

УДК 621.3.01  
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).26](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).26)

## CALCULATION OF THE OPERATING CHARACTERISTICS OF AN INDUCTION ELECTRIC DRIVE IN START-BRAKING MODES

### РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ У ПУСКОГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ

**Dmytro V. Kostenko**

dmi.kostenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1164-3066

**Valentin I. Lokarev**

valentyn.lokariev@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8776-3286

**Serhii L. Trybulkevych**

sergiy.trybulkevich@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-5783-6616

**Hanna S. Hrudinina**

hanna.hrudinina@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8298-9251

**Oleksandr P. Klochkov**

sotah87@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6426-3374

**Heorhii V. Babkin**

gvbabkin@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6303-0993

**Д. В. Костенко,**

канд. техн. наук, доцент

**В. І. Локарев,**

докт. техн. наук, професор

**С. Л. Трибулькевич**

**Г. С. Грудініна,**

канд. техн. наук

**О. П. Клочков,**

канд. техн. наук

**Г. В. Бабкін,**

канд. техн. наук, доцент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

**Abstract.** There are numerous groups of electromechanisms, the operation of which in braking modes is no less important than in the driving mode. For example, in lifting electromechanisms, the efficiency of the braking modes of the electric drive directly affects not only productivity, but also economy and safety. The electric braking mode is inevitable in a reversible electric drive, but is not necessary in a drive with precise stopping. Electric braking is often used to dampen the speed before stopping before applying mechanical brakes. Of the braking modes, counter-switching is most often used. But there is no formula that would satisfy the requirements of simplicity and the required accuracy. The formulas of Kloss and Shubenko cannot be taken into account in this case, because they describe this mode with unacceptable errors. The problem of improving the calculation apparatus for the operating characteristics of an asynchronous electric drive in starting and braking modes has been solved. Mathematical dependencies for calculating electromechanical and mechanical characteristics in the starting mode, as well as in the braking modes of recuperation and counter-switching, which eliminate the shortcomings of traditional formulas, are considered.

**Purpose.** The purpose of the work is to reduce the complexity and increase the accuracy of calculating the working processes of an asynchronous electric drive in all areas of the operating characteristics, focusing on the starting and braking modes of the engine. The task is to improve the dependencies for calculating the operating characteristics of asynchronous electric drives in all main modes of operation of an asynchronous motor, including starting and braking modes, aimed at eliminating the shortcomings of traditional formulas is relevant.

**Method.** To achieve the set goal, research and transformation of the well-known formulas of Kloss and Shubenko were carried out, relative units were applied. The function of the calculated load is performed by the so-called basic component (the base, underlined from below), which, in addition to the physical load, also takes into account the critical moment of the engine.

**Scientific novelty.** The simplified method of calculating the operating characteristics of an asynchronous motor has been extended to the braking modes of regenerative braking and reverse switching. The effectiveness and required accuracy of the calculation are confirmed by the given calculation examples.

*Practical significance.* The proposed dependencies, which correspond to the form of the described characteristics, are distinguished by simplicity and uniformity, which contributes to reducing the complexity of the calculation.

**Key words:** asynchronous electric drive; mechanical characteristic; electromechanical characteristic; recuperation; reverse switching; complexity; accuracy.

**Анотація.** Існують численні групи електромеханізмів, робота яких у гальмівних режимах не менш важлива, ніж у руховому. Наприклад, у вантажопідйомних електромеханізмів ефективність гальмівних режимів електроприводу безпосередньо позначається як на продуктивності, а й у економічності і безпеки. Режим електричного гальмування неминучий у реверсивному електроприводі є необ'ємним у приводі з точним зупиненням. Електричне гальмування часто використовують для гасіння швидкості перед зупинкою до накладання механічних гальм. З гальмівних режимів найчастіше використовують противоключення. Але формули, яка б задовольняла вимогам простоти і необхідної точності, немає. Формули Клосса і Шубенка у разі неможливо взяти до уваги, тому що вони описують цей режим із неприпустимими похибками. Розв'язано завдання вдосконалення розрахункового апарату робочих характеристик асинхронного електроприводу у пускогальмівних режимах. Розглянуто математичні залежності для розрахунку електромеханічної та механічної характеристики у режимі пуску, а також у гальмівних режимах рекуперації та противоключення, що усувають недоліки традиційних формул. **Мета.** Метою роботи є зниження трудомісткості та підвищення точності розрахунку робочих процесів асинхронного електроприводу на всіх ділянках робочих характеристик, акцентуючи увагу на пускогальмівних режимах роботи двигуна. Завданням є вдосконалення залежностей для розрахунку робочих характеристик асинхронних електроприводів у всіх основних режимах роботи асинхронного двигуна, включаючи і пускогальмівні режими, спрямованої на усунення недоліків традиційних формул є актуальним.

