

Міністерство освіти і науки України



ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

## НАУКОВІ ПРАЦІ

Серія: Електротехніка і енергетика

№2 (31) 2024



Дрогобич 2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАУКОВІ ПРАЦІ  
ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**СЕРІЯ:  
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
І  
ЕНЕРГЕТИКА**

**Всеукраїнський науковий збірник,  
заснований у червні 2003 року  
Виходить 2 рази на рік**

**№2(31)'2024**

Дрогобич – 2024

УДК 621.3::620.2

Друкується за рішенням Вченої ради державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (протокол № 9 від 10.10.2024 року).

У збірнику публікуються наукові статті співробітників кафедр Донецького національного технічного університету та інших університетів України та світу. В цих статтях наведено результати наукових досліджень і розробок з питань електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Збірник розрахований на наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, а також аспірантів і студентів, які навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Засновник та видавець** – Донецький національний технічний університет

**Головний редактор** – **С. М. Тімошенко**, доктор техн. наук, доцент, професор кафедри електричної інженерії ДВНЗ «ДонНТУ», м. Дрогобич, Україна;

**Заступник головного редактора** – **О. Ю. Колларов**, кандидат техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії, м. Дрогобич, Україна;

**Відповідальний секретар** – **В. В. Калиниченко**, кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки, м. Дрогобич, Україна;

#### **Склад редакційної колегії:**

**О. І. Толочко**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна;

**І. О. Шведчикова**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри електроніки та електротехніки Київського національного університету технологій та дизайну, м. Київ, Україна;

**О. О. Шавьолкін**, д-р техн. наук, проф., кафедра електроніки та електротехніки Київського національного університету технологій та дизайну, м. Київ, Україна;

**В. А. Святний**, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерної інженерії ДВНЗ «ДонНТУ», м. Дрогобич, Україна;

**С. В. Подкопаєв**, д-р техн. наук, проф., проректор з наукової роботи ДВНЗ «ДонНТУ», м. Дрогобич, Україна;

**А. А. Зорі**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри електронної техніки ДВНЗ «ДонНТУ», м. Дрогобич, Україна;

**О. П. Чорний**, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри систем автоматичного управління та електроприводу КрНУ імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна;

**А. М. Ганжа**, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

**А. В. Бойко**, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

**П. П. Говоров**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри світлотехніки та джерел світла Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна;

**М. В. Гребченко**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна;

**П. Д. Лежнюк**, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна;

**Ю. Л. Саснко**, д-р техн. наук, проф., декан енергетичного факультету Приазовського державного технічного університету, м. Київ, Україна;

**О. С. Яндульський**, д-р техн. наук, проф., декан Факультету електроенерготехніки та автоматики НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна;

**А. К. Семенченко**, д-р техн. наук, проф., м. Дрогобич, Україна;

**П. Енафф**, PhD, проф. Еколь де Мін, м. Нансі, Франція.

## **ЗМІСТ**

<b>Шавьолкін О. О., Гаман Ю. С. УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНОЮ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТВАРИННИЦЬКОЇ ФЕРМИ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТА ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТОМ</b> .....	6
<b>Баран П. М., Кідиба В. П. СИСТЕМА "АЛЬГРА" ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА ЗАХИСТУ ЇЇ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ</b> .....	17
<b>Граняк В. Ф. ПРИСКОРЕНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ВСТАНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ ПУСКОВИМ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА НАПРУГОЮ СТАТОРНОГО КОЛА</b> .....	25
<b>Берідзе Т. М. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ З УРАХУВАННЯМ ВИКИДІВ</b> .....	33
<b>Нємцев Е. М. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМІРОК LiFePO<sub>4</sub> НА ПАРАМЕТРИ РОБОТИ АКУМУЛЯТОРНИХ ЗБІРОК</b> .....	40
<b>Колларов О. Ю., Остренко Д. О. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ У РОБОТІ ФЕС</b> .....	50
<b>Калиниченко В. В. ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗРАХУНКУ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМКНЕННЯ В ДІЛЬНИЧНИХ ПІДЗЕМНИХ МЕРЕЖАХ</b> .....	59
<b>Сергієнко Л. В., Сергієнко О. І. ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТУ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАНУ ЗАКРИТИХ ШАХТ</b> .....	63
<b>Белицький П. В. ПІДВИЩЕННЯ ГАЛЬМІВНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛОКОМОТИВА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ З УРАХУВАННЯМ ЗУСИЛЬ У ЙОГО ЗЧПНИХ ПРИСТРОЯХ</b> .....	68
<b>Любименко О. М., Штепа О. А. ВІДНОВЛЕННЯ ПАЛАДІСВИХ МЕМБРАН ПІСЛЯ КОНТАКТУ З ВОДНЕМ ДЛЯ ВОДНЕВО-КИСНЕВИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ</b> .....	76

