

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-628

THE RESULTS OF STUDIES OF THE MODES OF OPERATION ASYNCHRONOUS MOTORS AT LOWER VOLTAGES TO DETERMINE OPPORTUNITIES TO INCREASE THEIR ENERGY INDICATORS

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

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime state University named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

³ — Pacific higher naval school named after S.O. Makarov, Vladivostok, Russian Federation

Energy performance asynchronous motors (AD), power factor and efficiency, significantly depend on the parameters of the supply voltage (magnitude, frequency) and mode of operation (load factor). To improve the efficiency of operation, various methods of reducing reactive power are used. It is possible to distinguish artificial methods based on the use of additional devices, and the possibility of reducing reactive power in a natural way. The research is aimed at identifying the dependence of the energy parameters of the AD in the function of the stator voltage. A characteristic operational feature of three-phase AD is relatively large values of idling currents I_0 (up to 40% of I_n), which are more reactive and largely determine the power coefficients. Thus, reactive power consumed from the network is less dependent on loads. When the phase voltage changes, the reactive power changes in the quadratic dependence. In addition, the change in voltage leads to a change in the inductive resistance, depending on the saturation of the magnetic system of AD. In determining the feasibility of changing (reducing) the phase voltage to the AD, investigated the dependence of the additional reactive power dQ , which is the greater, the less loaded AD, and the loss of active power in the AD, determining their heating, in the function U_r .

The performed studies reveal the possibility of natural increase of the co-efficiency of AD power when working with the load factor $K_z < 1$. In the case of the implementation of these opportunities, the weighted average power factor of the $\cos \varphi_p$ of production enterprises as a whole may not be less than 0.9. The results of the research allow us to conclude about the feasibility of using low voltage U_s for three-phase motors operating in areas of low loads.

Keywords: power factor, efficiency, reactive power, electric energy, electric motor, electric drive, energy performance.

For citation:

Burkov, Aleksey F., Valeriy N. Yurin, and Vagarshak R. Avetisyan. "The results of studies of the modes of operation asynchronous motors at lower voltages to determine opportunities to increase their energy indicators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 619–628. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-6.

УДК 621.313.33

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

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

¹ — Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет имени адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

³ — Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова, Владивосток, Российская Федерация

Энергетические показатели асинхронных двигателей (АД), коэффициент мощности и коэффициент полезного действия, существенно зависят от параметров питающего напряжения (величина, частота)

и режима работы (коэффициент загрузки). Для повышения эффективности эксплуатации применяются различные способы снижения реактивной мощности. Можно выделить искусственные способы, основанные на применении дополнительных устройств, и возможность уменьшения реактивной мощности естественным путем. Выполненные исследования направлены на выявление зависимостей энергетических показателей АД в функции напряжения статора. Характерной эксплуатационной особенностью трехфазных АД являются относительно большие значения токов холостого хода I_0 (до 40 % от I_n), которые в большей степени являются реактивными и в значительной степени определяют коэффициенты мощности. Таким образом, реактивная мощность, потребляемая из сети, в меньшей степени зависит от нагрузки. При изменении фазного напряжения реактивная мощность изменяется в квадратичной зависимости. Кроме того, изменение напряжения приводит к изменению индуктивного сопротивления, зависящего от насыщения магнитной системы АД. При определении целесообразности изменения (снижения) фазного напряжения, подводимого к АД, исследованы зависимости изменения дополнительной реактивной мощности ΔQ , которая тем значительнее, чем меньше нагружен АД, и потерь активной мощности в АД, определяющих их нагрев, в функции U_{ϕ} .

Выполненные исследования раскрывают возможности естественного повышения коэффициента мощности АД при их работе с коэффициентом загрузки $k_z < 1$. В случае реализации этих возможностей средневзвешенный коэффициент мощности $\cos \varphi_{cp}$ производственных предприятий в целом может иметь значения не ниже 0,9. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности использования пониженного напряжения U_s для трехфазных двигателей, работающих в областях малых нагрузок.

Ключевые слова: коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, реактивная мощность, электрическая энергия, электродвигатель, электропривод, энергетические показатели.

Для цитирования:

Бурков А. Ф. Исследование асинхронных двигателей с целью определения возможностей повышения их энергетических показателей / А. Ф. Бурков, В. Н. Юрин, В. Р. Аветисян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 619–628. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-6.

