



УДК 621.313.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Ф. Бурков¹, В.Н. Юрин², В.Р. Аветисян³

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

²Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского,
г. Владивосток, Россия

³Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,
г. Владивосток, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3927-563>, burkov.22@mail.ru

***Резюме:** Современное общество неразрывно связано с использованием электрической энергии во многих областях его жизни и деятельности. Не исключением является флот и его транспортная инфраструктура, которые оснащены электрическим оборудованием различной степени сложности. В настоящее время сотни тысяч торговых, рыбопромысловых, пассажирских и других категорий судов находятся в рабочем состоянии и выполняют свои функции по назначению. Техническое совершенство их производственных механизмов и осуществляемых ими технологических процессов в значительной степени определяется совершенством соответствующего привода и степенью его автоматизации. Преимущества электрической энергии, создание достаточно совершенных электромеханических преобразователей и развитие систем управления привели к активному внедрению автоматизированных электроприводов, основной составной частью которых являются электродвигатели. В статье представлены некоторые результаты исследований по широко используемым трехфазным асинхронным двигателям, выполненных с целью повышения их энергетической эффективности.*

***Ключевые слова:** асинхронный двигатель, коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, однофазный режим работы.*

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-92-100

***Для цитирования:** Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 92-100. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-92-100.*

STUDIES OF POSSIBILITIES OF ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCRONOUS MOTORS IMPROVEMENT

A.F. Burkov¹, V.N. Yurin², V.R. Avetisyan³

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

²Maritime state University named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

³Pacific higher naval school named after S.O. Makarov, Vladivostok, Russia

Abstract: Modern society is inseparably linked with electrical energy utilization in many areas of life and activities. Fleet and its transport infrastructure equipped with an electric equipment of various degree of complexity is not an exception. Currently, hundreds of thousands of commercial, fishing, passenger and other ships are operational and perform their functions. Technical perfection of their production mechanisms and technological processes being implemented are largely determined by the perfection of the actuator and degree of automation. The advantages of electrical energy, creation of advanced enough electromechanical converters and the development of control systems has led to the introduction of automated electric drives, the main part of which are electric motors. The article presents some results of the performed researches on widely used three-phase asynchronous motors, with the aim of improving their energy efficiency.

Keywords: induction motor, power factor, efficiency, single phase mode of work.

For citation: A.F. Burkov, V.N. Yurin, V.R. Avetisyan Studies of possibilities of energy efficiency of asynchronous motors improvement // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 92-100. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-92-100.

Введение

Поиски резервов экономии топливно-энергетических ресурсов исследуются во всех звеньях энергетического цикла: от добычи топливного сырья до использования энергии, включая электрическую [1, 2, 3].

Резерв экономии электроэнергии [4] в свете решения этих задач представляется в разработке и внедрении способов естественного повышения коэффициента мощности отдельных ее потребителей. Поскольку основными потребителями электроэнергии на флоте и береговых предприятиях являются электроприводы, то существенное влияние на энергетическую эффективность могут оказать разработанные и реализованные научно-технические мероприятия, направленные на повышение энергетических показателей: коэффициента мощности ($\cos \varphi$) и коэффициента полезного действия (КПД) широко используемых асинхронных электродвигателей (ЭД) [5].

Характерной особенностью эксплуатационных режимов работы многих асинхронных ЭД является изменение в широком диапазоне нагрузок (моментов сопротивления) на валах.

1. Методика и материалы

Организованные и проведенные исследования направлены на определение некоторых закономерностей изменения коэффициентов $\cos \varphi$ и КПД трехфазных асинхронных ЭД и целесообразности использования асинхронных ЭД при однофазных режимах их работы при изменении моментов сопротивления на валах.

Асинхронные ЭД функционируют, как правило, в квазисимметричных режимах, причины которых носят разнообразный характер [6].

У симметричных ЭД такие режимы возникают, например, при неравномерном распределении нагрузок между фазами трехфазной электроэнергетической системы [7].

При аналитических исследованиях несимметричных режимов широко используется метод симметричных составляющих. Система несимметричных первичных напряжений ($\dot{U}_{sA}, \dot{U}_{sB}, \dot{U}_{sC}$) может быть представлена как сумма составляющих прямой последовательности ($\dot{U}_{спрA}, \dot{U}_{спрB}, \dot{U}_{спрC}$) и обратной последовательности ($\dot{U}_{sobA}, \dot{U}_{sobB}, \dot{U}_{sobC}$).

