

## ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІД ЧАС РУШАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

**ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: 34092@ukr.net;

**ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: zacheпа.nataliia@ukr.net

**Мета роботи.** Проведення експериментальних досліджень температурних режимів асинхронного двигуна під час рушання на лабораторному комплексі. Отримання реальних характеристик процесу нагрівання під час виконання рушання, оцінка його впливу на стан ізоляції асинхронного двигуна, підтвердження адекватності непрямого методу визначення температури нагрівання обмоток асинхронного двигуна під час формування циклічного пускового моменту в процесі рушання.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач використовувалося математичне моделювання за вперше отриманими математичними виразами що розраховують температури обмотки статора під час рушання з урахуванням впливу частоти напруги живлення на параметри асинхронного двигуна. Фізичне моделювання на розробленому лабораторному стенді режимів рушання з фіксування температури під час кожного етапу експерименту для підтвердження теоретичних досліджень рушання при імпульсному характері пускового моменту.

**Отримані результати.** Застосування різних методів побудови еквівалентних теплових схем (ЕТС) для розрахунку температурних режимів АД вимагає значних ресурсовитрат, що є нерентабельним, коли ротор машини нерухомий як у випадку рушання. З використанням методу визначення втрат у сталі в режимі глибокого насичення виведені математичні залежності розрахунку температурного режиму під час виконання алгоритму, що враховує зміну властивостей обмотки статора під час нагрівання, розраховані допустимі параметри перевантаження за струмом з урахуванням допустимого нагрівання обмоток статора. У роботі отримані математичні залежності для розрахунку температурних режимів обмоток статора під час формування циклічного пускового моменту для виконання рушання, що враховують зміну початкових умов рушання для кожного циклу і зміну властивостей обмоток статора під час нагрівання. Розроблений лабораторний комплекс дозволяє проводити дослідження температурних режимів обмотки статора при рушанні асинхронного двигуна із загальмованим ротором, при завданні різних значень амплітуди і частоти напруги живлення. Результати досліджень вказують, що математичні залежності, виведені в роботі дозволяють забезпечити контроль температури нагрівання аналітичним методом. Аналіз режимів роботи асинхронного двигуна під час виконання рушання підтвердив необхідність контролю температурних показників обмоток статора для попередження виникнення аварійних ситуацій. В цілому при рушанні з застосуванням покрокової подачі напруги живлення зниженою частоти для отримання підвищеного пускового моменту, нагрів обмоток статора відбувається повільніше в порівнянні з нагріванням при тривалому режимі роботи асинхронного двигуна із загальмованим ротором, що дозволяє виконувати багаторазові спроби рушання на зниженій частоті з великою амплітудою напруги живлення.

**Наукова новизна.** Вперше отримані та експериментально підтвердженні математичні залежності для розрахунку температури обмоток статора під час рушання зі загальмованим ротором асинхронної машини, що враховують зміну властивостей обмотки статора під час нагрівання та вплив частоти напруги живлення.

**Практична цінність.** Вперше пропонується непрямий метод контролю температури нагрівання обмоток статора асинхронної машини під час рушання для запобігати виникненню аварійних ситуацій на технологічному обладнанні що пускається під навантаженням.

**Ключові слова:** обмотки статора асинхронної машини; температурний режим; параметри асинхронної машини; частоти напруги живлення; експериментальний комплекс.

### I. ВСТУП

Рушання і пуск деяких технологічних механізмів може супроводжуватися значними моментами опору, тому виникає необхідність виконання передпусковий підготовки за рахунок формування моменту рушання

більше пускового в кілька разів [1].

Дослідження зі створення великого пускового моменту проводилися по відношенню до підйомно-транспортних механізмів. На даний момент система електроприводу механізму підйому все частіше вико-

нується на базі асинхронного двигуна з реостатним пуском. При виконанні технологічних операцій підйому може виникати аварійні ситуації під впливом збільшеного моменту опору під час рушення, такі як порушення цілісності ізоляції обмоток двигуна або підгорання контактів реостатних опорів. Причинами аварійних ситуацій, як правило, є великі пускові струми, значні ударні моменти при виконанні реостатного пуску в наслідок зміни фізико-хімічних властивостей ущільнювальної гуми в процесі експлуатації, деформації контактних поверхонь, засмічення направляючих, зміни жорсткості каната при рушення затвора [1], нелінійності характеру тертя в системі, викиданого різницею коефіцієнта тертя спокою і початком проковзування [2], самим проковзуванням коліс механізму.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Виконання режимів рушення і передстартової підготовки за рахунок простих законів частотного управління дозволяє не тільки підвищувати значення пускового моменту асинхронного двигуна (АД), але і забезпечувати необхідну інтенсивність його збільшення. Однак закони частотного управління що застосовуються, не враховують зміну електромагнітних параметрів асинхронної машини при зниженні частоти напруги живлення і, як наслідок, вибрані параметри управління при формуванні великого пускового моменту за рахунок роботи на зниженій частоті ( $5 \div 20$  Гц) можуть виявитися неефективними [3]. Теоретичні дослідження підтвердили можливість отримання максимально допустимого пускового моменту з мінімальним пусковим струмом в області низьких частот [4]. Доведено, що при визначенні параметрів напруги живлення для частотно-регульованого асинхронного електроприводу (ЧРЕП) необхідно враховувати вплив кривої намагнічування на параметри самого АД [3].

