



Valentyn
I. Lokarev
Локарев
Валентин
Иванович

УДК 681.5
Л73

UNCONVENTIONAL MATHEMATICAL FORMULATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

НЕТРАДИЦИОННАЯ ФОРМА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

DOI 10.15589/SMI. 2015.02.03

Valentyn I. Lokarev

В. И. Локарев, д-р. техн. наук, проф.
valentyn.lokariev@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0001-8776-3286

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаєв

Abstract. A new mathematical formulation of the performance characteristics of asynchronous electric drives, mechanical $\omega(M)$ and electromechanical $I(M)$ ones, has been considered. They are widely used in engineering practice and educational process of higher educational institutions when designing and studying industrial electromechanisms. The article aim is to increase the amount of computational tools for the formulation of motor electromagnetic properties, enhance their form and structure in order to improve the accuracy and performance of the computational process. The method of performing the work is a divergence from the conventional mathematical formulation of the performance characteristics of asynchronous electric drives, the search for new more efficient forms in terms of the objectives. The new mathematical formulation of the performance characteristics of asynchronous electric drives is obtained by bringing the known formulas of Kloss and Shubenko to the relative values, replacing the slip with a system value and performing a series of mathematical transformations. At this, the total number of formulas for calculating the performance characteristics doubled. Two groups of formulas were developed: with one independent variable $v(m)$ and $i(m)$ and with two variables $v(m, i)$ and $i(m, v)$. The first group of formulas is independent and self-sufficient. Mechanical $v(m)$ and electromechanical $i(m)$ characteristics are based on the motor passport data. The formulas for their calculation contain repetitive elements, do not require to involve other characteristics, that determines an effective and productive calculation. The mechanical characteristics can be constructed using the second group of formulas, if electromechanical one is known and vice versa. All the obtained formulas differ from the traditional ones by the uniformity of structure and form and close interaction, so any mechanical characteristics can be constructed by electromechanical and vice versa. As well as the original traditional formulas, the new formulas perfectly describe the working areas of characteristics, but can make significant errors in the starting ranges. In order to eliminate this disadvantage, the correction of the formulas was performed. The basic formulas are used when calculating the working areas, and the corrected ones — at starting ranges. The results of the work can be used in engineering practice and educational process of higher educational institutions when designing and studying industrial electromechanisms.

Keywords: mathematical formulation; asynchronous electric drive; performance characteristics.

Анотація. На відміну від традиційного опису робочих характеристик асинхронного електропривода $v(m)$ та $i(m)$ запропонований представлено в трьох видах: як функції з одною незалежною змінною, як функції з двома незалежними змінними, у вигляді залежності, що коригує похибки. Змінено й форму залежностей, вона стала однаковою для різних характеристик, більш прозорою з огляду на її фізичний зміст.

Ключові слова: математичний опис; асинхронний електропривод; робочі характеристики.

Аннотация. В отличие от традиционного описания предложенное математическое описание рабочих характеристик асинхронного электропривода $v(m)$ и $i(m)$ представлено в трех видах: как функции с одной независимой переменной, как функции с двумя независимыми переменными, в виде зависимости, корректирующей погрешности. Видоизменена и форма зависимостей, она стала одинаковой для разных характеристик, более прозрачной с точки зрения физического смысла.

Ключевые слова: математическое описание; асинхронный электропривод; рабочие характеристики.

References

- [1] Bazakutsa V.A. *Mezhdunarodnaya sistema edinits* [International System of Units]. Kharkov, Izdatelstvo kharkovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1963. 128 p.
- [2] Geyler L.B. *Elektroprivod v tyazhelom mashinostroenii* [Electric drive in heavy engineering]. Moscow, Mashiv Publ., 1958. 587 p.
- [3] Lokarev V.I., Malyuk D.V. Rabochie kharakteristiki asinkhronnykh elektrodvigately i ikh korrektsiya pri raschete protsessov sudovykh elektropriwodov [Performance characteristics of asynchronous motors and their correction when calculating the marine electric drives processes]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2013, no. 3, pp. 69–73.
- [4] Lokarev V.I. *Energoberezhenie v elektroprihode* [Energy saving in an electric drive]. Nikolaev, NUK Publ., 2009. 195 p.
- [5] Chekunov K.A. *Teoriya sudovogo elektropriroda* [Theory of marine electric drive]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 336 p.

Problem statement. In practice of the calculation of operation processes of the marine electromechanisms the performance characteristics of the electric drive, i. e. mechanical and electromechanical ones, are of great importance. The correct description of the transient processes and stable modes depends largely on their accuracy in various operation modes. Finally, the estimation accuracy of the engine state, completeness of its active materials use, performance and service life also depends on it.

The values which have been defined as the time ones in the development of the international system of units in the 60-ies of the last century are still used at the description of the dependencies for the construction of the performance characteristics [1]. More efficient and convenient calculations with the relative calculations are seldom made. It complicates the calculations of operation processes in the electric drive, reduces their quality and performance.

Along with the replacement of obsolete units and the transition to relative values the problem arises. This problem is in the modification of the form of dependence for calculating the performance characteristics of the asynchronous electric drive, achieving their uniformity, improving their accuracy and calculation performance.

Latest research and publications analysis. The replacement of non-system units with the system ones [1] was made in [3] as well as the transition to relative values was performed. The form of the performance characteristics remained unchanged and, therefore, the above-mentioned discrepancies are preserved.

THE ARTICLE AIM is the improvement of the performance when calculating the operation processes of marine asynchronous electric drives by ordering the dependencies used.

Basic material. At the determination of the mechanical $\omega(M)$ and electromechanical $I(M)$ characteristics we consider such parameters as relative moments, — critical moment $m_k = M_k/M_n$ and starting moment $m_n = M_n/M_n$, and currents — starting current $i_n = I_n/I_n$ and free-running current $i_0 = I_0/I_n$.

Постановка проблемы. В практике расчета рабочих процессов судовых электромеханизмов важное место занимают рабочие характеристики электропривода — механическая и электромеханическая. От их точности в различных режимах работы зависит в значительной мере правильность описания переходных процессов и установившихся режимов и, в конечном итоге, точность оценки состояния двигателя, полноты использования его активных материалов, производительности и ресурса.

При описании зависимостей для построения рабочих характеристик до настоящего времени используются величины, которые при разработке международной системы единиц еще в 60-е годы прошлого столетия были определены как временные [1]. Редко принимаются более производительные и удобные расчеты с относительными вычислениями, что усложняет расчеты рабочих процессов в электроприводе, снижает их качество и производительность.

Возникает задача — наряду с заменой устаревших единиц и переходом к относительным величинам — видоизменить форму зависимости для расчета рабочих характеристик асинхронного электропривода, добившись единообразия их формы, повышения точности и производительности расчета.