## CONTENTS

<b>O. O. Shavolkin, Y. S. Haman</b> MANAGEMENT OF A HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM FOR A LIVESTOCK FARM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES AND ELECTRIC TRANSPORT .....	6
<b>P. Baran, V. Kidyba</b> SYSTEM "ALTRA" FOR DIAGNOSING THE STATE OF INSULATION OF THE ELECTRICAL NETWORK AND EARTH-FAULT PROTECTION .....	17
<b>V. F. Hraniak</b> ACCELERATED EXPERIMENTAL METHOD OF DETECTION THE FUNCTIONAL DEPENDENCE BETWEEN THE STARTING TORQUE OF AN INDUCTION MOTOR AND THE STATOR VOLTAGE .....	25
<b>T. Beridze</b> EFFICIENCY OF ELECTRICITY CONSUMPTION AT MINING ENTERPRISES TAKING EMISSIONS INTO ACCOUNT .....	33
<b>E. Niemtsev</b> ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INDIVIDUAL CHARACTERISTICS OF LIFEPO4 CELLS ON THE PERFORMANCE PARAMETERS OF BATTERY ASSEMBLIES .....	40
<b>O. Kollarov, D. Ostrenko</b> ANALYSIS OF THE STAGNATION OF THE HUMERAL NEURAL NETWORKS FOR THE ADVANCEMENT OF RELIABLE OPERATION OF A PHOTOVOLTAIC STATION .....	50
<b>V. Kalynychenko</b> SOME ASPECTS OF THE CALCULATION OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN DISTRICT UNDERGROUND NETWORKS .....	59
<b>L. V. Serhiienko, O. I. Serhiienko</b> JUSTIFICATION OF THE COMPLEX PROJECT OF HEAT AND ELECTRICITY PRODUCTION USING METHANE FROM CLOSED MINES .....	63
<b>P. Belytskyi</b> INCREASING THE BRAKING CAPACITY OF INDUSTRIAL LOCOMOTIVES TAKING INTO ACCOUNT THE FORSES IN ITS COUPLING DEVICE .....	68
<b>O. M. Liubymenko, O. A Shtepa</b> RESTORATION OF PALLADIUM MEMBRANES AFTER CONTACT WITH HYDROGEN FOR HYDROGEN-OXYGEN FUEL CELLS .....	76

**В. Ф. ГРАНЯК** (канд. техн. наук, доц.)  
Вінницький національний аграрний університет  
[titanxp2000@ukr.net](mailto:titanxp2000@ukr.net)

## **ПРИСКОРЕНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ВСТАНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ ПУСКОВИМ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА НАПРУГОЮ СТАТОРНОГО КОЛА**

*Досліджено особливості отримання експериментальної залежності пускового моменту асинхронного двигуна від напруги живлення статора. Показано, що при визначенні цієї залежності двигун працює в режимі короткого замикання, що призводить до швидкого перегріву його обмоток.*

*Запропоновано та обґрунтовано доцільність прискореного експериментального методу визначення функціональної залежності пускового моменту від напруги живлення. Цей підхід дозволяє здійснити повну серію вимірювань пускового моменту для різних значень напруги статорного кола в межах часу, що не перевищує період нагрівання обмоток від початкової до номінальної температури. Розроблено конструкцію дослідної установки.*

*Розроблені математичні моделі, які описують термічну поведінку статорних обмоток та механічне переміщення аналогової частини вимірювального каналу пускового моменту, які підтверджують правильність застосування запропонованого методу функціональної залежності пускового моменту асинхронного двигуна від напруги статорного кола.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, пусковий момент, перегрів, напруга живлення, вимірювання.

**Вступ.** Актуальною тенденцією останніх десятиліть є різке зростання популярності асинхронних автоматизованих електроприводів [1, 2]. Зазначена тенденція обумовлена як активним розвитком методів керування асинхронними електродвигунами та зростанням популярності асинхронних генераторів [3, 4], так і зниженням вартості силової напівпровідникової техніки [5], що обумовило загальне зниження собівартості таких систем. При цьому їх введення в експлуатацію, як правило, потребує проведення передексплуатаційних випробувань, що включають у себе отримання дослідних моментних характеристик машини [6, 7].

