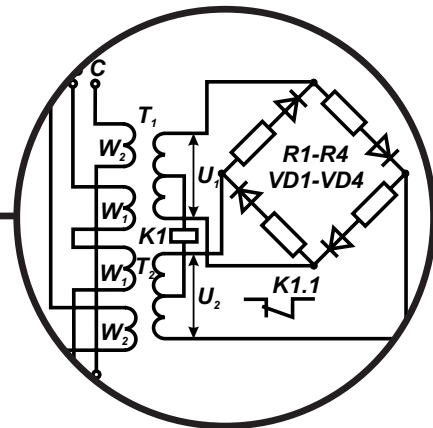




DOI 10.15589/jnn20170208
УДК 621.313
Л73

CALCULATION OF OPERATING CHARACTERISTICS OF THE ASYNCHRONOUS DRIVE

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Valentyn I. Lokariev
valentyn.lokariev@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0460-1324

Yana B. Volianskaya
yanavolayskaya@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-3010-1684

В. И. Локарев,
д-р техн. наук, проф.

Я. Б. Волянская,
канд. техн. наук, доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The task of optimization of calculation of operating characteristics of asynchronous drives has been solved. It is a part of the complex scientific and applied problem of improvement of calculation of operating processes of marine and industrial mechanisms. The system of correct mathematical expressions for calculation of starting areas of the mechanical and electromechanical characteristics of asynchronous drives is obtained. The expressions address the disadvantages of the traditional formulas by Kloss and Shubenko. The proposed dependencies allow reducing labour intensity of the calculation, extending functional possibilities of the calculation means, improving the accuracy of the calculation of the starting areas. Efficiency and required accuracy of the obtained dependencies are confirmed by the calculations performed and approbation in the educational process.

Keywords: asynchronous electric drive; mathematical description; relative quantities; calculation accuracy; electric drive characteristics.

Аннотация. Получена система коректних математических выражений для расчета пусковых участков механической и электромеханической характеристик асинхронных электроприводов, устраняющих недостатки традиционных формул Клосса и Шубенко. Эффективность и необходимая точность полученных зависимостей подтверждены выполненными расчетами и апробацией в учебном процессе.

Ключевые слова: асинхронный электропривод; математическое описание; относительные величины; точность расчетов; характеристики электропривода.

Анотація. Отримано систему коректних математичних виразів для розрахунку пускових ділянок механічної й електромеханічної характеристик асинхронних електроприводів, що усувають недоліки традиційних формул Клосса і Шубенка. Ефективність і необхідна точність отриманих залежностей підтверджено виконаними розрахунками й апробацією в навчальному процесі.

Ключові слова: асинхронний електропривод; математичний опис; відносні величини; точність розрахунків; характеристики електропривода.

REFERENCES

- [1] Moskalenko V. V. *Elektricheskiy privod: uchebnik dlya stud. vyssh. uchebn. zavedeniy* [Electric drive]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 368 p.
- [2] Onishchenko G. B. *Elektricheskiy privod* [Electric drive]. Moscow, RASKHN Publ., 2003. 320 p.
- [3] Kozyrev S. K., Anuchin A. S., Kozyaruk A. E., Ladygin A. N., Prudnikova Yu. I., Sergievskiy Yu. N. *Elektricheskiy privod. Terminy i opredeleniya* [Electric drive. Terms and definitions]. Moscow, MEI Publ., 2015. 96 p.
- [4] Chekunov K. A. *Teoriya sudovogo elektroprivoda. Uchebnoe posobie* [Theory of the ship electric drive: reference book]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 336 p.
- [5] Terekhov V. M., Osipov O. I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy* [Control systems of electric drives]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 304 p.
- [6] Popovich M. G., Lozinskiy O. Y., Klepikov V. B. *Elektromekhanichni systemy avtomatichnoho keruvannya ta elektroprivody: Navch. posibnyk* [Electromechanic systems of automatic control and electric drives]. Kyiv, Lybid Publ., 2005. 680 p.
- [7] Lokarev V. I. *Energoberezhenie v elektroprivode. Uchebnoe posobie* [Energy preservation in the electric drive]. Nikolaev, NUK Publ., 2009. 195 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время известны формулы Клосса и Шубенко, традиционно используемые для расчета рабочих характеристик асинхронных электроприводов [1–3]. Однако, адекватно описывая характеристики на рабочих участках, уравнения допускают серьезные неточности на пусковых участках.