Введение (Introduction)

Использование электромеханических преобразователей, в частности электродвигательных устройств, в настоящее время трудно переоценить. Электродвигатели (ЭД) являются основными составными частями электроприводов (ЭП) [1], [2] различных механизмов и потребляют значительную часть вырабатываемой электрической энергии (ЭЭ) [3]. Отмечается расширение областей использования ЭД в различных отраслях жизнедеятельности человека [4]. К основным типам широко используемых ЭД относятся асинхронные двигатели (АД) [5]. По данным, приведенным в [6], АД потребляют более 50 % всей производимой в мире ЭЭ. В отдельных отраслях промышленности потребление ЭЭ асинхронными ЭД составляет более 80 %. В частности, на флоте ЭД судовых ЭП потребляют ориентировочно до 90 % ЭЭ, вырабатываемой преимущественно судовыми источниками — генераторами [7].

Основные затраты, обусловленные преобразованием ЭЭ в механическую энергию, оцениваются посредством энергетических показателей. Для АД к ним относятся коэффициент полезного действия (η) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Известно, что энергетические показатели АД в процессе эксплуатации зависят от величины и качества напряжения питающей сети (статора) U_s , частоты сети f_c и коэффициента загрузки k_z , определяемого моментом сопротивления на валу ЭД M_c [8] – [10]. Изменение напряжения и частоты питающей сети используется, в первую очередь, для получения необходимых искусственных характеристик ЭД. Момент сопротивления на валу ЭД в составе ЭП определяется механической характеристикой производственного механизма [11].

Рост потребления энергоресурсов и увеличение стоимости энергии на современном этапе ставят задачу повышения энергосбережения. Эффективное использование энергетических ресурсов, включая электрическую энергию, относится к приоритетным аспектам развития современной мировой и отечественной экономики. Научно-технические вопросы компенсации реактивной мощности активно рассматриваются с 70-х гг. XX в. и широко представлены в литературе [12],

[13] и др. Внедрение источников (компенсаторов) реактивной мощности для снижения потоков реактивной мощности получило распространение преимущественно в береговых энергоустановках. Компенсации реактивной мощности в автономных электроэнергетических системах, к которым относятся и судовые системы, посвящены работы [14], [15] и др. Искусственная компенсация требует значительных затрат, связанных с приобретением, монтажом и эксплуатацией дополнительного оборудования. Наряду с искусственными, отдельный интерес представляют мероприятия, направленные на снижение реактивной мощности естественным путем [16].

Основной задачей выполненных исследований является определение целесообразности использования напряжений, отличных от номинальных, с целью естественного повышения энергетических показателей АД.

Методика и материалы (Methods and Materials)

Выполненные исследования направлены на выявление зависимостей энергетических показателей АД в функции напряжения статора. В качестве объекта исследований принят имеющийся в наличии трехфазный АД типа АО2-41-4 с паспортными данными: номинальное напряжение $U_n = 380/220$ В; номинальная мощность на валу $P_{2н} = 4,0$ кВт; номинальный ток $I_n = 8,3/14,4$ А; номинальная частота вращения вала $n_n = 1410$ об/мин; номинальный коэффициент полезного действия (КПД) $\eta_n = 0,86$; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,85$ (φ_n — номинальный угол сдвига между активной и полной мощностью). Характерной эксплуатационной особенностью трехфазных АД являются относительно большие значения токов холостого хода I_0 (до 40 % от I_n), обусловленные наличием воздушных зазоров между статорами и вращающимися роторами. Токи холостого хода АД в большей степени являются реактивными и в значительной степени определяют коэффициенты мощности $\cos \varphi$ АД. Таким образом, реактивная мощность, потребляемая АД из сети, в меньшей степени зависит от нагрузок на их валах. У многих АД реактивная мощность, потребляемая ими на холостом ходу, составляет (60 ... 80) % от реактивной мощности, потребляемой ЭД при номинальной нагрузке.

Зависимость реактивной мощности Q АД от нагрузки (момента сопротивления) на валу может быть выражена уравнением [17]:

$$Q = \frac{P_{2н}}{\eta_n} \left(\frac{I_0}{I_n \cos \varphi_n} + k_3 \left(\operatorname{tg} \varphi_n - \frac{I_0}{I_n \cos \varphi_n} \right) \right) \quad (1)$$

или по формуле [18]:

$$Q = Q_0 + k_3^2 (Q_n - Q_0), \quad (2)$$

где Q_0 — реактивная мощность на холостом ходу; Q_n — номинальная реактивная мощность.