Составляющие напряжения статора прямой и обратной последовательностей для фазы A , например, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{спрA} = \dot{U}_{спр} &= \left(\dot{U}_{sA} + \dot{U}_{sB}\underline{a} + \dot{U}_{sC}\underline{a}^2 \right) / 3; \\ \dot{U}_{sobA} = \dot{U}_{sob} &= \left(\dot{U}_{sA} + \dot{U}_{sB}\underline{a}^2 + \dot{U}_{sC}\underline{a} \right) / 3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В выражении (1) \underline{a} , \underline{a}^2 – единичные комплексы, которые имеют следующий вид:

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad \underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}. \quad (2)$$

Составляющие тока фазы статора прямой и обратной последовательностей, с учетом схемы замещения асинхронного ЭД [8], выражаются аналитическими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{спр} &= \frac{\dot{U}_{спр}}{\left(R_s + jX_{s\sigma} \right) + \left(Z_m^{-1} + Z_{rпр}^{-1} \right)^{-1}}; \\ \dot{I}_{sob} &= \frac{\dot{U}_{sob}}{\left(R_s + jX_{s\sigma} \right) + \left(Z_m^{-1} + Z_{rоб}^{-1} \right)^{-1}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где R_s , $X_{s\sigma}$ – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора ЭД соответственно; Z_m – комплексное сопротивление контура намагничивания; $Z_{rпр}$, $Z_{rоб}$ – составляющие сопротивления эквивалентного неподвижного ротора для токов прямой и обратной последовательностей соответственно.

Составляющие $Z_{rпр}$ и $Z_{rоб}$ в выражении (3) определяются как

$$Z_{rпр} = \frac{R'_r}{s} + jX'_{r\sigma}, \quad (4)$$

$$Z_{rоб} = \frac{R'_r}{2-s} + jX'_{r\sigma}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) s – скольжение двигателя.

Частота токов прямой последовательности $f_{rпр}$ в роторных цепях асинхронных ЭД определяется как

$$f_{rпр} = f_s \left(\frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} \right) = f_s s. \quad (6)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_s$ – угловая скорость вращения электромагнитного поля статора ЭД, f_s – частота тока статора).

Частота токов роторов обратной последовательности $f_{rоб}$, выражаемая зависимостью

$$f_{rоб} = (2-s)f_s, \quad (7)$$

значительно больше частоты токов ротора прямой последовательности $f_{rпр}$, определяемой по формуле (6). Эффект вытеснения токов обратной последовательности значительно больше, чем токов прямой последовательности.

С учетом схемы замещения фазные токи статора асинхронного ЭД могут быть представлены как

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{sA} &= \dot{I}_{спр} + \dot{I}_{sob}; \\ \dot{I}_{sB} &= \dot{I}_{спр}\underline{a}^2 + \dot{I}_{sob}\underline{a}; \\ \dot{I}_{sC} &= \dot{I}_{спр}\underline{a} + \dot{I}_{sob}\underline{a}^2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

При искажении напряжений статора двигателя, например, на 4 % ($U_{\text{собр}}/U_{\text{спр}} = 0,04$) искажение тока статора составляет 20 % ($I_{\text{собр}}/I_{\text{спр}} = 0,20$). При этом в одной из фаз ток в относительных единицах может составлять 1,2, а потери – 1,44 [8].

Вращающий момент M трехфазного ЭД при искажениях симметрии напряжений статора выражается как

$$M = M_{\text{пр}} + M_{\text{об}}, \quad (9)$$

где $M_{\text{пр}}$, $M_{\text{об}}$ – составляющие момента прямой и обратной последовательностей соответственно.

Составляющая вращающего момента асинхронного ЭД прямой последовательности $M_{\text{пр}}$ определяется из выражения

$$M_{\text{пр}} = \frac{m_s U_{\text{спр}}^2 R'_r}{s \omega_0 \left(\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_{s\sigma} + X'_{r\sigma})^2 \right)}, \quad (10)$$

а обратной $M_{\text{об}}$ – из выражения

$$M_{\text{об}} = \frac{m_s U_{\text{собр}}^2 R'_r}{(2-s) \omega_0 \left(\left(R_s + \frac{R'_r}{2-s} \right)^2 + (X_{s\sigma} + X'_{r\sigma})^2 \right)}. \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) m_s – число фаз обмотки статора; R'_r , $X'_{r\sigma}$ – приведенные активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки ротора ЭД соответственно.

