

УДК 621.313.333.2

В. С. Петрушин, д-р техн. наук,
Ю. Р. Плоткин, канд техн. наук,
Р. Н. Еноктаев, аспирант ОНПУ,
О. И. Шестаков, студент ОНПУ

РАЗРАБОТКА ШЕСТИФАЗНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

***Аннотация.** Разработаны комплексные математические модели управляемых электроприводов с шестифазными асинхронными двигателями. Выполнено автоматизированное оптимизационное проектирование шестифазных регулируемых асинхронных двигателей для трех проектных задач. За счет параметрической оптимизации найдены приемлемые значения варьируемых параметров при двух проектных критериях. Выполнено сопоставление технико-экономических показателей электроприводов с трёхфазными и шестифазными асинхронными двигателями. Определено значительное снижение виброакустических показателей в шестифазных двигателях.*

***Ключевые слова:** шестифазный регулируемый асинхронный двигатель, регулировочные характеристики, автоматизированное оптимизационное проектирование, проектные диапазонные критерии, варьируемые параметры, виброакустические показатели*

В.С. Петрушин, д-р техн. наук,
Ю.Р. Плоткін, канд техн. наук,
Р.М. Єноктаєв, аспірант ОНПУ,
О.І. Шестаков, студент ОНПУ

РОЗРОБКА ШЕСТИФАЗНОГО РЕГУЛЬОВАННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

***Анотація.** Розроблено комплексні математичні моделі керування електроприводів з шестифазними асинхронними двигунами. Виконано автоматизоване оптимізаційне проектування шестифазних регульованих асинхронних двигунів для трьох проектних задач. За рахунок параметричної оптимізації знайдені прийнятні значення варійованих параметрів при двох проектних критеріях. Виконано зіставлення техніко-економічних показників електроприводів з трифазними і шестифазними асинхронними двигунами. Визначено значне зниження виброакустичних показників у шестифазний двигунах.*

***Ключові слова:** шестифазний регульований асинхронний двигун, регульовальні характеристики, автоматизоване оптимізаційне проектування, проектні діапазонні критерії, варійовані параметри, виброакустичні показники*

V. Petrushin, ScD,
Y. Plotkin, PhD,
R. Yenoktaiev, Graduate student of ONPU,
O. Shestakov, Student of ONPU

DESIGN LIMITATIONS IN THE DEVELOPMENT OF CONTROLLED INDUCTION MOTORS

***Abstract.** Develop a comprehensive mathematical model of controlled electric drives with a six-phase asynchronous motors. Performed automated design optimization of controlled six-phase asynchronous motors for the three project tasks. The comparison of technical and economic parameters of electric drives with three-phase and six-phase asynchronous motors. Defined by a significant reduction in vibro-acoustic performance in a six-phase motors.*

***Keywords:** adjustable six-phase induction motor, control characteristics, computer-aided design optimization, design a range of criteria, variable parameters, vibro-acoustic performance*

Введение. Одним из путей улучшения эксплуатационных характеристик регулируемых асинхронных двигателей (РАД) является увеличение числа фаз, что способствует снижению пульсаций момента и скорости на валу двигателя, повышению надежности при уменьшенных уровнях шума и вибрации. Такой управляемый электропривод может быть построен при использовании многофазного преобразователя частоты, со-

здающего симметричную систему напряжений, имеющую временной сдвиг, равный пространственному сдвигу фаз многофазных РАД. Кроме того, дробление электрической мощности по фазам делает регулировочные характеристики РАД менее критичными к асимметрии по амплитуде и фазе питающего напряжения, что с увеличением числа фаз, в конечном итоге, упрощает систему управления и повышает надежность [1–3].

Применение многофазных регулируемых двигателей наблюдается в медицинской и бытовой технике, в электромобилестроении, в текстильной промышленности, в системах электродвижения судов [4]. Перспективно их использование в специальных вентиляционных системах и комплексах, где требуется повышенная надёжность двигателя при низком уровне шума и вибрации [5].

Постановка задач исследования. Для разработки шестифазного РАД должна быть создана комплексная модель привода, включающая модели шестифазного частотного преобразователя с двумя автономными инверторами напряжения (АИН), шестифазного двигателя и нагрузки. На рис.1 приведены две схемы регулируемых электроприводов: с трехфазным РАД и с шестифазным РАД.