Для підтвердження працездатності теоретичних досліджень по формуванню великого пускового моменту в області низьких частот при струмі статора, що не перевищує пусковий, необхідно провести експериментальні дослідження на реальному обладнанні.

## III. МЕТА РОБОТИ

Під час виконання передпускової підготовки для руйнування адгезивних шарів робочого органа в робочому положенні необхідно сформуванню за допомогою електроприводу достатні зусилля для рушення. Максимально допустимий пусковий момент формується за умови дотримання допустимого перевантаження за струмом. У деяких випадках для виконання рушення технологічних механізмів формування моменту з допустимим перевантаженням за струмом недостатньо [5].

У разі недостатнього рушійного моменту вал двигуна, а, отже, і ротор асинхронної машини перебувають у нерухомому стані. Пусковий струм відповідає

струму короткого замикання і є джерелом нагрівання обмоток асинхронної машини. Температура нагрівання залежить від амплітудного значення струму та часу його дії  $\Theta = F(I, t)$  [6].

Тому процеси рушення і пуску виконуються під час короткочасного створення значних пускових моментів і мають імпульсний характер.

З огляду на короткочасний характер пускових моментів можна формувати сигнали частоти  $f_1$  і напруги  $U$  живлення, за яких струмове перевантаження асинхронного двигуна АД більше допустимого  $I_1 > I_{пвск.max}$ , але на допустимо короткий період часу, за якого не відбудеться порушення цілісності ізоляції унаслідок нагрівання провідника.

Метою роботи є проведення експериментальних досліджень температурних режимів асинхронного двигуна під час рушення на лабораторному комплексі. Дослідження режимів дозволяє отримати реальні характеристики процесу нагрівання, оцінити його вплив на стан ізоляції асинхронного двигуна [7], підтвердити адекватність непрямого методу визначення температури нагрівання обмоток асинхронного двигуна під час формування циклічного пускового моменту в процесі рушення [6].

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Під час рушення, коли ротор знаходиться в нерухомому стані та рух повітря, укладеного всередині закритого двигуна, відсутній, має місце адіабатний процес, тобто тепловіддача практично відсутня:  $\lambda \approx 0$  [8]. Під час виконання рушення тривалість формованого пускового моменту становить 0,02–1 с. [4]. Час імпульсу пускового моменту набагато менший за теплову постійну часу нагрівання асинхронного двигуна:  $t_{imp} \ll T$ .

Тепло, що виділяється в провідниках обмоток статора за відсутності примусового охолодження і короткочасності теплового процесу, не встигає передаватися повітрю, що може призвести до перевищення максимально допустимої температури нагрівання обмотки. Визначати температурні режими обмоток статора з нагрівання корпусу двигуна для цього режиму неприпустимо. Застосування прямого методу вимірювання температури обмоток статора під час рушення дуже важко, так як датчики температури мають значну інерційність, що може призвести до некоректної фіксації вимірюваного параметра. Тому аналітичний метод визначення нагрівання обмотки статора дозволить отримати точніший результат.

Процес рушення і пуску супроводжується наявністю пускових струмів, що перевищують номінальні в 3–10 разів, асинхронна машина піддається тепловим навантаженням зі значним моментом опору на валу двигуна, і природно, що за короткий час виділяється велика кількість теплової енергії [9], [10]. Для запобігання перегрівання обмоток двигуна під час форму-

вання пускових моментів процесу рушання необхідно контролювати час роботи АД.

Під час розрахунку температури нагрівання обмоток статора приймемо такі припущення: фазні обмотки симетричні та зрушені в просторі на  $120^\circ$ ; магніторухійна сила обмоток і магнітних полів розподілена синусоїдально вздовж повітряного зазора; ротор електрично та магнітно симетричний.

Застосування різних методів побудови еквівалентних теплових схем (ЕТС) для розрахунку температурних режимів АД – складне завдання, що вимагає значних ресурсозатрат [11]. У цьому випадку і з урахуванням вищевикладених припущень застосування ЕТС нерентабельно, тому що теплові схеми описують фізичні процеси, які відбуваються в асинхронній машині при  $\omega_0 \neq 0$  і при  $\omega_0 = 0$ . Тому під час розрахунку окремого випадку, коли ротор машини нерухомий, велика частина змінних у рівняннях ЕТС дорівнює нулю і складність розрахунку не відповідає поставленому завданню. Під час описаного вище режиму роботи АД більшою мірою, порівняно з іншими частинами асинхронної машини, будуть нагріватися обмотки статора, тому що струм, який протікає в обмотках статора, дорівнює:

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_\mu^2}, \quad (1)$$

де  $I_2$  – струм ротора;  $I_\mu$  – струм контуру намагнічування.

З урахуванням того, що процес рушання короткочасний, має імпульсивний характер і рух АД відсутній, то пусковий струм статора вважаємо незмінним  $I_1 = const$  [12]. Тому, з огляду на прийняті допущення, температуру нагрівання АД раціонально контролювати за нагріванням обмотки статора однієї з фаз. Величина активного опору знаходиться з відомої залежності [13]:

$$R = R_0(1 + \alpha\Theta(t)), \quad (2)$$

де  $R_0$  – опір обмотки статора в холодному стані, Ом;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт,  $1/^\circ\text{C}$ .