**Формулювання проблеми.** Низька ефективність існуючих засобів експериментального визначення моментних характеристик двигунів може бути пояснена передусім обмеженими можливостями використовуваного типового методу вимірювання, що полягає у наступному: ротор двигуна загальмовується, і на статор обмотки подається номінальна напруга, що призводить до швидкого нагрівання останнього протягом короткого проміжку часу (приблизно 10 секунд). Таким чином можливо провести лише одне вимірювання моменту і напруги живлення, поки температура обмотки змінюється від кімнатної до номінальної. Після цього двигун охолоджується протягом кількох годин та встановлюється нове значення напруги живлення. Зазначений вимірювальний експеримент типово повторюється 18-20 разів [3, 8]. Отже, загальна трудомісткість контролю залежності пускового моменту від кутового положення ротора приблизно становить 36 нормо-годин для одного двигуна.

Тож виходячи з сказаного є очевидним, що розробка експрес методів визначення моментних характеристик асинхронних двигунів, що дозволили б підвищити продуктивність таких вимірювань, є актуальною науково-прикладною задачею.

**Аналіз шляхів розв'язання задачі.** Для вирішення поставленої задачі пропонується здійснювати прискорений контроль залежності пускового моменту від напруги живлення у проміжок часу, коли температура обмоток статора змінюється від кімнатної до розрахункової робочої.

Суть запропонованого методу полягає в тому, що ротор двигуна загальмовується за допомогою вимірювального важеля і сенсора зусилля. При цьому до обмоток його статора підводиться напруга живлення від трифазного регульованого джерела змінної напруги, а контроль залежності пускового моменту від напруги живлення здійснюється шляхом вимірювання поточних значень моменту і напруги живлення у проміжок часу, коли температура обмоток статора змінюється від кімнатної до номінальної. Структурна схема експериментальної установки, що реалізує запропонований метод, наведена на рис. 1.

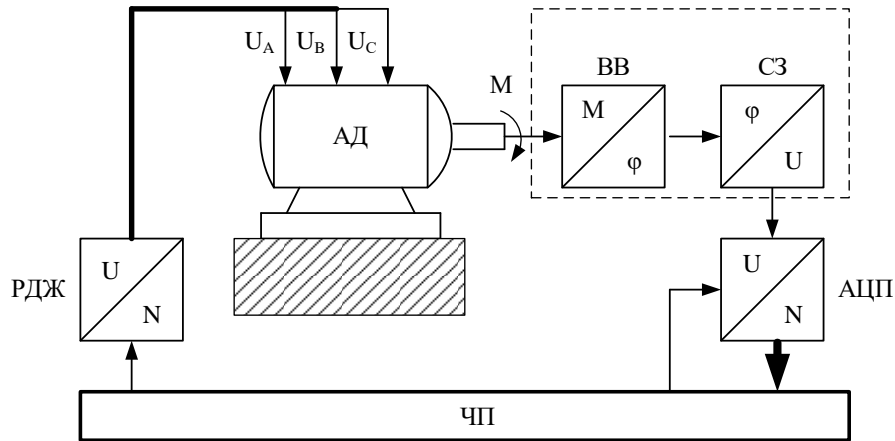


Рисунок 1 – Структурна схема експериментальної установки

При цьому асинхронний двигун (АД) жорстко закріплюється на основі. Обмотки статора АД заживлюються від регульованого трифазного джерела живлення (РДЖ), управління яким здійснюється з керуючого виходу числового перетворювача (ЧП). Ротор АД загальмовано вимірювальним важелем (ВВ) через сенсор зусилля (СЗ), які у сукупності формують аналогову частину вимірювального каналу. Аналоговий вихід СЗ з'єднано з входом аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Керуваний вхід та вихід АЦП з'єднаний з ЧП, під керуванням якого здійснюється вимірювання пускового моменту і зміна напруги живлення на обмотках АД.

Метод прискореного контролю здійснюють за таким алгоритмом. Задається початкова напруга живлення на обмотки статора АД. В результаті цього на роторі АД створюється обертальний момент, що за допомогою вимірювального важеля діє на сенсор зусилля. Після завершення перехідного процесу СЗ перетворює кут скручування ВВ  $\varphi$  в напругу  $U$ , а на виході АЦП формується двійковий код  $N$ , який записується в ЧП. Після цього на виході РДЖ встановлюється нове значення напруги живлення і виконуються вимірювання відповідного їй пускового моменту. Тривалість даного вимірювального експерименту не повинна перевищити проміжку часу, за який температура обмоток статора змінюється від кімнатної до номінальної.

Як показують результати аналізу літературних джерел, швидкодія запропонованого вимірювального каналу в основному лімітуватиметься сталою часу механічної частини вимірювального каналу [9, 10], що обґрунтовує необхідність дослідження закону протікання зазначеного перехідного процесу.