Анализ последних исследований и публикаций. В [3] выполнена замена несистемных единиц системными [1], а также осуществлен переход к относительным величинам. Форма же рабочих характеристик осталась неизменной и, следовательно, отмеченные выше несоответствия сохранились.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — повышение производительности при расчёте рабочих процессов судовых асинхронных электроприводов путём упорядочения используемых при этом зависимостей.

Изложение основного материала. При определении механической $\omega(M)$ и электромеханической $I(M)$ характеристик учитываются такие показатели, как относительные моменты, — критический $m_k = M_k/M_n$ и пусковой $m_n = M_n/M_n$, токи — пусковой $i_n = I_n/I_n$ и свободного хода $i_0 = I_0/I_n$.

The type of the mechanical characteristics of the asynchronous motor is strongly dependent on the type of its rotor. For rotors with deep slot or double squirrel cage there are not any simple or convenient analytical expressions for practice.

If the motor has a short-circuited rotor with a normal squirrel cage or a phase-wound rotor with slip rings the mechanical characteristics has a simple mathematical description in the form of the Kloss formula:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (1)$$

and electromechanical characteristics are traditionally represented by the Shubenko formula:

$$I = \sqrt{I_0^2 + (I_H^2 - I_0^2) \cdot \frac{S \cdot M}{S_H \cdot M_H}}. \quad (2)$$

Let us start to convert the Kloss formula from the transfer of the absolute moments M and M_k to the relative form $m = M/M_H$ and $m_k = M_k/M_H$ and the replacement of slips S and S_k with the relative velocities $v = \omega/\omega_H$ and $v_k = \omega_k/\omega_H$:

$$m = \frac{2m_k}{\frac{v_c - v}{v_c - v_k} + \frac{v_c - v_k}{v_c - v}}, \quad (3)$$

where $v_c = \omega_c/\omega_H$ is a synchronous velocity p. u., M_H, ω_H are the nominal values of the moment, Nm and the angular velocity, s^{-1} .

After simple transformations we obtain:

$$m = \frac{2m_k}{\frac{v_c - v}{v_c - v_k} + \frac{1}{\frac{v_c - v}{v_c - v_k}}} = \frac{2m_k \cdot \frac{v_c - v}{v_c - v_k}}{\left(\frac{v_c - v}{v_c - v_k}\right)^2 + 1}, \quad (4)$$

or

$$\left(\frac{v_c - v}{v_c - v_k}\right)^2 - \frac{2m_k}{m} \cdot \frac{v_c - v}{v_c - v_k} + 1 = 0. \quad (5)$$

The solution of equation (5) can be submitted in the form of:

$$\frac{v_c - v}{v_c - v_k} = \frac{m_k}{m} \pm \sqrt{\left(\frac{m_k}{m}\right)^2 - 1}, \quad (6)$$

which implies an expression for the mechanical characteristics $v(m)$:

$$v = v_c - (v_c - v_k) \cdot \left(\frac{m_k}{m} - \sqrt{\left(\frac{m_k}{m}\right)^2 - 1}\right). \quad (7)$$

The formula (7) can be written for the nominal mode ($v = 1, m = 1$) and expressed relatively to the velocities difference ($v_c - v_k$):

Вид механической характеристики асинхронного двигателя сильно зависит от типа его ротора. Для роторов с глубоким пазом или двойной беличьей клеткой не существует сколько-нибудь простых или удобных для практики аналитических выражений.

Если двигатель имеет короткозамкнутый ротор с нормальной беличьей клеткой или фазный ротор с контактными кольцами механическая характеристика имеет простое математическое описание в виде формулы Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (1)$$

а электромеханическая характеристика традиционно представлена формулой Шубенко:

$$I = \sqrt{I_0^2 + (I_H^2 - I_0^2) \cdot \frac{S \cdot M}{S_H \cdot M_H}}. \quad (2)$$

Преобразование формулы Клосса начнем с перевода абсолютных моментов M и M_k в относительную форму $m = M/M_H$ и $m_k = M_k/M_H$ и замены скольжений S и S_k относительными скоростями $v = \omega/\omega_H$ и $v_k = \omega_k/\omega_H$:

$$m = \frac{2m_k}{\frac{v_c - v}{v_c - v_k} + \frac{v_c - v_k}{v_c - v}}, \quad (3)$$

где $v_c = \omega_c/\omega_H$ — синхронная скорость, о. е.; M_H, ω_H — номинальные значения момента, Нм и угловой скорости, s^{-1} .

После несложных преобразований получим:

$$m = \frac{2m_k}{\frac{v_c - v}{v_c - v_k} + \frac{1}{\frac{v_c - v}{v_c - v_k}}} = \frac{2m_k \cdot \frac{v_c - v}{v_c - v_k}}{\left(\frac{v_c - v}{v_c - v_k}\right)^2 + 1}, \quad (4)$$

или

$$\left(\frac{v_c - v}{v_c - v_k}\right)^2 - \frac{2m_k}{m} \cdot \frac{v_c - v}{v_c - v_k} + 1 = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) можно подать в виде:

$$\frac{v_c - v}{v_c - v_k} = \frac{m_k}{m} \pm \sqrt{\left(\frac{m_k}{m}\right)^2 - 1}, \quad (6)$$

откуда следует выражение для механической характеристики $v(m)$:

$$v = v_c - (v_c - v_k) \cdot \left(\frac{m_k}{m} - \sqrt{\left(\frac{m_k}{m}\right)^2 - 1}\right). \quad (7)$$

Формулу (7) запишем для номинального режима ($v = 1, m = 1$) и выразим ее относительно разности скоростей ($v_c - v_k$):

$$v_c - v_k = \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}}. \quad (8)$$

$$v_c - v_k = \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}} \quad (8)$$

Applying (8) to (7), we obtain an equation of the mechanical characteristics of the asynchronous motor $v(m)$ in a way, which is slightly different comparing with (7):

$$v = v_c - \frac{v_c - 1}{(m_k - \sqrt{m_k^2 - 1})} \cdot \left(\frac{m_k}{m} - \sqrt{\left(\frac{m_k}{m}\right)^2 - 1} \right) \quad (9)$$

We can make up a formula from (8) for determining the critical velocity v_k :

$$v_k = v_c - \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}} \quad (10)$$

To simplify the expressions, adding the index «с» to the moment m , let us introduce the following notation:

$$\frac{m_k}{m_c} = m_{kc}, \quad \frac{m_k}{m_{\Pi}} = m_{k\Pi}, \quad m_k - \sqrt{m_k^2 - 1} = \bar{m}_k, \\ m_{kc} - \sqrt{m_{kc}^2 - 1} = \bar{m}_{kc-}, \quad m_{kc} + \sqrt{m_{kc}^2 - 1} = \bar{m}_{kc+}, \\ m_{k\Pi} + \sqrt{m_{k\Pi}^2 - 1} = \bar{m}_{k\Pi+}, \quad \frac{1}{\bar{m}_k} = \bar{m}_k^{-1}.$$

For m_{kc} the sign «-» corresponds to $v > v_k$, the sign «+» — to $v < v_k$ in the formulas.