Формула Клосса для простого по форме участка трудоемка и нуждается в упрощении, а формула Шубенко обременена зависимостью от механической характеристики и требует самостоятельности. С помощью выше-названных соотношений можно по известной механической характеристике получить электромеханическую формулу. Но обратный переход — от электромеханической к механической — невозможен. Хотя, с точки зрения вероятностей выбора оптимального способа расчета, двухсторонний переход весьма желателен.

До настоящего времени остается не решенной задача получения эффективных и точных зависимостей для расчета пусковых участков механической и электромеханической характеристик асинхронных электроприводов. Перечисленные моменты являются основной составляющей комплексной проблемы совершенствования расчета рабочих процессов электромеханизмов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известно, что при скольжениях $s_k < s < 1$ формула Клосса дает значительные погрешности [4], поэтому приведено корректирующее уравнение для их устранения. Однако для участка $0 < s < s_k$ сохраняется традиционное соотношение, которое, учитывая простую форму характеристики на этом участке, неоправданно громоздко.

В [5] также представлена зависимость формулы Шубенко от механической характеристики. Но имен-

но в этом причина большой трудоемкости и низкой точности расчета на пусковом участке ($s_k < s < 1$) по данному соотношению. Следует также отметить, что корректирующая формула отсутствует.

В связи с этим задача оптимизации расчета рабочих процессов асинхронных электроприводов может быть решена только путем пересмотра существующего математического описания их характеристик.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — снижение трудоемкости и повышение точности расчета рабочих процессов асинхронных электроприводов путем совершенствования математического описания рабочих характеристик двигателей.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При расчете рабочих процессов в электроприводе незаменимыми являются рабочие характеристики электродвигателя — механическая $\omega(M)$ и электромеханическая $I(\omega)$ или $\omega(I)$ [6].

Для расчета механических характеристик используется формула Клосса:

$$m = \frac{2m_k}{\left(\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} \right)}, \quad (1)$$

а для вычисления электромеханических характеристик — формула Шубенко:

$$i^2 = i_0^2 + (1 - i_0^2)ms / s_n. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2), адекватно описывая рабочие участки характеристик (от $s = 0$ до $s = s_k$), недопустимо искажают пусковые и тормозные участки (от $s = s_k$ до $s = s_n$ и выше). Поэтому в расчетной практике формулы (1) и (2) применяются для рабочих участков, а для пусковых и тормозных корректируют формулы рабочих участков.

Например, для описания пускового участка механической характеристики удачное уравнение предложил К. А. Чекунов [2]:

$$m = \frac{m_k [2 + (s^2 - s_k^2)k]}{\left(\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} \right)}, \quad (3)$$

где

$$k = \frac{m_{пк} \left(s_k + \frac{1}{s_k} \right) - 2}{(1 - s_k)}, \quad m_{пк} = \frac{m_{п.}}{m_k}.$$

В результате исследований и ряда преобразований формул (1) и (2) получена система зависимостей, позволяющих решить поставленную задачу.

Особенности представляемых зависимостей включают следующие положения:

1) использование относительных величин, за базовые значения которых приняты номинальные, как более информативные и экономные [7];

2) рабочие характеристики на рабочих участках представлены двух видов: определяемые по паспортным данным двигателя, определяемые одна по другой (т. е. механическая по электромеханической и наоборот);

3) под электромеханической характеристикой понимается зависимость относительного тока от момента $i(m)$;

4) нагрузка на валу двигателя учитывается моментами сопротивления m_c и корнями уравнения привода вида $\overline{m}_{кк}^{\pm} = m_{кк} \pm \sqrt{m_{кк}^2 - 1}$.