Коэффициент загрузки k_3 ЭД в (1) и (2), определяется известным соотношением

$$k_3 = \frac{P_2}{P_{2н}} Q. \quad (3)$$

С учетом выражений (1), (3) выполнены расчеты зависимости $Q = f(k_3)$ для исследуемого двигателя серии АО. Наиболее существенное уменьшение реактивной мощности Q у АД наблюдается при снижении нагрузки от номинальной ($P_2 = P_{2н}; k_3 = 1,0$) до 40 % ($P_2 = 0,4P_{2н}; k_3 = 0,4$) и составляет около 26 %. Дальнейший анализ зависимости $Q = f(k_3)$ показывает, что при снижении нагрузки от 40 % ($P_2 = 0,4P_{2н}; k_3 = 0,4$) до 0 ($P_2 = 0; k_3 = 0$) реактивная мощность АД Q снижается примерно на 7 %.

Реактивная мощность Q АД связана с напряжением сети (питания) зависимостью

$$Q = 3 \left(\frac{U_{\phi}^2}{X_{\mu}} + \left(I_s^2 X_s + (I_r')^2 X_r' \right) \right), \quad (4)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение ЭД; X_{μ} — индуктивное сопротивление контура намагничивания АД; X_s, X_r' — индуктивные сопротивления фазы обмотки статора и фазы обмотки ротора, приведен-

ные к статорной цепи, соответственно; I_s, I'_r — ток статора и ток ротора, приведенный к статорной цепи ЭД.

Составляющая $3U_\phi^2/X_\mu$ в (4) представляет собой реактивную мощность АД на холостом ходу Q_0 , а $3(I_s^2 X_s + (I'_r)^2 X'_r)$ — изменение реактивной мощности при изменении нагрузки (момента M_c) на валу ЭД.

Таким образом, согласно зависимости (4), при изменении фазного напряжения АД его реактивная мощность изменяется в квадратичной зависимости. Кроме того, изменение напряжения приводит к изменению индуктивного сопротивления, зависящего от насыщения магнитной системы ЭД.

В общем случае, изменение реактивной мощности Q АД от изменения напряжения U_ϕ может быть представлено приращением $|dQ|$ к номинальной реактивной мощности Q_n , соответствующей номинальному напряжению ЭД $U_{\phi,n}$:

$$Q = Q_n \pm |dQ|. \quad (5)$$

На рис. 1 приведены зависимости $dQ = f(U_\phi)$ при $M_c = \text{const}$ ($k_{31} = 0,5$ и $k_{32} = 1,0$) для ЭД номинальной мощностью $P_{2н} = 7,0$ кВт ($I_n = 14,6$ А; $I_0 = 5,0$ А; $\cos\varphi_n = 0,85$). Представленные на рис. 1 зависимости $dQ = f(U_\phi)$ наглядно характеризуют влияние изменения напряжения на величину дополнительной реактивной мощности, которое тем значительнее, чем меньше нагружен АД. Например, для приведенного ЭД номинальной мощностью 7,0 кВт при $U_\phi = U_{\phi,n}$ его реактивная мощность $Q_n = 5,0$ кВАр для $k_{32} = 1,0$ и $Q_n = 3,3$ кВАр для $k_{31} = 0,5$. При уменьшении напряжения U_ϕ на 10 % относительно номинального $U_{\phi,n}$ реактивная мощность Q АД уменьшается на 14,0 % (0,7 кВАр) при $k_{32} = 1,0$, и на 59,0 % (примерно 2,0 кВАр) при $k_{31} = 0,5$.

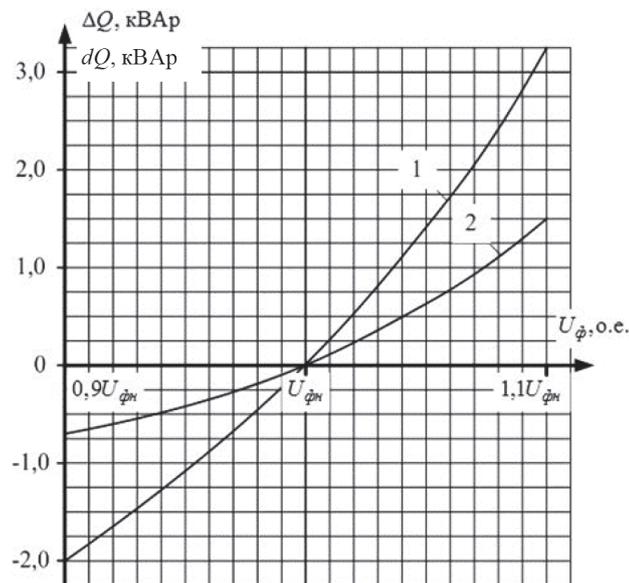


Рис. 1. Зависимости $dQ = f(U_\phi)$ АД при $M_c = \text{const}$ (1 — $k_{31} = 0,5$; 2 — $k_{32} = 1,0$)

При определении целесообразности изменения (снижения) фазного напряжения, подводимого к АД, необходимо исследование зависимостей изменения потерь активной мощности в АД, определяющих их нагрев, в функции фазного напряжения. На рис. 2 приведены ориентировочные зависимости средних значений потерь от фазного напряжения для коэффициентов загрузки 0,5 и 1.

