

УДК 621.313.333.2

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.053>

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

В.С. Петрушин^{1*}, докт.техн.наук, **Ю.Р. Плоткін**^{2**}, канд.техн.наук, **Р.М. Єноктаєв**^{1***}, канд.техн.наук, **А.С. Кириленко**^{1****}, **В.В. Заволінковський**^{1*****}

¹Одеський національний політехнічний університет,
пр. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

²Берлінська вища школа економіки і права,
Альт Фрідріхсфельде, 60, Берлін, 10315, Німеччина

e-mail: victor_petrushin@ukr.net, juriy.plotkin@hwr-berlin.de, rostik-enok@ukr.net

Розглянуто критерій ефективності роботи регульованого асинхронного електропривода – коефіцієнт корисної дії. Його математичне моделювання здійснюється як з урахуванням нахилу зовнішньої характеристики частотного перетворювача, так і без нього. Виконано перехід від сімейства робочих характеристик коефіцієнта корисної дії за різних параметрів регулювання – частот напруги живлення – до його регульовальних характеристик. Запропоновано розрахунок критерію відповідно до експлуатаційного режиму навантаження. Згідно з цим критерій розраховується як середньодіапазонний у певному діапазоні регулювання швидкості або визначається з урахуванням заданої тахограми зміни швидкостей. Отримано зміну коефіцієнта корисної дії в неусталених режимах. Запропоновано розрахунок критерію під час роботи привода, коли тривалість сталих режимів співрозмірна з тривалістю перехідних режимів. Експериментально підтверджено результати математичного моделювання, у процесі якого визначається критерій ефективності в сталих та неусталених режимах. Доведено, що за використання математичних моделей з урахуванням нахилу зовнішньої характеристики перетворювача частоти похибка визначення коефіцієнта корисної дії привода менша, ніж без огляду на нього. Запропоноване теоретичне визначення критерію ефективності може бути використано в процесі розробки регульованих асинхронних електроприводів. Бібл.12, рис. 3.

Ключові слова: регульований асинхронний електропривод, сталі та неусталені режими, критерій ефективності, коефіцієнт корисної дії, математичне моделювання, експериментальні дослідження.

Вступ. Застосування регульованих асинхронних електроприводів (РАЕП) у різних галузях промисловості, на транспорті, у комунальній сфері, у сільському господарстві зумовлює їх удосконалення, яке не можливе без ретельного моделювання всіх фізичних процесів, що відбуваються в них. Поряд з раціональним регулюванням параметрів руху навантаження, збільшенням ресурсу роботи електротехнічного й механічного устаткування РАЕП здатні забезпечувати істотне енергозбереження. Ці завдання повинні вирішуватися з необхідною ефективністю.

Постановка задачі дослідження. Ефективність роботи РАЕП можна визначити через енергетичний показник – коефіцієнт корисної дії (ККД). Міжнародними стандартами встановлено не тільки класи ККД двигунів змінного струму, що живляться від мережі [1], а й такі, що живляться від перетворювачів [2]. Якщо стандарт [1] однозначно визначає класи, то стандарт [2], який мав декілька редакцій (згідно з однією з них для розрахунку усередненого ККД регульованого асинхронного двигуна потрібно брати до уваги значення цього енергетичного показника в семи навантажувально-регульовальних точках за різних швидкостей та навантажень), не дає точного рішення. На черзі класифікація за ефективністю систем електропривода, де теж з'являться подібні проблеми. Між тим класи можуть бути розглянуті з використанням діапазонних регульовальних характеристик або динамічних характеристик. Питанням дослідження енергетичних показників регульованих асинхронних двигунів (РАД) та РАЕП присвячено ряд робіт [3, 4, 5, 6, 7]. Доцільно розглянути ККД привода не тільки в сталих, а також у неусталених режимах. Цей критерій ефективності може

© Петрушин В.С., Плоткін Ю.Р., Єноктаєв Р.М., Кириленко А.С., Заволінковський В.В., 2020

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-2659-126X>, ** <https://orcid.org/0000-0001-9257-5933>,

*** <https://orcid.org/0000-0003-1577-9822>, ****<https://orcid.org/0000-0002-2579-5351>

*****<https://orcid.org/0000-0002-1350-5839>

використовуватися в процесі вибору того чи іншого варіанту регульованого електропривода, а також під час розробки таких приводів.