Рівняння енергетичного балансу провідника фази обмотки статора з урахуванням (2) можна описати такою математичною залежністю:

$$\Delta P_1 (1 + \alpha\Theta(t)) = Cm \frac{d\Theta_{np}}{dt}; \quad (3)$$

$$\Delta P_1 = I_c^2 R_1 + \Delta P_{cm},$$

де  $\Delta P_1$  – загальні втрати в обмотках статора зі зміною частоти напруги живлення, Вт;  $\Delta P_{cm}$  – втрати в сталі, Вт;  $I_c$  – струм статора, А;  $R_1$  – активний опір обмотки кола, Ом;  $t$  – час дії струму, с;  $C$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);  $m = \rho Sln$  – маса провідника, кг;  $\rho$  – щільність матеріалу обмотки, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площа перерізу провідника, м<sup>2</sup>;  $l$  – довжина провідника обмотки

фази статора, м;  $n$  – кількість провідників;  $\Theta_{np}$  – температура нагрівання,  $^\circ\text{C}$ .

Відомо, що зміна частоти напруги живлення впливає на зміну параметрів електромагнітного кола асинхронної машини [14], тому втрати в сталі вираховуються за методикою, запропонованою в [14], де в режимі насичення втрати визначаються так:

$$\Delta P_{cm} = \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_\mu)}{dI_\mu}\right)^2} (E(I_\mu))^2, \quad (4)$$

де  $\xi$  – конструктивний коефіцієнт, що залежить від параметрів феромагнітного матеріалу (0,003–0,004) у разі насичення;  $I_\mu$  – струм магнітного кола асинхронної машини, А;  $E(I_\mu)$  – залежність кривої намагнічування від струму намагнічування [14].

Отже, рівняння енергетичного балансу з урахуванням утрат у сталі зі зниженням частоти напруги живлення має вигляд:

$$\left( I_c^2 R_1 + \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_\mu)}{dI_\mu}\right)^2} (E(I_\mu))^2 \right) (1 + \alpha\Theta(t)) = Cm \frac{d\Theta_{np}}{dt}. \quad (5)$$

Контроль температурного режиму виконується не тільки в процесі рушання і пуску, коли асинхронна машина знаходиться в області насичення магнітопроводу, але і під час виконання технологічних робіт з використанням закону частотного керування  $u/f = const$ . У таких випадках облік втрат сталі в двигуні в ненасиченому стані магнітної системи розраховується за (4), де конструктивний коефіцієнт  $\xi'$  змінюється на  $\xi' = 0,002$ .

Залежність зміни температури обмотки із загальмованим ротором у часі з урахуванням зміни опору під час нагрівання струмом  $I_c = const$ , а також за нульових початкових умов, розраховується за виразом:

$$\Theta(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left( \Theta_0 + \frac{1}{\alpha} \right) e^{\frac{\Delta P_1 \alpha}{Cm} t},$$

або

$$\Theta(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left( \Theta_0 + \frac{1}{\alpha} \right) e^{\frac{\left( I_c^2 R_1 + \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_\mu)}{dI_\mu}\right)^2} (E(I_\mu))^2 \right) \alpha}{Cm} t}. \quad (6)$$

Відповідно до початкових умов залежність (6) вірна під час виконання першої спроби рушання, коли

температура обмоток статора двигуна відповідала температурі навколишнього середовища, тому що електрична машина була не під напругою і без руху.

У разі прикладання напруги до асинхронного двигуна з розрахунковими параметрами для здійснення спроб рушання повторно через короткий період часу, який характеризує паузу, початкові умови для (6) визначаються значенням нагрівання від попереднього струмового імпульсу  $\Theta_{i-1}$ , де  $i$  – номер імпульсу моменту, який формується для АД під час рушання.

Вираз (6) з урахуванням заданих початкових умов набуває такого вигляду:

$$\Theta_i(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left( \Theta_{i-1} + \frac{1}{\alpha} \right) e^{-\left( \frac{I_{ct}^2 R_1 + \frac{\xi}{\left( \frac{dE(I_{\mu i})}{dI_{\mu i}} \right)^2} (E(I_{\mu i}))}{C_m} \right) (t_i - t_{i-1})}. \quad (7)$$

За (7), урахуовуючи параметри машини, розраховуємо допустиме значення температурної межі з урахуванням параметрів навколишнього середовища. Допустиме нагрівання електродвигуна визначається найменш теплостійкими матеріалами його конструкції. Таким матеріалом є ізоляція обмотки статора.

У нашому випадку гранична температура перегрівання обмотки класу С не перевищує 180 °С [16] і обмежується властивостями застосованих матеріалів. За одного і того самого навантаження електродвигуна його нагрівання буде неоднаковим за різних температур навколишнього середовища. Розрахункова температура  $\Theta_0$  дорівнює 20 °С [16].

З виразу (6) визначаємо допустимий час роботи двигуна для заданої температурної межі  $\Theta_{dop}$ :

$$t_i = \frac{C_m}{\Delta P_{li} \alpha} \ln \left( e^{-\left( \frac{I_{ct}^2 R_1 + \frac{\xi}{\left( \frac{dE(I_{\mu i})}{dI_{\mu i}} \right)^2} (E(I_{\mu i}))}{C_m} \right) (t_i - t_{i-1})} \right). \quad (8)$$

Цей вираз дозволяє визначити час, за якого двигун працює зі струмами, значення яких  $I_c \geq I_{pysk-max}$ , але середнє нагрівання обмоток за імпульс не перевищує  $\Theta_{dop}$ .

Отже, застосовуємо непрямий метод контролю нагрівання обмоток статора під час виконання передпускової підготовки та рушання і маємо можливість запобігти виникненню аварійних ситуацій та збереження цілісності ізоляції обмоток статора АД.

