалі не запускається. При завантаженні електродвигуна на 75 %, та 50 % електродвигун запускається при будь-якій кратності напруги у межах прийнятого діапазону.

Отримані залежності часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» дозволяють провести кількісний аналіз теплового перехідного процесу при пуску електродвигуна.

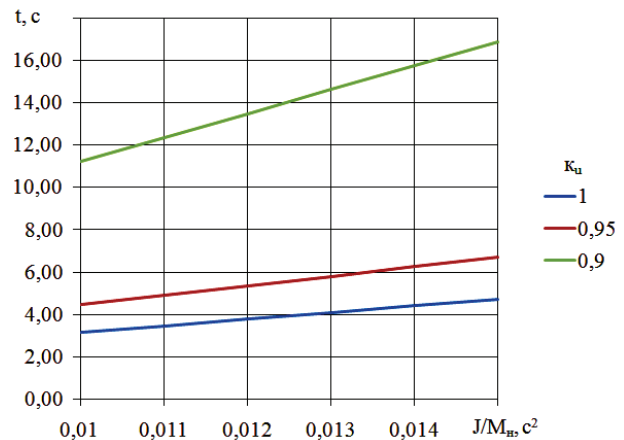


Рис. 2. Залежність часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» у функції параметра системи J/M_n та кратності прикладеної напруги k_U при коефіцієнті завантаження робочої машини $k_3 = 1$

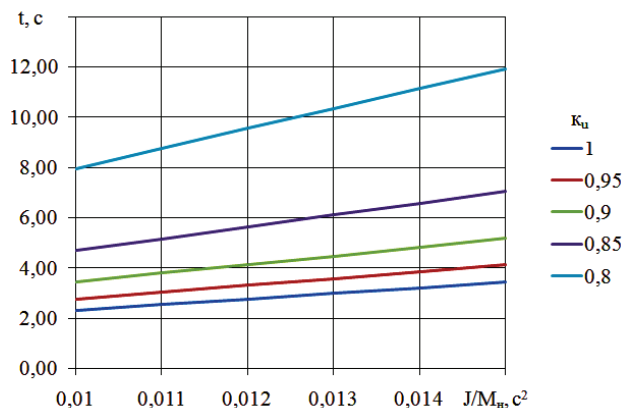


Рис. 3. Залежність часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» у функції параметра системи J/M_n та кратності прикладеної напруги k_U при коефіцієнті завантаження робочої машини $k_3 = 0,75$

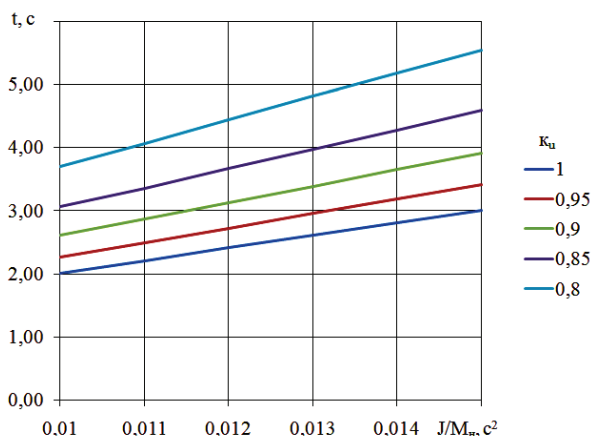


Рис. 4. Залежність часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» у функції параметра системи J/M_n та кратності прикладеної напруги k_U при коефіцієнті завантаження робочої машини $k_3 = 0,5$

Здійснено дослідження кількісної залежності перевищення температури обмотки статора асинхронного електродвигуна під час розгону на кожній ділянці у функції параметра системи J/M_n , кратності прикладеної напруги k_U та коефіцієнту завантаження робочої машини k_3 . Приймаємо, що значення параметра J/M_n знаходиться у межах від 0,01 до 0,015 s^2 . Значення коефіцієнта прикладеної напруги k_U – в межах від 1,0 до 0,8. Значення коефіцієнта завантаження k_3 змінюється від 0,5 до 1,0. Розраховуємо значення перевищення температури обмотки статора електродвигуна в кінці розгону. Результати представлені графічно (рис. 5–7).