**Методика.** Для отримання поставленої мети виконані дослідження і перетворення відомих формул Клосса і Шубенка, застосовані відносні одиниці. Функцію розрахункового навантаження виконує так звана базова складова (база, що підкреслюється низу), яка, крім фізичного навантаження враховує і критичний момент двигуна.

**Наукова новизна.** Спрощений спосіб розрахунку робочих характеристик асинхронного двигуна був розширений на гальмівні режими рекуперативного гальмування і противоключення. Ефективність та необхідна точність розрахунку підтверджується наведеними прикладами розрахунку.

**Практична значимість.** Запропоновані залежності, які відповідають формі описуваних характеристик, відрізняються простотою та однаковістю, що сприяє зниженню трудомісткості розрахунку.

**Ключові слова:** асинхронний електропривод; механічна характеристика; електромеханічна характеристика; рекуперація; противоключення; трудомісткість; точність.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У народному господарстві країни експлуатуються численні групи електромеханізмів, робота яких у гальмівних режимах не менш важлива, ніж у руховому. Наприклад, у вантажопідйомних електромеханізмів ефективність гальмівних режимів електроприводу безпосередньо позначається як на продуктивності, а й у економічності і безпеки. Режим електричного гальмування неминучий у реверсивному електроприводі є необ'ємним у приводі з точним зупиненням. Електричне гальмування часто використовують для гасіння швидкості перед зупинкою до накладання механічних гальм. Це дозволяють зменшувати знос дорогих елементів (гальмівних стрічок та колодок) механічних гальмівних пристроїв. У судових умовах шляхом використання режиму рекуперації при опусканні якорів та інших вантажів на великі глибини домагатися суттєвої економії енергії. Про важливість для будь-якого приводу пускового режиму годі й казати, – без нього неможливий вихід двигуна на робочий режим. З гальмівних режимів найчастіше використовують противоключення. Але формули, які б задовольняли вимогам простоти і необхідної точності, немає. Формули Клосса

і Шубенка у разі неможливо взяти до уваги, т.к. описують цей режим із неприпустимими похибками. Завдання вдосконалення залежностей для розрахунку робочих характеристик асинхронних електроприводів у всіх основних режимах роботи асинхронного двигуна, включаючи і пускогальмівні режими, спрямованої на усунення недоліків традиційних формул є актуальним.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомо, що формули Клосса та Шубенка, коректно описуючи робочі ділянки механічної та електромеханічної характеристик рухового режиму, неприпустимо спотворюють ділянки пуску та противоключення. Для пускової ділянки механічної характеристики існує формула, запропонована К.А. Чекуновим [4], до розрахунку електромеханічної характеристики аналогічної формули немає. У [2] та [3] отримані формули для розрахунку обох робочих характеристик на всіх ділянках. З їхньою допомогою можна вести розрахунок робочих характеристик і в пускогальмівних режимах. Але ці формули засновані на несистемних величинах, допустимих тимчасово, що відповідає загальним цілям, поставленим у цій роботі.

### МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є зниження трудомісткості та підвищення точності розрахунку робочих процесів асинхронного електроприводу на всіх ділянках робочих характеристик, акцентуючи увагу на пускогальмівних режимах роботи двигуна.

### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Нижче наведені формули для розрахунку робочих характеристик асинхронних електроприводів, які в порівнянні з традиційними формулами характеризуються такими особливостями:

1. Всі величини виражені у відносних одиницях, базовими яких є їх номінальні значення. «тимчасово допустимі» не використовуються.

