

О. В. БІБІК

ОБГРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Обгрунтовано підходи до проектування асинхронних двигунів із змінним навантаженням з використанням критерію інтенсивних квазістатичних режимів. Підходи апробовано на прикладі дослідження робочих режимів трифазних шестиполосних асинхронних двигунів потужністю 700 Вт і 11 кВт приводу поршневих компресорів. Визначено можливості покращення ККД асинхронних двигунів у квазістатичних режимах при зміні моменту інерції приводу та вибору оптимальних параметрів асинхронних двигунів за критерієм ефективності, що забезпечує максимальне значення ККД у робочих режимах.

Ключові слова: проектування, асинхронний двигун, змінне навантаження, критерій інтенсивних квазістатичних режимів, коефіцієнт корисної дії.

Обоснованы подходы проектирования асинхронных двигателей с переменной нагрузкой с использованием критерия интенсивных квазиустановившихся режимов. Подходы были апробированы на примере исследования рабочих режимов трехфазных шестиполосных асинхронных двигателей мощностью 700 Вт и 11 кВт привода поршневых компрессоров. Определены возможности повышения КПД асинхронных двигателей в квазиустановившихся режимах путем изменения момента инерции привода и выбора оптимальных параметров асинхронных двигателей с помощью критерия эффективности, что обеспечивает максимальное значение КПД в рабочих режимах.

Ключевые слова: проектирование, асинхронный двигатель, переменная нагрузка, критерий интенсивных квазиустановившихся режимов, коэффициент полезного действия

The design approaches of variable load induction motors using the criterion of intense quasi-steady-state modes are substantiated. With the help of the proposed criterion, the analysis of serial two-, four- and six-pole induction motors in the power range of 0.09–11 kW was performed. This made it possible to define induction motors and their parameters (the number of pairs of poles, critical slip, moment of inertia) for which a refined designing is necessary into account the nature of the load. Approaches were tested on the example of the study of the operating modes of three-phase six-pole induction motors with a power of 700 W and 11 kW for single- and two-cylinder piston compressors. The possibilities of increasing the efficiency of induction motors in quasi-steady-state modes by changing the drive inertia moment and selecting the optimal induction motors parameters using the efficiency criterion, which provides the maximum efficiency value for quasistatics, were determined. The feasibility of applying approaches of design is proved by the example of calculating quasi-steady regimes of the six-pole induction motors with a power of 700 W for a two-cylinder compressor. A moment of inertia of the drive was determined, which allows to increase the efficiency in the quasi-steady regimes to its nominal value. It is shown that the optimal design of the induction motors with the constant basic moment of inertia of the drive and the variation in the length of the package and the number of effective stator winding conductors can increase the efficiency in operating modes by 10 %.

Keywords: designing, induction motor, periodic loading, criterion of intensive quasi-steady modes, efficiency.

Вступ. Робочі режими асинхронних двигунів (АД), що працюють у складі поршневих компресорних установок, характеризуються періодичним навантаженням. Проявом чого є пульсації частоти обертання ротора двигунів, струмів, електромагнітного моменту і, як наслідок, зростання втрат, споживаної потужності та зниження їх енергетичних показників. При цьому коефіцієнт корисної дії в робочих режимах АД зменшується від його номінального значення (яке розраховано для тривалого режиму роботи) на 10–40 %, що призводить у цілому до зниження енергоефективності компресорів, зокрема холодильного обладнання [1, 2]. Рівні пульсації частоти обертання ротора відкритих поршневих (ПК) і герметичних поршневих (ГПК) компресорів жорстко регламентовані і залежать від типу з'єднання двигуна з приводом [2].

При періодичному навантаженні крім робочих характеристик АД доцільно розглядати їх частотні характеристики – залежності відношення амплітуд електромагнітного моменту і моменту опору від частоти вимушених коливань (середньої частоти обертання ротора). Це дозволяє виявити у межах частотної характеристики двигунів діапазон, що відповідає резонансу, при якому величина електромагнітного моменту значно перевищує величину моменту опору [1].