In view of the above mentioned notations the dependences (7), (9) and (10) can be written as follows:

$$v = v_c - (v_c - v_k) \cdot \bar{m}_{kc-}, \quad (11)$$

$$v = v_c - \frac{v_c - 1}{\bar{m}_k} \cdot \bar{m}_{kc}, \quad (12)$$

$$v_k = v_c - \frac{v_c - 1}{\bar{m}_k}. \quad (13)$$

On the way to simplify the forms we can go ahead and replace the division operation with the multiplication of reciprocals, which simplifies the calculation procedure:

$$v = v_c - (v_c - 1) \cdot \bar{m}_{kc} \cdot \bar{m}_k^{-1}, \quad (14)$$

$$v_k = v_c - (v_c - 1) \cdot \bar{m}_k^{-1}. \quad (15)$$

Then let us check of the formulas (7) and (9) for accuracy of the determination of the values v and m with its help in the significant points of mechanical characteristics:

1. Free running. When we apply the values of the moment $m_c = 0$ to (7) and (9) the expression in the right parentheses will possess the value $(\infty - \infty = 0)$. Consequently, the subtrahend of the right part will be equal to zero, and the result will be $v = v_c$. Such correspondence between m_c and v should be at the free running.

2. Nominal mode. The speed value, equal to one, must conform to the velocity value, equal to one. In (9)

Подставим (8) в (7), получим уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя $v(m)$ в несколько другом по сравнению с (7) виде:

$$v = v_c - \frac{v_c - 1}{(m_k - \sqrt{m_k^2 - 1})} \cdot \left(\frac{m_k}{m} - \sqrt{\left(\frac{m_k}{m}\right)^2 - 1} \right) \quad (9)$$

Из (8) составим формулу для определения критической скорости v_k :

$$v_k = v_c - \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}} \quad (10)$$

С целью упрощения записей, приписав моменту m индекс «с», введем такие обозначения:

$$\frac{m_k}{m_c} = m_{kc}, \quad \frac{m_k}{m_{\Pi}} = m_{k\Pi}, \quad m_k - \sqrt{m_k^2 - 1} = \bar{m}_k, \\ m_{kc} - \sqrt{m_{kc}^2 - 1} = \bar{m}_{kc-}, \quad m_{kc} + \sqrt{m_{kc}^2 - 1} = \bar{m}_{kc+}, \\ m_{k\Pi} + \sqrt{m_{k\Pi}^2 - 1} = \bar{m}_{k\Pi+}, \quad \frac{1}{\bar{m}_k} = \bar{m}_k^{-1}.$$

В формулах для m_{kc} знак «-» соответствует $v > v_k$, знак «+» — $v < v_k$.

С учётом указанных выше обозначений зависимости (7), (9) и (10) запишутся так:

$$v = v_c - (v_c - v_k) \cdot \bar{m}_{kc-}, \quad (11)$$

$$v = v_c - \frac{v_c - 1}{\bar{m}_k} \cdot \bar{m}_{kc}, \quad (12)$$

$$v_k = v_c - \frac{v_c - 1}{\bar{m}_k}. \quad (13)$$

По пути упрощения формы можно пойти дальше и заменить операции деления операцией умножения обратных величин, что облегчает процедуру вычисления:

$$v = v_c - (v_c - 1) \cdot \bar{m}_{kc} \cdot \bar{m}_k^{-1}, \quad (14)$$

$$v_k = v_c - (v_c - 1) \cdot \bar{m}_k^{-1}. \quad (15)$$

Выполним теперь проверку формул (7) и (9) на точность определения с её помощью величин v и m в показательных точках механической характеристики:

1. Свободный ход. При подстановке в (7) и (9) значения момента $m_c = 0$ выражение в правых скобках примет значение $(\infty - \infty = 0)$. Следовательно, вычитаемое правой части станет равным нулю и результат будет $v = v_c$. Такое соответствие между m_c и v и должно быть при свободном ходе.

2. Номинальный режим. Значению момента, равному единице, должно соответствовать значение скорости, также равное единице. В (9) при значении $m_c = 1$ оба выражения в скобках становятся равными и взаимно уничтожаются. В результате $v = 1$, что свидетельствует о точном воспроизведении формулой условий номинального режима. А (7) с помощью (8) сводится к (9).

at the value $m_c = 1$ both expressions in parentheses become equal and cancel each other out. As a result, $v = 1$, indicating the accurate performance of nominal mode conditions by the formula. And (7) with the help of (8) is reduced to (9).

3. Critical mode. When we apply the values $m = m_k$, the expression in parentheses becomes equal to 1. Now we have the following equation:

$$v_k = v_c - \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}}$$

The resulting expression coincides with the expression (10). However we cannot check the correctness of the formula (9) — the parameter v_k (or S_k) is not given in the catalogs.

4. Starting mode. With proper description of starting mode by formula (9) the velocity value $v = 0$ should coincide with the substitution $m = m_n$. Let us check this condition:

$$v = v_c - \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}} \cdot \left(\frac{m_k}{m_n} + \sqrt{\left(\frac{m_k}{m_n}\right)^2 - 1} \right)$$

It is necessary to satisfy the equality to meet it:

$$v_c = \frac{v_c - 1}{\bar{m}_k} \cdot \bar{m}_{кп+}$$

or

$$\frac{\bar{m}_{кп+}}{\bar{m}_k} = \frac{v_c}{v_c - 1}$$

For instance, for the motor 4A132S6 $m_k = 2.5$; $m_n = 2.0$; $v_c = 1.034$; $m_{кп} = 1.2$; $\bar{m}_{кп+} = 2.0$; $\bar{m}_k = 0.21$; $\bar{m}_{кп+} / \bar{m}_k = 2.0 / 0.21 = 9.52$; $v_c / (v_c - 1) = 1.034 / 0.034 = 30.4$; $9.52 \neq 30.4$.

Starting conditions ($m = m_n$; $v_n = 0$) are not performed with the formula (9). It should be corrected.

The formula (9) is valid for the construction of the mechanical characteristics only in the working area in a range of velocities from $v = v_c$ to $v = v_k$.

Let us present the formula (7) as follows to give it the ability to accurately describe the starting range of the mechanical characteristics of the motor:

$$v = k_v [v_c - k_m (v_c - v_k) \bar{m}_{кк+}], \quad (16)$$

where

$$k_m = \frac{v_c}{(v_c - v_k) \bar{m}_{кп+}}, \quad (17)$$

$$k_v = \frac{v_k}{v_c - (v_c - v_k) k_m}. \quad (18)$$

are the adjusting coefficients.

The formula (16), corresponding to the critical mode, is ($\bar{m}_{кк+} = \bar{m}_{кп+} = 1$)

$$v_k = k_v [v_c - k_m (v_c - v_k) \bar{m}_{кк+}]. \quad (19)$$

The formula (16), corresponding to the start, is given as follows:

3. Критический режим. При подстановке значения $m = m_k$ выражение в правых скобках становится равной единице. Остается:

$$v_k = v_c - \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}}$$

Полученное выражение совпадает с выражением (10). Но проверить правильность формулы (9) не представляется возможным — параметр v_k (или S_k) в каталогах не дается.