2. Несистемні величини ( $S$ ,  $n$ ), віднесені до «тимчасово допустимих» не використовуються.

3. Залежно для розрахунку ЕМХ та МХ мають однакову структуру та форму у вигляді двочлена. Перший член є початкове значення описуваної величини за відсутності навантаження, а другий, – її збільшення під впливом навантаження.

4. Функцію розрахункового навантаження виконує так звана базова складова (база, що підкреслюється низу), яка, крім фізичного навантаження  $m_c$  враховує і критичний момент двигуна.

5. Обидві характеристики та їх описи поділяються на дві частини – докритичну (ДКЧ) і посткритичну (ПКЧ).

Бази ЕМХ описуються формулою  $m_{i\mp} = m_{k-} + m_c$ , де  $m_c = \sqrt{m_k^2 - m_c^2}$ , яка в ДКЧ використовується зі знаком «-», а в ПКЧ зі знаком «+» При описі баз МХ застосовується ця ж форма, але з дільником  $m_c$ :

$$m_{v\mp} = \frac{(m_{k-}^2 - m_c^2)^{0.5}}{m_c}.$$

Основи різних показників та його частин пов'язані між собою співвідношеннями:  $m_{i-} + m_{i+} = 2m_k$ ,

$$m_{v-} + m_{v+} = \frac{2m_k}{m_c}, \quad m_{v-} = \frac{m_{i-}}{m_c},$$

$$m_{v+} = \frac{m_{i+}}{m_c}.$$

Умовні позначення і скорочення.

1. Відносні швидкості:

$$v = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad v_c = \frac{\omega_c}{\omega_n}, \quad v_n = \frac{\omega_n}{\omega_n} = 1,$$

$$v_k = \frac{\omega_k}{\omega_n}, \quad v_n = \frac{\omega_n}{\omega_n},$$

– відповідно: поточна, синхронна, номінальна, критична, пускова.

Моменти опору (абсолютні):  $M_n$  – номінальний,  $M_c$  – поточний,  $M_k$  – критичний,  $M_n$  – пусковий.

2. Відносні моменти опору

$$m_c = \frac{M_c}{M_n}, m_n = \frac{M_n}{M_n}, m_k = \frac{M_k}{M_n}, m_n = \frac{M_n}{M_n}, -$$

поточний, номінальний, критичний, пусковий.

3. Відносні струми:

$$i = \frac{I}{I_n}, i_0 = \frac{I_0}{I_n}, i_n = \frac{I_n}{I_n} = 1, i_k = \frac{I_k}{I_n}, i_n = \frac{I_n}{I_n} -$$

вільного ходу, номінальний, критичний, пусковий.

### Механічна характеристика

на докритичній частині характеристики (ДКЧ)

$v > v_k$ :

$$v = v_c - P_v m_v^-, \quad (1)$$

$$\text{де } P_v = (v_v - 1) / \underline{m}_n^-, \quad \underline{m}_v^- = (m_k - \underline{m}_c) / m_c,$$

$$\underline{m}_i^- = m_k^2 - \sqrt{m_k^2 - 1}, \quad \underline{m}_c = \sqrt{m_k^2 - m_c^2}$$

на посткритичній частині характеристики (ПКЧ)

$v < v_k$ :

$$v = v_b - P_v \underline{m}_v^+, \quad (2)$$

$$\text{де } v_b = P_v \underline{m}_n^+, \quad P_v = v_k / (\underline{m}_n^+ - 1),$$

$$\underline{m}_n^+ = \left( m_k + \sqrt{m_k^2 + m_n^2} \right) / m_n,$$

$$\underline{m}_v^+ = (m_k + m_c) / m_c.$$

### Електромеханічна характеристика

на докритичній частині характеристики  $i < i_k$ :

$$i^2 = i_0^2 + P_i \underline{m}_i^-, \quad (3)$$

$$\text{де } P_i = (1 - i_0^2) / \underline{m}_n^-, \quad \underline{m}_i^- = m_k - \underline{m}_c,$$