Традиційний підхід до проектування електричних машин із змінним (періодичним або пульсуючим) навантаженням базується на [3]: 1) збільшенні момен-

ту інерції приводу за рахунок збільшення розмірів ротора двигуна; 2) установки додаткового маховика. Це дозволяє знизити рівень пульсацій частоти обертання ротора двигунів, струмів статора і ротора, електромагнітного моменту, а також зношування машин та підвищити їх технічний ресурс [4]. Однак, при цьому збільшуються у першому випадку масо-габаритні показники двигуна, у другому – маса приводу. Тому, остаточний вибір технічного рішення потребує дослідження квазістатичних режимів АД з врахуванням характеру навантаження і впливу зміни моменту інерції приводу на показники у робочих режимах.

Оптимальне проектування АД з врахуванням характеру навантаження за критерієм максимуму ККД у квазістатичних режимах дозволяє визначити конструктивні параметри двигунів, які забезпечують підвищення експлуатаційних показників АД для умов змінного навантаження. Даний підхід містить:

1) формування критерію інтенсивних квазістатичних режимів АД [5] з метою визначення конкретних типорозмірів АД, що потребують проектування з врахуванням змінного навантаження;

2) розроблення і удосконалення математичних моделей АД з врахуванням характеру навантаження, уточненням розрахунку струмів, моментів і частоти обертання та їх пульсацій, ККД і коефіцієнта потужності в квазістатичних режимах на період навантаження для дослідження робочих режимів [6–8];

© О.В. Бібік, 2019

3) розроблення алгоритму оптимального проектування АД з врахуванням змінного навантаження з метою покращення їх техніко-економічних показників у квазістатичі [9];

4) визначення конструктивних параметрів АД конкретних типів поршневого компресорів, що забезпечують максимальне значення ККД у квазістатичних режимах [9].

Постановка задачі. Метою даної роботи є обґрунтування підходів до проектування АД із змінним навантаженням з покращеними характеристиками у робочих режимах.

Критерій інтенсивних квазістатичних режимів АД, які працюють у складі ЕМС з періодичним навантаженням запропоновано в роботі [5]. Його величина розраховується як відношення механічної постійної двигуна T_{MK} до електромагнітної T_E та характеризує наявність резонансу у межах частотної характеристики двигуна (коли амплітуда електромагнітного моменту M перевищує амплітуду моменту опору M_c ($m = M / M_c > 1$)) при частоті [1]

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{T_{MK}}{2T_E}}, \quad (1)$$

де ω_p , ω_0 – резонансна частота і частота вільних коливань відповідно.

При відсутності резонансу виконується умова [1]:

$$k_1 = T_{MK} / T_E > 2, \quad (2)$$

де k_1 – критерій інтенсивних квазістатичних режимів.

Співвідношення $k_1 > 2$ може бути отримано через вибір моменту інерції електроприводу, кількості пар полюсів, опору ротора, що впливає на критичне ковзання АД (J , p , s_k , M_k), згідно виразу [1]:

$$k_1 = \frac{J \cdot (\omega_1 \cdot s_k)^2}{2pM_k}. \quad (3)$$

Це дозволяє зменшити відношення амплітуд моментів M і M_c відповідно критерію [1]:

$$m = \frac{1}{\sqrt{k_1 - 0.25 \cdot k_1^2}}. \quad (4)$$

За допомогою критерію інтенсивних квазістатичних режимів проведено аналіз трифазних АД загальнопромислового призначення потужністю від 90 Вт до 11 кВт, що спроектовані на синхронні частоти обертання 3000, 1500 і 1000 об/хв, та уточнено область пошуку резервів поліпшення їх техніко-економічних показників у квазістатичних режимах. При розрахунках прийнято момент інерції електроприводу $J = 1,2 \cdot J_p$, де J_p – момент інерції ротора.