Зависимости, представленные на рис. 2, справедливы для АД диапазона мощностей (1 ... 100) кВт. Их анализ показывает, что при коэффициентах загрузки менее 0,5 понижение фазного напряжения приводит к уменьшению среднего значения потерь.

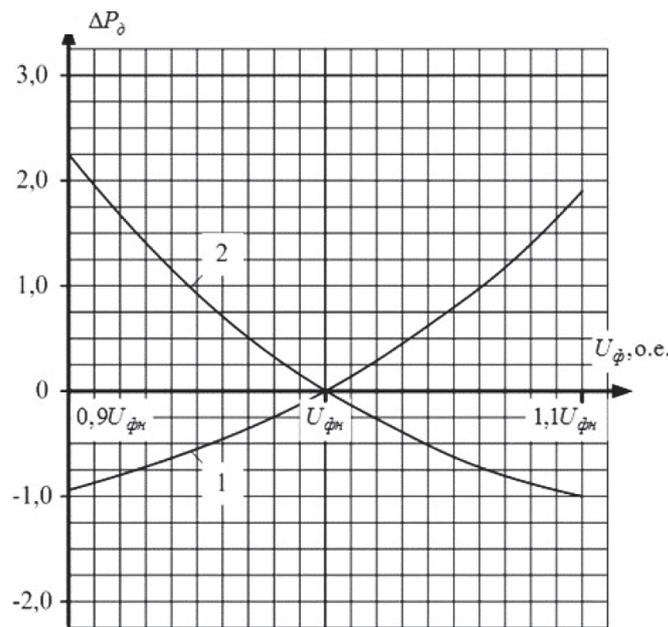


Рис. 2. Зависимость $dP_d = f(U_\phi)$ АД при $M_c = \text{const}$ (1 — $k_{31} = 0,5$; 2 — $k_{32} = 1,0$)

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Исходя из постановки задачи, выполнены исследования, направленные на определение возможностей повышения энергетических показателей АД при изменении питающего напряжения. С целью определения наилучших значений энергетических показателей исследуемого ЭД при изменении нагрузки на его валу определены зависимости:

$$U_s = f(P_2); \cos \varphi = f(P_2); \eta = f(P_2), \quad (6)$$

представленные на рис. 3.