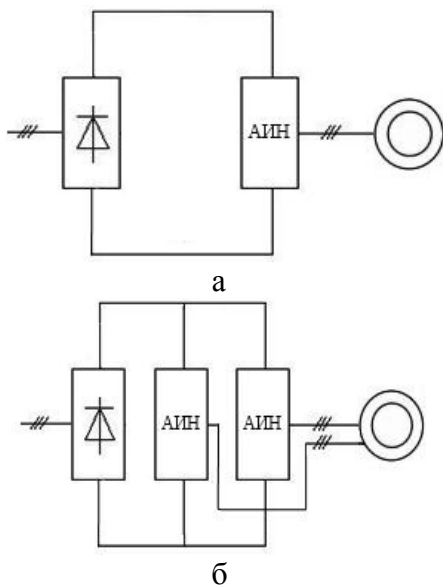


Рис.1. Схемы регулируемого ЭП:
 а – с трехфазным АД,
 б – с шестифазным АД.

В модели шестифазного АД обеспечивается исключение из рассмотрения пространственных гармоник 5, 7 и кратного им порядка [6].

Проектирование регулируемых АД для приводов с полупроводниковыми преобразователями необходимо выполнять с учетом требования работы в определенном диапазоне частот вращения и это обстоятельство определяет специфику критерия оптимальности. Обоснованным является выбор среднечастотного критерия КПД, что обеспечит минимизацию энергетических потерь во всем диапазоне регулирования от n_1 до n_2 [7,8,9]

$$\eta_{срАД} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} \eta_{АД}(n) \, dn. \quad (1)$$

Однако данный диапазонный критерий КПД не учитывает затраты на изготовление и эксплуатацию двигателя и привода, коэффициент инфляции и другое. Такой учет осуществляется при использовании диапазонного критерия ежегодных ПЗ.

При работе РАД в составе современных частотно–регулируемых электроприводов из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия ПЗ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии

$$ПЗ_{ЭП} = сеп [1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{аЭП}, \quad (2)$$

где $сеп$ – полная стоимости двигателя;
 $с_а$ – стоимость потерь электроэнергии за год, грн;
 t_n – нормативный срок окупаемости двигателя, лет;
 k_a – доля затрат на амортизационные отчисления;
 k_o – доля затрат на обслуживание при эксплуатации двигателя.
 Для регулируемых асинхронных двигателей значения $T_n = 5$ лет, $k_a = 0,065$, $k_o = 0,069$ принимаются теми же, что и для общепромышленных АД.

$$ПЗ_{срЭП} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} ПЗ_{ЭП}(n) \cdot dn. \quad (3)$$

Если известны временные диаграммы эксплуатации нагрузок, т.е. время работы на каждой частоте вращения, то оценку данных диапазонных энергетических критериев двигателя и привода необходимо производить с учетом длительности работы двигателя в каждой точке диапазона регулирования

$$\eta_{сдАД} = \frac{\sum_i (\eta(n_i) \cdot t_{n_i})}{\sum_i t_{n_i}}, \quad (4)$$

где t_{n_i} – время работы двигателя при частоте вращения n_i , i – порядковый номер участка тахограммы.

Соответственно рассчитываются среднediaпазонные приведенные затраты

$$ПЗ_{сдЭП} = \frac{\sum_i (ПЗ(n_i) \cdot t_{n_i})}{\sum_i t_{n_i}}, \quad (5)$$

Результаты исследований. Особенно важно при проектировании РАД является необходимость использования в системе расчетного проектирования комплексной математической модели всей системы ЭП, а не модели только двигателя [10,11]. На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработан программный продукт DI-MASDrive [12], позволяющий осуществить проектирование РАД.

Рассматривается работа серийного асинхронного трехфазного двигателя 4А160S4 и выполненного на его базе шестифазного АД. В шестифазном двигателе число параллельных ветвей уменьшается вдвое. Стоимость шестифазного АД больше стоимости трехфазного АД, что учитывается 5% повышением затрат на производство. Рассматривается работа двигателя в регулируемом электроприводе (РЭП) с частотным преобразователем (Altivar 58, 1500 у.е., 15 кг, $\eta_{пр}=0,94$) при законе частотного управления $U/f=const$.

Условно принимается, что массогабаритностоимостные показатели шестифазных преобразователей на 30% больше соот-

ветствующих показателей трехфазных преобразователей. Как нагрузка используется “лифтовая” нагрузка величиной 75 Нм. В качестве варьируемых параметров выбраны частота, на которую проектируется обмотка статора (ОС) двигателя и длина пакета статора двигателя (L). Изменение частоты (f) предполагает автоматическое изменение числа витков ОС (W_1), сечения эффективно-го проводника ОС ($q_{эф}$), диаметра обмоточного провода ($d_{пр}$) [13].