на після критичної частині характеристики  $i > i_k$ ,

$$i^2 = i_b^2 + P_i \underline{m}_i^+, \quad (4)$$

$$\text{де } i_b^2 = i_k^2 - P_i m_k, \quad P_i = (i_n^2 - i_k^2) / \sqrt{m_k^2 - m_n^2},$$

$$i_k^2 = i_0^2 + P_i m_k.$$

### РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ $v(m)$ ДВИГУНА У ГАЛЬМОВОМУ РЕЖИМІ РЕКУПЕРАЦІЇ

Розрахунок механічної характеристики в гальмівному режимі рекуперації розглянемо на прикладі електродвигуна 4A250M8 [1] з наступними технічними даними:  $v_c = 1,014$ ,  $S_k = 0,08$ ,  $m_k = 2,0$ ,  $m_n = 1,2$ ,  $\underline{m}_n^- = 0,27$ .

Ділянка гальмівного режиму рекуперації відноситься до докритичної частини характеристики. Тому для розрахунку слід використовувати формулу (1) з урахуванням умов переходу характеристики з першого квадранта в другий та зміни величини критичного моменту

$$\nu = \nu_c + P_{\nu} \underline{m}_{\nu}^{-}$$

Визначимо постійні величини у виразі (1):

$$\nu_c = 1,014,$$

$$P_{\nu} = (\nu_c - 1) / \underline{m}_n = 0,014 / 0,27 = 0,052,$$

$$\underline{m}_n = m_k - \sqrt{m_k^2 - 1} = 2 - \sqrt{4 - 1} = 0,27.$$

Знак перед другим доданком у виразі (1) змінено на протилежний у зв'язку зі зміною знака тс. Критичний момент у генераторному режимі ткг для двигунів з нормальним ковзанням може бути визначений згідно з відношенням [4]

$$m_{ке} / m_{к\partial} = (1 + S_k) / (1 - S_k).$$

Генераторний критичний момент двигуна

$$\begin{aligned} m_{ке} / m_{к\partial} &= (1 + S_k) / (1 - S_k) = \\ &= 2(1 + 0,08) / (1 - 0,08) = 2,4. \end{aligned}$$

Після підстановки в розрахункову формулу постійних величин матимемо:

$$\nu = 1,014 + 0,052 \underline{m}_{\nu}^{-}$$

Базові складові  $\underline{m}_{\nu}^{-}$  визначаються за формулою

$$\underline{m}_{\nu}^{-} = \left( m_k - \sqrt{m_k^2 - m_c^2} \right) / m_c$$

Результати розрахунку МХ за останньою формулою поміщені у таблиці 1.

Графік механічної характеристики двигуна для режиму рекуперації, побудований з таблиці 1, показаний на рис. 1.

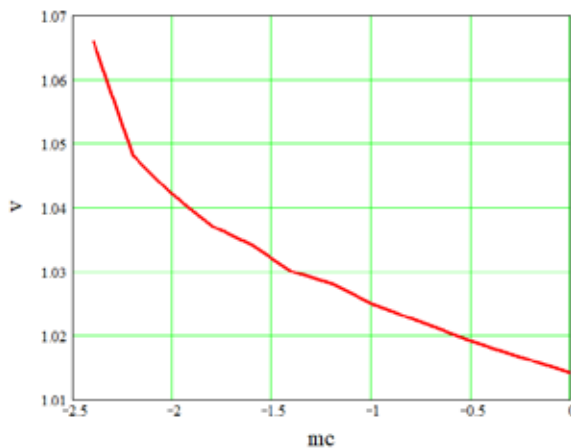


Рис. 1. Графік механічної характеристики двигуна на ділянці рекуперації

## РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ $\nu(m)$ ДВИГУНА В РЕЖИМАХ ПУСКУ ТА ПРОТИВМИКАННЯ

Оскільки ділянки режимів пуску та противмикання знаходяться в посткритичній частині характеристики  $\nu(m)$ , для його розрахунку використовуємо залежність (2):

$$\nu = \nu_b - \Pi_{\nu} \underline{m}_{\nu}^{+},$$

$$\text{де } \nu_b = \Pi_{\nu} \underline{m}_n^{+}, \quad \Pi_{\nu} = \nu_k / (\underline{m}_n^{+} - 1).$$