Як зазначалося вище, РДЖ повинно забезпечити формування на обмотки статора АД ступінчасто-змінну напругу. В такому випадку диференційне рівняння, що описує фізичні процеси в вимірювальному каналі під час зміни вхідного сигналу можна представити у наступному вигляді

$$\varphi''(t) + 2\varepsilon\omega\varphi'(t) + \omega^2\varphi(t) = \begin{cases} b_0, & 0 < t < t_1, \\ b_1, & t_1 < t < t_2, \\ b_2, & t_2 < t < t_3, \\ \dots & \dots \dots \\ b_k, & t_k < t < t_{k+1}, \\ b_{n-1}, & t_{n-1} < t < t_n, \end{cases} \quad (1)$$

де  $b_i = M_{ki}/J$  – сталі моменту, що визначаються зміною напруги живлення;

$\omega = \sqrt{k/J}$  – власна частота вільних (недемпфованих) коливань вимірювального важеля перетворювача;

$\varepsilon = P/(2\sqrt{JC})$  – ступінь заспокоєння вільних коливань;

де  $J$  – момент інерції ротора АД;

$P$  – коефіцієнт заспокоєння;

$k$  – жорсткість сенсора зусилля;

$\varphi$  – кут скручування вимірювального важеля.

При цьому значення пускового моменту може бути визначено, як:

$$M_{ki} = K \cdot U_i^2 + \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (2)$$

де  $a, b$  – коефіцієнти змінної складової моменту АД;

$K$  – коефіцієнт пропорційності.

Для знаходження частинних розв'язків виразу (1), що задовольняють нульові початкові умови  $\varphi(0)=\varphi'(0)=0$ , доцільним є застосування операторного методу розрахунку [11]. Запишемо праву частину рівняння (1) за допомогою одиничної функції:

$$f(t) = \begin{cases} b_0, & 0 < t < t_1, \\ b_1, & t_1 < t < t_2, \\ b_2, & t_2 < t < t_3, \\ \dots = \eta(t) \cdot b_0 - \eta(t-t_1) \cdot (b_0 + \eta(t-t_1) \cdot b_1 - \eta(t-t_2) \cdot b_1 + \\ + \eta(t-t_2) \cdot b_2 + \dots - \eta(t-t_k) \cdot b_{k-1} + \eta(t-t_k) \cdot b_k - \eta(t-t_{k+1}) \cdot b_k + \dots, \\ b_k, & t_k < t < t_{k+1}, \\ b_{n-1}, & t_{n-1} < t < t_n, \end{cases} \quad (3)$$

тоді

$$f(t) = \eta(t) \cdot b_0 + \sum_{k=1}^{n-1} \eta(t-t_k) \cdot (b_k - b_{k-1}). \quad (4)$$

Користуючись теоремою запізнення з (4) отримаємо:

$$L(f(t)) = \frac{b_0}{s} + \frac{1}{s} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} e^{-st_k} (b_k - b_{k-1}), \quad (5)$$

де  $s$  – стала Лапласа.

Оскільки початкові умови нульові, то для зображення функції буде справедлива наступна рівність:

$$s^2\Phi(s) + 2\varepsilon\omega s\Phi(s) + \omega^2\Phi(s) = \frac{b_0}{s} + \frac{1}{s} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} e^{-pt_k} (b_k - b_{k-1}), \quad (6)$$

Здійснивши перетворення якої маємо:

$$\Phi(s) = \frac{1}{s^2 + 2\varepsilon\omega s + \omega^2} \cdot \left[ \frac{b_0}{s} + \frac{1}{s} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} e^{-pt_k} (b_k - b_{k-1}) \right]. \quad (7)$$

Для знаходження оригінала  $\varphi(t)$  скористаємося положеннями теореми розкладання, у відповідності до якої [11, 12]:

$$\frac{b_0}{s(s^2 + 2\varepsilon\omega s + \omega^2)} = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2s + A_3}{(s + \varepsilon\omega)^2 + \omega^2(1 - \varepsilon^2)}, \quad (8)$$

де  $A_1, A_2, A_3$  – невідомі сталі, які знаходять методом невизначених коефіцієнтів.