Мета роботи: експериментально підтвердити коректність теоретичного визначення за допомогою моделювання критерію ефективності РАЕП у сталих та неусталених режимах.

Матеріали і результати дослідження. Для дослідження експлуатаційних характеристик РАЕП відповідно до принципів системного підходу здійснюється сумісний розгляд перетворювачів, двигунів і навантаження [8], що реалізовано в програмі DIMASDrive [9], розробленій на кафедрі електричних машин Одеського національного політехнічного університету. Досліджується РАЕП з найбільш розповсюдженим транзисторним перетворювачем частоти (ПЧ) з автономним інвертором напруги та ШІМ-регулюванням, який має відповідний умовний коефіцієнт корисної дії η_{mnc} (у такому випадку $\eta_{mnc}=0,958$). Для визначення ККД РАЕП потрібно розрахувати потужність, що споживається двигуном $P_{\text{дв}}$. У [8] наведено методику розрахунку $P_{\text{дв}}$. Тоді ККД привода розраховується як $\eta_{\text{пр}} = P_2 \cdot \eta_{mnc} / P_{\text{дв}}$, де P_2 – механічна потужність на валу двигуна.

На експериментальному стенді асинхронний двигун АІР71А2У3 живився від транзисторного ПЧ Altivar 28 Telemecanique.

Обмотка статора двигуна мала з'єднання "зірка". Лінійна напруга мережі під час експерименту складала 380 В за частоти 50 Гц. Перетворювач мав стандартні налаштування: $U_{\text{ном}} = 400$ В і $f_{\text{ном}} = 50$ Гц, частота модуляції – 4 кГц. Як експериментальні, так і теоретичні характеристики отримано для закону частотного регулювання L – постійний момент навантаження ($U/f = \text{const}$) [10]. Під час експериментальних досліджень виконувалися положення, наведені в [11]. З метою визначення енергетичних показників РАЕП проводилося осцилографування струму, який він споживає за допомогою пристрою BORDO-421. Шляхом використання програми "Обробка результатів", розробленої на базі MATLAB, було знайдено ККД РАЕП.

На рис.1 наведено залежності ККД привода від моменту навантаження для різних частот живлення, отримані як експериментально (рис.1, а), так і в результаті математичного моделювання без (рис.1, б) і з урахуванням (рис.1, в) нахилу зовнішньої характеристики ПЧ [12].

За умови, що РАЕП має навантаження $M=2$ Н·м (78,7% від $M_{\text{ном}}$ двигуна), і воно незмінно, використовуючи механічні характеристики за різних частот напруги живлення двигуна, можна перейти до регульованих характеристик, що являють собою залежності ККД РАЕП від частоти обертання в певному діапазоні регулювання. На рис.2 такі залежності наведено (нумерація характеристик відповідає наступному