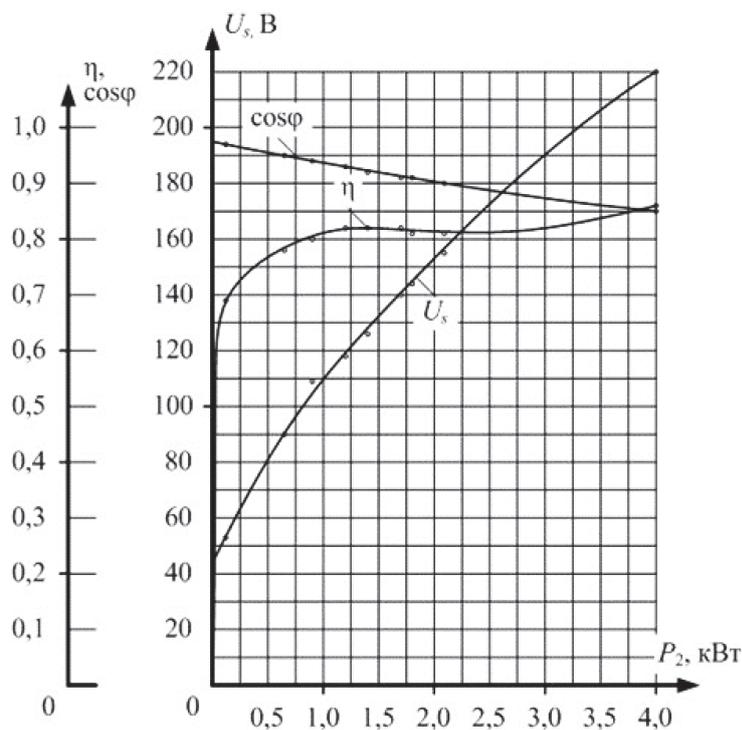


Рис. 3. Графики зависимостей $U_s = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что при регулировании питающего напряжения АД в зависимости от нагрузки наименьшее значение коэффициента мощности соответствует его номинальному значению при номинальной мощности ЭД при $U_s = U_n = 220$ В ($\cos \varphi_{\min} = \cos \varphi_n = 0,85$; $P_2 = P_{2н} = 4,0$ кВт). Наибольшее фиксированное значение коэффициента мощности отмечено при мощности P_2 , равной 0,12 кВт, и $U_s = 53$ В ($\cos \varphi_{\max} = 0,97$).

Выполненные исследования раскрывают возможности естественного повышения коэффициента мощности АД при их работе с коэффициентом загрузки менее 1. В случае реализации этих возможностей средневзвешенный коэффициент мощности производственных предприятий в целом может иметь значения не ниже 0,9. При изменении питающего напряжения для $M_c = \text{var}$ с целью выполнения условия $\cos \varphi = \max$ другой энергетический показатель АД — коэффициент полезного действия — изменяется по зависимости, представленной на рис. 3. В частности, при увеличении нагрузки до значений P_2 , близких к 1,2 кВт (около $0,3P_{2н}$), отмечена тенденция возрастания КПД до 0,82. При дальнейшем увеличении нагрузки значения КПД ЭД остаются практически неизменными с последующим возрастанием (при $P_2 = P_{2н} = 4,0$ кВт $\eta = \eta_n = 0,86$) — см. рис. 3.

В общем случае техническая реализация изменения напряжения, подводимого к обмоткам статоров АД, в функции изменения нагрузки представляет определенные затруднения, и очевидно, предпочтительна для ЭП, включающих АД относительно большой мощности. Многие ЭП, работающие в широких диапазонах изменения нагрузок (станки, подъемники и т. д.), включают ЭД сравнительно небольших мощностей. Для этих случаев целесообразно исследование изменений напряжения АД при переключении обмоток статора АД с «треугольника» на «звезду».

На основании проведенного анализа приняты следующие напряжения U_s для исследуемого АД: при соединении обмоток статора в «треугольник» — 150 В, 135 В, 127 В и 100 В; для схемы соединения обмоток в «звезду» — 220 В, 210 В, 200 В и 190 В.

По результатам выполненных исследований на рис. 4 и 5 представлены графики зависимостей $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ ЭД типа АО2-41-4, построенные для различных значений напряжения при схеме соединения обмоток статора АД в «треугольник».

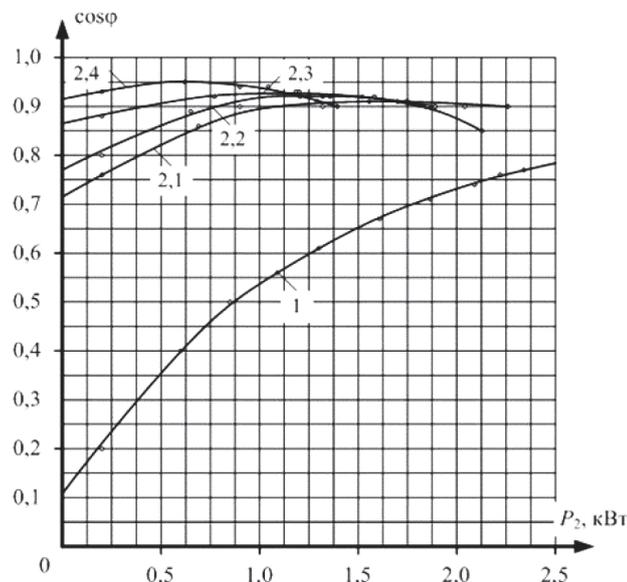


Рис. 4. Графики $\cos \varphi = f(P_2)$ для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «треугольник»

Зависимости η на рис. 4 и 5 соответствуют номинальному значению напряжения статора АД ($U_s = U_n = 220$ В), зависимости 2,1 — напряжению $U_s = 150$ В; 2,2 — 135 В; 2,3 — 127 В и 2,4 — 100 В.

На рис. 6 и 7 приведены зависимости $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ АД, построенные для различных значений напряжения по схеме «звезда».