Для сохранения результирующего момента M при несимметрии напряжений статора необходимо увеличение составляющей $M_{\text{пр}}$ на значение $M_{\text{об}}$, что приводит: к возрастанию скольжения s двигателя примерно в $M_{\text{пр}}/(M_{\text{пр}} - |M_{\text{об}}|)$ раз, увеличению потерь и ухудшению КПД трехфазных ЭД.

В зависимости от вида несимметрии и степени ее проявления нештатные режимы работы асинхронных ЭД можно условно объединить в четыре группы.

Режимы первой группы возникают при технологических несимметриях или незначительных разрегулировках элементов систем управления (СУ) в процессе эксплуатации. Такие эксплуатационные режимы можно отнести к квазинормальным.

Ко второй группе нештатных режимов относятся несимметричные режимы, которые возникают при значительных разрегулировках элементов или частичных отказах СУ, которые, нарушая нормальное функционирование электроприводов (ЭП), не приводят к полной потере их управляемости.

В третью группу входят специальные режимы, возникающие по причинам пробоев одного или нескольких силовых полупроводниковых приборов (СПП), при их наличии в преобразователях электрической энергии. Из-за отсутствия постоянной составляющей и четных гармоник тока перегрузки и искажения переменных незначительны.

Специальные режимы работы четвертой группы связаны с полным закрытием одного или нескольких СПП. При этом высока вероятность присутствия постоянной составляющей момента $M_{\text{пс}}$, наличие которой одновременно с двигательным режимом создает режим динамического торможения ЭД. Составляющая $M_{\text{пс}}$, как правило, вносит наибольшие искажения в механические характеристики асинхронных ЭД, так как ее значения прямо пропорциональны значениям постоянной составляющей тока, которая ограничена только активным сопротивлением обмоток двигателя. Более подробная характеристика таких режимов приведена в работе [9].

Работа трехфазных асинхронных ЭД в однофазных режимах представляет собой частный случай специальных режимов четвертой группы.

2. Результаты и обсуждение

В соответствии с поставленными задачами выполнены исследования несимметричных (однофазных) режимов работы трехфазного асинхронного ЭД типа «АО2-41-4» с целью определения возможностей повышения его энергетических показателей в области нагрузок, меньших номинальных.

Известно, что мощность трехфазных асинхронных ЭД в режиме однофазного питания при использовании различных схемных решений и дополнительных устройств может достигать 60 % от его номинальной мощности трехфазного режима. Трехфазным ЭД при однофазном питании присущи основные недостатки однофазных двигателей: отсутствие пускового момента; пониженное использование активных материалов; меньший, по сравнению с трехфазным режимом, КПД. Однако при работе трехфазных ЭД с коэффициентом загрузки k_3 , меньшим 0,5, его перевод в однофазный режим в ряде случаев может оказаться целесообразным. К особенностям однофазных режимов работы трехфазных двигателей относится повышение коэффициента $\cos \varphi$ в области малых нагрузок при примерном равенстве КПД трехфазного и однофазного режимов.

На основании полученных результатов исследований построены зависимости энергетических показателей асинхронного ЭД в трехфазном ($\cos \varphi = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$) и однофазном ($\cos \varphi_1 = f(P_2)$, $\eta_1 = f(P_2)$) режимах работы (рис. 1).

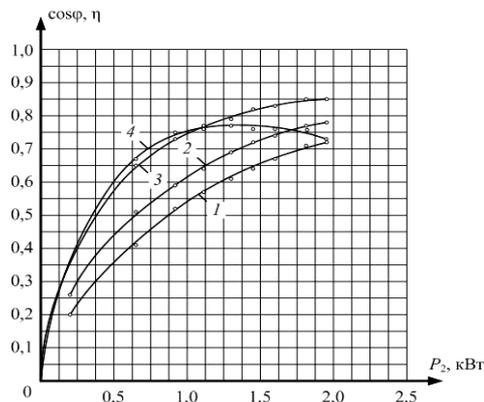


Рис. 1. Зависимости энергетических показателей ЭД типа «АО2-41-4»:
 1 – $\cos \varphi = f(P_2)$; 2 – $\cos \varphi_1 = f(P_2)$; 3 – $\eta = f(P_2)$; 4 – $\eta_1 = f(P_2)$

При работе трехфазных асинхронных ЭД в однофазных режимах их энергетические показатели (характеристики) можно улучшить за счет подключения к фазным обмоткам статора конденсаторов.