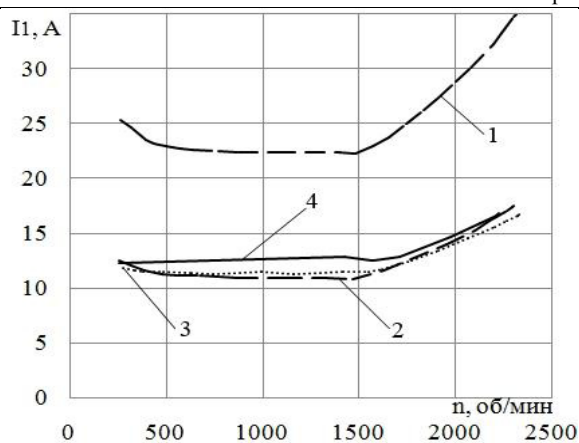
Первая проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для определенного диапазона регулирования. В рассматриваемом случае выбран диапазон 300 – 1900 об/мин. Диапазоны изменения варьируемых параметров от 0,8 до 1,2 базовых значений.

В табл. 1 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений шестифазного асинхронного двигателя при использовании критериев проектирования: $\eta_{АД}$ (1) и $ПЗ_{ЭП}$ (2).

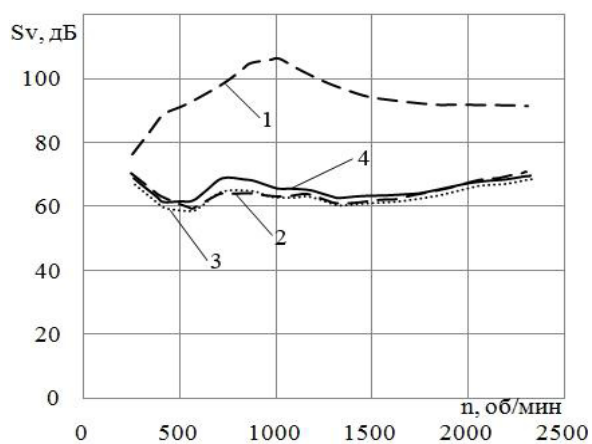
На рис.2 представлены регулировочные характеристики рассматриваемых РЭП для первой проектной задачи, представляющие собой зависимости изменения электрических и виброакустических величин от числа оборотов.

1. Проектные критерии и конструктивные изменения шестифазного асинхронного двигателя

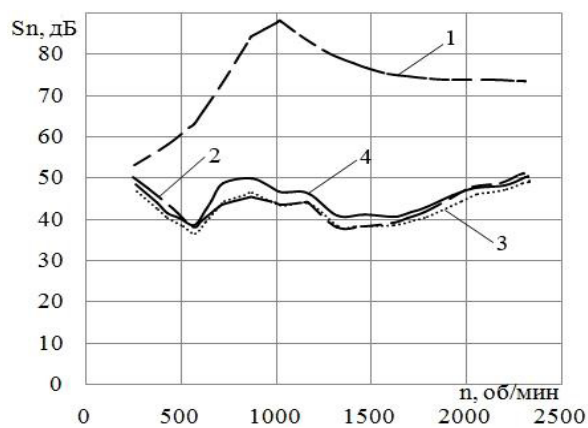
Двигатели / Показатели и параметры	Серийный трехфазный	Базовый шестифазный	Оптимизированный	
			по критерию 1	по критерию 2
$\eta_{сд} АД, \%$	83,87	84,05	85,89	84,10
$ПЗ_{сд} РЭП, \text{тыс. у.е.}$	5,162	5,928	5,968	5,882
$\eta_{сд} РЭП, \%$	82,23	82,40	84,21	82,45
L, мм	130	130	153,9	123,3
f, Гц	50	50	59,90	52,96
W_1	112	112	93	106
$q_{эф}, \text{мм}^2$	2,45	2,45	2,94	2,59
$d_{пр}, \text{мм}$	1,33	1,33	1,43	1,33



а



б



в

Рис.2. Изменение потребляемого тока (а), виброскорости (б) и магнитного шума (в) в диапазоне регулирования: 1–РЭП с серийным трехфазным АД, 2–РЭП с базовым шестифазным АД, 3–РЭП с шестифазным АД оптимизированным по критерию 1, 4–РЭП с шестифазным АД оптимизированным по критерию 2

Вторая проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для работы на заданную тахограмму (100 с.– 300 об/мин, 100 с.– 1900 об/мин) и решается без учета переходных процессов.