$$\underline{m}_{\nu}^{+} = \left( m_k + \sqrt{m_k^2 - m_c^2} \right) / m_c,$$

$$\underline{m}_n^{+} = \left( m_k + \sqrt{m_k^2 - m_n^2} \right) / m_n.$$

Для електродвигуна 4A250M8 значення постійних величин:  $\nu_b = 1,44$ ,  $\Pi = 0,48$ ,  $\nu_k = 0,96$ ,  $\underline{m}_n^{+} = 3,0$ . Після підстановки у вихідний вираз постійних величин отримаємо розрахункову залежність у вигляді:

$$\nu = 1,44 - 0,48 \underline{m}_{\nu}^{+}$$

Результати покрокового розрахунку згідно з отриманим виразом наведено в таблиці 2.

Підсумкові дані в таблиці 2 відповідають двом ділянкам, противключення (від  $m_c = 0,5$  до  $m_c = 1,2$ ) та пусковому (від  $m_c = 1,2$  до  $m_c = 2,0$ ). Їхні графіки як частини повної механічної характеристики двигуна зображено на рис. 2.

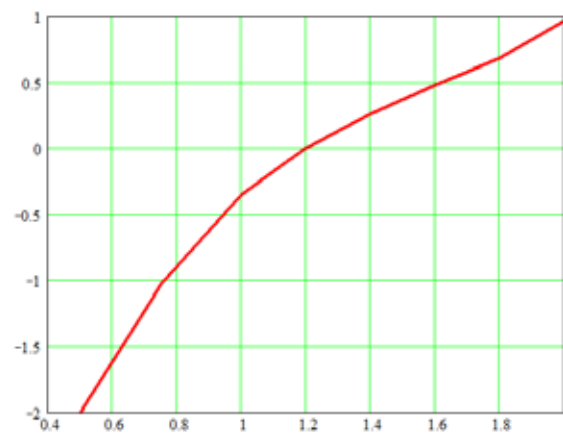


Рис. 2. Графік механічної характеристики двигуна на ділянці противключення

Таблиця 1. Розрахунок механічної характеристики двигуна для рекуперації

|                                   |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $-m_c$                            | 0,0   | 0,5   | 0,75  | 1,0   | 1,2   | 1,4  | 1,6   | 1,8   | 2,0   | 2,2   | 2,4   |
| $m_c^2$                           | 0,0   | 0,25  | 0,56  | 1,0   | 1,44  | 1,96 | 2,56  | 3,24  | 4,0   | 4,84  | 5,76  |
| $\underline{m}_{\nu}^{-}$         | 0,0   | 0,10  | 0,20  | 0,22  | 0,27  | 0,31 | 0,38  | 0,45  | 0,54  | 0,65  | 1,0   |
| $P_{\nu} \underline{m}_{\nu}^{-}$ | 0,0   | 0,005 | 0,01  | 0,011 | 0,016 | 0,02 | 0,02  | 0,023 | 0,028 | 0,034 | 0,052 |
| $\nu$                             | 1,014 | 1,019 | 1,022 | 1,025 | 1,028 | 1,03 | 1,034 | 1,037 | 1,042 | 1,048 | 1,066 |

**Таблиця 2.** Розрахунок механічної характеристики в режимах пуску та противовмикання

|                           |          |      |       |       |      |      |      |      |      |
|---------------------------|----------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| $m_c$                     | 0,0      | 0,5  | 0,75  | 1,0   | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0  |
| $\underline{m}_v^+$       | $\infty$ | 7,88 | 5,13  | 3,73  | 3,0  | 2,45 | 2,0  | 1,59 | 1,0  |
| $\Pi_v \underline{m}_v^+$ | $\infty$ | 3,79 | 2,47  | 1,79  | 1,44 | 1,18 | 0,96 | 0,76 | 0,48 |
| $\nu$                     |          | -2,0 | -1,03 | -0,35 | 0,0  | 0,26 | 0,48 | 0,68 | 0,96 |

### РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА У РЕЖИМІ РЕКУПЕРАЦІЇ

Електромеханічна характеристика на ділянці рекуперації є продовженням робочої ділянки на другий квадрант. Для його опису може бути використана формула

$$i^2 = i_0^2 + P_i \underline{m}_i^- ,$$

$$\text{де } P_i = (1 - i_0^2) / \underline{m}_n^- .$$

При переході характеристики у другий квадрант знак другого доданку не змінюється через зміну знаків обох співмножників,  $m_c$  і  $m_i$ . Критичний момент стає рівним  $m_{кр} = 2,4$ , корінь набуває значення  $m_{н-} = 0,22$ , а співмножник  $P_i$  стає рівним  $P_i = 0,88/0,22 = 4,0$ . Після підстановки цих величин у вихідний вираз отримаємо розрахункову залежність  $i^2 = 0,12 + 4,0 \underline{m}_i^-$ . Результати розрахунку, виконаного згідно з цією формулою, представлені нижче у табличній формі.

Графік електромеханічної характеристики в режимі рекуперації, як частина загальної характеристики, може бути побудований по таблиці 3.

### РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ У РЕЖИМАХ ПУСКУ І ПРОТИВОВКЛЮЧЕННЯ

Ділянки режимів пуску та противмикання ЕМХ розташовані в посткритичній частині та для їх розрахунку слід використовувати формулу (4)

$$i^2 = i_b^2 + \Pi_i \underline{m}_i^+ ,$$

$$\text{де } i_b^2 = i_k^2 - \Pi_i m_k , \quad \Pi_i = (i_n^2 - i_k^2) / \sqrt{m_k^2 - m_n^2}$$

Дані двигуна:  $m_k = 2,0$ ,  $m_n = 1,2$ ,  $i_n = 6,0$ ,  $i_k = 2,6$ . Отримано розрахунком:  $\Pi_i = 18,28$ ,  $i_b^2 = 6,76 - 18,28 \cdot 2 = -29,8$ . Після підстановки у розрахункову формулу постійних величин отримаємо:  $i^2 = -29,8 + 18,28 \underline{m}_i^+$ . Розрахунок характеристики, виконаний відповідно до останньої формули, наведено в таблиці 4.

Дані діапазону навантажень  $m_c$  від 0,0 до 1,2 відносяться до гальмівної ділянки противовключення, а від 1,2 до 2,0, – до пускової.

Графік електромеханічної характеристики в режимах пуску і противключення, як частина загальної характеристики, може бути побудований по таблиці 4.

**Таблиця 3.** Розрахунок електромеханічної характеристики у режимі рекуперації

|                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $-m_c$                  | 0,0  | 0,5  | 0,75 | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0  | 2,2  | 2,4  |
| $m_c^2$                 | 0,25 | 0,56 | 1,0  | 1,44 | 1,96 | 2,56 | 3,84 | 4,0  | 4,84 | 5,76 |      |
| $\underline{m}_i^-$     | 0,0  | 0,05 | 0,12 | 0,22 | 0,32 | 0,45 | 0,61 | 0,81 | 1,07 | 1,44 | 2,4  |
| $P_i \underline{m}_i^-$ | 0,0  | 0,20 | 0,48 | 0,88 | 1,28 | 1,80 | 2,44 | 3,24 | 4,28 | 5,76 | 9,84 |
| $i^2$                   | 0,12 | 0,32 | 0,60 | 1,00 | 1,40 | 1,92 | 2,56 | 3,36 | 4,40 | 5,88 | 9,72 |
| $i$                     | 0,34 | 0,57 | 0,77 | 1,00 | 1,18 | 1,39 | 1,60 | 1,83 | 2,10 | 2,42 | 3,11 |

**Таблиця 4.** Розрахунок ЕМХ у режимах пуску та противовключення

|                           |       |      |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $m_c$                     | 0,0   | 0,5  | 0,75  | 1,0   | 1,2   | 1,4   | 1,6   | 1,8   | 2,0   |
| $m_c^2$                   | 0,0   | 0,25 | 0,56  | 1,0   | 1,44  | 1,96  | 2,56  | 3,24  | 4,0   |
| $\underline{m}_i^+$       | 4,0   | 3,94 | 3,85  | 3,73  | 3,6   | 3,43  | 3,20  | 2,87  | 2,0   |
| $\Pi_i \underline{m}_i^+$ | 73,12 | 72,0 | 70,38 | 68,18 | 65,80 | 62,70 | 68,50 | 52,46 | 36,58 |
| $i^2$                     | 43,32 | 42,2 | 40,58 | 38,38 | 36,0  | 32,90 | 28,70 | 22,66 | 6,76  |
| $i$                       | 6,57  | 6,5  | 6,37  | 6,2   | 6,0   | 5,74  | 5,36  | 4,76  | 2,6   |