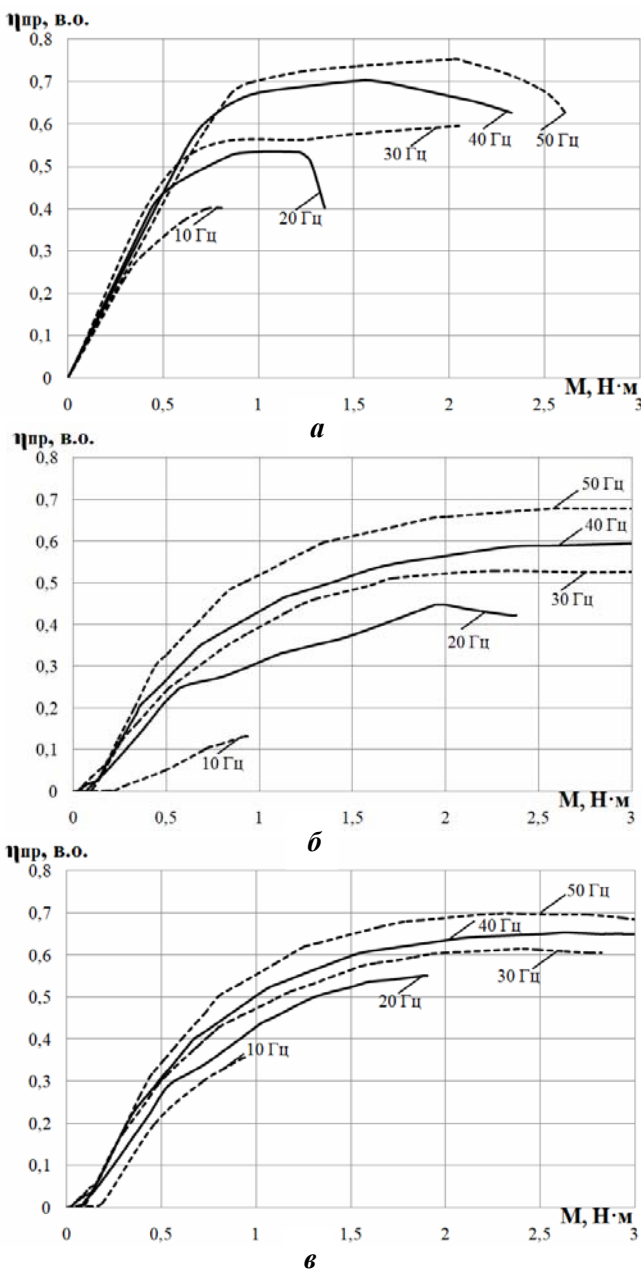


Рис. 1

порядку: 1 – експеримент, 2 – моделювання без урахування нахилу зовнішньої характеристики ПЧ, 3 – моделювання з урахуванням нахилу зовнішньої характеристики ПЧ).

Якщо ефективність РАЕП оцінюється для всього заданого діапазону регулювання, то ККД може розраховуватись як усереднене:

$$\eta_{np} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \eta(n_i) dn.$$

У такому випадку (діапазон 1700 – 2800 об/хв) η_{np} , що знайдено з експерименту, дорівнює 0,67, $\eta_{np}=0,575$, що отримано в результаті математичного моделювання без урахування нахилу зовнішньої характеристики ПЧ, і $\eta_{np}=0,641$, що отримано в результаті математичного моделювання з урахуванням нахилу зовнішньої характеристики ПЧ.

Якщо відомі часові експлуатаційні діаграми навантаження, а саме час роботи на кожній частоті обертання, обумовлений технологічними вимогами до приводних механізмів, то оцінку даного діапазонного критерію необхідно робити з урахуванням тривалості роботи двигуна в кожній точці діапазону регулювання: $\eta_{np} = \frac{\sum_i (\eta(n_i) \cdot t_{n_i})}{\sum_i t_{n_i}}$, де t_{n_i} – час роботи двигуна

за відповідної частоти обертання n_i , i – порядковий номер ступені тахограми.

Значення діапазонних ККД РАЕП, отриманих експериментально та за рахунок математичного моделювання з урахуванням тривалості роботи двигуна в кожній точці діапазону регулювання відповідно до заданої тахограми (100 с – 1800 об/хв, 200 с – 2600 об/хв, 100 с – 2300 об/хв) такі: 0,672 – з експерименту, 0,585 – з математичного моделювання без урахування нахилу зовнішньої характеристики ПЧ і 0,647 – з математичного моделювання з урахуванням нахилу зовнішньої характеристики ПЧ.