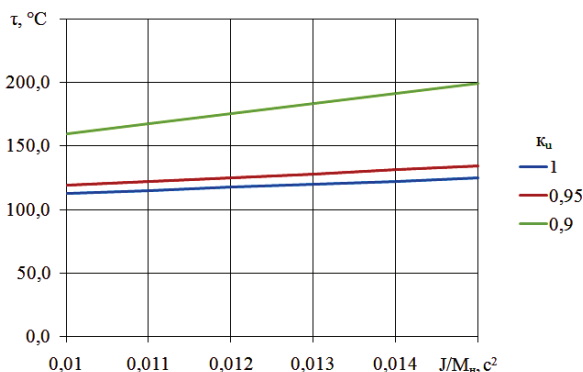


Рис. 5. Залежність перевищення температури обмотки статора асинхронного електродвигуна в кінці розгону при $k_3 = 1$

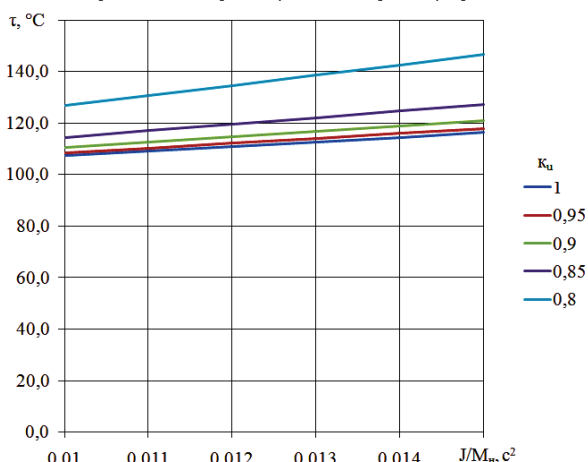


Рис. 6. Залежність перевищення температури обмотки статора асинхронного електродвигуна в кінці розгону при $k_3 = 0,75$

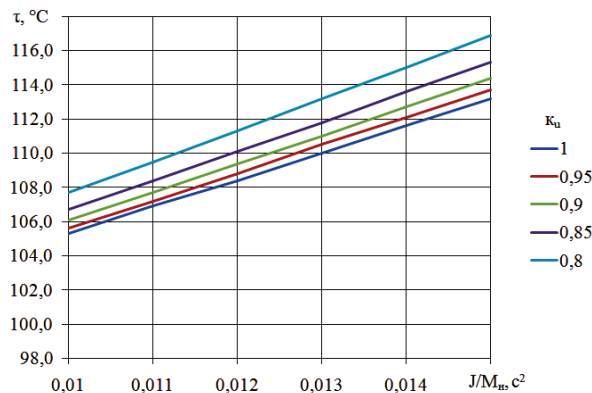


Рис. 7. Залежність перевищення температури обмотки статора асинхронного електродвигуна в кінці розгону при $k_3 = 0,5$

Результати проведеного аналізу показують, що на перевищення температури електродвигуна при пуску суттєвий вплив здійснює як кратність прикладеної напруги, так і коефіцієнт завантаження при пуску. При цьому перевищення температури обмотки в кінці пуску перевищує номінальне значення, тобто спостерігається підвищена витрата ресурсу ізоляційної конструкції електродвигуна, що потребує подальшого дослідження та кількісної оцінки додаткового теплового зношення ізоляції.

6.4. 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 [9].

Проведені розрахунки дозволили отримати результати залежності додаткового теплового зношення ізоляції обмотки у функції максимального перевищення температури обмотки при заданому значенні постійної часу нагрівання електродвигуна типорозміру 4A132M2У3, для якого $T = 1910$ с. При цьому прийнято, що $\vartheta_{ср} = 40$ °С.

Ізоляція класу В вказаного електродвигуна характеризується наступними параметрами: $B = 10200$ К, $\theta_n = 403$ К, $\tau_n = 90$ °С, $\epsilon_n = 1$ бгод/год.

Приймаємо, що вказаний електродвигун працює в парі з робочою машиною з незалежною від швидкості механічною характеристикою. За алгоритмом, який наведений в [9], розраховуємо залежності додаткового теплового зношення ізоляції для електродвигуна типорозміру 4A132M2У3. Знайдемо ці залежності у функції відношення моменту інерції системи «електродвигун – робоча машина» до номінального моменту електродвигуна при кратності напруги живлення $k_U = 0,8-1,0$; $k_3 = 0,75$. Результати представлені графічно на рис. 8.

Як видно з представлених залежностей, в післяпусковий період спостерігається додаткове теплове зношення ізоляції. Воно в значній мірі, залежить як від відношення моменту інерції системи «електродвигун – робоча машина» до номінального моменту електродвигуна, так й від кратності прикладеної напруги та коефіцієнту завантаження електродвигуна.