В результаті отримаємо [11, 13]:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{\omega^2}, \\ A_2 = -\frac{1}{\omega^2}, \\ A_3 = -\frac{2\varepsilon}{\omega}. \end{cases} \quad (9)$$

Скориставшись таблицею елементарних перетворень Лапласа та властивостями Лаплас-перетворень, зокрема теоремою запізнення, отримаємо [14]:

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \frac{b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon\omega t} \left[ \cos(\omega\sqrt{1-\varepsilon^2}t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega\sqrt{1-\varepsilon^2}t) \right] \right\} \cdot \eta(t) + \\ & + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{b_k - b_{k-1}}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon\omega(t-t_k)} \cdot \left[ \cos(\omega\sqrt{1-\varepsilon^2}(t-t_k)) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega\sqrt{1-\varepsilon^2}(t-t_k)) \right] \right\} \cdot \eta(t-t_k) \end{aligned} \quad (10)$$



$$\varphi(t) = \begin{cases} \frac{b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega t} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) \right] \right\}, & 0 < t < t_1 \\ \frac{b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega t} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) \right] \right\} + \\ + \frac{b_1 - b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega(t-t_1)} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) \right] \right\}, & t_1 < t < t_2 \\ \frac{b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega t} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) \right] \right\} + \\ + \frac{b_1 - b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega(t-t_1)} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) \right] \right\} + \\ + \frac{b_2 - b_1}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega(t-t_2)} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_2)) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_2)) \right] \right\}, & t_2 < t < t_3 \\ \dots & \dots & \dots \end{cases} \quad (11)$$

Здійснивши перехід від параметра кут повороту  $\varphi(t)$  рухомої частини до параметра  $M(t)$  на виході сенсора зусилля, отримуємо:

$$M_k(t) = \begin{cases} \frac{Klg b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega t} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) \right] \right\}, & 0 < t < t_1 \\ \frac{Klg b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega t} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) \right] \right\} + \\ + Klg \frac{b_1 - b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega(t-t_1)} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) \right] \right\}, & t_1 < t < t_2 \\ \frac{Klg b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega t} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} t) \right] \right\} + \\ + Klg \frac{b_1 - b_0}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega(t-t_1)} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_1)) \right] \right\} + \\ + Klg \frac{b_2 - b_1}{\omega^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega(t-t_2)} \cdot \left[ \cos(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_2)) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\varepsilon^2} (t-t_2)) \right] \right\}, & t_2 < t < t_3 \\ \dots & \dots & \dots \end{cases} \quad (12)$$

При цьому коефіцієнти  $b$  можуть бути визначеними наступним чином:

$$b_0 = \frac{k \cdot U_0^2 + A}{J}, \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{k \cdot \left( U_0 + \sum_{i=1}^n h_i \right)^2 + A}{J}, \quad (14)$$

де  $U_0$  – початкова величина напруги, що подається з РДЖ;

$h$  – крок квантування, із величиною якого збільшується напруга живлення для отримання залежності  $M_h = f(U_h)$ .

Величина кроку квантування визначається

$$h = \frac{U_{K \max} - U_0}{n}, \quad (15)$$

де  $U_{K\max}$  – максимальне значення напруги живлення короткого замикання;

$n$  – кількість експериментальних точок, у яких здійснюється вимірювання пускового моменту.

Кількість експериментальних точок, у яких здійснюється вимірювання пускового моменту, може бути визначеною, як:

$$n = \frac{\tau_p}{t_*}, \quad (16)$$

де  $\tau_p$  – час проведення дослідження короткого замикання, на протязі якого його температура не перевищить розрахункового значення;

$t_*$  – тривалість перехідного процесу під час подачі напруги живлення на ОК.

А час нагрівання обмоток до номінальної температури визначатиметься, як [15]:

$$\tau_p = \frac{c \cdot m \cdot \left( \ln \left( \left( \frac{I_K}{I_H} \right)^2 \right) - \ln \left( \frac{I_K^2}{I_H^2} - 1 \right) \right)}{A_K (T_H - T_0)}, \quad (17)$$

де  $c$  – питома теплоємність обмоток статора;

$m$  – маса обмотки статора;

$T_H$  – номінальна температура обмотки статора;

$T_0$  – початкова температура обмотки статора;

$A_K$  – тепловіддача двигуна в режимі короткого замикання;

$I_K$  – середнє значення струму короткого замикання, що протікає у обмотках статора під час проведення експериментального дослідження;

$I_H$  – номінальний струм статора.

При цьому, враховуючи той факт, що при загальмованому роторі самообудов обмоток не відбувається, тепловіддача двигуна в режимі короткого замикання буде у декілька разів нижчою, у порівнянні з номінальним значенням [8, 16, 17]. В свою чергу, середнє значення струму короткого замикання обмоток статора, враховуючи, що діапазон зміни напруги живлення при отриманні моментних характеристик типово обертається у межах (0,8...1,0) від номінального значення [1, 3], може бути визначено наступним чином:

$$I_K = 0,9 \cdot \frac{I_H}{I_H}, \quad (18)$$

де  $I_H$  – номінальне значення пускового струму.

Результат моделювання часу нагрівання до номінальної температури обмотки статора від початкового значення цієї температури для параметрів асинхронного двигуна АР100L2 наведено на рис. 2.