Зависимости $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ двигателя «АО2-41-4», построенные по результатам исследований при работе в трехфазном и однофазных режимах с подключенными в схему обмоток статора конденсаторами различной емкости, показаны на рис. 2.

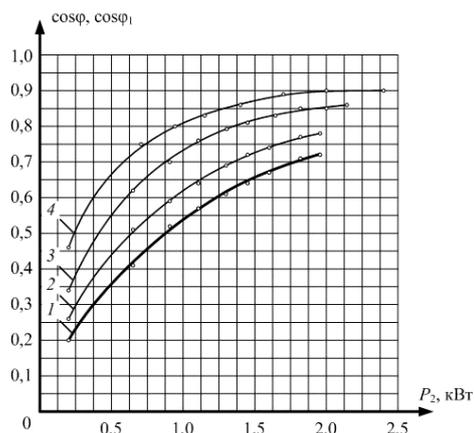


Рис. 2. Зависимости $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ исследуемого двигателя:

1 – трехфазного режима работы ($U_C = 380$ В); 2 – однофазного режима ($U_C = 380$ В), $C = 0$ мкФ;
3 – $C = 16$ мкФ; 4 – $C = 24$ мкФ

На рис. 3 показаны зависимости КПД от мощности P_2 двигателя «АО2-41-4», построенные по результатам исследований при трехфазном и однофазных режимах работы с подключенными в схему обмоток статора конденсаторами.

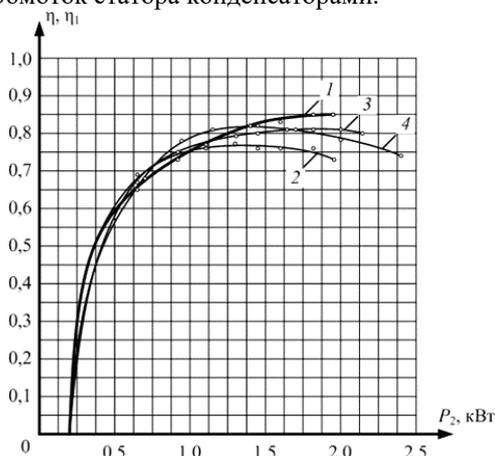


Рис. 3. Зависимости $\eta = f(P_2)$ и $\eta_1 = f(P_2)$ ЭД

(Обозначения – как на рис. 2)

Исходя из изложенного, с точки зрения энергетических показателей в области малых нагрузок использование трехфазных ЭД в однофазных режимах при определенных условиях более экономично, что подтверждено проведенными исследованиями.

При подключении к фазным обмоткам статора конденсаторов коэффициент $\cos \varphi_1$ ЭД повышается как за счет улучшения характеристик двигателей, так и за счет действия конденсаторов, являющихся емкостными элементами. При нагрузке на исследуемый ЭД, соответствующей, например, $P_2 = 1,12$ кВт в трехфазном режиме, потребляемая мощность двигателя $P = 1,46$ кВт, а коэффициент $\cos \varphi$ составляет 0,57. При этом $\text{tg } \varphi = 1,43$, а реактивная мощность Q имеет значение 2,09 кВАр. Соответственно в однофазном режиме работы при $P_2 = 1,12$ кВт и $P = 1,46$ кВт $\cos \varphi_1$ увеличивается до 0,64 (на 12,3 %), а $\text{tg } \varphi = 1,19$ и $Q = 1,74$ кВАр. Для той же нагрузки, соответствующей $P_2 = 1,12$ кВт, при подключении конденсаторов суммарной емкостью C , равной 16 мкФ, коэффициент $\cos \varphi_1$ увеличивается

до 0,76 (на 33,3 %). В этом случае $\text{tg } \varphi=0,90$ и $Q=1,31$ кВАр. При подключении в однофазном режиме к обмоткам статора исследуемого ЭД конденсаторов суммарной емкостью 24 мкФ $\cos \varphi_1$ увеличивается до 0,83 (на 45,6 %), а $\text{tg } \varphi=0,67$ и $Q=0,95$ кВАр.

Значения коэффициента η_1 в этих случаях практически остаются неизменными в диапазоне нагрузок, составляющем $(0 \dots 0,3)P_{2н}$.