В табл. 2 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений шестифазного асинхронного двигателя при использовании двух критериев проектирования: $\eta_{АД}$ (1) и $ПЗ_{ЭП}$ (2).

2. Проектные критерии и конструктивные изменения шестифазного асинхронного двигателя при второй проектной задаче

Двигатели Показатели и параметры	Серийный трехфазный	Базовый шестифазный	Оптимизированный	
			по критерию 1	по критерию 2
$\eta_{сд}$ АД, %	76,12	76,12	80,76	79,04
$ПЗ_{сд}$ РЭП, тыс. у.е.	5,587	6,363	6,201	6,093
$\eta_{сд}$ РЭП, %	74,63	74,63	79,18	77,49
L, мм	130	130	148,4	116,3
f, Гц	50	50	59,83	57,13
W_1	112	112	94	98
$q_{эф}$, мм ²	2,45	2,45	2,937	2,80
$d_{пр}$, мм	1,33	1,33	1,43	1,38

Третья проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для работы на заданную тахограмму (5 с.– 400 об/мин, 5 с.– 1000 об/мин, 5 с.– 1900 об/мин) и решается с учетом переходных процессов. В данном опыте были приняты скорость нарастания частоты 20 Гц/с и момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом 1 кг·м².

В табл. 3 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений шестифазного двигателя при использовании двух критериев: $\eta_{АД}$ (1) и $ПЗ_{ЭП}$ (2).

На рис. 3 показаны изменения токов, виброскоростей и магнитных шумов при работе рассматриваемых двигателей на заданную тахограмму.

3. Проектные критерии и конструктивные изменения шестифазного асинхронного двигателя при третьей проектной задаче

Двигатели / Показатели и параметры	Серийный трехфазный	Базовый шестифазный	Оптимизированный	
			по критерию 1	по критерию 2
$\eta_{сд}$ АД, %	90,13	90,38	92,48	90,72
$P_{3сд}$ РЭП, тыс. у.е.	4,074	4,850	5,004	4,769
$\eta_{сд}$ РЭП, %	88,34	88,61	90,61	88,94
L , мм	130	130	154,1	117,3
f , Гц	50	50	59,51	51,89
W_1	112	112	94	108
$q_{эф}$, мм ²	2,45	2,45	2,92	2,54
$d_{пр}$, мм	1,33	1,33	1,43	1,33

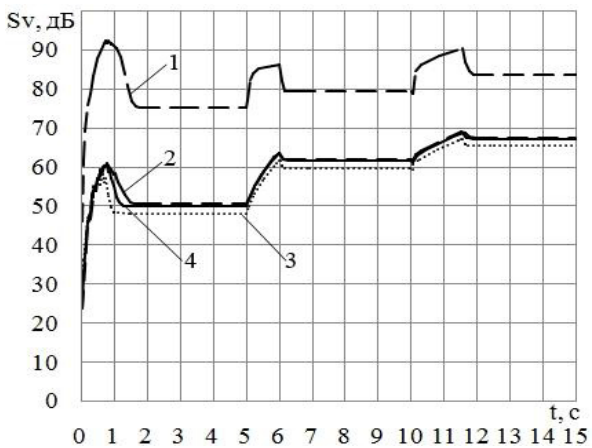
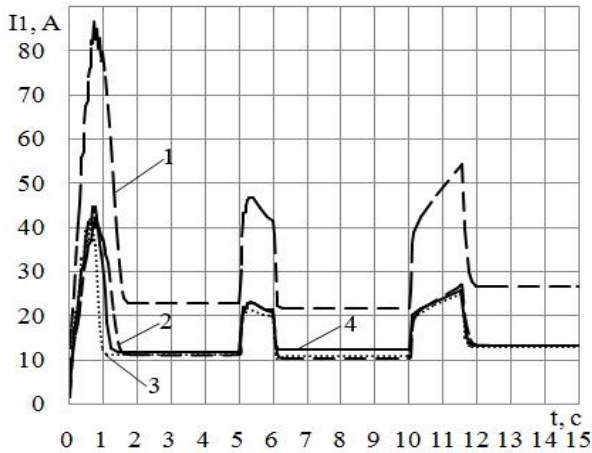
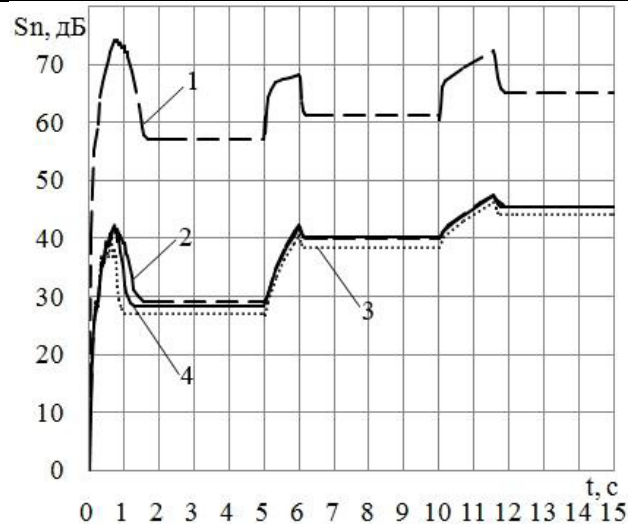