Умові (2) відповідає ряд двополюсних АД (рис. 1, а) з номінальними потужностями 180, 250, 370 і 550 Вт, моментами інерції і критичними ковзаннями

відповідно $J = 4,2 \cdot 10^{-4} - 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і $s_k = 0,46 - 0,55$. Найбільшу цікавість для дослідження й аналізу квазістатичних режимів зі змінним навантаженням являють двигуни малої потужності 90 Вт і 120 Вт (відповідно $k_1 = 0,53$ і $0,46$) з малими моментами інерції ($2,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) та двигуни у діапазоні потужностей 2,2–11 кВт (k_1 для даного інтервалу змінюється від 0,94 до 0,25) з малими значеннями критичних ковзань ($s_k = 0,25 - 0,15$).

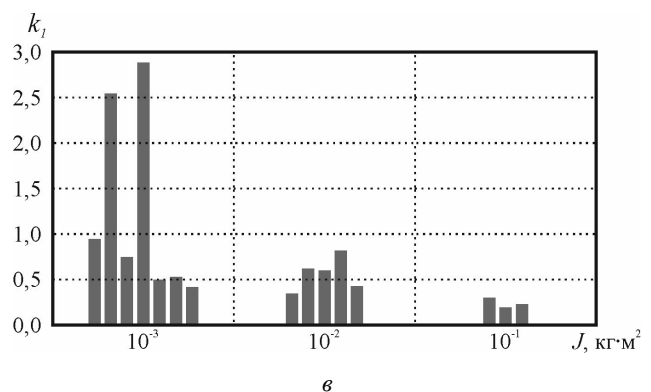
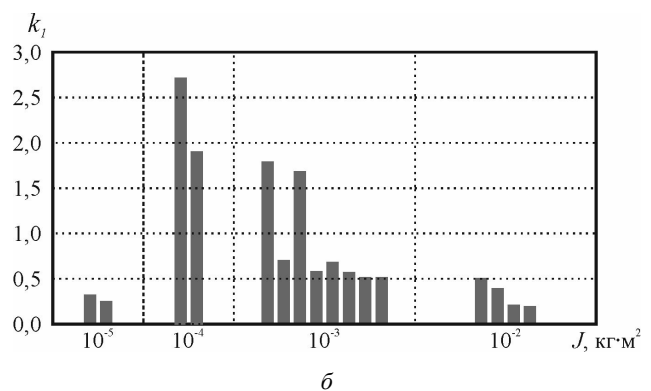
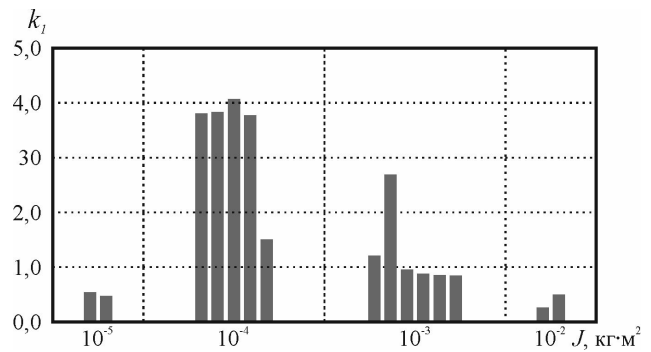


Рис. 1 – Гістограми залежності критерію інтенсивних квазістатичних режимів від моменту інерції електроприводу з: а – двополюсними, б – чотириполюсними, в – шестиполюсними АД

Для чотириполюсних (рис. 1, б) і шестиполюсних (рис. 1, в) двигунів область інтенсивних квазістатичних режимів АД збігається з діапазоном досліджень – від 90 Вт до 11 кВт. Винятком, за відсутності резонансних явищ, є двигуни: чотириполюсний потужністю 120 Вт

($J = 7 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $s_k = 0,5$, $k_1 = 2,71$) і шестиполосні потужністю 180 Вт і 250 Вт ($k_1 = 2,54$ і $2,88$, $s_k = 0,55$ і $0,62$ відповідно), що обумовлено співвідношенням параметрів згідно (3).

Математична модель асинхронного привода розроблена у середовищі MATLAB-Simulink, надана блоками: математичної моделі АД, навантажень, розрахунку струмів, моментів, частоти обертання, втрат, ККД, коефіцієнта потужності та пульсацій струмів, моментів і частоти обертання в квазісталих режимах із врахуванням періоду навантаження [8]. Дана модель дозволяє проводити комплексний аналіз режимів роботи АД, уточнювати результати їх розрахунків та досліджувати можливості покращення характеристик при змінному навантаженні [6–8].