4. Пусковой режим. При правильном описании пускового режима формулой (9) подстановке $m = m_n$ должно соответствовать значение скорости $v = 0$. Проверим это условие:

$$v = v_c - \frac{v_c - 1}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}} \cdot \left(\frac{m_k}{m_n} + \sqrt{\left(\frac{m_k}{m_n}\right)^2 - 1} \right)$$

Для его удовлетворения необходимо выполнение равенства:

$$v_c = \frac{v_c - 1}{\bar{m}_k} \cdot \bar{m}_{кп+}$$

или

$$\frac{\bar{m}_{кп+}}{\bar{m}_k} = \frac{v_c}{v_c - 1}$$

Например, для двигателя 4A132S6 $m_k = 2.5$; $m_n = 2.0$; $v_c = 1.034$; $m_{кп} = 1.2$; $\bar{m}_{кп+} = 2.0$; $\bar{m}_k = 0.21$; $\bar{m}_{кп+} / \bar{m}_k = 2.0 / 0.21 = 9.52$; $v_c / (v_c - 1) = 1.034 / 0.034 = 30.4$; $9.52 \neq 30.4$.

Условия пуска ($m = m_n$; $v_n = 0$) формулой (9) не выполняются. Её следует корректировать.

Формула (9) действительна для построения механической характеристики только на рабочем участке в интервале скоростей от $v = v_c$ до $v = v_k$.

Формулу (7) для придания ей способности точно описывать пусковой участок механической характеристики двигателя представим в следующем виде:

$$v = k_v [v_c - k_m (v_c - v_k) \bar{m}_{кк+}], \quad (16)$$

где k_m, k_v — корректирующие коэффициенты, равные:

$$k_m = \frac{v_c}{(v_c - v_k) \bar{m}_{кп+}}, \quad (17)$$

$$k_v = \frac{v_k}{v_c - (v_c - v_k) k_m}. \quad (18)$$

Формула (16), соответствующая критическому режиму, — ($\bar{m}_{кк+} = \bar{m}_{кп+} = 1$)

$$v_k = k_v [v_c - k_m (v_c - v_k) \bar{m}_{кк+}]. \quad (19)$$

Формула (16), соответствующая пуску, представлена таким образом:

$$v_n = k_v [v_c - k_m (v_c - v_n) \bar{m}_{кп+}]. \quad (20)$$

Проверим формулы (19) и (20) для электродвигателя 4A132S8, коэффициенты которого (17) и (18) равны следующим значениям:

$$v_n = k_v[v_c - k_m(v_c - v_n)\bar{m}_{кп+}]. \quad (20)$$

Let us check the formulas (19) and (20) for the motor 4A132S8, the coefficients of which (17) and (18) are equal to the following values:

$$k_m = \frac{v_c}{(v_c - v_k)\bar{m}_{кп+}} = \frac{1,034}{0,16 \cdot 2,0} = 3,19$$

$$k_v = \frac{v_k}{v_c - (v_c - v_k)k_m} = \frac{0,872}{1,034 \cdot 0,162 \cdot 3,19} = 1,69$$

$$v_k = 1,69(1,034 - 0,62 \cdot 3,19) = 0,87$$

$$v_n = 1,69(1,034 - 0,62 \cdot 3,19 \cdot 2) = 0.$$

As we can see, the formula (16) gives the exact velocity values at the extremes «к» and «п» of the starting range of the mechanical characteristics $v(m)$.

Let us modify the form of the dependence (16) in order to make its form more simple and convenient to use and apply the coefficients k_m (17) and k_v (18) to it. After that we have:

$$v = \frac{v_k(\bar{m}_{кп+} - \bar{m}_{кв+})}{\bar{m}_{кп+} - 1}, \quad (21)$$

expression, all the members of which are known from previous calculations.

If we supply the expression v_k from (13) to (21) as well, the form of dependence will become more complicated and close to other previously discussed formulas of the mechanical characteristics:

$$v = \left[v_c - \frac{(v_c - 1)}{m_k} \right] \frac{\bar{m}_{кп+} - \bar{m}_{кв+}}{(\bar{m}_{кп+} - 1)}. \quad (22)$$

Thus, we have several formulas to construct the starting range of the mechanical characteristics of the asynchronous electric drive, among which you can choose the most appropriate one.

Now let us turn to the formula describing the electromechanical characteristics of the asynchronous electric drive. Both parts of the formula (2) will be divided by the nominal current I_n , the ratio S/S_n will be replaced by the ratio $(v_c - v)/(v_c - v_n)$, and also we will take into account the fact that $v_n = 1$ and $M/M_n = m_c$.

We will obtain

$$i = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \frac{v_c - v}{v_c - 1}}. \quad (23)$$

The ratio $(v_c - v)/(v_c - 1)$ from (14) can be given as follows:

$$(v_c - v)/(v_c - 1) = (m_{кв} - \sqrt{m_{кв}^2 - 1}) / (m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}). \quad (24)$$

The formula (23) considering (24) will have the following form:

$$i = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \frac{m_{кв} - \sqrt{m_{кв}^2 - 1}}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}}},$$

or in a contracted form:

$$i = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \bar{m}_{кв-} \cdot \bar{m}_k^{-1}}. \quad (25)$$

$$k_m = \frac{v_c}{(v_c - v_k)\bar{m}_{кп+}} = \frac{1,034}{0,16 \cdot 2,0} = 3,19,$$

$$k_v = \frac{v_k}{v_c - (v_c - v_k)k_m} = \frac{0,872}{1,034 \cdot 0,162 \cdot 3,19} = 1,69,$$

$$v_k = 1,69(1,034 - 0,62 \cdot 3,19) = 0,87,$$

$$v_n = 1,69(1,034 - 0,62 \cdot 3,19 \cdot 2) = 0.$$

Как видим, формула (16) дает точные значения скорости в крайних точках «к» и «п» пускового участка механической характеристики $v(m)$.

Видоизменим форму зависимости (16) с целью придания ей более простого вида, удобного при пользовании, и подставим в неё коэффициенты k_m (17) и k_v (18). Будем иметь после этого:

$$v = \frac{v_k(\bar{m}_{кп+} - \bar{m}_{кв+})}{\bar{m}_{кп+} - 1}, \quad (21)$$

выражение, все члены которого известны из предыдущих расчётов.

Если подставить в (21) так же выражение v_k из (13), то форма зависимости усложнится и станет близкой к другим рассмотренным ранее формулам механической характеристики:

$$v = \left[v_c - \frac{(v_c - 1)}{m_k} \right] \frac{\bar{m}_{кп+} - \bar{m}_{кв+}}{(\bar{m}_{кп+} - 1)}. \quad (22)$$

Таким образом, имеем несколько формул для построения пускового участка механической характеристики асинхронного электропривода, из числа которых можно выбрать наиболее подходящую.