Принятые условные обозначения и сокращения:

$s, s_n, s_k, s_{п}$ — скольжения: текущее, номинальное, критическое, пусковое;

$v = \frac{\omega}{\omega_n}, v_c = \frac{\omega_c}{\omega_n}, v_k = \frac{\omega_k}{\omega_n}, v_{п} = \frac{\omega_{п}}{\omega_n}$ — относитель-

ные скорости: текущая, синхронная, критическая, пусковая;

$m_c = \frac{M_c}{M_n}, m_k = \frac{M_k}{M_n}, m_{п} = \frac{M_{п}}{M_n}$ — относительные

моменты сопротивления: текущий, критический, пусковой;

$i = \frac{I}{I_n}, i_0 = \frac{I_0}{I_n}, i_k = \frac{I_k}{I_n}, i_{п} = \frac{I_{п}}{I_n}$ — относительные

токи: текущий, свободного хода, критический, пусковой.

Кроме момента m_c , в качестве параметра, характеризующего нагрузку, применяется корень $\overline{m}_{кк}^{\pm} = m_{кк} \pm \sqrt{m_{кк}^2 - 1}$, который приобретает разные значения в следующих режимах:

- при свободном ходе: $\overline{m}_{кк}^{\pm} = 0$;
- в номинальном: $\overline{m}_{кк}^{\pm} = m_k - \sqrt{m_k^2 - 1}$;
- в критическом: $\overline{m}_{кк}^{\pm} = 1$;
- в пусковом: $\overline{m}_{кк}^{\pm} = m_{кк} + \sqrt{m_{кк}^2 - 1}$.

Расчет механических характеристик

На рабочем участке расчет по паспортным данным двигателя описывает выражение:

$$s = P_s \overline{m}_{кк}^{\pm}, \quad (4)$$

где

$$P_s = s_k = \frac{s_n}{m_k}, \quad m_k = m_k - \sqrt{m_k^2 - 1},$$

$$\overline{m}_{кк}^{\pm} = m_{кк} - \sqrt{m_{кк}^2 - 1}, \quad m_{кк} = \frac{m_k}{m_c}.$$

Формула (4) является аналогом равенства (1).

На рабочем участке определение по электромеханической характеристике можно представить таким образом:

$$s = P_{si} \frac{(i^2 - i_0^2)}{m_c}, \quad (5)$$

$$\text{где } P_{si} = \frac{s_n}{(1 - i_0^2)}.$$

Традиционного соответствия (5) не существует.

На пусковом участке уравнения по паспортным данным двигателя показывает зависимость:

$$s = 1 - P_s (\overline{m}_{кк}^+ - \overline{m}_{кк}^-), \quad (6)$$

$$\text{где } P_s = \frac{1 - s_k}{(\overline{m}_{кк}^+ - 1)}, \quad \overline{m}_{кк}^+ = m_{кк} + \sqrt{m_{кк}^2 - 1}, \quad m_{кк} = \frac{m_k}{m_{п}}.$$

Аналогом формулы (6) является традиционное выражение (3).

Расчет электромеханических характеристик

На рабочем участке вычисления по паспортным данным двигателя представлены в виде:

$$i^2 = i_0^2 + P_i m_c \overline{m}_{кк}^{\pm}, \quad (7)$$

$$\text{где } P_i = \frac{(1 - i_0^2)}{\overline{m}_{кк}^{\pm}}, \quad i_0 = \sin \varphi_n - \overline{m}_k \cos \varphi_n.$$

Формула (7) показывает соответствия уравнения (2).

На рабочем участке расчет по механической характеристике производится так:

$$i^2 = i_0^2 + P_{is} m_c s, \quad (8)$$

$$\text{где } P_{is} = \frac{(1 - i_0^2)}{s_n}.$$

Формула (8) – аналог равенства (2).

На пусковом участке паспортные данные двигателя можно определить следующим образом:

$$i^2 = i_k^2 + P_i \sqrt{m_k^2 - m_c^2}, \quad (9)$$

$$\text{где } i_k^2 = i_0^2 + P_i m_k, \quad P_i = \frac{(i_{п}^2 - i_k^2)}{\sqrt{m_k^2 - m_{п}^2}}.$$

Соответствия формуле (9) среди традиционных зависимостей не существует.