Періодичне і пульсуюче навантаження [8], що характерне для одноциліндрового ($n_u = 1$) і двоциліндрового з зсувом робочих циклів на 180° ($n_u = 2$) поршневих компресорів одинарної дії, представлено залежністю моменту опору від кута повороту ротора двигуна $\gamma - M_c = f(\gamma)$, що прикладене у діапазоні $\frac{7}{9}\pi$ ($\gamma_1 = \frac{2\pi}{9}$; $\gamma_2 = \pi$) на періоді 2π для одноциліндрового поршневого компресора та на періоді π – двоциліндрового ПК. Розглянуті типи навантажень мають однаковий еквівалентний момент опору M_{ce} , у якості якого був прийнятий середній момент M_{csp} за період зміни моменту навантаження T_n .

Чисельний експеримент. Із застосуванням запропонованого критерію проведено дослідження робочих режимів шестиполосних трифазних АД з постійним $M_c = const$ і змінним $M_c = f(\gamma)$ навантаженням, характерним для одно- і двоциліндрових поршневих компресорів за зміни моменту інерції приводу і постійним значенням критичного ковзання з метою обґрунтування можливості підвищення ККД. Для цього виконано аналіз впливу зміни моменту інерції приводу компресорів на пульсації електромагнітного моменту ΔM , частоти обертання ротора $\delta\omega_r$ та енергетичні показники – ККД і коефіцієнт потужності у квазісталих режимах α [8]. Результати чисельних розрахунків характеристик квазісталих режимів асинхронних двигунів: №1 – 4A80A6У3 з номінальною потужністю $P_n = 700$ Вт, моментом інерції приводу $J_1 = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $s_k = 0,37$, $k_1 = 0,49$ та № 2 – 4A160S6У3 з $P_n = 11$ кВт, $J_1 = 1,28 \cdot J_p = 0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $s_k = 0,15$, $k_1 = 0,29$ наведено в табл. 1.

Для робочого режиму АД №1 з пульсуючим навантаженням ($n_u = 2$) потужність, яка споживається, збільшується на 26,3 %; ККД зменшується на 16 % ($\eta = 58,1$ %) в порівнянні з постійним навантаженням (див. табл.1). Режим характеризується пульсаціями: $\Delta M = 440$ %, $\delta\omega_r = 4,2$ %. При збільшенні моменту інерції приводу у 5 разів ($J_2 = 5J_1$), що відповідає

умові (1), ККД двигуна збільшується на 15,8 %, тобто практично до його номінального значення (73,9 %). Ступінь пульсацій частоти обертання ротора знижується в 4 рази. Це проілюстровано гістограмою на рис. 2.

У випадку одноциліндрового компресора з J_1 мають місце пульсації: $\Delta M = 772$ %, $\delta\omega_r = 81,5$ %, пульсації струмів статора і ротора відповідно $\delta i_s = 120$ %, $\delta i_r = 193$ % [8], що призводить до збільшення втрат у обмотках статора і ротора в 2,4 рази і до збільшення потужності, яка споживається, та зниження ККД на 27,3 % ($\eta = 46,7$ %) в порівнянні з постійним навантаженням. В результаті збільшення моменту інерції даного електроприводу у 5 разів можливо підвищити ККД двигуна на 9,4 % – до 56,1 % (рис. 3).