Для підтвердження працездатності теоретичних

досліджень з формування пускового моменту в області низьких частот зі струмом статора, що не перевищує пусковий, необхідно провести експериментальні дослідження на реальному обладнанні.

Експериментальні дослідження склалися з дослідження температурних режимів з імпульсним характером пускового моменту [17].

Застосування перетворювача частоти (ПЧ) у цих умовах обумовлено не тільки можливістю підвищення керованості технологічним процесом, а й здатністю силових перетворювачів частоти працювати з короткочасним перевантаженням за струмом [18]. У табл. 1 наведені гранично допустимі режими навантаження, які повинні забезпечуватися ПЧ за номінальної напруги живлення.

**Таблиця 1.** Режими навантаження перетворювачів частоти до 80 кВА

№	Навантаження % від $I_{nom}$ .	Тривалість навантаження, с.	Середнє значення струму протягом циклу, % від $I_{nom}$ .	Час циклу, хв.
1	125	900	100	30
2		300	110	10
3	150		120	100
4		10		
5	175	60	30	
6			10	
7	200	15	10	
8		10		
9		5		
10	225	10	10	
11				

У [17] визначено час роботи ПЧ залежно від струмових перевантажень.

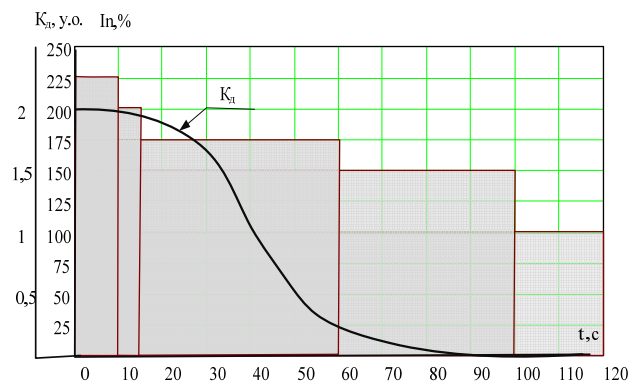
З урахуванням запропонованого алгоритму виконання рушання технологічного механізму необхідно контролювати не тільки перевантаження за струмом, а й динамічні. Діапазон струмових і динамічних перевантажень за часом роботи наведено на рис. 1

Зі збільшенням часу розгону, тобто збільшенням плавності зміни навантаження, динамічний коефіцієнт зменшується і розраховується за формулою:

$$K_d = f(T/T_{12}), \quad (9)$$

де  $T_{12} = 2\pi/\Omega_{12}$  – період власних коливань системи;  $T$  – час розгону.

Істотне зниження  $K_d$  досягається зі збільшенням часу плавного навантаження  $T$  до значення  $T_{12}$ . Подальше збільшення часу розгону не дає істотного зниження динамічних навантажень і може призвести до погіршення керованості приводу [19].



**Рисунок 1.** Діапазон струмових і динамічних перевантажень

За ДСТУ ПЧ не допускає перевантаження за струмом  $2,25I_{ном}$  протягом 10 с. Постає питання, чи можливо сформувати режим рушення із загальмованим ротором частотно-регульованого електропривода з перевантаженням за струмом вище ДСТУ з імпульсним характером формування пускового моменту (період імпульсу 1–3 с).

Для експериментального підтвердження теоретично отриманих результатів розроблено лабораторний комплекс на базі асинхронного двигуна 4AA71A6УЗ з такими параметрами:  $P = 0,37$  кВт,  $U = Y/\Delta = 380/220$  В,  $I = Y/\Delta = 1,1/1,9$  А,  $\omega = 920$  об/хв,  $R_l = 15,7$  Ом.

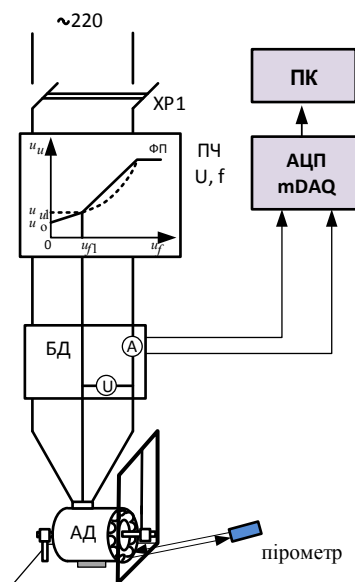
Лабораторний комплекс оснащений блоком датчиків струму і напруги, що дозволяє записувати миттєві значення параметрів за допомогою аналогоцифрового перетворювача (АЦП) на персональний комп'ютер (ПК) у текстовому файлі для подальшої математичної обробки відповідно до етапів виконання експериментальних досліджень. Функціональна схема лабораторного комплексу наведена на рис. 2.

Асинхронний двигун, ротор якого через важіль ( $l = 0,08$  м) з'єднаний з тензодатчиком, який, у свою чергу, жорстко зафіксовано на металоконструкції лабораторного комплексу, що імітує початковий момент рушення із загальмованим ротором, за заданими параметрами напруги живлення, встановленими на перетворювачі частоти, що виконує короточасний пуск з одночасним фіксуванням миттєвих значень струму і напруги (БД) → АЦП(m-DAQ) → ПК у вигляді текстового файлу з можливістю математичної обробки в програмі MathCAD для аналізу отриманих результатів [20].

Однак параметри ДСТУ стосуються нормальних режимів роботи системи ЕП, що не відповідає режимам рушення. У нашому випадку за рахунок налаштування параметрів перетворювача частоти, імпульсного характеру напруги, що прикладається, відсутності перегрівання обмоток АД може працювати за даного режиму і забезпечити виконання рушення.