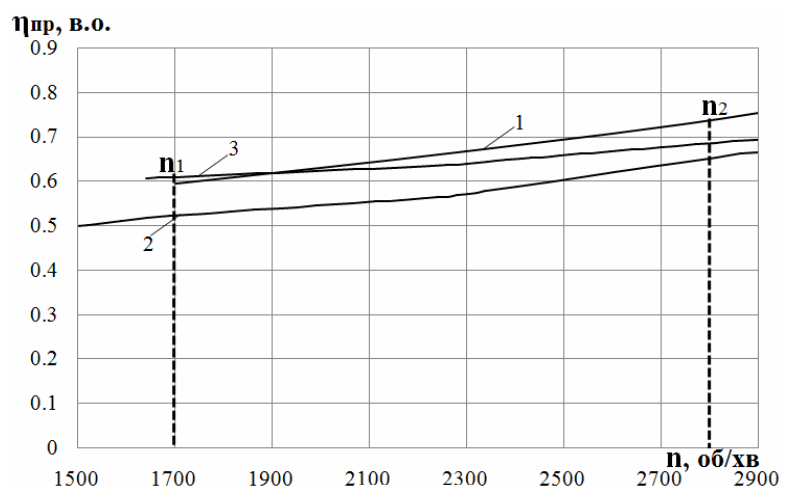


Рис. 2

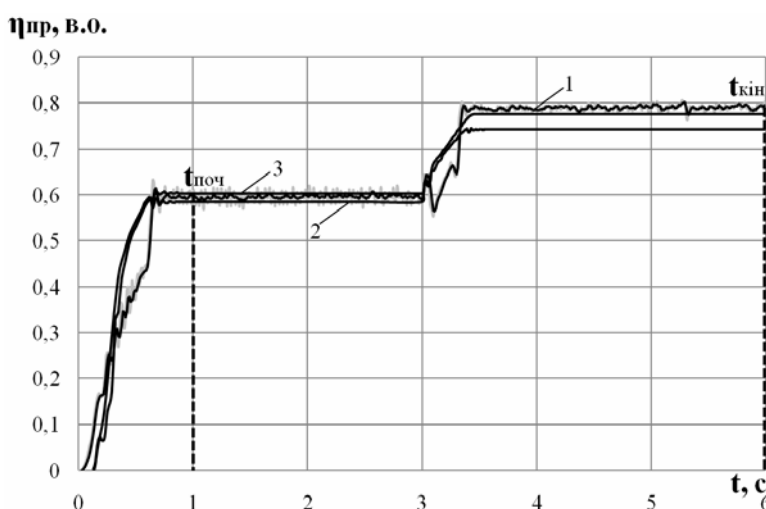


Рис. 3

Було проведено теоретичні (з урахуванням насичення магнітопроводу і витіснення струму в обмотці ротора) та експериментальні дослідження динамічних характеристик ККД регульованого асинхронного електропривода. Двигун АІР71А2У3 запускався за моменту інерції двигуна з навантажувальним механізмом $0,0017 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Дослідження було проведено за інтенсивності наростання частоти перетворювача 50 Гц/с, від якої залежить тривалість перехідного процесу.

Момент навантаження на валу мав лінійну залежність від числа обертів та описувався рівнянням $M(n) = 0,2 + 0,825 \cdot n \cdot 10^{-3}$.

На рис. 3 наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень під час роботи РАД на задану тахограму (3 с на 1705 об/хв, $M=1,61$ Н·м; 3 с – 2850 об/хв, $M=2,55$ Н·м). Значення діапазонних ККД РАЕП з урахуванням їх зміни в перехідних режимах можна розрахувати:

$$\eta_{np} = \frac{I}{t_{кин} - t_{поч}} \cdot \int_{t_{поч}}^{t_{кин}} \eta(t) dt .$$

Значення діапазонних ККД РАЕП, отриманих експериментально та за рахунок математичного моделювання з урахуванням їх зміни в перехідних режимах і без урахування пуску, такі: 0,701 – з експерименту, 0,674 – з математичного моделювання без урахування нахилу зовнішньої характеристики ПЧ і 0,696 – з математичного моделювання з урахуванням нахилу зовнішньої характеристики перетворювача частоти.

Висновки. 1. Зіставлення експериментальних характеристик ККД РАЕП з характеристиками, визначеними за допомогою математичного моделювання, показує, що похибка під час моделювання з урахуванням нахилу зовнішньої характеристики частотного перетворювача менша, ніж без урахування.

2. Оцінку ефективності РАЕП доцільно давати, використовуючи значення діапазонних ККД РАЕП з урахуванням або тривалості роботи двигуна в кожній точці діапазону регулювання, або їх зміни в перехідних режимах. Такий підхід дає змогу оцінювати ефективність РАЕП як для режимів роботи, у яких тривалість динамічних режимів значно менша тривалості усталених режимів, так і для режимів за співрозмірності вищевказаних тривалостей.

3. Аналогічним чином може здійснюватися оцінка ефективності регульованого асинхронного електроприводу за інших типів та тахограм навантаженнях, законів частотного керування перетворювачів частоти та їх налаштування.

