

УДК 621.313.333.2

Петрушин В. С., д-р техн. наук,
Плоткин Ю. Р., канд. техн. наук,
Еноктаев Р. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВУХБЛОЧНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ И МНОГОФАЗНЫМИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

***Аннотация.** Рассмотрен ряд схем регулируемых электроприводов, в которых использованы двухблочные выпрямители и многофазные асинхронные двигатели. Выполнено математическое моделирование при условии работы рассматриваемых приводов на определенную по величине и характеру нагрузку и заданный диапазон регулирования. В результате сравнения технико-экономических показателей рассматриваемых схем обеспечивается возможность выбора приемлемого варианта в зависимости от обоснованного критерия выбора. Определено снижение виброакустических показателей шестифазных двигателей по сравнению с трехфазными.*

***Ключевые слова:** частотный преобразователь, двухблочный выпрямитель, регулируемый асинхронный двигатель, регулировочные характеристики, критерии выбора, виброакустические показатели*

Петрушин В. С., д-р техн. наук,
Плоткин Ю. Р., канд. техн. наук,
Еноктаев Р. М.

МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВОБЛОЧНИМИ ВИПРЯМЛЯЧАМИ ТА БАГАТОФАЗНИМИ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

***Анотація.** Розглянуто ряд схем регульованих електроприводів, в яких використані двоблочні випрямлячі і багатofазні асинхронні двигуни. Виконано математичне моделювання за умови роботи розглянутих приводів на певне за величиною і характером навантаження і заданий діапазон регулювання. В результаті порівняння техніко-економічних показників розглянутих схем забезпечується можливість вибору прийняттого варіанту в залежності від обґрунтованого критерію вибору. Визначено зниження віброакустичних показників шестифазних двигунів у порівнянні з трифазними.*

***Ключові слова:** частотний перетворювач, двоблочний випрямляч, регульований асинхронний двигун, регульовальні характеристики, критерії вибору, віброакустичні показники*

Petrushin V., ScD,
Plotkin Y., PhD,
Yenoktaiev R.

SIMULATION OF VARIABLE SPEED DRIVES WITH BI-BLOCK RECTIFIERS AND HIGH-PHASE INDUCTION MOTORS

***Annotation.** Reviewed a series of schemes of variable speed drives, which are used diblock rectifiers and high-phase induction motors. Mathematical modeling of work, provided the unit in question to a certain magnitude and nature of the load and the specified control range. As a result, comparison of technical and economic indicators examined schemes it is possible to select a suitable option, depending on the sound selection criteria. Determined reduction of vibro-acoustic performance six-phase motors as compared to the three-phase motors.*

***Keywords:** inverter, diblock rectifier, adjustable induction motor, control characteristics, selection criteria, vibro-acoustic performance*

Введение. Преобразователи частоты, используемые в регулируемых электроприводах (РЭП), могут включать в себя один, два и более блоков сетевых выпрямителей. При нескольких блоках применяются трехобмоточные трансформаторы [1] и такое техническое решение дает возможность снизить пульсации на стороне постоянного тока

преобразователя и компенсировать гармонические составляющие определенных порядков на стороне переменного тока. Как при одно, так и при многоблочном выпрямлении за счет использования одного или нескольких автономных инверторов создается многофазная симметричная система напряжений, которая питает многофазные регулиру-

емые асинхронные двигатели (РАД). Двигатели с числом фаз более 3 находят применение в медицинской и бытовой технике, в автомобилестроении, в текстильной промышленности, в системах электродвижения судов [2,3]. Поскольку у многофазных РАД наблюдается снижение пульсаций момента и скорости на валу двигателя, перспективно их использование в специальных вентиляционных системах и комплексах, где требуется повышенная надёжность двигателя при низком уровне шума и вибрации [4,5]. В связи с дроблением электрической мощности по фазам регулировочные характеристики РАД менее критичны к асимметрии по амплитуде и фазе питающего напряжения, что с увеличением числа фаз, в конечном итоге, упрощает систему управления и повышает надёжность.

Постановка задач исследования. Целесообразно сопоставить эксплуатационные характеристики РАД при различных схемах электроприводов, работающих на одинаковую нагрузку в определенном диапазоне регулирования. На рис.1 приведены четыре схемы приводов (с трехфазным АД и с шести фазным АД).