Полученные решения позволяют:

1) упростить исходные формулы (1) и (2) и сблизить их по форме и составу расчетных элементов (равенства (4) и (7));

2) сделать формулу для расчета электромеханической характеристики независимой от механической характеристики и вести расчет по паспортным данным двигателя (уравнение (7));

3) найти формулы, позволяющие по механической характеристике строить электромеханическую и наоборот (соотношения (5) и (8));

4) получить относительно простые зависимости для описания пусковых участков механической и электромеханической характеристик, лишенные погрешностей, присущих традиционным формулам (равенства (6) и (9)).

Ниже приведены примеры расчетов, выполненных по данным уравнениям.

Пример 1. Рассчитать и построить рабочие характеристики $s(m)$ и $i(m)$ электродвигателя 4A280S6, имеющего следующие технические данные.

$$N_H = 75 \text{ кВт}; s_H = 0,02; m_K = 2,2;$$

$$m_H = 1,2; i_H = 7,0; \cos \varphi_H = 0,89.$$

Формулы для расчета:

$$s = P_s \bar{m}_{Kc}^-; s = 1 - P_s (\bar{m}_{Kc}^+ - \bar{m}_{Kc}^-);$$

$$i^2 = i_0^2 + P_i m_c \bar{m}_{Kc}^-; i^2 = i_0^2 + P_i \sqrt{m_K^2 - m_c^2};$$

$$i_K^2 = i_0^2 + P_i m_K.$$

Определение постоянных величин:

$$\bar{m}_K^- = m_K^- \sqrt{m_K^2 - 1} = 2,2 - \sqrt{2,2^2 - 1} = 0,24;$$

$$P_s = s_K = \frac{s_H}{m_K} = \frac{0,02}{0,24} = 0,083;$$

$$m_{Kc} = \frac{m_K}{m_H} = \frac{2,2}{1,2} = 1,83;$$

$$\bar{m}_{Kc}^+ = m_{Kc} + \sqrt{m_{Kc}^2 - 1} = 1,83 + \sqrt{1,83^2 - 1} = 3,37;$$

$$P_i = \frac{(1 - i_0^2)}{\bar{m}_K^-} = \frac{0,94}{0,24} = 3,92;$$

$$P_s = \frac{1 - s_K}{\bar{m}_{Kc}^+ - 1} = \frac{1 - 0,083}{3,37 - 1} = 3,87;$$

$$i_K^2 = i_0^2 + P_i m_K = 0,06 + 3,92 \cdot 2,2 = 8,68;$$

$$i_K = 2,94;$$

$$i_0 = \sin \varphi_H - \bar{m}_K^- \cos \varphi_H = 0,46 - 0,24 \cdot 0,89 = 0,25;$$

$$i_0^2 = 0,06;$$

$$P_i = \frac{(i_H^2 - i_K^2)}{\sqrt{m_K^2 - m_H^2}} = \frac{(49 - 8,66)}{\sqrt{2,2^2 - 1,2^2}} = 21,92.$$

Расчет рабочих характеристик представлен в табл. 1. В строках верхней части таблицы приведен регулярный ряд моментов сопротивления m_c , начиная от свободного хода $m_c = 0$ и заканчивая критическим моментом $m_K = 2,2$, и их квадраты (строки 1–2). Ниже — отношения критических моментов к моментам сопротивления (строка 3) и соответствующие им корни разных знаков (строки 4 и 5), разницы между корнями, соответствующими пуску и текущим значениям нагрузки (строка 6), произведения текущих моментов сопротивления m_c на корни $\bar{m}_{Kc}$ (строка 7).

Данные этой части таблицы (строки 1–7) имеют общий характер и используются при расчете обеих характеристик на рабочих и пусковых участках. Вычисленные для электродвигателя 4A280S6, они соответствуют также любому другому двигателю с таким же критическим моментом $m_K = 2,2$.