Теперь обратимся к формуле, описывающей электромеханическую характеристику асинхронного электропривода. Обе части формулы (2) разделим на номинальный ток I_n , отношение S/S_n заменим отношением $(v_c - v)/(v_c - v_n)$, а также учтем, что $v_n = 1$, а $M/M_n = m_c$.

Получим

$$i = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \frac{v_c - v}{v_c - 1}}. \quad (23)$$

Отношение $(v_c - v)/(v_c - 1)$ из (14) можно представить так:

$$(v_c - v)/(v_c - 1) = (m_{кв} - \sqrt{m_{кв}^2 - 1}) / (m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}). \quad (24)$$

Формула (23) с учётом (24) приобретает вид:

$$i = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \frac{m_{кв} - \sqrt{m_{кв}^2 - 1}}{m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}}},$$

или в свернутом виде:

$$i = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \bar{m}_{кв-} \cdot \bar{m}_k^{-1}}. \quad (25)$$

Проверим правильность описания формулой (25) различных режимов работы двигателя — свободный ход, номинальный, критический и пусковой.

1. Свободный ход. При подстановке $m_c = 0$ второе слагаемое выражения (25) обратится в нуль. Остаётся $i = i_0$, т.е. условие выполняется точно.

Let us check the correctness of the description of different modes of operation of the engine, i.e. free running, nominal, critical and starting mode, by the formula (25).

1. Free running. When we apply $m_c = 0$ the addend of the expression (25) will become 0. $i = i_0$ will remain, i.e. the condition is satisfied accurately.

2. Nominal mode. At $m_c = 1$ $\bar{m}_{кк-}$ becomes equal to $\bar{m}_к^{-1}$, multiplication of $\bar{m}_{кк-} \cdot \bar{m}_к^{-1}$ becomes equal to 1, the whole result also becomes equal to 1, that confirms the correctness of the formula (25) under nominal conditions.

3. Critical mode. At $m_c = m_к \bar{m}_{кк} = 1$ and the whole result will be as follows:

$$i_к = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_к}. \quad (26)$$

In the catalogs of data on the current in the critical mode $i_к$ is not given, so we have to use the calculated value.

4. Starting mode. It is difficult to check the accuracy of the formula (25) in its standard form in the starting mode. Let us do this on a specific example of the motor 4A132S8, applying the expression of the starting current i_n in terms of numbers:

$$i_n^2 = i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_n \cdot \bar{m}_{кк+}$$

The data for the motor: $i_0^2 = 0,51$; $\bar{m}_к^{-1} = 4,47$; $m_n = 2$; $\bar{m}_{кк+} = 2$.

After applying the numerical values we have:

$$i_n^2 = 0,51 + 0,49 \cdot 4,76 \cdot 2 \cdot 2 = 9,84, \quad i_n = 3,14.$$

Thus, the starting current calculated using the formula (25) is equal to 3.14, and its catalog value is $i_n = 5.5$. The starting current is determined with great accuracy. The formula (25) also needs to be corrected.

Представим зависимость тока в таком виде:

$$i^2 = k_i i_0^2 + k_n (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_c \cdot \bar{m}_{кк+}, \quad (27)$$

where k_i and k_n are the coefficients of correction.

The formula (27) is written for two modes, i.e. critical and starting one:

$$i^2 = k_i i_0^2 + k_n (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_к \cdot \bar{m}_{кк+},$$

$$i_n^2 = k_i i_0^2 + k_n (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_n \cdot \bar{m}_{кк+}.$$

We have a system of two equations with two unknowns. After solving it, we obtain the expression for calculating the coefficients k_i and k_n :

$$k_i = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(i_к^2 - \frac{(i_n^2 - i_к^2)}{\sqrt{m_к^2 - m_n^2}} \cdot m_к \right), \quad (28)$$

$$k_n = \frac{i_n^2 - i_к^2}{(1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot \sqrt{m_к^2 - m_n^2}}. \quad (29)$$

After applying (28) and (29) to (27) we will obtain:

$$i^2 = i_к^2 + \frac{i_n^2 - i_к^2}{\sqrt{m_к^2 - m_n^2}} \cdot \sqrt{m_к^2 - m_c^2}. \quad (30)$$

2. Номинальный режим. При $m_c = 1$ $\bar{m}_{кк-}$ становится равным $\bar{m}_к^{-1}$, произведение $\bar{m}_{кк-} \cdot \bar{m}_к^{-1}$ обращается в единицу, равным единице становится и общий результат, что подтверждает правильность формулы (25) в номинальном режиме.

3. Критический режим. При $m_c = m_к \bar{m}_{кк} = 1$ и конечный результат будет таким:

$$i_к = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_к}. \quad (26)$$

В каталогах данных по току в критическом режиме $i_к$ не приводят, так что остается использовать расчетное значение.

4. Пусковой режим. Проверить точность формулы (25) по её общему виду в режиме пуска сложно. Сделаем это на конкретном примере двигателя 4A132S8, представив выражение пускового тока i_n в численном виде:

$$i_n^2 = i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_n \cdot \bar{m}_{кк+}.$$

Данные двигателя: $i_0^2 = 0,51$; $\bar{m}_к^{-1} = 4,47$; $m_n = 2$; $\bar{m}_{кк+} = 2$.

После подстановки численных значений имеем:

$$i_n^2 = 0,51 + 0,49 \cdot 4,76 \cdot 2 \cdot 2 = 9,84, \quad i_n = 3,14.$$

Таким образом, рассчитанный по формуле (25) пусковой ток равен 3,14, а каталожное его значение составляет $i_n = 5,5$. Пусковой ток определен с большой погрешностью. Формула (25) так же нуждается в коррекции.

Представим зависимость тока в таком виде:

$$i^2 = k_i i_0^2 + k_n (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_c \cdot \bar{m}_{кк+}, \quad (27)$$

где k_i и k_n — коэффициенты коррекции.

Формулу (27) запишем для двух режимов — критического и пускового:

$$i^2 = k_i i_0^2 + k_n (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_к \cdot \bar{m}_{кк+},$$

$$i_n^2 = k_i i_0^2 + k_n (1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot m_n \cdot \bar{m}_{кк+}.$$

Имеем систему из двух уравнений с двумя неизвестными. Решив ее, получим выражения для вычисления коэффициентов k_i и k_n :

$$k_i = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(i_к^2 - \frac{(i_n^2 - i_к^2)}{\sqrt{m_к^2 - m_n^2}} \cdot m_к \right), \quad (28)$$

$$k_n = \frac{i_n^2 - i_к^2}{(1 - i_0^2) \cdot \bar{m}_к^{-1} \cdot \sqrt{m_к^2 - m_n^2}}. \quad (29)$$

После подстановки (28) и (29) в (27) будем иметь:

$$i^2 = i_к^2 + \frac{i_n^2 - i_к^2}{\sqrt{m_к^2 - m_n^2}} \cdot \sqrt{m_к^2 - m_c^2}. \quad (30)$$

Получив три разные формулы для вычисления электромеханической характеристики — (23), (25) и (30), подчеркнем, что формула (23) безошибочна только на рабочем участке и требует наличия механической характеристики. Формула (25) также при-

Having obtained three different formulas for calculating the electromechanical characteristics — (23), (25) and (30) — we emphasize that the formula (23) is infallible only in the working area and requires mechanical characteristics. The formula (25) can only be applied at the working area, but it allows us not to use the mechanical characteristics. The performance of the formula (30) is limited with the starting range.