У исследуемого двигателя, имеющего $\cos \varphi_n$ 0,85 при $P_{2н}=4,0$ кВт, в случаях однофазных режимов работы коэффициент $\cos \varphi_1$ достигает значений: 0,78 при $P_2=1,96$ кВт $(0,49P_{2н})$ и $C=0$; 0,86 – при $P_2=2,14$ кВт $(0,54P_{2н})$ и $C=16$ мкФ; 0,90 – при $P_2=2,40$ кВт $(0,60P_{2н})$ и $C=24$ мкФ.

Номинальное значение КПД η_n у исследуемого двигателя составляет 0,86 при $P_{2н}=4,0$ кВт. При однофазных режимах работы коэффициент η_1 достигает значений: 0,77 при $P_2=(1,12 \dots 1,30)$ кВт $((0,28 \dots 0,33)P_{2н})$ и $C=0$; 0,81 – при $P_2=(1,64 \dots 2,00)$ кВт $((0,41 \dots 0,50)P_{2н})$ и $C=16$ мкФ; 0,82 – при $P_2=1,40$ кВт $(0,35 P_{2н})$ и $C=24$ мкФ.

При однофазных режимах работы наблюдается увеличение фазного тока у исследуемого ЭД.

На рис. 4 показаны полученные в результате исследований осциллограммы переходного и установившегося режимов работы двигателя.

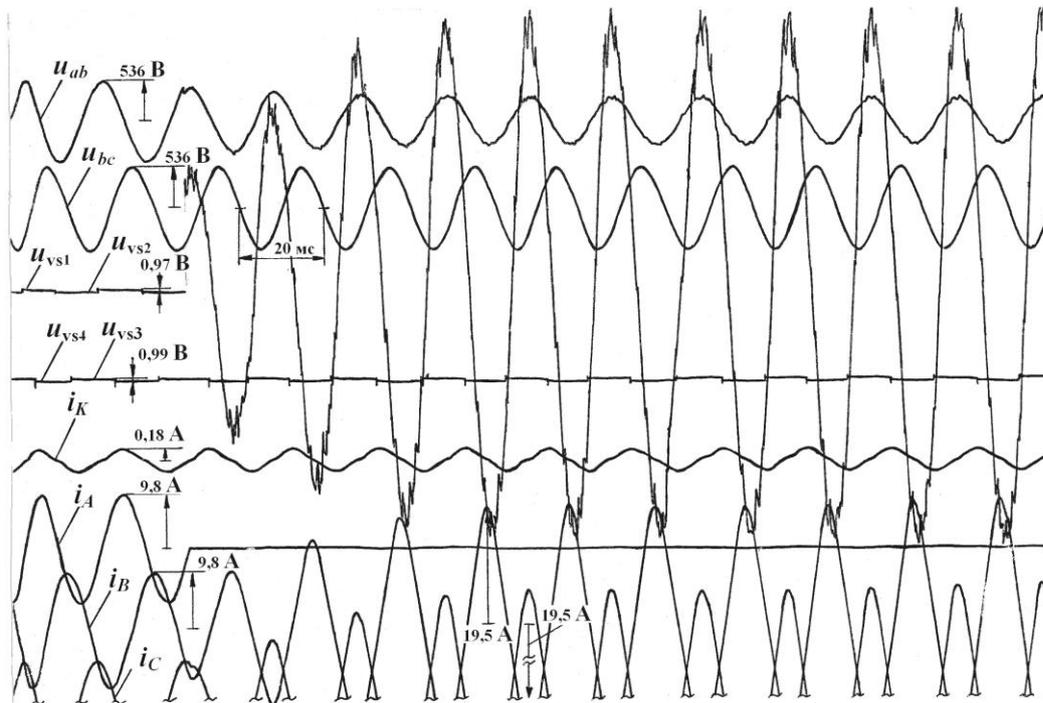


Рис. 4. Осциллограммы переходного и установившегося режима работы исследуемого асинхронного ЭД при однофазном режиме работы

В случаях возникновения однофазных режимов при работе двигателя в предшествующих трехфазных режимах амплитудный фазный ток увеличивается практически в два раза $(1,99I_{\phi})$.

Результаты выполненных исследований несимметричных режимов работы ЭП с асинхронными двигателями, включая однофазные, достаточно подробно приведены в работе [10].

Заключение

По результатам исследований однофазных режимов работы трехфазных ЭД отмечена тенденция повышения коэффициента $\cos \varphi$ с увеличением подключаемых к обмоткам статоров емкостей при незначительном изменении КПД в области нагрузок, составляющих до 40 % от номинальных.