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

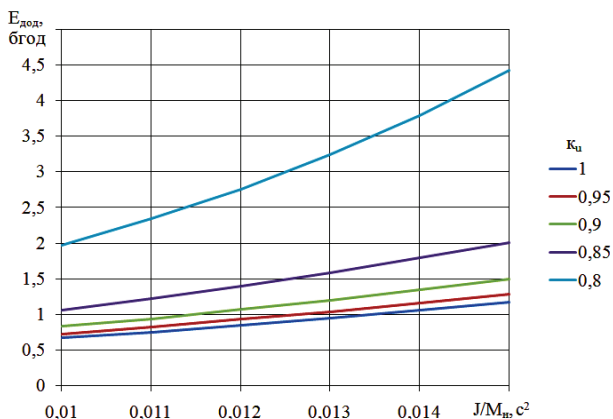


Рис. 8. Залежності додаткового теплового зношення ізоляції у функції відношення моменту інерції системи «електродвигун – робоча машина» до номінального моменту електродвигуна

Здійснимо дослідження залежності додаткового теплового зношення ізоляції у функції імпульсу квадрату пускового струму електродвигуна (рис. 9).

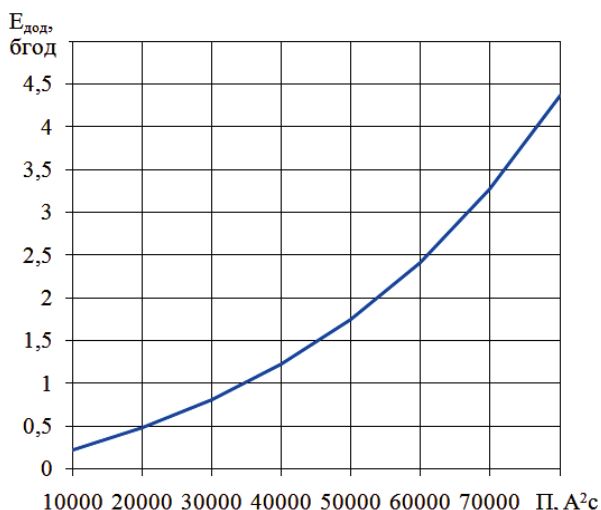


Рис. 9. Залежність додаткового теплового зношення ізоляції у функції імпульсу квадрату пускового струму електродвигуна

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

6.5. Розробка пристрою діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період. Нагрівання обмоток статора асинхронного електродвигуна супроводжується додатковим тепловим зношенням ізоляції, яке відбувається в період роботи електродвигуна після запуску, тобто при його охолодженні до номінального перевищення температури. Показником додаткового зношення ізоляції в післяпусковий період є імпульс квадрату пускового струму.

В [10] обґрунтовано непрямий метод вимірювання імпульсу квадрату електричного струму і отримано вираз для розрахунку допустимого перевищення температури однієї фази обмотки статора у функції допустимого значення імпульсу квадрату пускового струму:

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{r\Pi_{\text{доп}}}{C}, \quad (42)$$

де $\Pi_{\text{доп}}$ – допустиме значення імпульсу квадрату пускового струму, $\text{A}^2\text{с}$.

Таким чином, допустиме значення імпульсу квадрату пускового струму прямо пропорційне перевищенню температури однієї фази обмотки статора електродвигуна, тобто: $\tau_{\text{доп}} = f(\Pi_{\text{доп}})$.

В результаті проведених досліджень запропонована структурна схема пристрою діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період. У пристрої контроль імпульсу квадрату пускового струму здійснюється за допомогою вимірювання перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища. Структурна схема пристрою наведена на рис. 10.

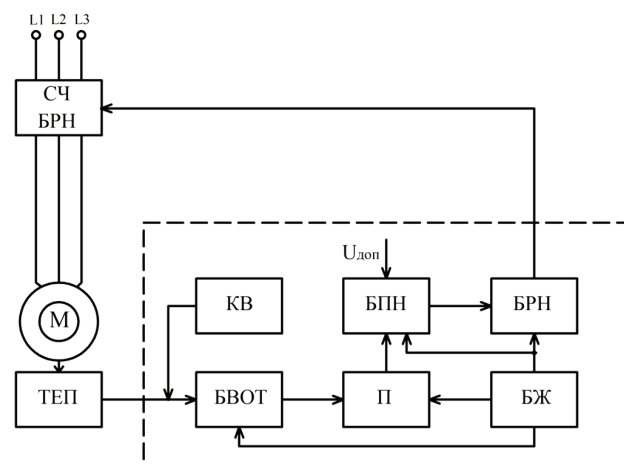


Рис. 10. Структурна схема пристрою діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період

Пристрій складається з:

- термоелектричного перетворювача температури (термопари) (ТЕП);
- блоку вимірювання і обробки температури (БВОТ);
- компенсаційного вузла (КВ);
- підсилювача (П);
- блоку порівняння напруги (БПН);
- блоку регулювання напруги (БРН), до складу якого входить силова частина (СЧ БРН).