## ВИСНОВКИ

1. На прикладі розрахунку робочих характеристик реального двигуна показана ефективність і достатня точність нової форми математичного опису робочих характеристик асинхронного електроприводу в гальмівних режимах.

2. У розглянутих гальмівних режимах використовуються ті ж корені та базові складові, що і в руховому

режимі. Вони точно витримуються параметри двигуна, задані каталогом.

3. З розв'язанням задачі вдосконалення розрахункового апарату робочих характеристик у гальмівних режимах отримано можливість будувати безперервні механічні та електромеханічні характеристики, що включають усі можливі режими двигуна, що для традиційних формул недоступно.

## REFERENCES

- [1] Kravchik, A.E., Shlaf, M.M., Afonin, V.I., Sobolenskaya, E.A. (1982). Asynkhronni dyvuhuny seriyi 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. M.: Energoizdat. [in Ukrainian]
- [2] Lokarev, V.I. (2015). Netradytsiyna forma matematychnoho opysu robochykh kharakterystyk asynkhronnoho elektropryvodu. [Non-traditional form of mathematical description of the operating characteristics of an asynchronous electric drive]. *Sudnobuduvannya ta mors'ka infrastruktura*. – Shipbuilding and marine infrastructure, № 02. Pp. 108–118. [in Ukrainian]
- [3] Lokarev, V.I., Volyanska, Ya.B. (2017). Rozrakhunok robochykh pokaznykiv asynkhronnoho elektropryvodu. [Calculation of operating parameters of an asynchronous electric drive]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK – Collection of scientific works of the National University of Ukraine*, № 2. Pp. 57–62. [in Ukrainian]
- [4] Chekunov, K.A. (1982). Teoriya sudnovoho elektropryvodu [Theory of ship electric drive]. L.: Sudnobuduvannya. [in Ukrainian]
- [5] Gnatov, A.V., Argun, Shch.V., Trunova, I.S. (2016). Teoriya elektropryvodu transportnykh zasobiv [Theory of electric drive of vehicles]. Kharkiv: Kharkivs'kyi natsional'nyi avtomobil'no-dorozhnyi universytet. [in Ukrainian]
- [6] Kostinyuk, L.D., Moroz, V.I., Paranchuk, Ya.S. (2004). Modelyuvannya elektropryvodiv [Modeling of electric drives]. L'viv: Vydavnytstvo Natsional'noho Universytetu "L'vivs'ka politekhnika". [in Ukrainian]

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кравчик, А.Е., Шлаф, М.М., Афонін, В.І., Соболенська, Е.А. (1982). Асинхронні двигуни серії 4А. М.: Енергоіздат. 504 с.
- [2] Локарев, В.І. (2015). Нетрадиційна форма математичного опису робочих характеристик асинхронного електроприводу. *Суднобудування та морська інфраструктура*. № 02, Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. С. 108–118.
- [3] Локарев, В.І., Волянська, Я.Б. (2017). Розрахунок робочих показників асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць НУК*. № 2, Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. С. 57–62.
- [4] Чекунов К.А. (1982). Теорія суднового електроприводу. Л.: Суднобудування. 332 с.
- [5] А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, І.С. Трунова. (2016). Теорія електроприводу транспортних засобів. Х.: ХНАДУ. 292 с.
- [6] Костинюк, Л.Д., Мороз, В.І., Паранчук, Я.С. (2004). Моделювання електроприводів: Навч. посібник. Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка». 404 с.

© Костенко Д. В., Локарев В. І., Трибулькевич С. Л., Грудініна Г. С., Клочков О. П., Бабкін Г. В.  
Дата надходження статті до редакції: 07.05.2025  
Дата затвердження статті до друку: 24.05.2025