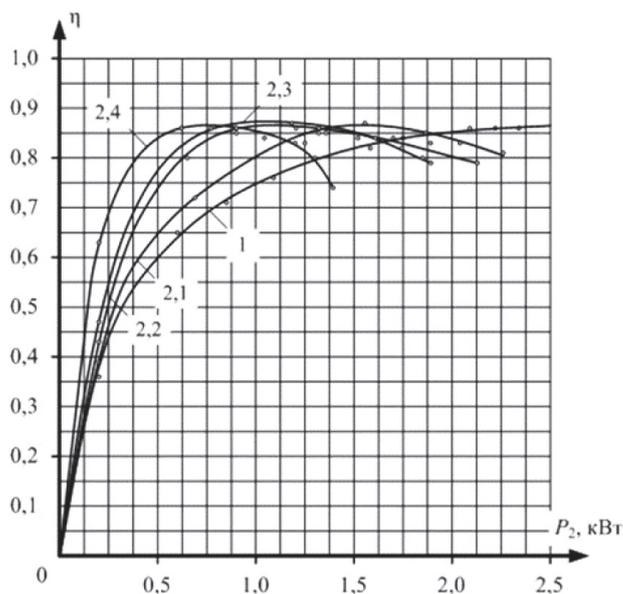


Рис. 5. Графики $\eta = f(P_2)$, для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «треугольник»

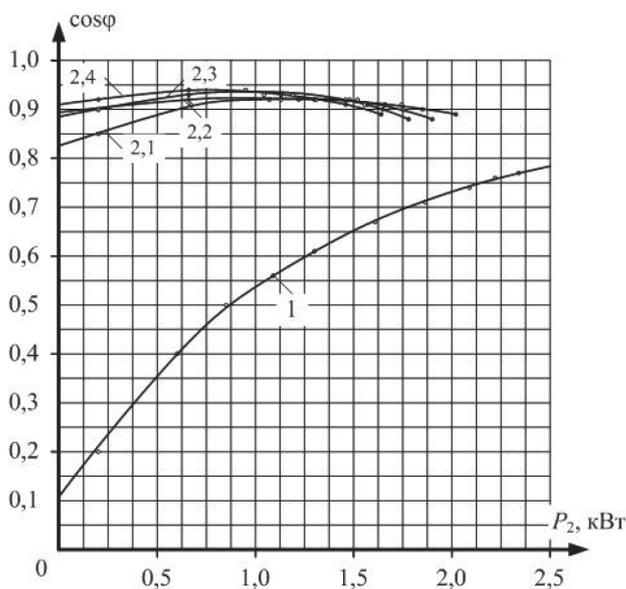


Рис. 6. Графики $\cos \varphi = f(P_2)$ для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «звезда»

Зависимости I на рис. 6 и 7 соответствуют номинальному напряжению ($U_s = 380$ В). Пониженные значения принимались исходя из условия

$$U_{сф} = \frac{U_{сл}}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

справедливого при соединении обмоток статора, исследуемого АД по схеме «звезда», где $U_{сф}$, $U_{сл}$ — фазные и линейные напряжения обмоток статора АД соответственно.

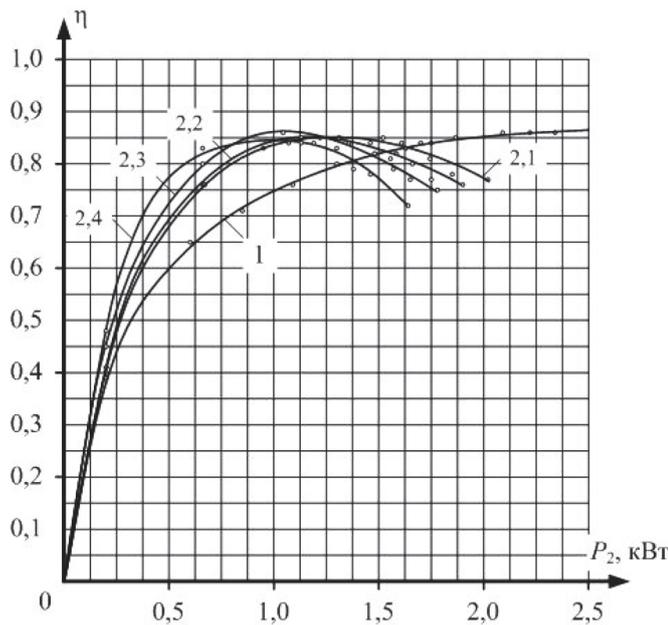


Рис. 7. Графики $\eta = f(P_2)$, для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «звезда»