Під час проведення експериментальних дослі-

джень температурних режимів асинхронного двигуна під час рушення із загальмованим ротором необхідно фіксувати не тільки діючі значення струму і напруги, а й миттєві значення струмів за всіма трьома фазами, так як із загальмованим ротором існує можливість електромагнітної несиметрії обмоток статора електричної машини.



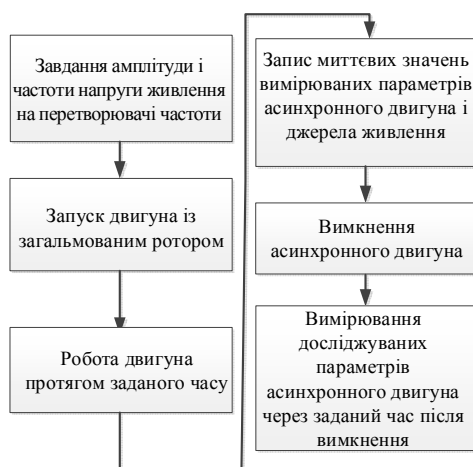
**Рисунок 2.** Функціональна схема лабораторного комплексу

З іншого боку, у зазначеному режимі джерелом нагрівання є пусковий струм, що протікає по обмотках статора. Отже, більшою мірою, порівняно з іншими частинами асинхронної машини, нагріватимуться саме обмотки статора і будуть джерелом нагрівання дотичних частин асинхронної машини. Оскільки одним із завдань під час рушення є запобігання перегрівання асинхронної машини, то контроль температури раціонально виконувати з нагріванням обмоток статора, без застосування ресурсозатратних ЕТС.

Під час проведення експерименту фіксувалися миттєві значення струмів кожного циклу роботи двигуна, значення температури протягом циклу із заданими значеннями часу роботи  $t_p = 3$  с і часу паузи  $t_n = 20$  с, що дозволило імітувати формування пускового моменту під час багаторазової спроби рушення. Максимально допустима початкова напруга джерела живлення під час рушення становить 40 %  $U_{ном}$ . В від можливого (380 В), зі зміною частоти з кроком 5 Гц у діапазоні 50 – 10 Гц. Алгоритм проведення одного циклу експерименту наведено на рис. 3.

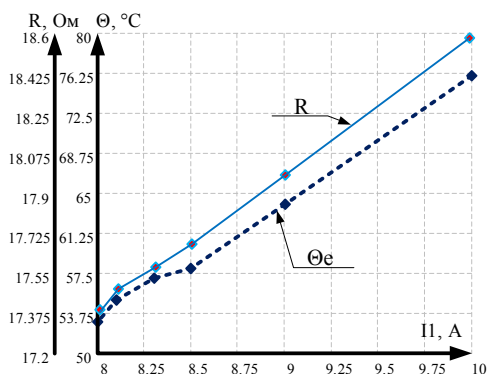
Для реєстрації температури нагрівання обмотки статора двигуна використовувався пірометр типу Laser radiation, який виконує вимірювання на відстані 100–200 мм. Під час проведення експерименту була знята кришка асинхронного двигуна для забезпечення доступу до лобових частин обмоток статора. За один

період роботи АД виконувалося по два вимірювання пірометром на кожній фазі та фіксувалося усереднене значення.



**Рисунок 3.** Алгоритм проведення одного циклу експерименту

За допомогою отриманих миттєвих значень струму на ПК виконано розрахунок значень струму однієї фази статора. Під час проведення експерименту діючі значення струму обмотки статора додатково фіксувалися амперметром з класом точності 2 %. Експериментальні та розрахункові значення досліджуваних параметрів асинхронного двигуна наведені на рис. 4.



**Рисунок 4** Графіки експериментальних залежностей температури та активного опору під час нагрівання обмоток пусковим струмом ( $I_c$ ) протягом 90 с у разі виконання покрокового режиму рушання.

Результати експериментальних досліджень за заданими параметрами управління і розрахункові значення температури нагрівання з урахуванням початкових умов наведені у табл. 2.

Відносна похибка розрахункових значень температури нагрівання обмоток статора становить 1,6 %.

**Таблиця 2.** Результати експериментальних досліджень за заданими параметрами управління

№ пор.	Частота напруги живлення $f, \text{Гц}$	Розрахунковий струм обмотки статора $I_c, \text{А}$	Фактичний струм обмотки статора $I_c, \text{А}$	Активний опір обмотки статора $R, \text{Ом}$	Експериментальна температура $\Theta_e, \text{°C}$ обмотки статора за робочий час, $t_p, \text{с}$	Розрахункова температура $\Theta_p, \text{°C}$ обмотки статора за робочий час, $t_p, \text{с}$
1	10	10,2	10	15,85	5,5	5,4
2	15	9,18	9	15,85	4,4	4,312
3	20	8,65	8,5	15,85	4,2	4,143
4	25	8,49	8,3	15,85	4	3,851
5	30	8,26	8,1	15,85	3,9	3,875
6	35	8,12	8	15,86	3,5	3,36
7	40	8,1	8	15,87	3,3	3,2
8	45	8,08	8	15,89	3,1	3,05
9	50	8,08	8	15,9	3	2,9

## V. ВИСНОВКИ

Застосування різних методів побудови еквівалентних теплових схем (ЕТС) для розрахунку температурних режимів АД вимагає значних ресурсовитрат, що є нерентабельним, оскільки теплові схеми описують фізичні процеси, що відбуваються в асинхронній машині за  $\omega_d \neq 0$  і за  $\omega_d = 0$ . Тому, під час розрахунку окремого випадку, коли ротор машини нерухомий, значна частина змінних у рівняннях ЕТС дорівнює нулю і складність розрахунку не відповідає поставленому завданню. З використанням методу визначення втрат у сталі в режимі глибокого насичення виведені математичні залежності розрахунку температурного режиму під час виконання алгоритму, що враховує зміну властивостей обмотки статора під час нагрівання, розраховані допустимі параметри перевантаження за струмом з урахуванням допустимого нагрівання обмоток статора.