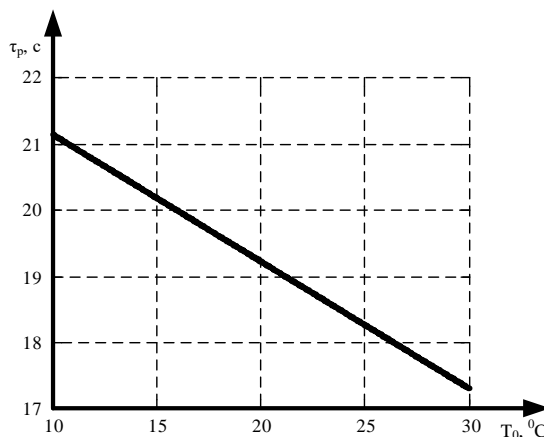


Рисунок 2 – Залежність часу нагрівання обмотки асинхронного двигуна АР100L2 від її початкової температури

В свою чергу тривалість механічного перехідного процесу аналогової частини вимірювального каналу механічного моменту може бути визначеною, як [1, 18]:

$$t_* = J \cdot \frac{2}{P} \ln \left( M_K \frac{g \cdot K1}{\delta \cdot k} \right), \quad (19)$$

$g$  – прискорення вільного падіння;

$\delta$  – нормоване значення похибки, що характеризує закінчення перехідного процесу у перетворювачі;

$K_1$  – коефіцієнт сенсора зусилля.

Результат моделювання тривалості перехідного процесу у вимірювальному перетворювачі з коефіцієнтом заспокоєння  $P=2$ , жорсткістю сенсора  $k=1$  кг/В, нормованому значенні похибки  $\delta=5\%$  та моменту інерції системи, що дорівнює моменту інерції ротора асинхронного двигуна АР100L2, від пускового моменту наведено на рис. 3

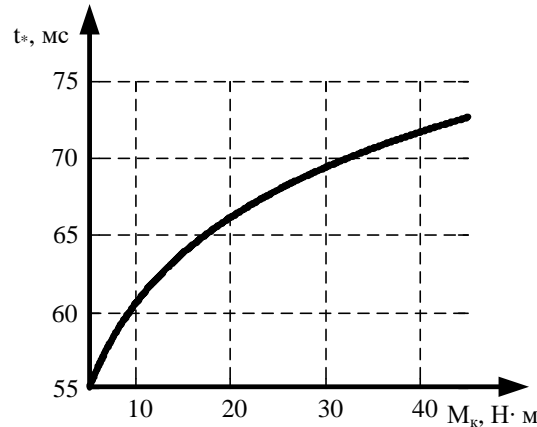


Рисунок 3 – Залежність тривалості перехідного процесу у вимірювальному перетворювачі від пускового моменту

Як випливає з аналізу результатів, наведених на рис. 2 та рис. 3, інерційні властивості дослідної установки з типовими параметрами у повній мірі дозволяють здійснити повну серію (18-20) вимірювань пускового моменту АД для різних значень напруги статорного кола.

**Висновки.** Запропоновано та обґрунтовано доцільність використання експрес методу експериментального визначення функціональної залежності пускового моменту асинхронного двигуна від напруги живлення, що дозволяє здійснити повну серію вимірювань пускового моменту АД для різних значень напруги статорного кола за проміжок часу, що не перевищує час нагрівання обмотки статора від його початкової до номінальної температури. Розроблено конструкцію дослідної установки.

Показано, що швидкодія вимірювального каналу запропонованої дослідної установки в основному визначається інерційними властивостями аналогової частини вимірювального каналу механічного моменту.

Отримано математичну модель нагрівання статорних обмоток асинхронного двигуна у режимі короткого замикання, що дозволяє визначити граничну тривалість вимірювального експерименту.

Отримано динамічну математичну модель аналогової частини вимірювального каналу пускового моменту, що дозволяє визначити тривалість її механічного перехідного процесу, як лімітуючого чинника швидкодії вимірювального каналу механічного моменту.