Далее описаны равенства последовательных расчетных шагов, соответствующих принятым формулам, и результаты их расчета для разных моментов сопротивления m_c . Строка 8 содержит расчет механической характеристики на рабочем участке, а строки 9 и 10 — этой же характеристики на пусковом участке. Строки 11–13 охватывают расчет электромеханической характеристики на рабочем участке, а строки 14–17 — этой же характеристики на пусковом участке.

Для оценки полученных результатов расчета обратимся к итоговым данным, содержащимся в строках таблицы 8 и 10 (механическая характеристика $s(m)$) и 13 и 17 (электромеханическая характеристика $i(m)$). В строке 8 при $m_c = 0$ (свободный ход) находим ожидаемое скольжение $s = 0$, номинальному моменту $m_H = 1$ соответствует номинальное скольжение $s_H = 0,02$, критическому моменту $m_K = 2,2$ — критическое скольжение $s_K = 0,083$. По данным строки 10 при пусковом моменте $m_H = 1,2$ скольжение равно $s_H = 1$, при моменте $m_K = 2,2$ скольжение $s_K = 0,083$, т. е. такое же, как и на рабочем участке механической характеристики, что свидетельствует об границе между участками и непрерывности механической характеристики.

Из строки 13 видно, что моменту свободного хода $m_c = 0$ отвечает ток свободного хода $i_0 = 0,25$, номинальному моменту $m_H = 1$ — номинальный ток $i_H = 7$, а критическому моменту $m_K = 2,2$ — ток этого же режима $i_K = 2,94$. Рабочий участок электромеханической характеристики также описывается безукоризненно. На пусковом участке электромеханической характеристики (строка 17) находим, что пусковому моменту $m_H = 1,2$ соответствует пусковой ток $i_H = 7$, а при критическом моменте $m_K = 2,2$ ток равен $i_K = 2,94$, т. е. как и на рабочем участке, что свидетельствует о не-

Таблица 1. Расчет рабочих характеристик ЭД 4A280S6 (формулы 3, 4, 7, 8)

1	m_c	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
2	m_c^2	0	0,04	0,16	0,36	0,64	1,0	1,44	1,96	2,56	3,24	4,0	4,84
3	m_{kc}	∞	11	5,5	367	2,75	2,2	1,83	1,57	1,38	1,22	1,1	1,0
4	$\overline{m_{kc}^-}$	0	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,36	0,43	0,52	0,64	1,0
5	$\overline{m_{kc}^+}$							3,37	2,78	2,33	1,92	1,56	1,0
6	$\overline{m_{kp}^+} - \overline{m_{kc}^+}$							0	0,59	1,04	1,45	1,81	2,37
7	$m_c \cdot \overline{m_{kc}^-}$	0	0,21	0,37	0,58	0,79	1,0	1,2	1,5	1,79	2,16	2,66	4,16
8	$s = s_k \cdot \overline{m_{kc}^-}$	0	0,004	0,007	0,012	0,016	0,02	0,024	0,03	0,036	0,043	0,053	0,083
9	$P_s \times (6)$							0	0,23	0,4	0,56	0,7	0,92
10	$s = 1 - (9)$							1,0	0,77	0,6	0,44	0,3	0,083
11	$P_i \times (7)$	0	0,038	0,14	0,33	0,59	0,94	1,4	1,97	2,73	3,67	5,0	8,6
12	$i^2 = i_0^2 + (11)$	0,06	0,098	0,2	0,39	0,65	1,0	1,46	2,03	2,79	3,73	5,06	8,66
13	$i = \sqrt{(12)}$	0,25	0,32	0,45	0,62	0,81	1,0	1,21	1,42	1,67	1,93	2,25	2,94
14	$\sqrt{m_k^2 - m_c^2}$							1,84	1,7	1,5	1,26	0,92	0
15	$\Pi_i \times (14)$							40,33	37,26	32,9	27,6	20,2	0
16	$i^2 = i_k^2 + (15)$							49	45,9	41,56	36,26	28,86	8,66
17	$i = \sqrt{(16)}$							7	6,78	6,45	6,02	5,36	2,94

Примечание. Числа в скобках во втором столбце таблицы указывает адрес (номер строки), содержащий второй сомножитель или слагаемое формулы в данной строке. Например, в строке 9 постоянное число P_s умножается на число, содержащееся в 6-й строке — $(\overline{m_{kp}^+} - \overline{m_{kc}^+})$, в результате получаем фрагмент формулы (6, а), — $(P_s(\overline{m_{kp}^+} - \overline{m_{kc}^+}))$.