У роботі отримані математичні залежності для розрахунку температурних режимів обмоток статора під час формування циклічного пускового моменту для виконання рушання, що враховують зміну початкових умов рушання для кожного циклу і зміну властивостей обмоток статора під час нагрівання.

Отже, застосовуємо непрямий метод контролю нагрівання обмоток статора під час виконання передпускової підготовки та рушання і маємо можливість запобігти виникненню аварійних ситуацій та збереження цілісності ізоляції обмоток статора АД.

Розроблений лабораторний комплекс дозволяє проводити дослідження температурних режимів обмоток статора при рушанні асинхронного двигуна із загальмованим ротором, при заданих різних значеннях амплітуди і частоти напруги живлення. Результати досліджень вказують, що математичні залежності,

виведені в роботі дозволяють забезпечити контроль температури нагрівання аналітичним методом. Аналіз режимів роботи асинхронного двигуна під час виконання рушання підтвердив необхідність контролю температурних показників обмоток статора для попередження виникнення аварійних ситуацій.

В цілому при рушанні з застосуванням покрової подачі напруги живлення зниженою частоти для отримання підвищеного пускового моменту, нагрів обмоток статора відбувається повільніше в порівнянні з нагріванням при тривалому режимі роботи асинхронного двигуна із загальмованим ротором, що дозволяє виконувати багаторазові спроби зрушення на зниженій частоті з великою амплітудою напруги живлення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Хребтова О.А. Сергієнко С. А. Дослідження властивостей системи електропривода механізму підйому затвору зливної греблі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – 660 с.
- [2] Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. – Харьков: Изд-во «Підручник НТУ «ХП»», 2014. – 408 с.
- [3] Chenchevoi V. Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties / M. Zagirnyak, V. Chenchevoi, V. Ogar // Acta Technica. – Iss. 59/2014 (1). – PP. 25–47.
- [4] Хребтова О.А. Определение момента асинхронного двигателя при трогании / О.А. Хребтова, В.В. Ченчевой, В.А. Огарь // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, – 2013. – Вип. 4/2013 (24). – 106 с.
- [5] Balik J., Lukac P. On the kinetics of dynamic strain ageing. Kovove Mater. – 1998. V. 36. No. 1. P. 3–9.
- [6] Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. под ред. Мамиконянца. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
- [7] Михалев М. А., Михалева И. М. Основы теплопередачи. – М. : Энергия. 1977. - 342 с.
- [8] Обзор методов теплового расчета и существующих моделей. URL : [http://www.physicexplorer.ru/obzor\\_metodov\\_teplovogo\\_rascheta\\_i\\_sushchestvuyushchih\\_modelей\\_441-1.html](http://www.physicexplorer.ru/obzor_metodov_teplovogo_rascheta_i_sushchestvuyushchih_modelей_441-1.html)
- [9] Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. Е. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М. : Вища школа. 1983. – 616 с.
- [10] Гуревич Э. И. Переходные процессы в электрических машинах. / Э. И. Гуревич, Ю. Л. Рыбин // – Л. : Энергоатомиздат, 1983. - 316 с.
- [11] Носач Е. В. Процессы нагревания обмоток при пуске электрических машин. / Е. В. Носач, А. П. Черный, О. С. Воробейчик // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. – 2011. – № 1. С. 75–79.
- [12] Шидловська Н. А. Нелінійні кола з тепловими втратами. – К. : Наукова думка. 2002. – 160 с.
- [13] Огарь В. О. Родькин Д. Й. Характеристики асинхронных двигунів з урахуванням нелінійних властивостей магнітної системи : монографія. – Кременчук : ПП Щербатих О. В. 2013. – 320 с.
- [14] Родькин Д. И., Ченчевой В. В., Огарь В. А. Природа аномальных потерь в стали в режиме глубокого насыщения. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. № 1. – 76-93 с.
- [15] Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах : учеб. пособие для вузов. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
- [16] Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования. [Электронный ресурс] / Официальный веб-портал ГОСТ 24607–88. Режим доступа: <http://introkub.ru/6/GOST-24607-88-Preobrazovateli-chastoty-poluprovodnikovyye-Obshchiye-tekhnicheskiye-trebovaniya.php>
- [17] Хребтова О. А. Гладир А. І. Модернізація електропривода механізму підйому затвору зливної греблі в умовах Кременчуцької ГЕС. Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 4, част. 2. С. 59–63.
- [18] Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики [Электронный ресурс] / Офіційний веб-портал ГОСТ Р 51137-98. Режим доступа : [http://valvolodin.narod.ru/gost/gost\\_r\\_51137-98.pdf](http://valvolodin.narod.ru/gost/gost_r_51137-98.pdf)
- [19] Калинов А. П., Мамчур Д. Г., Гладырь А. И. Учебно исследовательское оборудование на базе универсальных модулей АЦП. [Электронный ресурс] / Офіційний веб-портал ПиКАД : Промышленные измерения контроль автоматизация диагностика 4/2008 Режим доступа : <http://www.picad.com.ua /0408/pdf/vnedr4.pdf>
- [20] Петрушин В. С., Якимец А. М. Анализ переходных процессов в АД при частотно-токовом управлении. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – № 2. Том 1. С. 49–52