В качестве критериев выбора приемлемого варианта при сопоставлении различных электроприводов и двигателей могут использоваться масса, габариты, стоимость двигателя, среднediaпазонные приведенные затраты на изготовление и эксплуатацию (*ПЗ*), среднediaпазонные энергетические показатели (*КПД* и коэффициент мощности). Можно также использовать аналогичные критерии, определяемые для всего РЭП.

Среднediaпазонные энергетические критерии [6] отражают энергетику РАД во всем диапазоне регулирования от n_1 до n_2 и определяются как эквивалентные усредненные для этого диапазона

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

$$\cos \varphi_{1срАД} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} \cos \varphi_{1АД}(n) \cdot dn. \quad (2)$$

То же касается и обобщенного критерия приведенных затрат двигателя, который учи-

тывает стоимость изготовления и затраты на эксплуатацию.

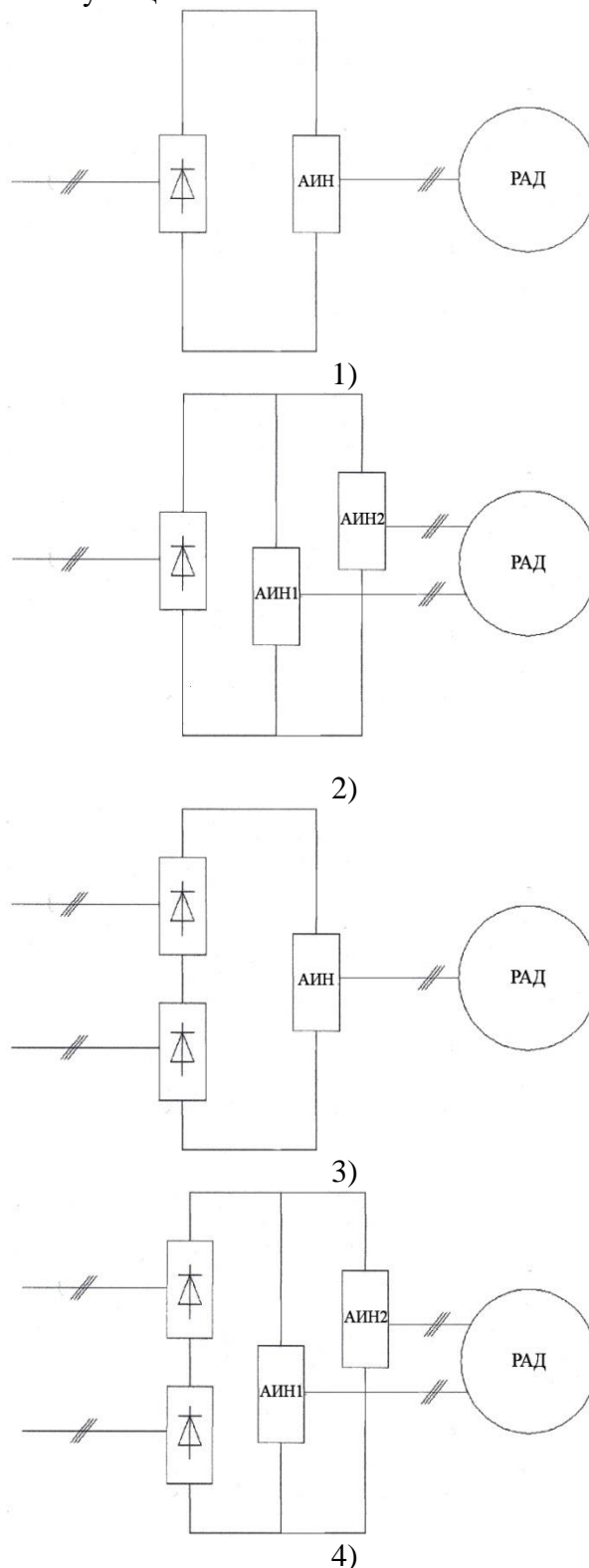


Рис.1. Схемы РЭП: 1– с одноблочным выпрямителем и трехфазным РАД; 2– с одноблочным выпрямителем и шести фазным РАД; 3– с двухблочным выпрямителем и трехфазным РАД; 4– с двухблочным выпрямителем и шести фазным РАД.