Let us write the formulas (14) and (25)

$$\begin{aligned} v &= v_c - (v_c - 1) \cdot \bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-, \\ i^2 &= i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-. \end{aligned}$$

Let us solve the expression for current in relation to the multiplication $\bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-$

$$\bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^- = \frac{i^2 - i_0^2}{m_c(1 - i_0^2)}.$$

Applying the above mentioned dependence to the formula of velocity (14) instead of $\bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-$ we will obtain new expression for the mechanical characteristics of the motor:

$$v = v_c - (v_c - 1) \cdot \frac{i^2 - i_0^2}{m_c(1 - i_0^2)}. \quad (31)$$

Based on the data of the electromechanical characteristics, the formula (31) allows us to calculate the mechanical characteristics of the motor.

Thus, similarly to the electromechanical characteristics, there are three formulas for constructing mechanical characteristics: (14), (21), (31). The formulas (14) and (31) serve only for the working area, (21) — only the starting one, and (31) requires electromechanical characteristics.

The calculation of performance characteristics of 4A180M8 is given in tables 1–2, graphical representation is in Fig. 1.

Mechanical characteristics $v(m)$ is obtained using the formula (11):

$$v = v_c - (v_c - v_k) \cdot \bar{m}_{kc+},$$

electromechanical one $i(m)$ — using the formula (25):

$$i^2 = i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc+}.$$

The first three lines of Table 1 are common, the next two are devoted to the characteristics $v(m)$, the last three lines — to the characteristics $i(m)$. In the 3rd and 4th line of the second column the value \bar{m}_{kc} with different signs appears. The sign «−» refers to the working area (from v_c to v_k), the sign «+» — to the starting range (from v_k to v_n).

Formulas with constant values of variables that are ready for the calculation are as follows:

$$v = 1,027 - (1,027 - 0,927) \cdot \bar{m}_{kc} = 1,027 - 0,1\bar{m}_{kc}.$$

$$i^2 = 0,345 + 0,655 \cdot 3,7 \cdot m_c \cdot \bar{m}_{kc} = 0,345 + 2,42 \cdot m_c \cdot \bar{m}_{kc}.$$

where

$$v_c = 1,027, v_k = 0,927, i_0^2 = 0,345, (1 - i_0^2) = 0,655,$$

$$m_k = 2,0, m_n = 1,2, \bar{m}_k^{-1} = 3,7$$

$$m_{kc} = m_k / m_c, \bar{m}_{kc+} = m_{kc} \pm \sqrt{m_{kc}^2 - 1}.$$

менима только на рабочем участке, но позволяет обойтись без механической характеристики. Действие формулы (30) ограничено пусковым участком.

Запишем формулы (14) и (25):

$$\begin{aligned} v &= v_c - (v_c - 1) \cdot \bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-, \\ i^2 &= i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-. \end{aligned}$$

Выражение для тока решим относительно произведения $\bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-$:

$$\bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^- = \frac{i^2 - i_0^2}{m_c(1 - i_0^2)}.$$

Подставив в формулу для скорости (14) вместо $\bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc}^-$ записанную выше зависимость, получим новое выражение для механической характеристики двигателя:

$$v = v_c - (v_c - 1) \cdot \frac{i^2 - i_0^2}{m_c(1 - i_0^2)}. \quad (31)$$

Основываясь на данных электромеханической характеристики, формула (31) позволяет рассчитать механическую характеристику двигателя.

Таким образом, аналогично электромеханической характеристике, имеются три формулы для построения механической характеристики: (14), (21), (31). Формулы (14) и (31) обслуживают только рабочий участок, (21) — только пусковой, а (31) — требует наличия электромеханической характеристики.

Расчет рабочих характеристик электродвигателя 4A180M8 приведен в табл. 1–2, графическое изображение на рис. 1.

Механическая характеристика $v(m)$ получена с помощью формулы (11):

$$v = v_c - (v_c - v_k) \cdot \bar{m}_{kc+},$$

электромеханическая $i(m)$ — с помощью формулы (25):

$$i^2 = i_0^2 + (1 - i_0^2) \cdot m_c \cdot \bar{m}_k^{-1} \cdot \bar{m}_{kc+}.$$

Первые три строки табл. 1 являются общими, последующие две посвящены характеристике $v(m)$, последние три строки — характеристике $i(m)$. В 3-й и 4-й строке второго столбца фигурирует величина \bar{m}_{kc} с разными знаками. Знак «−» относится к рабочему участку (от v_c до v_k), знак «+» — к пусковому (от v_k до v_n).

Формулы с постоянными значениями величин, готовые к ведению расчёта, имеют следующий вид:

$$v = 1,027 - (1,027 - 0,927) \cdot \bar{m}_{kc} = 1,027 - 0,1\bar{m}_{kc},$$

$$i^2 = 0,345 + 0,655 \cdot 3,7 \cdot m_c \cdot \bar{m}_{kc} = 0,345 + 2,42 \cdot m_c \cdot \bar{m}_{kc},$$

где

$$v_c = 1,027, v_k = 0,927, i_0^2 = 0,345, (1 - i_0^2) = 0,655,$$

$$m_k = 2,0, m_n = 1,2, \bar{m}_k^{-1} = 3,7,$$

$$m_{kc} = m_k / m_c, \bar{m}_{kc+} = m_{kc} \pm \sqrt{m_{kc}^2 - 1}.$$

Table 1. Calculation of characteristics $v(m)$ and $i(m)$ without correction (formulas (11) and (26))

Таблица 1. Расчёт характеристик $v(m)$ и $i(m)$ без коррекции (формулы (11) и (26))

1	m_c	0	0,6	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	1,8	1,6	1,4	1,2
2	m_{kc}	∞	3,33	2	1,66	1,43	1,26	1,1	1	1,1	1,26	1,42	1,66
3	$\bar{m}_{kc-}, \bar{m}_{kc+}$	0	0,15	0,27	0,34	0,41	0,67	0,89	1	1,34	2	2,47	3
4	$0,1\bar{m}_{kc-}, 0,1\bar{m}_{kc+}$	0	0,015	0,027	0,034	0,041	0,067	0,089	0,1	0,13	0,2	0,25	0,3
5	$v = 1,027 - (4)$	1,027	1,012	1	0,993	0,986	0,96	0,938	0,927	0,897	0,827	0,777	0,727
6	$2,42 \cdot m_c \cdot \bar{m}_{kc}$	0	0,21	0,65	0,99	1,39	2,59	3,87	4,84	5,83	7,74	8,37	8,71
7	$0,345 + (6)$	0,345	5,56	1	1,35	1,74	2,94	4,22	5,19	6,18	8,09	8,72	9,06
8	$i = \sqrt{(7)}$	0,59	0,81	1	1,16	1,32	1,71	2,05	2,28	2,49	2,84	2,95	3