Таблиця 1 – Результати чисельних розрахунків квазісталих режимів АД поршневих компресорів за зміни моменту інерції приводу

АД №	Момент інерції J	Тип M_c	Показники робочих режимів
1	J_1	<i>const</i>	$P_2 = 338,5$ Вт, $\eta = 74$ % $\Delta M = 11,9$ %, $\delta\omega_r = 2,6$ %
	J_1	<i>var</i> $n_u = 2$	$P_2 = 315,4$ Вт, $\eta = 58,1$ % $\Delta M = 440$ %, $\delta\omega_r = 4,2$ %
	$J_2 = 5J_1$		$P_2 = 338,4$ Вт, $\eta = 73,9$ % $\Delta M = 4,2$ %, $\delta\omega_r = 1$ %
	J_1	<i>var</i> $n_u = 1$	$P_2 = 295,2$ Вт, $\eta = 46,7$ % $\Delta M = 772$ %, $\delta\omega_r = 81,5$ %
	$J_2 = 5J_1$		$P_2 = 295,6$ Вт, $\eta = 56,1$ % $\Delta M = 530,4$ %, $\delta\omega_r = 26,3$ %
2	J_1	<i>const</i>	$P_2 = 8790$ Вт, $\eta = 89,7$ %
		<i>var</i>	$P_2 = 8582$ Вт, $\eta = 88,4$ % $\Delta M = 120$ %, $\delta\omega_r = 22$ %
	$J_2 = 1,2J_1$		$P_2 = 10550$ Вт, $\eta = 87,6$ % $\Delta M = 97,6$ % $\delta\omega_r = 17,5$ %

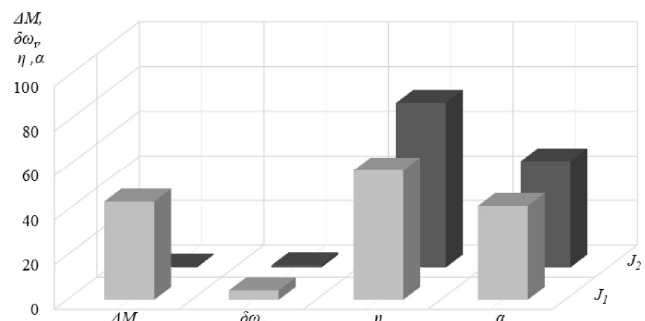


Рис. 2 – Гістограма показників квазісталих режимів двигуна 4A80A6У3 двоциліндрового компресора

При оптимальному проектуванні асинхронного двигуна 4A80A6У3 з пульсуючим навантаженням (при його незмінному базовому моменті інерції J_1) на ос-

нові запропонованого підходу [9] можна підвищити ККД у квазісталих режимах на 7,6 % (до 65,7 %) при варіюванні параметрами двигуна (наприклад, довжиною пакета і числом ефективних провідників обмотки статора). У подальшому для підвищення ККД підібрати необхідну масу маховика. Таким чином, для асинхронних двигунів двоциліндрових з зсувом робочих циклів на 180° ($n_{\text{ц}} = 2$) поршневих компресорів одинарної дії поряд з вибором моменту інерції приводу необхідно оптимізувати їх конструктивні параметри.

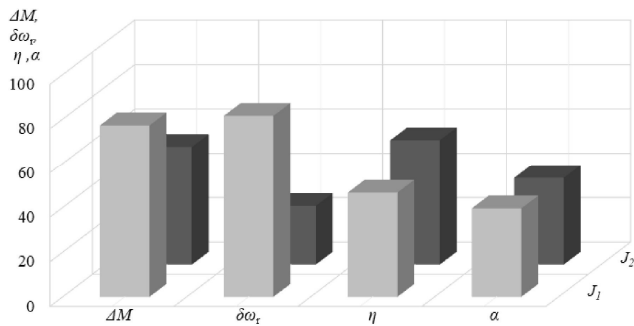


Рис. 3 – Гістограма показників квазісталих режимів двигуна 4A80A6U3 одноциліндрового компресора

Гістограма показників квазісталих режимів двигуна №2 потужністю 11 кВт, з періодичним навантаженням ($n_{\text{ц}} = 1$), за зміни моментів інерції на 20 %, показана на рис. 4. Для даного АД із значним моментом інерції приводу $J_1 = 0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і малим значенням критичного ковзання ($s_k = 0,15$), розбіжність по ККД складає 2 %, $\delta\omega_r$ – в межах 17,5...22 %. Це підтверджує необхідність проектування АД для відкритих поршневих компресорів із забезпеченням допустимого значення пульсації частоти обертання ротора [2] – у межах 1...2 %.