Приведенные затраты имеют различные значения в разных точках диапазона в связи с тем, что они зависят от КПД и коэффициента мощности. Поэтому обобщенный критерий $PЗ$ является также средндиапазонным и определяется как эквивалентное усредненное значение для всего диапазона

$$PЗ_{сдАД} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} PЗ_{АД}(n) \cdot dn. \quad (3)$$

При известной полной стоимости двигателя ced значение критерия определяется как

$$PЗ_{АД} = (ced + C_u)[1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{аАД}, \quad (4)$$

где C_u – стоимость затрат на компенсацию реактивной мощности, грн; $C_{аАД}$ – 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 [7,8]. Тогда

$$PЗ_{АД} = 1,67(ced + C_u) + C_{аАД}, \quad (5)$$

$$C_u = C_{cre} P_1 (tg\phi_{1АД} - 0,484), \quad (6)$$

$$C_{аАД} = C_{cae} P_{1АД} (1,04 - \eta_{АД}), \quad (7)$$

где C_{cae} – коэффициент, учитывающий стоимость потерь активной энергии, представляющий собой произведение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии в течении срока службы двигателя (1 грн. за кВт·ч), числа часов работы двигателя в течении года (2100), числа лет работы до капитального ремонта (5) и коэффициента относительной загрузки двигателя (0,8), C_{cre} – коэффициент, учитывающий стоимость компенсации реактивной энергии и представляющий собой произведение стоимости 1 кВАр реактивной мощности компенсирующих устройств (10 грн. за 1 кВАр), коэффициента участия двигателя в максимуме нагрузки системы (0,25).

Коэффициент мощности современных частотно-регулируемых электроприводов близок к 1. Поэтому из выражения критерия $PЗ$ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии

$$PЗ_{ЭП} = ser [1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{аЭП}, \quad (8)$$

где ser – полная стоимость электропривода

$$C_{аЭП} = C_{cae} P_{1ЭП} (1,04 - \eta_{ЭП}). \quad (9)$$

Значения коэффициентов и стоимостей, а также часов и лет используются такие же, что и для определения $PЗ_{АД}$

$$PЗ_{сдЭП} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} PЗ_{ЭП}(n) \cdot dn. \quad (10)$$

Результаты исследований. Рассматривается работа РАД на базе серийного двигателя 4А160S4. В двигателях используется схема соединения обмотки статора “звездой”. При задании исходных данных шестифазного двигателя число параллельных ветвей уменьшается вдвое. При использовании двухблочных выпрямителей, включенных последовательно, фазное напряжение на двигателе будет вдвое больше, чем при использовании одноблочного выпрямителя. В связи с этим двигатели для двухблочных схем должны иметь обмотки, пересчитанные на новое напряжение. В модели шестифазного АД обеспечивается исключение из рассмотрения пространственных гармоник 5, 7 и кратного им порядка, а также меняется коэффициент распределения, зависящий от числа фаз.

При моделировании работы РАД в соответствии с принципами системного подхода необходимо совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и нагрузок [9]. На кафедре электрических машин Одесского политехнического университета разработана программа DIMASDrive, позволяющая осуществить такое моделирование.

Для электропривода с одноблочным выпрямителем и трехфазным РАД выбран частотный преобразователь Altivar 58 (28000 грн., 15 кг, $\eta_{пр} = 0,94$). Массогабаритностоймости показатели шестифазных преобразователей условно увеличиваются на 30 %. Также на 30 % увеличиваются эти показатели при использовании двухблочных схем выпрямления. За счет увеличения затрат на производство учитывается изменение стоимостей шестифазных РАД по сравнению с трехфазными.