Рис.3 Изменение потребляемого тока (а), виброскорости (б) и магнитного шума (в): 1– РЭП с серийным трехфазным АД, 2– РЭП с базовым шестифазным АД, 3– РЭП с шестифазным АД оптимизированным по критерию 1, 4– РЭП с шестифазным АД оптимизированным по критерию 2

Выводы. Потребляемый ток шестифазных АД примерно вдвое меньше потребляемого тока трехфазного АД.

Выявлено значительное снижение виброскоростей и магнитных шумов шестифазных АД по сравнению с аналогичными показателями трехфазного АД в анализируемом диапазоне регулирования, при всех трех рассматриваемых проектных задачах.

Результаты оптимизационного проектирования различны в зависимости от того, какой проектный критерий был выбран. За счет найденных варьируемых переменных обеспечиваются экстремумы соответствующих критериев.

Возможно проведение оптимизационного проектирования при других критериях, коэффициентах значимости критериев, проектных задачах, а также разнообразных варьируемых параметрах.

Список использованной литературы

1. Дацковский Л. Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-

а

б

в

регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) [Текст] / Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой и др. // Электротехника. – Москва: – 1996. – Вып.10.

2. Соустин Б.П. Многофазный инверторный асинхронный электропривод [Текст] / Б.П. Соустин // Наука производства. – Москва: – 2000. – Вып. 3. – С. 10–16.

3. Сидельников Б.В. Шестифазные частотно-регулируемые асинхронные двигатели большой мощности [Текст] / Б.В. Сидельников // Известия РАН. Энергетика. – Москва: – 2000. – Вып. 3. – С. 31–38.

4. Мустафа Т.М. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя [Текст] / Т.М. Мустафа, С.В. Волков, А.М. Ершов, Ю.М. Сенцов, Г.М. Минаев // Электротехника. – Москва: – 2014. – Вып.1. – С. 46–54.

5. Голубев А.Н. Влияние числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя на его виброшумовые характеристики [Текст] / А.Н. Голубев., С.В. Игнатенко // Электротехника.– Москва: – 2000. – Вып.6. – С. 28–31.

6. Голубев А.Н. Математическая модель асинхронного двигателя с многофазными обмотками статора и ротора [Текст] / А.Н. Голубев, В.В. Зыков // Электротехника. – Москва: – 2003. – Вып.7. – С. 35–40.

7. Петрушин В.С. Диапазонные критерии оптимальности при проектировании регулируемых асинхронных двигателей [Текст] / В.С. Петрушин // Труды Одесск. политехн. ун-та. – Киев: – 2001. – Вып.1(13). – С. 81–86.

8. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления [Текст] / В.С. Петрушин // Электромашинно-обудовання та електрообладнання. Респ. міжвід. наук. техн. зб. – Киев: – 2001.– Вып. 56. – С. 51–54.

9. Schroder P. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen, 2 Auflage. Berlin. Springer. – 2001. – S. 1172.

10. Park T.S. Speed-sensorless vector control of an induction motor using recursive least square algorithm / T.S. Park, S.H Kim, J.Y. Yoo // Trans. KIEE. Vol. 48B, № 3, mar, 1999. pp. 139–143.

11. IEC/TS 60034-25 Ed. 1.0 Rotating electrical machines Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply.

12. 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: – Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

13. Петрушин В.С. Проектные диапазонные критерии при разработке регулируемых асинхронных двигателей [Текст] / В. С. Петрушин, Р. Н. Еноктаев // Электротехника і електромеханіка. – Харьков: – 2014. – Вып.5. – С. 33–36.