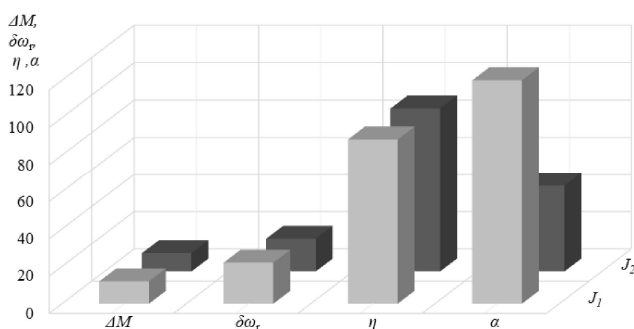


Рис. 4 – Гістограма показників квазісталих режимів двигуна 4A160S6U3 одноциліндрового компресора

Висновки. 1. Обґрунтована необхідність використання критерію інтенсивних квазісталих режимів для вибору варіантів АД поршневих компресорів, які потребують уточненого проектування з врахуванням характеру навантаження. За допомогою запропонованого критерію проведено аналіз та обрано серійні АД у діапазоні потужностей 90 Вт... 11 кВт за параметра-

ми: синхронна частота обертання, критичне ковзання, момент інерції з метою покращення техніко-економічних показників асинхронного привода поршневих компресорів.

2. Обґрунтовано підходи до проектування АД, що працюють у складі систем із змінним навантаженням. Підходи апробовано при дослідженні робочих режимів і встановлено можливість підвищення ККД трифазних шестиполосних АД двоциліндрового з зсувом робочих циклів на 180° поршневого компресора одинарної дії (з пульсуючим навантаженням) у робочих режимах:

– за традиційним підходом до номінального значення завдяки збільшенню моменту інерції згідно критерію інтенсивних квазісталих режимів,

– при оптимальному проектуванні (при незмінному базовому моменті інерції приводу) з врахуванням квазісталих режимів (при варіюванні параметрами АД) ККД – на 7...10 %.

Показано, що для асинхронних двигунів одноциліндрових компресорів одинарної дії поряд з моментом інерції приводу треба оптимізувати конструктивні параметри АД.

3. Доцільність застосування підходів проектування доведено на прикладі розрахунку квазісталих режимів двигуна 4A80A6U3 приводу двоциліндрового компресора ($k_1 = 0,49$), в результаті збільшення моменту інерції якого у п'ять разів ККД двигуна збільшено на 15,8 % (до 73,9 % при номінальному 74 %). При його оптимальному проектуванні при незмінному базовому моменті інерції приводу та варіюванні довжиною пакета і числом ефективних провідників обмотки статора підвищено ККД у робочих режимах на 7,6 %.

У випадку одноциліндрового компресора одинарної дії традиційний підхід не є ефективним, оскільки при збільшенні моменту інерції у п'ять разів ККД можна підвищити лише до 56,1 % наближаючись до його значення, що відповідає робочому режиму з пульсуючим навантаженням.

Список літератури

- Артемюк Б. Т. Асинхронные двигатели при периодической нагрузке. / Б. Т. Артемюк. – К.: Техніка, 1972. 200 с.
- Редкозуб Б. Д. Динамические характеристики поршневого компресора / Б. Д. Редкозуб, В. Б. Якобсон // Холодильная техника. – 1972. – № 4. – С. 9-12.
- Морозюк Л. И., Морозюк Т. В. Проектирование поршневого компресора холодильных машин и тепловых насосов / [Л. И. Морозюк, Т. В. Морозюк, Л. В. Ястребова и др.]; под ред. Л. И. Морозюк. – Одесса: ОГАХ, 2003. – 75 с.
- Смирнов Ю. В. Усовершенствование асинхронных электроприводов машин с периодически изменяющейся нагрузкой. / Ю. В. Смирнов // Электротехника. 2007. № 6. С. 13-16.
- Бібік О. В. Формування критерію визначення ефекту від урахування квазістатичності / О. В. Бібік // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – 2008, Вип. 20. – С. 40.
- Войтех А. А. Моделирование переходных процессов в полюсопереключаемых асинхронных двигателях. / А. В. Войтех, А. Н. Попович. – К: Наук. думка, 1989. 152 с.
- Бибик О. В. Врахування квазістатичних режимів при розробці асинхронних двигунів із змінним характером навантаження / О. В. Бібік, О. М. Попович // Науч. труды Кременчугского государственного политехнического университета "Проблемы создания новых машин и технологий". – Кременчуг. – 2004. – С. 23-24.