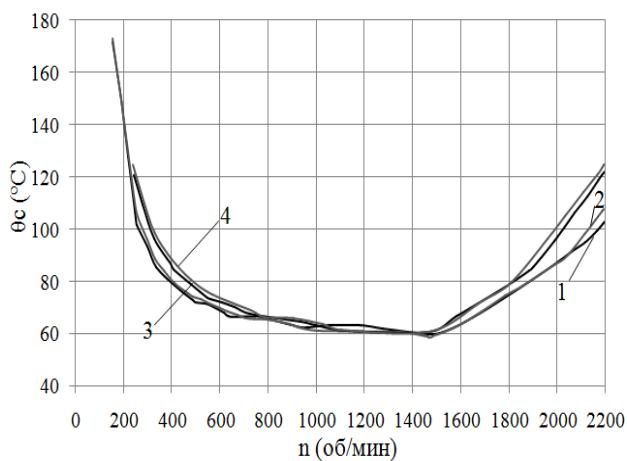
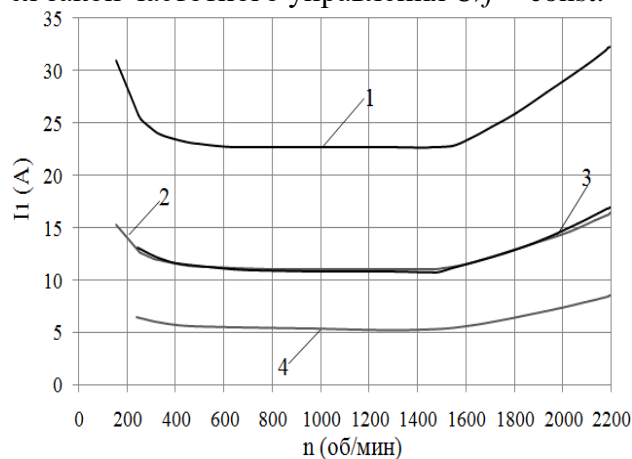
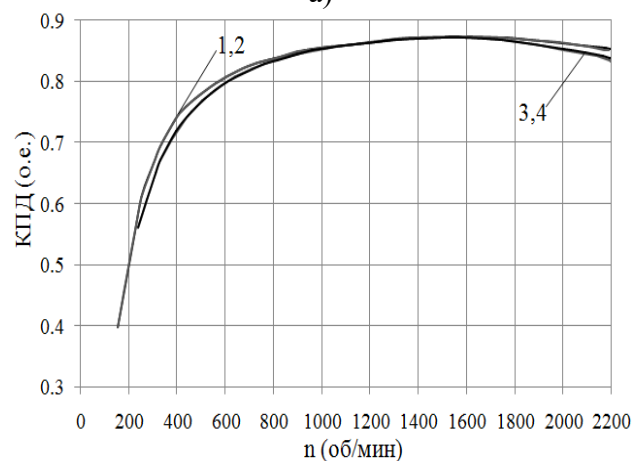


Рис.2. Изменение температур перегрева статорных обмоток двигателей в диапазоне регулирования

Во всех преобразователях рассматривался закон частотного управления $U/f = const.$



а)



б)

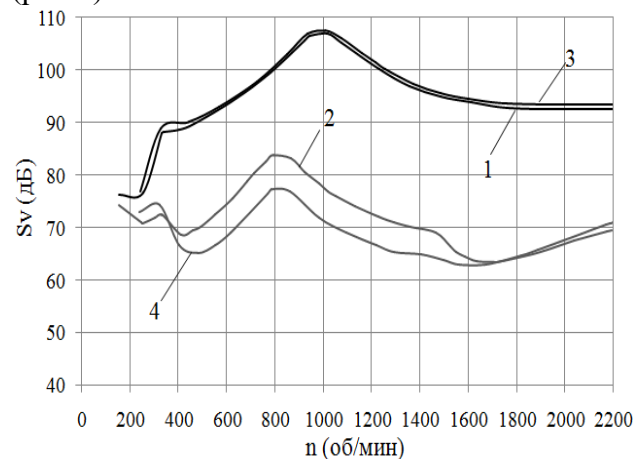
Рис.3. Изменение потребляемых двигателем токов (а) и КПД (б) в диапазоне регулирования

В качестве нагрузки использовалась «лифтовая» нагрузка, $M_{нагр} = 75 \text{ Н}\cdot\text{м}$. При

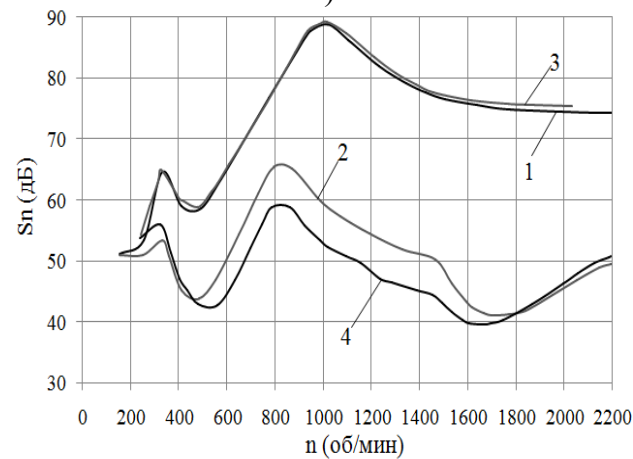
этой нагрузке требуемый диапазон регулирования (300 – 1800 об/мин) может быть обеспечен всеми рассматриваемыми электроприводами, что подтверждается зависимостями температур перегрева θ_{oc} обмоток статора двигателей (рис.2). Зависимости представлены соответственно нумерации рассматриваемых схем.