Заключение (Conclusion)

К общим тенденциям изменений энергетических показателей при изменении (снижении) напряжений U_s , подводимых к статору трехфазного АД, относится смещение максимальных значений (экстремумов) функций $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ в области меньших нагрузок. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности использования пониженного напряжения для трехфазных АД, работающих в области малых нагрузок (моментов сопротивлений на валу). В общих исследованных случаях при уменьшении напряжений и нагрузок отмечается возрастание коэффициентов мощности ($\cos \varphi$) относительно номинальных значений. Максимальные значения коэффициента полезного действия практически остаются неизменными. Необходимо отметить, что при снижении напряжения U_s происходит незначительное изменение частоты вращения ротора (вала) АД.

При обобщении результатов выполненных исследований для определения целесообразности использования пониженных напряжений для АД с другими параметрами необходим комплексный подход, включающий на основе анализа назначения ЭП, требований и рекомендаций, предъявляемых к ним, режимов работ и мощностей, определение групп или индивидуальных ЭП, для которых принципиально возможным является использование пониженных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 50369-1992. Электроприводы. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 14 с.
2. *Burkov A. F.* Main Types Electric Drives Marine Vessels of Russia / A. F. Burkov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2016. — Vol. 12. — No. 1. — Pp. 533–543.
3. *Сердешнов А. П.* Ремонт электрооборудования: в 2 ч. / А. П. Сердешнов. — 2-е изд. — Минск: ИВЦ Минфина, 2008. — Ч. 1. Ремонт электрических машин. — 293 с.
4. *Бурков А. Ф.* Теория, методы и средства улучшения качественных характеристик изоляций электрических машин / А. Ф. Бурков, Д. С. Николаев, В. Н. Юрин; под ред. А. Ф. Буркова. — Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2016. — 131 с.
5. *Burkov A. F.* Reliability Study of Shipboard Electrical Equipment / A. F. Burkov // Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2016. — Vol. 11. — Is. 14. — Pp. 3024–3027.

6. Черный А. П. Применение показателей качества преобразования энергии для оценки состояния и надежности электромеханических систем / А. П. Черный, А. П. Калинов, Д. Г. Мамчур // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: матер. IV междунар. науч.-техн. конф. — Днепро-держинск, 2006. — С. 245.
7. Бурков А. Ф. Надежность судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. — Владивосток: Изд-во ДФУ, 2014. — 204 с.
8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандар-тинформ, 2014. — 20 с.
9. Тарабин И. В. Компенсация реактивной мощности как метод повышения качества электрической энергии и сокращения потерь на примере данных «МРСК Сибири» / И. В. Тарабин, Р. Б. Скоков, И. А. Терехин, С. А. Горбачев // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2–22. — С. 4876–4879.
10. Цицикян Г. Н. Качество электроэнергии в автономных системах / Г. Н. Цицикян. — СПб.: Изд-во Крыловского гос. науч. центра, 2014. — 102 с.
11. Бурков А. Ф. Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. — СПб.: Лань, 2017. — 340 с.
12. Сысун В. И. Электромеханический компенсатор реактивной мощности / В. И. Сысун, А. А. Тихомиров // Международный научно-исследовательский журнал. — 2013. — № 8–1 (15). — С. 55–56.
13. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 224 с.
14. Радченко П. М. Цели, задачи и направления исследований в области компенсации реактивной мощности в СЭС / П. М. Радченко // Сб. науч. тр. НТО им. акад. А. Н. Крылова. — 1986. — № 436. — С. 6–12.
15. Арпишкин П. Н. Компенсация реактивной мощности электростанций консервного завода / П. Н. Арпишкин, В. Д. Гаврилов, П. М. Радченко // Рыбное хозяйство. — 1989. — № 6. — С. 43–46.
16. Семёнов А. С. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трехфазного источника питания / А. С. Семёнов, Г. А. Матул, Р. Р. Хазиев [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9–6. — С. 1210–1215.
17. Исследование и разработка способов естественного повышения коэффициента мощности судоремонтных заводов // Отчет о НИР ХДТ-6/81; рук. Б. В. Осокин. — Владивосток: Изд-во Дальневост. высш. инж. мор. училища, 1982. — 75 с.
18. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. / под ред. А. А. Федорова. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — Т. 1. — 568 с.