В случаях однофазных режимов, как и трехфазных, условия для достижения наибольших значений коэффициента мощности и КПД в функциях нагрузок различны.

При переключении трехфазных ЭД в однофазные режимы наблюдается незначительное изменение угловой скорости ω , их роторов.

Полученные результаты дают основание для вывода о том, что с точки зрения энергетических показателей использование трехфазных ЭД в однофазных режимах при определенных условиях более экономично.

Очевидно, что применение однофазных режимов будет тем эффективнее, чем большую часть времени ЭД будет работать в областях малых нагрузок.

Литература

1. Ключников А.Д. Предпосылки радикального повышения эффективности работ в области энергосбережения // Промышленная энергетика. 2001. № 4. С. 12–17.
2. Романов А.А., Земцов А.С. Необходимость технического перевооружения электроэнергетики России // Промышленная энергетика. 2002. № 3. С. 2–5.
3. Дьяков А.Ф. Состояние и перспективы развития нетрадиционной энергетики в России // Известия Академии наук. Энергетика. 2000. №4. С. 13–29.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. : Стандартинформ, 2014. 20 с.
5. Сердешнов А.П. Ремонт электрооборудования. В 2 ч. Ч. 1. Ремонт электрических машин. 2 изд. Минск : ИВЦ Минфина, 2008. 293 с.
6. Бурков А.Ф. Надежность судовых электроприводов. Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2014. 204 с.
7. Цицикян Г.Н. Качество электроэнергии в автономных системах. СПб.:Крыловский государственный научный центр, 2014. 102 с.
8. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2 т. Т. 1. М. : ИД МЭИ, 2006. 650 с.
9. Туганов М.С. Судовой бесконтактный электропривод. Л. : Судостроение, 1978. 288 с.
10. Бурков А.Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов. Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2011. 417 с.

Авторы публикации

Бурков Алексей Федорович – д-р техн. наук, профессор Дальневосточного федерального университета. E-mail: burkov.22@mail.ru.

Юрин Валерий Николаевич – доцент Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского. E-mail: yurinvn@yandex.ru.

Аветисян Вагаршак Радиевич – адъюнкт Тихоокеанского высшего военно-морского училища имени С.О. Макарова. E-mail: merin1309@mail.ru.

References

1. Kljuchnikov A.D. Predposylki radikal'nogo povyshenija `effektivnosti rabot v oblasti `energoberezhenija // Promyshlennaja `energetika. 2001. № 4. P.12–17.

2. Romanov A.A., Zemtsov A.S. Neobhodimost' tehničeskogo perevooruzhenija `elektro`energetiki Rossii // Promyshlennaja `energetika. 2002. № 3. P.2–5.

3. D'jakov A.F. Sostojanie i perspektivy razvitija netraditsionnoj `energetiki v Rossii // Izvestija Akademii nauk. `Energetika. 2000. № 4. P.13–29.

4. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehničeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elek-tricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. M. : Standartinform, 2014. 20 p.

5. Serdesnov A.P. Remont `elektrooborudovanija. V 2 ch. Ch. 1. Remont `elektricheskikh mashin. 2-e izd. Minsk : IVTs Minfina, 2008. 293 p.

6. Burkov A.F. Nadezhnost' sudovyh `elektroprivodov. Vladivostok : Dal'nevost. federal. un-t, 2014. 204 p.

7. Tsitsikjan G.N. Kachestvo `elektro`energii v avtonomnyh sistemah. SPb.:Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj tsentr, 2014. 102 p.

8. Ivanov-Smolenskij A.V. `Elektricheskie mashiny. V 2 t. T. 1. M. : ID M`EI, 2006. 650 p.

9. Tuganov M.S. Sudovoj beskontaktnyj `elektroprivod. L. : Sudostroenie, 1978. 288 p.

10. Burkov A.F. Povyshenie `effektivnosti tehničeskoi `ekspluatatsii sudovyh `elektroprivodov. – Vladivostok : Mor. gos. un-t im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2011. 417 p.

Authors of the publication

Aleksey F. Burkov – Doc. Sci. (Techn.), professor, Far Eastern Federal University. E-mail: burkov.22@mail.ru.

Valeriy N. Yurin – Assoc, Maritime state University named after adm. G.I. Nevelskoy E-mail: yurinvn@yandex.ru.

Vagarshak R. Avetisyan– adjunct of Pacific higher naval school named after S.O. Makarov E-mail: merin1309@mail.ru.

Поступила в редакцию

16 апреля 2018 г.