На рис.3 представлены регулировочные характеристики рассматриваемых РЭП, представляющие собой зависимости изменения потребляемого двигателями тока и КПД от числа оборотов.

Рассматривались также зависимости изменения виброакустических показателей электромагнитной природы (виброскорости S_v и магнитного шума S_n) от числа оборотов (рис.4)



а)



б)

Рис.4. Изменение виброскорости и магнитного шума в диапазоне регулирования

В таблице 1 приведены значения показателей, рассмотренных РЭП, к числу которых относятся среднediaпазонные КПД ($\eta_{сд}$) и приведенные затраты ($ПЗ_{сд}$), а также мас-

согабаритостойкие показатели как двигателей, так и приводов.

Таблица 1. Сравнение показателей различных РЭП

РЭП	Одно- блоч- ный	Одно- блоч- ный	Двух- блоч- ный	Двух- блоч- ный
Показатели и параметры	3-х фаз- ный	6-ти фаз- ный	3-х фаз- ный	6-ти фаз- ный
η_{cd} АД, %	80,78	80,88	79,69	79,59
$\cos\varphi_{cd}$ АД, о.е.	0,90	0,91	0,91	0,91
η_{cd} РЭП, %	79,20	79,29	79,69	79,59
P_{3cd} АД, тыс.у.е.	39,13	39,05	41,22	41,39
P_{3cd} РЭП, тыс.у.е.	87,38	101,3	102,0	116,1
Масса АД, кг	118	118	120	120
Объем АД, дм ³	9,62	9,62	9,62	9,62
Стои- мость АД, грн.	10222	10237	10669	10684
Масса РЭП, кг	133	138	139	144
Стои- мость РЭП, грн.	38222	46637	47069	55484

Выводы. Потребляемые двигателями токи различны для рассматриваемых схем РЭП и их наименьшие значения имеют место в электроприводе с двухблочным выпрямителем и шестифазным РАД.

Значения виброакустических показателей шестифазных двигателей меньше, чем трехфазных.

На основании сравнения технико-экономических показателей рассматриваемых схем, возможно осуществить выбор приемлемого варианта в зависимости от обоснованного критерия выбора.

Список использованной литературы

1. Мустафа Т.М. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя /

Т.М. Мустафа, С.В. Волков и др. // *Электротехника*: – 2014. – Вып.1. – С. 46-54.

2. Дацковский Л. Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Л. Х. Дацковский, В. И. Роговой и др. // *Электротехника*: – 1996. – Вып. 10.

3. Соустин Б.П. Многофазный инверторный асинхронный электропривод // *Наука производству*: – 2000. Вып.3. – С. 10-16.

4. Сидельников Б.В. Шестифазные частотно-регулируемые асинхронные двигатели большой мощности. *Известия РАН. Энергетика*: – 2000. – Вып.3. – С. 31-38.

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

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

7. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // *Электромашиностроения та электрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб*: – 2001. – Вип. 56. – С. 51 -54.

8. Петрушин В.С. Проектные диапазонные критерии при разработке регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, Р. Н. Еноктаев // *Електротехніка і електромеханіка*: –2014. – Вып. 5. – С. 33-36.

9. Петрушин В.С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" // *Одесса, Наука и техника*: –2006. – 320 с.

Получено 01.05.2016

References

1. 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).

2. 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).

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

4. 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).

5. Golubev A.N., Ignatenko C.B. *Vliyanie chisla faz statornoj 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. Petrushin V.S. *Diapazonnye kriterii optimal'nosti pri proektirovanii reguliruemykh asinkhronnykh 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).

7. 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), *Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya: Resp. mizhvid. nauk. – tekhn.* Vol. 56, pp. 51–54 (In Russian).

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

9. Petrushin V.S. *Uchebnoe posobie. Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode* [Textbook. Induction motors in

adjustable electric]. Odessa, Science and Technology Publ., 2006, 320 p. (In Russian).



Петрушин Виктор Сергеевич,
д-р техн. наук, проф.,
зав. каф.
Электрических машин
Одесск. нац. политехн.
ун-та, 65044, Одесса,
пр-т Шевченко, 1,
ОНПУ, тел. (048)734-
8494.
E-mail:
viktor_petrushin@ukr.net



Плоткин Юрий Романович,
к-т техн. наук, проф.,
HWR Berlin,
Alt Friedrichsfelde 60,
10315 Berlin;
тел. +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,
тел. (097)046-30-70
E-mail:
rostik-enok@inbox.ru