Стаття надійшла до редакції 10.08.2020



## ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ТРОГАНИИ ПОД НАГРУЗКОЙ

- ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: 34092@ukr.net;
- ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Цель работы.** Проведение экспериментальных исследований температурных режимов асинхронного двигателя при трогании на лабораторном комплексе. Получение реальных характеристик процесса нагрева при выполнении трогания, оценка его влияние на состояние изоляции асинхронного двигателя, подтверждение адекватности косвенного метода определения температуры нагрева обмоток асинхронного двигателя при формировании циклического пускового момента в процессе трогания.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовалось математическое моделирование с впервые полученными математическими выражениями что рассчитывают температуры обмотки статора во время трогания с учетом влияния частоты напряжения питания на параметры асинхронного двигателя. Физическое моделирование на разработанном лабораторном стенде режимов трогания с фиксирования температуры во время каждого этапа эксперимента для подтверждения теоретических исследований трогания при импульсном характере пускового момента.

**Полученные результаты.** Применение различных методов построения эквивалентных тепловых схем (ЕТС) для расчета температурных режимов асинхронного двигателя требует значительных ресурсов затрат, что является нерентабельным, когда ротор машины неподвижен как в случае трогания. С использованием метода определения потерь в стали в режиме глубокого насыщения выведены математические зависимости расчета температурного режима во время выполнения алгоритма, учитывающий изменение свойств обмотки статора во время нагревания, рассчитаны допустимые параметры перегрузки по току с учетом допустимого нагрева обмоток статора. В работе получены математические зависимости для расчета температурных режимов обмоток статора при формировании циклического пускового момента для выполнения трогания, учитывающие изменение начальных условий трогания для каждого цикла и изменение свойств обмоток статора во время нагревания. Разработан лабораторный комплекс позволяет проводить исследования температурных режимов обмотки статора при трогании асинхронного двигателя с заторможенным ротором, при задании различных значений амплитуды и частоты напряжения питания. Результаты исследований показывают, что математические зависимости, выведенные в работе позволяют обеспечить контроль температуры нагрева аналитическим методом. Анализ режимов работы асинхронного двигателя при исполнении трогания подтвердил необходимость контроля температурных показателей обмоток статора для предотвращать возникновение аварийных ситуаций. В целом при трогании с применением пошаговой подачи напряжения питания пониженной частоты для получения повышенного пускового момента, нагрев обмоток статора происходит медленнее по сравнению с нагревом при длительном режиме работы асинхронного двигателя с заторможенным ротором позволяет выполнять многократные попытки трогания на пониженной частоте с большей амплитудой напряжения питания.

**Научна новизна.** Впервые получены и экспериментально подтверждены математические зависимости для расчета температуры обмоток статора во время трогания с заторможенным ротором асинхронной машины, учитывающие изменение свойств обмотки статора во время нагревания и влияние частоты питающего напряжения.

**Практическая ценность.** Впервые предлагается косвенный метод контроля температуры нагрева обмоток статора асинхронной машины при трогании для предотвращать возникновение аварийных ситуаций на технологическом оборудовании, что пускается под нагрузкой.

**Ключевые слова:** обмотки статора асинхронной машины; температурный режим; параметры асинхронной машины; частоты напряжения питания; экспериментальный комплекс.



## THERMAL MODES OF THE AUTOMATED ELECTRIC DRIVE SYSTEM DURING BURNING UNDER LOAD

**KHREBTOVA O.A.** Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: 34092@ukr.net;

**ZACHEPA N.V.** Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Purpose.** Conducting experimental studies of temperature regimes of an induction motor during start-up on a laboratory complex. Obtaining real characteristics of the heating process during the start of the start, assessing its impact on the insulation state of the induction motor, confirming the adequacy of the indirect method of determining the heating temperature of the induction motor windings during the formation of the cyclic starting torque during the start.

**Methodology.** To solve these problems, we used mathematical modeling based on the first mathematical expressions that calculate the temperature of the stator winding during start-up, taking into account the influence of the frequency of the supply voltage on the parameters of the induction motor. Physical modeling on the developed laboratory stand of modes of movement on fixing of temperature during each stage of experiment for confirmation of theoretical researches of movement at pulse character of the starting moment.

**Findings.** The use of different methods of constructing equivalent thermal circuits (ETS) to calculate the temperature of an induction motor requires significant resource consumption, which is unprofitable when the rotor of the machine is stationary as in the case of failure. Using the method of determining losses in steel in the deep saturation mode, the mathematical dependences of the calculation of the temperature regime during the algorithm, taking into account the change in the properties of the stator winding during heating, calculated the allowable current overload parameters taking into account the allowable heating of stator windings. The paper obtains mathematical dependences for calculating the temperature regimes of the stator windings during the formation of the cyclic starting torque for the movement, taking into account the change of the initial conditions of the movement for each cycle and the change in the properties of the stator windings during heating. The developed laboratory complex allows to carry out research of temperature modes of a stator winding at movement of the induction motor with the braked rotor, at assignment of various values of amplitude and frequency of supply voltage. The results of research indicate that the mathematical dependences derived in the work allow to control the heating temperature by the analytical method. Analysis of the modes of operation of the induction motor during the execution of the movement confirmed the need to control the temperature of the stator windings to prevent accidents. In general, when starting with a step-by-step supply of low frequency supply voltage to obtain increased starting torque, the heating of the stator windings is slower compared to heating during prolonged operation of an induction motor with a braked rotor, which allows multiple attempts to move at low frequency. nutrition.