4. Запропоноване теоретичне визначення розглянутого критерію ефективності може бути використано під час розробки регульованих асинхронних електроприводів.

1. IEC 60034-30-1. Rotating electrical machines. Part. 30-1. Efficiency classes of line operated AC motors. IEC code. URL: <https://infostore.saiglobal.com/preview.pdf> (дата звернення: 03.01.2020)
2. IEC 60034-30-2. Rotating electrical machines. Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors. IEC code. URL: <https://www.twirpx.com/file/2495783/.pdf> (дата звернення: 05.01.2020)
3. Захаров А.В., Колосов А.Л. Исследование эффективности применения специальных серий частотно-регулируемых асинхронных двигателей в электроприводах центробежных насосов. *Электротехника*. 2008. № 11. С. 49 – 52.
4. Андриенко В. М. Определение энергетических показателей асинхронных двигателей при питании от статических преобразователей частоты. *Электротехника и электромеханика*. 2010. №. 3. С. 5 – 7.
5. Андрианов М.В., Родионов Р.В. Экспериментальные исследования энергетических показателей частотно-регулируемых асинхронных двигателей, работающих от полигармонических источников напряжения. *Электротехника*. 2006. №11. С.15 – 22.
6. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. Т. 256. 202 с.
7. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. М.: СОЛОН-Пресс, 2015. 268 с.
8. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. Одесса: Наука и техника, 2006. 320 с.
9. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода. Свидетельство о регистрации программы ПА№4065. Киев, 26.03.2001.
10. Altivar 28. Руководство по эксплуатации. 2012. 47 с. URL: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/privod/altivar/old/ATV28/ATV28_user_guide_1999_ru.pdf (дата звернення: 08.01.2020)

11. IEC 60034-2-3. Rotating electrical machines. Part 2-3. Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/619/61981.pdf> (дата звернення: 08.01.2020).
12. Петрушин В.С., Еноктаев Р.Н.. Анализ работы регулируемого асинхронного двигателя с учетом внешней характеристики частотного преобразователя. *Вестник Национального технического университета "ХПИ"*. 2017. № 27 (1249). С. 122 – 125.

УДК 621.313.333.2

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.С. Петрушин¹, докт.техн.наук, **Ю.Р. Плоткин**², канд.техн.наук, **Р.М. Еноктаев**¹, канд.техн.наук, **А.С. Кириленко**¹, **В.В. Заволинковский**¹

¹Одесский национальный политехнический университет,
пр. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина.

²Берлинская высшая школа экономики и права,
Альт Фридрихсфельде, 60, Берлин, 10315, Германия.

e-mail: victor_petrushin@ukr.net, juriy.plotkin@hwr-berlin.de, rostik-enok@ukr.net

Рассмотрен критерий эффективности работы регулируемого асинхронного электропривода - коэффициент полезного действия. Его математическое моделирование осуществляется как с учетом наклона внешней характеристики частотного преобразователя, так и без него. Выполнен переход от семейства рабочих характеристик коэффициента полезного действия при различных параметрах регулирования - частотах питающего напряжения до его регулировочных характеристик. Предложен расчет критерия в соответствии с эксплуатационным режимом нагрузки. Согласно этому критерий рассчитывается как средндиапазонный в определенном диапазоне регулирования скорости, или определяется с учетом заданной тахограммы изменения скоростей. Получено изменение коэффициента полезного действия в неустановившихся режимах. Предложен расчет критерия при работе привода, когда продолжительность установившихся режимов соизмерима с продолжительностью переходных режимов. Экспериментально подтверждены результаты математического моделирования, в процессе которого определяется критерий эффективности в установившихся и неустановившихся режимах. Доказано, что при использовании математических моделей с учетом наклона внешней характеристики преобразователя частоты погрешность определения коэффициента полезного действия привода меньше, чем без учета. Предложенное теоретическое определение критерия эффективности может быть использовано при разработке регулируемых асинхронных электроприводов. Библи. 12, рис. 3.

Ключевые слова: регулируемый асинхронный электропривод, установившиеся и неустановившиеся режимы, критерий эффективности, коэффициент полезного действия, математическое моделирование, экспериментальные исследования

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF A ADJUSTABLE INDUCTION ELECTRIC DRIVE

V.S. Petrushin¹, **Y.R. Plotkin**², **R.N. Yenoktaiev**¹, **A.S. Kyrylenko**¹, **V. V. Zabolinkovskiy**¹

¹Odesa National Polytechnic University,
Shevchenko av., 1, Odesa, 65044, Ukraine.