Запропонований пристрій працює наступним чином. Термоелектричним перетворювачем вимірюється перевищення температури обмоток статора трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. За допомогою компенсаційного вузла здійснюється автоматичне введення поправки до результатів вимірювання термоЕРС термопари при зміні температури її чутливого елемента з урахуванням температури вільних кінців термоперетворювача. Електричний сигнал від термопари після підсилення надходить до блоку порівняння напруги для порівняння виміряного значення напруги із заданим значенням допустимого рівня напруги. При відхиленні виміряних значень напруги від допустимих значень спрацьовує блок регулювання напруги, який формує електричний сигнал на силову частину блоку БРН, яка й забезпечує полегшення умов пуску електродвигуна.

Таким чином, запропонований пристрій дозволяє полегшити умови запуску електродвигуна при зниженні напруги живлення.

Дані дослідження можна застосувати для оптимізації робочого процесу цехів з точки зору скорочення витрат на ремонт приводних асинхронних електродвигунів за рахунок зменшення кількості аварійних пусків. Це також приведе до зменшення технологічних пауз на заміну електрообладнання, та зниження собівартості готової.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. До сильних сторін даної роботи можна віднести те, що 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. Запропоновано параметр оцінки пускового режиму системи «асинхронний електродвигун – робоча машина» – відношення моменту інерції системи до номінального моменту асинхронного електродвигуна.

В результаті дослідження теплового зношення ізоляції обмотки асинхронного електродвигуна в післяпусковий період було встановлено, що в якості діагностичного параметру режиму роботи електродвигуна в післяпусковий період можна прийняти імпульс квадрату пускового струму.

Запропоновано структурну схему пристрою діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період.

Weaknesses. Слабкі сторони даного дослідження пов'язані з тим, що для використання запропонованого пристрою діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період необхідно вмонтовувати термоелектричний перетворювач безпосередньо в обмотку електродвигуна. Це може привести до технічних складностей при встановлюванні пристрою на вже існуюче технологічне обладнання.

Opportunities. Отримані результати проведеного дослідження можуть бути використаними при оцінюванні пускових режимів асинхронних електродвигунів в умовах зниженої напруги з позиції ресурсозбереження. Це може стати також теоретичною базою для подальшої розробки пристроїв діагностування та захисту електродвигунів від зазначених експлуатаційних впливів.

Threats. Складності у впровадженні отриманих результатів дослідження пов'язані з економічною політикою підприємств, які використовують асинхронні електродвигуни в якості електроприводу. У більшості випадків технологічне обладнання має порівняно невелику потужність і доцільність вкладання додаткових коштів для впровадження додаткового обладнання не завжди може бути економічно обґрунтованою.

8. Висновки

1. Отримані вирази для розрахунку часу пуску асинхронного електродвигуна приводу робочих машин з незалежною від швидкості, лінійно зростаючою та нелінійно зростаючою механічними характеристиками у функції запропонованого параметру системи «асинхронний елект-

родвигун – робоча машина» – відношення моменту інерції системи до номінального моменту асинхронного електродвигуна. Вони враховують значення кратності прикладеної напруги та коефіцієнту завантаження робочої машини, і дозволяють оцінити пусковий режим з позиції ресурсозбереження.

2. Досліджено процес теплового зношення ізоляції, який показав, що тепловий перехідний процес при пуску є адиабатичним, а основне теплове зношення ізоляції припадає на післяпусковий період. Кількісна його оцінка показала, що при зменшенні напруги на 10 % додаткове теплове зношення ізоляції зростає на 25 %, а при зниженні напруги на 20 %, теплове зношення збільшується в три рази.

3. Зроблено аналіз впливу параметрів системи «електродвигун – робоча машина» на електромеханічні і теплові перехідні процеси при пуску електродвигуна при зниженій напрузі. В якості діагностичного параметру режиму роботи електродвигуна в післяпусковий період можна прийняти імпульс квадрату пускового струму, що суттєво зменшує трудомісткість розрахунків.