Table 2. Table 2. Correction calculation of the starting range of characteristics $v(m)$ and $i(m)$

Таблица 2. Корректирующий расчёт пускового участка характеристик $v(m)$ и $i(m)$

1	m_c	2	1,8	1,6	1,4	1,2
2	m_{kc}	1	1,1	1,26	1,42	1,66
3	\bar{m}_{kc+}	1	1,34	2	2,47	3
4	$3 - \bar{m}_{kc+}$	2	1,66	1	0,53	0
5	$v = 0,464 \cdot (4)$	0,927	0,77	0,464	0,246	0
6	$15,66\sqrt{4 - m_c^2}$	0	13,62	18,79	22,39	25,05
7	$i^2 = 5,19 + (6)$	5,19	18,81	23,98	27,58	30,25
8	$i = \sqrt{(7)}$	2,28	4,33	4,9	5,25	5,5

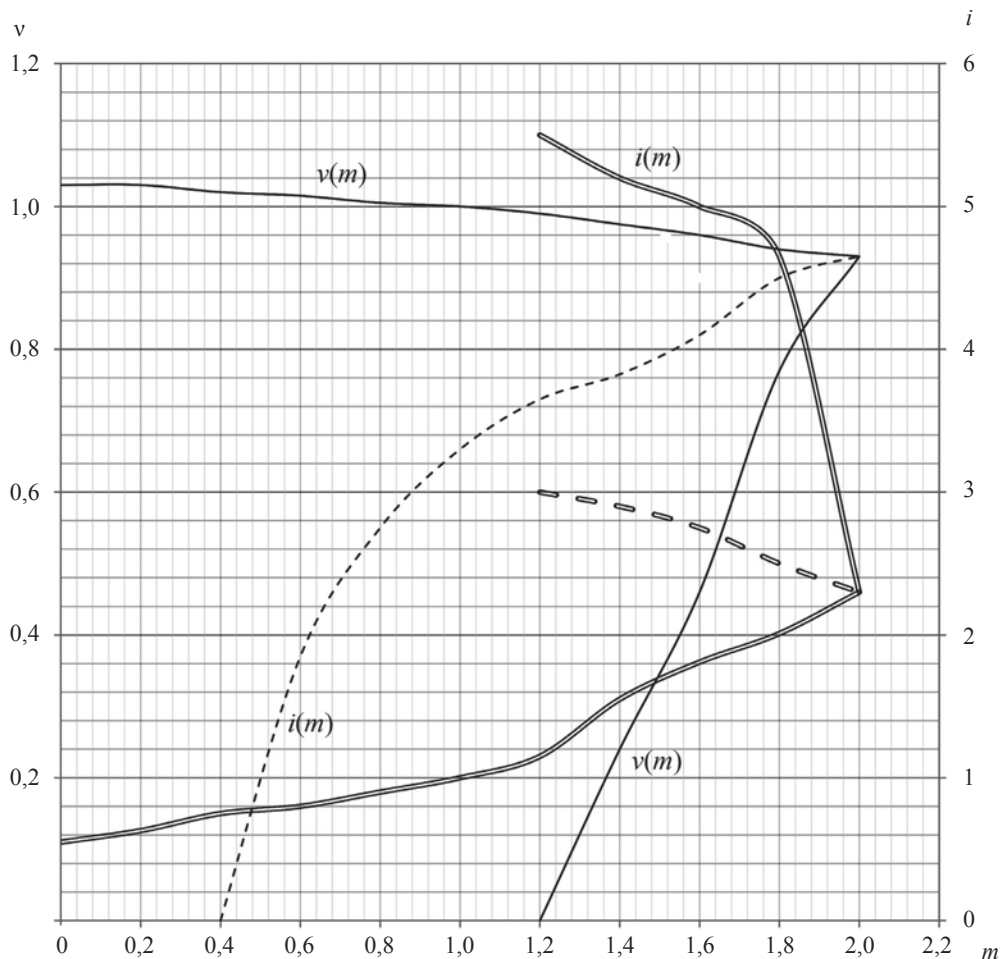


Fig. 1. Performance characteristics $v(m)$ and $i(m)$ of the motor 4A180M8:

Рис. 1. Рабочие характеристики $v(m)$ и $i(m)$ электродвигателя 4A180M8:

— — corrected / откорректированная; - - - — not corrected / не откорректированная

According to the final result of calculation of Table 1 (lines 5 and 8) we can make the following conclusions:

1. In the operation mode (from $m_c = 0$ to $m_c = 2$) the used dependences correctly describe both characteristics $v(m)$ and $i(m)$.

2. In the starting range (from $m_c = 1,2$ to $m_c = 2$) of the calculated characteristics we can see significant errors.

For example, velocity at the start-up is estimated to be 0.727 instead of the expected zero value, and the starting current is almost 2 times less instead of the catalog value $i_n = 5.5$ according to the calculation.

The formulas (11) and (25) in the starting range require the correction. To correct the mechanical characteristics in the starting range we use the formula (21):

$$v = \frac{v_k}{\bar{m}_{кп+} - 1} \cdot (\bar{m}_{кп+} - \bar{m}_{кс+}).$$

The correction of the electromechanical characteristics is performed using the formula (31):

$$i^2 = i_k^2 + \frac{i_n^2 - i_k^2}{\sqrt{m_k^2 - m_n^2}} \cdot \sqrt{m_k^2 - m_c^2},$$

where $\bar{m}_{кп+} = m_{кп} + \sqrt{m_{кп}^2 - 1}$;

$$m_{кп} = m_k / m_n = 2,0/1,2 = 1,67;$$

$$\bar{m}_{кп+} = 1,67 + \sqrt{1,67^2 - 1} = 3,0;$$

$$\bar{m}_{кс+} = m_{кс} + \sqrt{m_{кс}^2 - 1}, \quad m_{кс} = m_k / m_c; \quad i_k^2 = 5,19;$$

$$i_n^2 = 30,25, \quad \frac{i_n^2 - i_k^2}{\sqrt{m_k^2 - m_n^2}} = 15,66.$$

After applying the constant values the calculation formulas are as follows:

$$v = \frac{0,927}{3-1} \cdot (3 - \bar{m}_{кс+}) = 0,464 \cdot (3 - m_c^2).$$

$$i^2 = 5,19 + 15,66 \cdot \sqrt{4 - m_c^2}.$$

The correction calculation of the characteristics $v(m)$ and $i(m)$ in the starting range is given in Table 2.