REFERENCES

1. Russian Federation. State Standard GOST R 50369-1992. Electric drives. Terms and definitions. M.: Izd-vo standartov, 1993.
2. Burkov, Aleksei Fyodorovich. “Main Types Electric Drives Marine Vessels of Russia.” *Global Journal of Pure and Applied Mathematics* 12.1 (2016): 533–543.
3. Serdeshnov, A.P. *Remont elektrooborudovaniya: v 2 ch. Part 1. Remont elektricheskikh mashin*. 2nd ed. Minsk: IVTs Minfina, 2008.
4. Burkov, A.F., D.S. Nikolaev, and V.N. Yurin. *Teoriya, metody i sredstva uluchsheniya kachestvennykh kharakteristik izolyatsii elektricheskikh mashin*. Edited by A.F. Burkov. Vladivostok: Morsk. gos. un-t im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2016.
5. Burkov, Aleksei Fedorovich. “Reliability Study of Shipboard Electrical Equipment.” *Journal of Engineering and Applied Sciences* 11.14 (2016): 3024–3027.
6. Chernyi, A.P., A.P. Kalinov, and D.G. Mamchur. “Primenenie pokazatelei kachestva preobrazovaniya energii dlya otsenki sostoya-niya i nadezhnosti elektromekhanicheskikh system.” *Problemy avtomatizirovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika: mat. IV mezhdunarod. nauch.-tekhn. konf.* Dneprodzerzhinsk, 2006. 245.
7. Burkov, A.F. *Nadezhnost' sudovykh elektroprivodov*. Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2014.
8. Russian Federation. State Standard GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. M.: Standartinform, 2014.

9. Tarabin, I.V., R.B. Skokov, I.A. Terekhin, and S.A. Gorbachev. "Compensation of jet power as method of improvement of quality of electric energy and reduction of losses on the example of data of "IDGC of Siberia"." *Fundamental research* 2-22 (2015): 4876–4879.
10. Tsitsikyan, G. N. *Kachestvo elektroenergii v avtonomnykh sistemakh*. SPb.: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2014.
11. Burkov, A. F. *Osnovy teorii i ekspluatatsii sudovykh elektroprivodov*. SPb.: Lan', 2017.
12. Sysun, V.I., and A.A. Tikhomirov. "Electromechanical compensator of reactive power." *International Research Journal* 8-1(15) (2013): 55–56.
13. Zhelezko, Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii*. M.: Energoatomizdat, 1985.
14. Radchenko, P.M. "Tseli, zadachi i napravleniya issledovaniy v oblasti kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v SEES." *Sb. nauch. tr. NTO im. akad. A. N. Krylova* 436 (1986): 6–12.
15. Arpishkin, P.N., V.D. Gavrilov, and P.M. Radchenko. "Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti elektrostantsii konservnogo zavoda." *Rybnoe khozyaistvo* 6 (1989): 43–46.
16. Semenov, A.S., G.A. Matul, R.R. Khaziev, V.A. Shevchuk, and N.S. Cherenkov. "Analysis quality of electrical energy in the work asynchronous machine from three-phase power supply." *Fundamental research* 9-6 (2014): 1210–1215.
17. *Issledovanie i razrabotka sposobov estestvennogo povysheniya koeffitsienta moshchnosti sudoremontnykh zavodov. NIR Report*. Vladivostok: Dal'ne-vost. vyssh. inzh. mor. uch-shche, 1982.
18. Fedorov, A. A. *Spravochnik po elektrooborudovaniyu i elektrooborudovaniyu: v 2 t. Vol. 1*. M.: Energoatomizdat, 1986.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурков Алексей Федорович —
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
университет»
690091, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: burkov.22@mail.ru

Юрин Валерий Николаевич —
доцент
ФГБОУ ВО «Морской государственный
университет имени адмирала Г. И. Невельского»
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: yurinvn@yandex.ru

Аветисян Вагаршак Радиевич —
адъюнкт
ФГКВБОУ ВО «Тихоокеанское высшее военно-
морское училище имени С. О. Макарова»
690062, Российская Федерация, г. Владивосток,
Камский переулок, 6
e-mail: merin1309@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burkov, Aleksey F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str.,
Vladivostok, 690091,
Russian Federation
e-mail: burkov.22@mail.ru

Yurin, Valeriy N. —
associate professor
Maritime state University named
after adm. G.I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690059, Russian Federation
e-mail: yurinvn@yandex.ru

Avetisyan, Vagarshak R. —
adjunct
Pacific higher naval school named
after S.O. Makarov
6 Kamskiy Lane, Vladivostok, 690062,
Russian Federation
e-mail: merin1309@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 мая 2018 г.
Received: May 2, 2018.