²Berlin School of Economics and Law,
Alt Friedrichsfelde, 60, Berlin, 10315, Germany.

e-mail: victor_petrushin@ukr.net, juriy.plotkin@hwr-berlin.de, rostik-enok@ukr.net

The effectiveness criteria for an adjustable induction electric drive - efficiency is considered. Mathematical modeling of the criterion is carried out both taking into account the slope of the external characteristic of the frequency converter, and without this consideration. A transition has been made from the family of performance characteristics of the efficiency at various control parameters - frequencies of the supply voltage to its adjustment characteristics. The calculation of the criterion in accordance with the operational load mode is proposed. According to this, the criterion is calculated as average in a certain range of speed regulation, or is determined taking into account a given tachogram of speed change. The change in efficiency in transient modes is obtained. The calculation of the criterion during the drive operation is proposed, when the duration of steady-state modes is comparable with the duration of transient

modes. The results of mathematical modeling are experimentally confirmed, during which the effectiveness criteria in steady and unsteady modes is determined. It is proved that when using mathematical models, taking into account the slope of the external characteristics of the frequency converter, the error in determining the efficiency of the drive is less than without taking into account. The proposed theoretical definition of the effectiveness criteria can be used in the development of adjustable induction electric drives. References 12, figures 3.

Keywords: Adjustable induction electric drive, steady and unsteady modes, effectiveness criteria, efficiency, mathematical modeling, experimental studies

1. IEC 60034-30-1. Rotating electrical machines. Part. 30-1. Efficiency classes of line operated AC motors. IEC code. (Eng). URL: <https://infostore.saiglobal.com/preview.pdf> (Accessed: 03.01.2020).
2. IEC 60034-30-2. Rotating electrical machines. Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors. IEC code. (Eng). URL: <https://www.twirpx.com/file/2495783/pdf> (Accessed: 05.01.2020).
3. Zakharov A.V., Kolosov A.L. Study of the effectiveness of the use of special series of frequency-controlled asynchronous motors in electric centrifugal pump drives. *Elektrotehnika*. 2008. Vol. 11. Pp. 49 – 52. (Rus)
4. Andrienko V. M. Determination of energy indicators of induction motors when powered by static frequency converters. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2010. Vol. 3. Pp. 5 – 7. (Rus)
5. Andrianov M.V., Rodionov R.V. Experimental studies of energy indicators of variable-frequency asynchronous motors operating from polyharmonic voltage sources. *Elektrotehnika*. 2006. Vol. 11. Pp.15 – 22. (Rus)
6. Braslavskii I. Ia., Ishmatov Z. Sh., Poliakov V. N. Energy-saving asynchronous electric drive. M.: Akademiia. 2004. V. 256. 202 p. (Rus)
7. Vasil'ev B.Iu.. Electric drive. Electric drive Energetics. M.: SOLON-Press. 2015. 268 p. (Rus)
8. Petrushin V.S. Induction motors in the controlled-speed electric drives. Odessa: Nauka i Technica. 2006. 320 p. (Rus)
9. Petrushin V.S., Riabinin S.V., Iakimets A.M. Software product DIMASDrive. A program for analyzing the operation, selection and design of asynchronous squirrel-cage motors of controlled electric drive systems (certificate of registration of the program PA No. 4065. Kiev, March 26, 2001.
10. Altivar 28. Operation manual. 2012. 47 p. URL: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/privod/altivar/old/ATV28/ATV28_user_guide_1999_en.pdf (Accessed: 08.01.2020). (Rus)
11. IEC 60034-2-3. Rotating electrical machines. Part 2–3. Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/619/61981.pdf> (Accessed: 08.01.2020). (Eng)
12. Petrushin V.S., Enoktaev R.N.. Analysis of the operation of an adjustable induction motor, taking into account the external characteristics of the frequency converter. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta KhPI*. 2017. Vol. 27 (1249). Pp. 122 – 125. (Rus)

Надійшла: 28.02.2020

Received: 28.02.2020