прерывности электромеханической характеристики $i(m)$.

Пример 2. Рассчитать рабочий участок механической характеристики двигателя 4A280S6, используя данные электромеханической характеристики этого двигателя из табл. 1 (строка 13).

Формула для расчета механической характеристики:

$$s = P_s \frac{i^2 - i_0^2}{m_c}.$$

Определение постоянной величины P_s :

$$P_s = \frac{s_n}{1 - i_0^2} = \frac{0,02}{1 - 0,06} = 0,021.$$

Расчетное выражение с учетом постоянной величины P_s :

$$s = 0,021 \frac{i^2 - i_0^2}{m_c}.$$

Данные расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Расчет механической характеристики ЭД 4A280 по его электромеханической характеристике

1	m_c	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
2	$i^2 - i_0^2$	0	0,038	0,14	0,33	0,59	0,94	1,4	1,97	2,73	3,67	5	8,6
3	$(i^2 - i_0^2) / m_c$	0	0,19	0,35	0,55	0,74	0,94	1,17	1,41	1,71	2,04	2,5	3,91
4	$s = \frac{0,021(i^2 - i_0^2)}{m_c}$	0	0,004	0,07	0,012	0,016	0,02	0,025	0,03	0,036	0,043	0,055	0,082

Расчет выполнен в виде трех операций, полученных в результате разбиения расчетной формулы. Сравнивая результаты расчета таблицы 2 с данными итоговой строки 8 табл. 1 (механическая характеристика, полученная с помощью формулы (4)), убеждаемся в достаточно точном их совпадении.

ВЫВОДЫ. Предложена система корректных математических выражений для расчета рабочих характеристик асинхронных электроприводов, которая позволяет:

- 1) снизить трудоемкость расчета;
- а) рабочего участка механической характеристики за счет упрощения формулы (4) и сокращения числа операций на каждом расчетном шаге;

б) рабочего участка электромеханической характеристики благодаря отсутствию необходимости обрабатывать в каждом расчетном шаге к механической характеристике;

2) расширить функциональные возможности соответствующих расчетных средств для вычисления рабочих характеристик благодаря увеличению количества формул (от двух до шести) и большему разнообразию их свойств;

3) повысить точность расчета пусковых участков механической и электромеханической характеристик путем корректирования формул рабочих участков (формулы (7) и (8)), в результате чего достигнуто их совпадение в контролируемых каталожными данными режимах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Москаленко В. В.** Электрический привод [Текст] : учебник для студ. высш. учебн. заведений / В. В. Москаленко. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. — 368 с.
- [2] **Онищенко Г. Б.** Электрический привод [Текст] / Г. Б. Онищенко. — М. : РАСХН, 2003. — 320 с.
- [3] Электрический привод. Термины и определения [Текст] / С. К. Козырев, А. С. Анучин, А. Е. Козярук, А. Н. Ладыгин, Ю. И. Прудникова, Ю. Н. Сергиевский / под ред. С. К. Козырева. — М. : Издательство МЭИ, 2015. — 96 с.
- [4] **Чекунов К. А.** Теория судового электропривода [Текст] : учебное пособие / К. А. Чекунов. — Л. : Судостроение, 1982. — 336 с.
- [5] **Терехов В. М.** Системы управления электроприводов [Текст] : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 304 с.
- [6] Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи [Текст] : навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін. / за ред. М. Г. Поповича та О. Ю. Лозинського. — К. : Либідь, 2005. — 680 с.
- [7] **Локарев В. И.** Энергосбережение в электроприводе [Текст] : учебное пособие / В. И. Локарев. — Николаев : НУК, 2009. — 195 с.

© В. И. Локарев, Я. Б. Волянська

Надійшла до редколегії 15.02.2017

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. М. Я. Хлопенко