**Originality.** For the first time, mathematical dependences for calculating the temperature of stator windings during start-up with a braked rotor of an asynchronous machine are obtained and experimentally confirmed, which take into account the change in stator winding properties during heating and the influence of supply voltage frequency.

**Practical value.** For the first time, an indirect method of controlling the heating temperature of the stator windings of an asynchronous machine during start-up is proposed to prevent emergencies on process equipment that is started under load.

**Keywords** stator windings of asynchronous machine; temperature regime; parameters of the asynchronous machine; supply voltage frequency; experimental complex.

### REFERENCES

- [1] Khrebtova O.A., Sergienko S.A. (2012) Investigation of the properties of the electric drive system of the shutter dam lifting mechanism *Electromechanical and energy saving systems. Thematic issue "Problems of automated electric drive. Theory and Practice "of scientific and production magazine.* 3(19). - 660. (in Russian)
- [2] Klepikov V.B. (2014) Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: a monograph. H.: Publishing house "Textbooks of NTU" KhPI ". 408 p. (in Russian)
- [3] Chenchevoi V., Zagirnyak M., Ogar V. Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties. *Acta Technica.* Iss. 59/2014 (1). RR. 25–47. ISSN 0001–7043.
- [4] Khrebtova O.A., Chenchevoi V. V., Ogar V. O., (2013) Determination of the moment of the asynchronous engine at starting *Electromechanical and energy-saving systems: quarterly scientific-production journal.* 4. 106. (in Russian)

- [5] Balik J., Lukac P. (1998). On the kinetics of dynamic strain aging. *Kovove Mater*, Vol. 36. No. 1. P. 3–9.
- [6] Syromyatnikov I.A. (1984). Modes of operation of asynchronous and synchronous motors. Moscow, Energoatomizdat. 240. (in Russian)
- [7] Mikhalev M.A., Mikhaleva I.M. (1977) Fundamentals of heat transfer. Moscow, Energy. 342 p.
- [8] Review of thermal calculation methods and existing models. [Electronic resource] / Official web : [http://www.physic-explorer.ru/obzor\\_metodov\\_teplovogo\\_rascheta\\_i\\_sushchestvuyushchih\\_modeley-441-1.html](http://www.physic-explorer.ru/obzor_metodov_teplovogo_rascheta_i_sushchestvuyushchih_modeley-441-1.html)
- [9] Eliseeva E.A., Shinyansky A.V. (1983) Handbook of automated electric drive. Moscow, Higher school, 616. (in Russian)
- [10] Gurevich E. I., Rybin Yu. L. (1983) Transients in electric machines. L.: Energoatomizdat. 316. (in Russian)
- [11] Nosach E.V., Cherny A.P., Vorobeychik O.S. (2011) Processes of heating windings during starting of electric machines. *Electromechanical and energy-saving systems: quarterly scientific and production journal*. 1. p. 75–79. (in Russian)
- [12] Shidlovskaya N.A. (2002) Nonlinear circuits with heat loss. K.: Scientific opinion. 160. (in Ukrainian)
- [13] Ogar V.O., Rodkin D.I. (2013) Characteristics of induction motors taking into account the nonlinear properties of the magnetic system: a monograph. Kremenchuk: PP Shcherbatykh OV. 320. (in Ukrainian).
- [14] Rodkin D.I., Chencheva V.V., Ogar V.A. (2014) The nature of anomalous losses in steel in the deep saturation mode *Electromechanical and energy saving systems*. 3. 106. (in Russian)
- [15] Filippov I.F. (1986) Heat transfer in electric machines: textbook. manual for universities. L.: Energoatomizdat. 256. (in Russian)
- [16] GOST 24607–88 Semiconductor frequency converters. [Electronic resource] / General technical requirements. : <http://introkub.ru/6/GOST-24607-88-Preobrazovateli-chastoty-poluprovodnikovyye-Obshchiye-tekhicheskiye-trebovaniya.php>
- [17] Khrebtova O.A., Gladyr A.I. (2010) Modernization of the electric drive of the shutter dam lifting mechanism in the conditions of Kremenchug HPP *Bulletin of Kremenchug State University named after Mikhail Ostrogradsky*. 4, pp. 59–63. (in Ukrainian)
- [18] Electric drives adjustable asynchronous for energy facilities [Electronic resource] / Official web-portal GOST R 51137-98 Access mode: [http://valvolodin.narod.ru/gost/gost\\_r\\_51137-98.pdf](http://valvolodin.narod.ru/gost/gost_r_51137-98.pdf)
- [19] Kalinov A.P., Mamchur D.G., Gladyr A.I. Training and research equipment based on universal ADC modules. [Electronic resource] / Official web-portal of PICAD: Industrial measurements control automation diagnostics 4/2008 Access mode: <http://www.picad.com.ua/0408/pdf/vnedr4.pdf>
- [20] Petrushin V.S., Yakimets A.M. (2003) Analysis of transients in BP under frequency-current control *Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University*. 2. Volume 1. p 49–52. (in Russian)