Шляхом комп'ютерного моделювання було доведено коректність застосування запропонованого методу експериментального визначення функціональної залежності пускового моменту асинхронного двигуна від напруги живлення. Зокрема продемонстровано, що фактична тривалість механічного перехідного процесу вимірювального каналу пускового моменту типової електричної машини, а отже і обмежена нею швидкодія вимірювального каналу, дозволяє здійснити серію з 18-20 вимірювань, за проміжок часу, що не перевищує час нагрівання обмотки статора від початкової до номінальної температури.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Khrebtova O., and Zachepa, N. Analysis of electric drive systems for performance of driving and starting under load. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 4, 18–25, 2020. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-4-2>
2. Yaropud V., Aliiev E., Mazur I., and Burlaka S. Simulating the Process of Operation of Vortex Layer Electromagnetic Apparatus with Ferromagnetic Working Elements. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 99. Issue. 9, 64–71, 2023. <https://doi.org/10.15199/48.2023.09.11>
3. Xie F., Qiu C., and Qian Z. Optimal Speed–Torque Control of Asynchronous Motor for Electric Cars in the Field-Weakening Region Based on Voltage Vector Optimization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 37, Issue 1, 830–842, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3097906>
4. Hraniak V. F. Using discrete wavelet analysis of vibration signal for detection of electrical machines' defects. *Revue Roumaine des Sciences Techniques-Série Électrotechnique et Énergétique*, Vol. 68, Issue 4, 357–362, 2023. <https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2023.4.6>
5. Haikova T., Puzyr R., Savelov D., Dragobetsky V., Argat R., and Sivak R. The Research of the Morphology and Mechanical Characteristics of Electric Bimetallic Contacts. *Proceedings of the 25th IEEE International Conference*

- on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP, 9240847, 579–582, 2020. [https://doi.org/978-1-7281-9935-1/20/\\$31.00](https://doi.org/978-1-7281-9935-1/20/$31.00)
6. Savchenko, I., Shapoval, A., and Kuziev, I. Modeling of high module power sources systems safety processes. *Materials Science Forum*, 1052, 399–404, 2022. <https://doi.org/10.4028/p-24y9ae>
  7. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Bogachuk V. V., Vedmitskiy Y. G. at all. Phase noncontact method and procedure for measurement of axial displacement of electric machine's rotor. *Proceedings of SPIE-International society for Optical Engineering*. Vol. 10808, № 1080866, 7 p., 2018 <https://doi.org/10.1117/12.2501611>
  8. Sheremet O., and Sadovoi O. Regression analysis of the performance of asynchronous electric motors on the basis of support vector machine (SVM). *Computational problems of electrical engineering*, Vol. 8, No. 2, 79–87, 2018.
  9. Sziki G. A., Szanto A., Kiss J., Juhasz G. at all. (2022) Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen. *Applied Sciences* 10095. Vol.12, № 19, 18 p., 2022. <https://doi.org/10.3390/app121910095>
  10. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Kucheruk V. Y., and Khassenov A. Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machines. *Bulletin of the University of Karaganda–Physics*, Vol. 1, Issue 89., 72–80, 2018.
  11. Mykhalevych V., Dobraniuk Y., Matviichuk V., Kraievskiy V. at all. A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 1, 64–70, 2023. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3496>
  12. Gundebommu S. L., Matvijchuk V., Rubanenko O., and Branitskiy Y. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 38, Part 5, 3337–3344, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.243>
  13. Vedmitskiy Y. G., Kukharchuk V. V., Hraniak V. F., Vishtak I. V. at all. *Newton binomial in the generalized Cauchy problem as exemplified by electrical systems. Proceedings of SPIE-International society for Optical Engineering*. Vol. 10808, № 1080801, 7 p., 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2501600>
  14. Blumenfeld D. *Operations Research Calculations Handbook (Operations Research Series) 2nd Edition*. Florida: CRC Press. 2017, 256 p.
  15. Stadnii O. Y., Vasyura A. S., and Doroschenkov G. D. Emergency situations in the operation of asynchronous motors, measures and means of their prevention. *Optical and electronic devices and components in laser and energy technologies*. Vol.37, № 1, 109–115, 2019. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-37-1-109-115>
  16. Kaletnik H., Yaropud V., Polievoda Y., Solona O. at all. Study of the process of active-ventilation drying of legume grasses' fractional processing products. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 100, № 2, 156–163, 2024. <https://doi.org/10.15199/48.2024.02.32>
  17. Honcharuk I., Kupchuk I., Yaropud V., Kravets R. at all. Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 98, № 9, 14–20, 2022. <https://doi.org/10.15199/48.2022.09.03>
  18. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., and Aliiev E. (2022) The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, Vol. 33, № 1, 199–208, 2022. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.945>