14. Бибик Е. В. Исследования квазистатических режимов асинхронного двигателя при пульсирующей и периодической нагрузках / О. В. Бибік, О. М. Попович, І В Головань // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, частина 2, 2006, С. 99-102.
15. Бибік О. В. Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу в квазистатичних режимах роботи / О. В. Бибік, О. М. Попович // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2007. – № 3. – С. 12-14.
6. Voitek A., Popovich A. *Modelirovaniye perekhodnykh protsessov v polyusopereklyuchayemykh asinkhronnykh dvigatelyakh*. [Simulation of transients in poleswitching asynchronous motors] K.: Scientific thought, 1989. 152 p.
7. Bibik O. V., Popovich O. M. *Vrakhuvannya kvazystatychnykh rezhymiv pry rozrobtsi asinkhronnykh dyvuhuniv iz zminnym kharakterom navantazhennya* [Considering quasistatic regimes in the development of asynchronous motors with variable load characterization] *Nauk. Works of the Kremenchug State Polytechnic University "Problems of creating new machines and technologies"*. - Kremenchug.- 2004.- P. 23-24
8. Bibik E. V., Popovich A. N., Golovan I. V. *Issledovaniya kvazistaticheskikh rezhimov asinkhronnogo dvigatelya pri pul'siruyushchey i periodicheskoy nagruzkakh* [Investigations of quasistatic modes of an induction motor with pulsating and periodic loads] *Technical electrodynamic. Thematic issue "Power Electronics and Energy Efficiency"*. Part 2, 2006, P. 99-102.
9. Bibik O. V., Popovich O. M. [Increase of energy efficiency of asynchronous electric drive in quasi-static operating modes]. *Electrical Engineering and Electromechanics*. - 2007. – N 3. – P 12-14.

References (transliterated)

1. Artemuk B. T. *Asinkhronnyye dvigateli pri periodicheskoy nagruzke*. [Asynchronous motors with periodic load]. K.: Tehnika, 1972, 200 p.
2. Redkozub B. D., Jacobson V. B. *Dinamicheskiye kharakteristiki porshnevoogo kompressora* [Dynamic characteristics of a piston compressor] *Refrigeration equipment*. - 1972. - N. 4. - P. 9-12.
3. Morozyuk L. I., Morozyuk T. V., Yastrebova L. V. et al *Proyektirovaniye porshnevoogo kompressora kholodil'nykh mashin i teplovykh nasosov* [Designing of a piston compressor for refrigerating machines and heat pumps] Odessa, 2003. – 75 p.
4. Smirnov Yu V. *Usovershenstvovaniye asinkhronnykh elektroprivodov mashin s periodicheskimi izmenyayushcheysoy nagruzkoy*. [Improvement of asynchronous electric machines with periodically varying load]. *Electrical engineering*. 2007. No. 6. P. 13-16.
5. Bibik O. V. *Formuvannya kryteriyu vyznachennya efektu vid urakhuvannya kvazistatyky* [Formation of the criterion of determining the effect of taking quasi statics into account] *Works of the Institute of*

Надійшла (received) 15.03.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обґрунтування підходів щодо проектування асинхронних двигунів зі змінним навантаженням / О. В. Бибік // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 94-98. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Обоснование подходов по проектированию асинхронных двигателей с переменной нагрузкой / Е. В. Бибик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 94-98. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Subject of the approaches to design asynchronous motors with variable load / O.V. Bibik // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 94-98. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бибік Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник Інститут електродинаміки Національної академії наук України, тел. (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.

Бибик Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, тел. (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.

Bibik Olena Vasylyivna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Research Officer, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel. +38 (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.