CONCLUSIONS. 1. In the description of the performance characteristics the non-system units are replaced with the system ones, the absolute values — with the relative ones. The dependences for the mechanical characteristics are shaped identically with the electromechanical characteristics, which are largely corresponding to the sense of the described physical processes and more convenient to use.

2. The performance characteristics form two groups of dependences. The first group of dependences of the motor velocity and current is a function of one variable in the form of modes of the load moments. Without correction the formulas of the first group can be used only for working areas of the characteristics, as in the starting ranges they give unacceptably large errors. The suggested method of correction of performance characteristics helped to eliminate errors and extend the action of the formula in the starting ranges of the characteristics. The

По итоговому результату расчёта табл. 1 (строки 5 и 8) можно сделать следующие выводы:

1. В рабочем режиме (от $m_c = 0$ до $m_c = 2$) использованные зависимости корректно описывают обе характеристики $v(m)$ и $i(m)$.

2. На пусковом участке (от $m_c = 1,2$ до $m_c = 2$) рассчитываемых характеристик отмечаются значительные погрешности.

Например, скорость при пуске вместо ожидаемого нулевого значения оценивается величиной 0,727, а пусковой ток вместо каталожного $i_n = 5,5$ по расчёту значиться почти в 2 раза меньше.

Формулы (11) и (25) на пусковом участке нуждаются в корректировке. Для коррекции механической характеристики на пусковом участке использована формула (21):

$$v = \frac{v_k}{\bar{m}_{кп+} - 1} \cdot (\bar{m}_{кп+} - \bar{m}_{кс+}).$$

Коррекция электромеханической характеристики выполнена с помощью формулы (31):

$$i^2 = i_k^2 + \frac{i_n^2 - i_k^2}{\sqrt{m_k^2 - m_n^2}} \cdot \sqrt{m_k^2 - m_c^2},$$

где $\bar{m}_{кп+} = m_{кп} + \sqrt{m_{кп}^2 - 1}$;

$$m_{кп} = m_k / m_n = 2,0/1,2 = 1,67;$$

$$\bar{m}_{кп+} = 1,67 + \sqrt{1,67^2 - 1} = 3,0;$$

$$\bar{m}_{кс+} = m_{кс} + \sqrt{m_{кс}^2 - 1}, \quad m_{кс} = m_k / m_c; \quad i_k^2 = 5,19;$$

$$i_n^2 = 30,25, \quad \frac{i_n^2 - i_k^2}{\sqrt{m_k^2 - m_n^2}} = 15,66.$$

Расчётные формулы, после подстановки постоянных величин выглядят так:

$$v = \frac{0,927}{3-1} \cdot (3 - \bar{m}_{кс+}) = 0,464 \cdot (3 - m_c^2).$$

$$i^2 = 5,19 + 15,66 \cdot \sqrt{4 - m_c^2}.$$

Корректирующий расчет характеристики $v(m)$ и $i(m)$ на пусковом участке представлен табл. 2.

ВЫВОДЫ. 1. В описании рабочих характеристик несистемные единицы измерения заменены системными, абсолютные величины относительными, а зависимости для механической характеристики придана форма, совпадающая с формой электромеханической характеристики, в большей степени соответствующая смыслу описываемых физических процессов, более удобная при использовании.

2. Рабочие характеристики образуют две группы зависимостей. Первая группа зависимостей скорости и тока двигателя является функцией с одной переменной в виде модулей моментов нагрузки. Без коррекции формулы первой группы могут применяться только для рабочих участков характеристик, так как на пусковых участках они дают недопустимо большие погрешности. Предложенный способ коррекции рабочих характеристик позволил устранить погрешности и распространить действие формулы на пуско-

second group of the formulas is the function of two independent variables: the moment of resistance and velocity — for the mechanical characteristics and the moment of resistance and current — for the electromechanical characteristics. These formulas are valid in both areas of characteristics, working and starting one, but the converted characteristic should be corrected.

3. The diversity of the forms of the mathematical description, the presence of the different characteristics of the general structural element in the formulas, the possibility on the known mechanical characteristics of obtaining the electromechanical and vice versa, the correction of errors identified enhance opportunities in the selection of means for conducting calculation operations and are aimed at the increase of the accuracy of calculations and the reduction of their complexity.

вых участках характеристик. Вторая группа формул является функцией двух независимых переменных: момента сопротивления и скорости — для механической характеристики, и момента сопротивления и тока, — для электромеханической. Эти формулы действительны на обоих участках характеристик, рабочем и пусковом, но преобразуемая характеристика должна быть откорректирована.

3. Разнообразие форм математического описания, наличие в формулах разных характеристик общей структурной составляющей, возможность по известной механической характеристике получения электромеханической и наоборот, коррекция выявленных погрешностей расширяют возможности в выборе средств для проведения расчётных операций и направлены на повышение точности расчётов и снижения их трудоемкости.

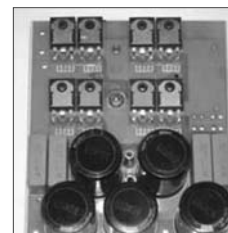
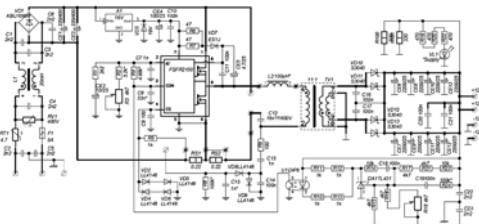
Список литературы

- [1] **Базакуца, В. А.** Международная система единиц [Текст] / В. А. Базакуца. — Харьков : Изд-во Харьковского государственного университета, 1963. — 128 с.
- [2] **Гейлер, Л. Б.** Электропривод в тяжелом машиностроении [Текст] / Л. Б. Гейлер. — М. : Машин, 1958. — 587 с.
- [3] **Локарев, В. И.** Рабочие характеристики асинхронных электродвигателей и их коррекция при расчёте процессов судовых электроприводов [Текст] / В. И. Локарев, Д. В. Малюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2013. — №4 — С. 69–73.
- [4] **Локарев, В. И.** Энергосбережение в электроприводе [Текст] : учеб. пособие / В. И. Локарев. — Николаев : НУК, 2009. — 195 с.
- [5] **Чекунов, К. А.** Теория судового электропривода [Текст] / К. А. Чекунов. — Л. : Судостроение, 1982. — 336 с.

© В. И. Локарев

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. *К. В. Дубовенко*

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



Научно-исследовательский институт современных проблем автоматики и электротехники работает над:

- Разработкой преобразователей постоянного напряжения на основе резонансных инверторов для судовых систем автоматики и специальных систем;
- Повышением качества электроэнергии в автономных электростанциях с газодизель-генераторными установками

просп. Героев Сталинграда, 9, каб. 458
тел.: +38 (0512) 70-94-44

◆ г. Николаев, Украина, 54025
◆ e-mail: sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua

Подробная информация: nuos.edu.ua/science/