#### REFERENCES

1. Khrebtova O., and Zachepa, N. Analysis of electric drive systems for performance of driving and starting under load. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 4, 18–25, 2020. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-4-2>
2. Yaropud V., Aliiev E., Mazur I., and Burlaka S. Simulating the Process of Operation of Vortex Layer Electromagnetic Apparatus with Ferromagnetic Working Elements. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 99. Issue. 9, 64–71, 2023. <https://doi.org/10.15199/48.2023.09.11>
3. Xie F., Qiu C., and Qian Z. Optimal Speed–Torque Control of Asynchronous Motor for Electric Cars in the Field-Weakening Region Based on Voltage Vector Optimization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 37, Issue 1, 830–842, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3097906>
4. Hraniak V. F. Using discrete wavelet analysis of vibration signal for detection of electrical machines' defects. *Revue Roumaine des Sciences Techniques-Série Électrotechnique et Énergétique*, Vol. 68, Issue 4, 357–362, 2023. <https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2023.4.6>
5. Haikova T., Puzyr R., Savelov D., Dragobetsky V., Argat R., and Sivak R. The Research of the Morphology and Mechanical Characteristics of Electric Bimetallic Contacts. *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP*, 9240847, 579–582, 2020. [https://doi.org/978-1-7281-9935-1/20/\\$31.00](https://doi.org/978-1-7281-9935-1/20/$31.00)
6. Savchenko, I., Shapoval, A., and Kuziev, I. Modeling of high module power sources systems safety processes. *Materials Science Forum*, 1052, 399–404, 2022. <https://doi.org/10.4028/p-24y9ae>

7. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Bogachuk V. V., Vedmitskiy Y. G. et al. Phase noncontact method and procedure for measurement of axial displacement of electric machine's rotor. *Proceedings of SPIE-International society for Optical Engineering*. Vol. 10808, № 1080866, 7 p., 2018 <https://doi.org/10.1117/12.2501611>
8. Sheremet O., and Sadovoi O. Regression analysis of the performance of asynchronous electric motors on the basis of support vector machine (SVM). *Computational problems of electrical engineering*, Vol. 8, No. 2, 79–87, 2018.
9. Sziki G. A., Szanto A., Kiss J., Juhasz G. et al. (2022) Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen. *Applied Sciences* 10095. Vol.12, № 19, 18 p., 2022. <https://doi.org/10.3390/app121910095>
10. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Kucheruk V. Y., and Khassenov A. Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machines. *Bulletin of the University of Karaganda–Physics*, Vol. 1, Issue 89., 72-80, 2018.
11. Mykhalevych V., Dobraniuk Y., Matviichuk V., Kraievskiy V. et al. A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 1, 64–70, 2023. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3496>
12. Gundebommu S. L., Matvijchuk V., Rubanenko O., and Branitskiy Y. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 38, Part 5, 3337-3344, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.243>
13. Vedmitskiy Y. G., Kukharchuk V. V., Hraniak V. F., Vishtak I. V. et al. *Newton binomial in the generalized Cauchy problem as exemplified by electrical systems. Proceedings of SPIE-International society for Optical Engineering*. Vol. 10808, № 1080801, 7 p., 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2501600>
14. Blumenfeld D. *Operations Research Calculations Handbook (Operations Research Series) 2nd Edition*. Florida: CRC Press. 2017, 256 p.
15. Stadnii O. Y., Vasyura A. S., and Doroschenkov G. D. Emergency situations in the operation of asynchronous motors, measures and means of their prevention. *Optical and electronic devices and components in laser and energy technologies*. Vol.37, № 1, 109–115, 2019. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-37-1-109-115>
16. Kaletnik H., Yaropud V., Polievoda Y., Solona O. et al. Study of the process of active-ventilation drying of legume grasses' fractional processing products. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 100, № 2, 156–163, 2024. <https://doi.org/10.15199/48.2024.02.32>
17. Honcharuk I., Kupchuk I., Yaropud V., Kravets R. et al. Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 98, № 9, 14–20, 2022. <https://doi.org/10.15199/48.2022.09.03>
18. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., and Aliiev E. (2022) The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, Vol. 33, № 1, 199–208, 2022. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.945>

V.F. HRANIAK

Vinnitsia National Agrarian University

**Accelerated experimental method of detection the functional dependence between the starting torque of an induction motor and the stator voltage.** The features of obtaining the experimental dependence of the starting torque of an induction motor on the supply voltage of the stator have been studied. It is shown that when determining this dependence, the motor operates in short-circuit mode, which leads to rapid overheating of its windings.

An accelerated experimental method for determining the functional dependence of the starting torque on the supply voltage has been proposed and justified. This approach allows for a complete series of measurements of the starting torque at different values of stator circuit voltage within a time frame that does not exceed the heating period of the windings from the initial to the rated temperature. A design for the experimental setup has been developed.

Mathematical models describing the thermal behavior of the stator windings and the mechanical movement of the analog part of the starting torque measurement channel have been developed, confirming the validity of the proposed method for determining the functional dependence of the starting torque of an induction motor on the stator circuit voltage.

**Key words:** *induction motor, starting torque, overheating, supply voltage, measurement.*