Получено 09.11.2015

References

1. Datskovskii L. X., Rogovoi V. I. i dr. Sovremennoe sostoyanie i tendentsii v asinkhronnom chastotno-reguliruemom elektroprivode (kratkii analiticheskii obzor) [Current status and trends in asynchronous variable frequency drives (policy brief)], (1996), Elektrotehnika, Vol.(10), (In Russian).

2. Soustin B.P. Mnogofaznyi invertorni asin-khronnyi elektroprivod [Single-phase inverter asynchronous electric], (2000), Nauka proizvodstvu, Vol.(3), pp. 10–16 (In Russian).

3. Sidel'nikov B.V. Shestifaznye chastotno-reguliruemye asinkhronnye dvigateli bol'shoi moshchnosti [Six-phase variable-frequency high power asynchronous motors],(2000), Izvestiya RAN. Energetika, Vol.(3), pp. 31–38 (In Russian).

4. Mustafa T.M., Volkov S.V., Ershov A.M., Sentsov Yu.M., Minaev G.M. Preobrazovatel' chastoty dlya grebnogo elektrodvigatelya [Frequency converter for the propeller motor], (2014), Elektrotehnika, Vol.(1), pp. 46–54 (In Russian).

5. Golubev A.N., Ignatenko C.B. Vliyanie chisla faz statornoi obmotki asinkhronnogo

dvigatelya na ego vibroshumovye kharakteristiki [Influence of the number of phases of the stator winding of the induction motor on its characteristics vibroshumovye], (2000), Elektrotehnika, Vol. (1), pp. 28–31 (In Russian).

6. Golubev A.N., Zыkov V.V. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya s mnogofaznymi obmotkami statora i rotora [A mathematical model of a multi-phase induction motor stator and rotor windings], (2003), Elektrotehnika, Vol.(7), pp. 35–40 (In Russian).

7. Petrushin V.S. Diapazonnyye kriterii optimal'nosti pri proektirovanii reguliruemyykh asinhronnykh dvigatelej [Range of optimality criteria for the design of controlled asynchronous motors], (2001), Tr. Odessk. politehn. un-ta, Vol.1(13), pp. 81 – 86 (In Russian).

8. Petrushin V.S. Privedennyye zatraty asinkhronnykh dvigatelei v chastotnom elektroprivode pri razlichnykh zakonakh upravleniya [These costs asynchronous motors in the drive frequency at different control laws], (2001), Elektromashinobudovaniya ta elektrobladnannya: Resp. mizhvid. nauk. – tekhn. Vol. (56), pp. 51–54 (In Russian).

9. Schroder P. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen, 2 Auflage. Berlin: Springer, 2001. – S. 1172.

10. Park T.S. Speed-sensorless vector control of an induction motor using recursive least square algorithm / T.S. Park, S.H Kim, J.Y. Yoo и др. // Trans. KIEE. Vol. 48B, № 3, mar, 1999. pp. 139–143.

11. IEC/TS 60034-25 Ed. 1.0 Rotating electrical machines Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply.

12. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. Programmnyj produkt „DIMASDrive”. Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoda (svidetel'stvo o registracii programmy PA№4065) [The software product "DIMASDrive". Analysis program of work, selection and design of asynchronous cage motors tion system so controlled drive (evidence of a PA program

registration number 4065).], (2001), Gosudarstvennyj departament intellektual'noj sobstvennosti, Kiev.

13. Petrushin V.S., Enoktaev R.N. Proektnyye diapazonnyye kriterii pri razrabotke reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei [Project range of criteria in the development of controlled asynchronous motors], (2014), Elektrotehnika i elektromekhanika, Vol.(5), pp. 33–36 (In Russian).



Петрушин Виктор Сергеевич,
д-р техн. наук, проф.,
зав. каф. Электрических машин Одесск. нац. политехн. ун-та,
Одесса, пр-т Шевченко, 1, тел. (048)734-8494.
E-mail:
victor_petrushin@ukr.net



Плоткин Юрий Романович,
к.т.н., проф., HWR Berlin,
Alt Friedrichsfelde 60,
10315 Berlin;
+49 (0)30 30877-2443.
E-mail:
juriy.plotkin@hwr-berlin.de



Еноктаев Ростислав Николаевич,
аспирант Одесск. нац. политехн. ун-та, 65044,
Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ,
E-mail:
rostik-enok@inbox.ru



Шестаков Олег Игоревич,
студент Одесск. нац. политехн. ун-та, 65044,
Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ,
E-mail:
nev3rmind95@gmail.com