4. Отримана залежність додаткового теплового зношення ізоляції від імпульсу квадрату сили електричного струму електродвигуна дозволяє кількісно обирати уставку імпульсу квадрату пускового струму запропонованого пристрою, який буде полегшувати пусковий режим електродвигуна. Запропоновано структурну схему пристрою діагностування додаткового теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в післяпусковий період. Використання цього пристрою дозволить суттєво зменшити додаткове теплове зношення ізоляції при аварійному пуску.

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. Sbata // 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. Вовк, О. Ю. Вплив зниження напруги живлячої мережі на теплове зношення ізоляції асинхронного електродвигуна [Текст] / О. Ю. Вовк, С. О. Квітка, О. С. Квітка // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2014. – Вип. 153. – С. 79–81.

9. Стребков, О. А. Дослідження електромеханічних і теплових перехідних процесів при пуску асинхронних електродвигунів [Текст] / О. А. Стребков // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 6/6 (26). – С. 18–25. doi:10.15587/2312-8372.2015.54644
10. Квітка, С. О. Непрямий спосіб вимірювання імпульсу квадрату пускового струму напруги [Текст] / С. О. Квітка, О. Ю. Вовк, О. А. Стребков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2016. – Вип. 175. – С. 91–93.

**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО
РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЙ ПУСК АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПониЖЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ**

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. Разработано устройство диагностирования дополнительного теплового износа изоляции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в послепусковой период.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электромеханический и тепловой переходной процесс, пониженное напряжение, пусковой режим.

Вовк Олександр Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки і електромеханіки, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, Україна, e-mail: aleksovok020405@yandex.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0154-6972>

Квітка Сергій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки і електромеханіки, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, Україна, e-mail: sergei.kvitka@yandex.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9234-9274>

Нестерчук Діна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки і електромеханіки, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, Україна, e-mail: dina-nesterchuk@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1995-9564>

Стребков Олександр Андрійович, асистент, кафедра електротехніки і електромеханіки, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, Україна, e-mail: sashko@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8113-7783>

Ковальов Олександр Вікторович, старший викладач, кафедра електротехніки і електромеханіки, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, Україна, e-mail: aleks_tdaty@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4646-2919>

UDC 621.316.93

DOI: 10.15587/2312-8372.2017.92244

**Trotsenko Ye.,
Brzhezitsky V.,
Masluhenko I.**

**STUDY OF SURGE ARRESTER MODEL
UNDER INFLUENCE OF VARIOUS
CURRENT PULSES**

Приведені результати дослідження моделі нелінійного обмежувача перенапруг за допомогою демонстраційної версії Micro-Cap. Визначено залишкову напругу при протіканні крізь нелінійний обмежувач перенапруг як стандартних комутаційних і грозових імпульсів струму різної амплітуди, так і імпульсу струму з крутим фронтом. Показано, що найменша похибка має місце при впливі на модель грозових імпульсів струму.

Ключові слова: схематехнічне моделювання, нелінійний обмежувач перенапруг, залишкова напруга.

1. Introduction

Surge arrester is one of the main protective devices, that is used in electrical networks for protection from switching and lightning surges. Due to non-linear resistors based on zinc-oxide materials, the use of surge arresters led to a deeper surge suppression compared with the valve-type arresters based on silicon carbide. The peak value of voltage that appears between the terminals of a surge arrester during the passage of discharge current with given shape and amplitude is called the residual voltage and is one of the most important characteristics of the surge arrester. The residual voltage depends on both the amplitude and the wave shape of the discharge current pulse [1]. For a fixed amplitude of discharge current pulse, the steeper is the front of a current pulse that passes through the surge arrester, the greater is the residual voltage of surge arrester. These and other properties of the surge arresters become important when dealing with

the insulation coordination and simulation of lightning protection of substations [2]. There are different models of the surge arrester for circuit simulation software, both simple consisting of a single non-linear element and complex consisting of several linear and non-linear elements. Surge arrester model must recreate in the virtual experiment the behavior of the real device and therefore requires study the influence of the current pulses of various wave shape and amplitude.

**2. The object of research
and its technological audit**

The object of the research is the dynamic model of the surge arrester implemented in the evaluation version of Micro-Cap 11 (developed by Spectrum Software Company) and proposed in paper [3]. The duration of lightning and switching surges lies in the microsecond range. In the simulation it is still not sufficiently studied