

Научная статья

УДК 621.33

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-4-82-88>

EDN KSKSTO

Методика проектирования асинхронных гребных электродвигателей с заданным коэффициентом мощности

Вениамин Францевич Самосейко, Сергей Владимирович Шарашкин[✉]

*Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова,
Санкт-Петербург, Россия, s_sharashkin@mail.ru*[✉]

Аннотация. Рассматривается вопрос повышения качества электроэнергии, в частности коэффициента мощности. Увеличение значения коэффициента мощности приводит к уменьшению реактивной составляющей токов в судовой сети и, как следствие, к уменьшению мощности преобразовательной техники, генераторов и кабельной продукции. Исследуется один из разделов методики проектирования судовых электрических машин, разработанной на кафедре электропривода и электрооборудования береговых установок ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», позволяющей производить оценку параметров асинхронных электрических двигателей в начале их проектирования. В настоящее время при проектировании электрических машин используются методики, разработанные в прошлом столетии и не позволяющие осуществлять электромагнитные расчеты, учитывая при этом желаемое значение коэффициента мощности. Отмечено, что коэффициент мощности определяется уже после задания основных параметров машины по эмпирическим формулам. Рассмотрена схема замещения асинхронного электродвигателя, содержащая параметры статорной и роторной обмоток, и его математическое описание, основанное на уравнениях, соответствующих законам Кирхгофа. Произведены преобразования уравнений, описывающих электромагнитные процессы в двигателе, записанных для статического режима работы в комплексной форме. Приведены выражения, позволяющие определить ток намагничивания, магнитные проводимости, намагничивающие силы, коэффициенты воздушного зазора и магнитного насыщения, основные габаритные характеристики электродвигателя, а также электромагнитный момент, который он развивает. На основе преобразованных уравнений, описывающих асинхронный электродвигатель, получены закономерности, позволяющие задавать в качестве исходных данных при проектировании значение коэффициента мощности. Проанализированы практическая значимость применяемой методики и актуальность выбранной тематики.

Ключевые слова: методика проектирования, гребной электродвигатель, асинхронный электродвигатель, коэффициент мощности, судовое электрооборудование

Для цитирования: Самосейко В. Ф., Шарашкин С. В. Методика проектирования асинхронных гребных электродвигателей с заданным коэффициентом мощности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 4. С. 82–88. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-4-82-88>. EDN KSKSTO.

Original article

Method of designing asynchronous propulsion motors with given power factor

Veniamin F. Samoseiko, Sergey V. Sharashkin[✉]

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russia, s_sharashkin@mail.ru*[✉]

Abstract. The article considers the problem of improving the quality of electricity, in particular the power factor. The increased value of the power factor leads to decreasing the reactive component of the currents in the ship power network and, as a result, to a decreased power of converting equipment, generators and cable products. There is studied a section in the methodology of designing ship electrical machines developed at the Department of Electric Drives and Electrical Equipment of Coastal Power Plants in Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, which allows to evaluate the parameters of asynchronous electric motors at the design stage. Today, in designing electrical machines there are used the methods developed in the last century, which do not allow to carry out electromagnetic calculations subject to the required value of the power factor. The power factor is known to be determined by

empirical formulas after setting the main parameters of the mechanism. The equivalent circuit of asynchronous electric motor containing the parameters of stator and rotor windings, and its mathematical description based on equations corresponding to Kirchhoff's laws are considered. Transformations of the equations describing the electromagnetic processes in the engine given for the static mode of operation in a complex form are made. There are given the expressions that allow determining the magnetizing current, magnetic conductivities, magnetizing forces, air gap and magnetic saturation coefficients, overall dimensions of the electric motor, and electromagnetic torque that it develops. Basing on the transformed equations describing an asynchronous electric motor there have been derived the regularities that help set the value of the power factor as initial data at the stage of design. The practical significance of the applied methodology and importance of the chosen subject have been analyzed.

Keywords: design technique, propulsion motor, asynchronous motor, power factor, ship electrical equipment

For citation: Samoseiko V. F., Sharashkin S. V. Method of designing asynchronous propulsion motors with given power factor. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2022;4:82-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-4-82-88>. EDN KSKSTO.

Введение

В настоящее время вопрос обеспечения высокого коэффициента мощности электродвигателей судовых электроприводов является актуальным. Многие ученые исследуют вопросы повышения качества электроэнергии, в том числе повышения коэффициента мощности. Использование гребных электрических двигателей с высоким коэффициентом мощности при построении систем электропривода позволяет понижать мощность преобразователей частоты, при этом уменьшается мощность, габариты главных генераторов и сечение кабельной продукции. Таким образом снижаются затраты на создание электроэнергетической системы судна, а также уменьшаются массогабаритные характеристики оборудования, при этом на судне освобождается полезная площадь [1–6].

Современный ледокольный флот Российской Федерации пополняется мощнейшими ледоколами проекта 22220 мощностью 60 МВт, также планируется к постройке ледокол проекта 10510 мощностью 120 МВт. На этих ледоколах в качестве гребных электродвигателей применяются асинхронные машины с короткозамкнутым ротором [7–9]. Как правило, проектирование этого типа электродвигателей основывается на эмпирическом опыте, где в основу проектирования положены основные параметры машины, такие как мощность, напряжение и угловая частота вращения. Такие параметры, как коэффициент мощности и коэффициент полез-

ного действия, определяются в результате проектирования на основе закономерностей, полученных еще в 1950–1960 гг. XX в. [10–12]. Подобные методы не позволяют проектировать машины с заданным коэффициентом мощности.

Задачей настоящего исследования является разработка методики определения основных параметров асинхронного электродвигателя с заданным коэффициентом мощности.

Методы и материалы исследования

На кафедре электропривода и электрооборудования береговых установок ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова» была разработана методика проектирования электрических асинхронных машин с короткозамкнутым ротором. В настоящей работе предлагается метод оценки габаритных параметров асинхронного электродвигателя с заданным коэффициентом мощности, используемый в данной методике. В работе для получения результатов применялись методы математического анализа.

Результаты исследования

Совокупность параметров, характеризующих асинхронный двигатель, приведена на схеме замещения (рис. 1). Данная схема замещения не учитывает насыщение стали магнитопровода и магнитные потери мощности.

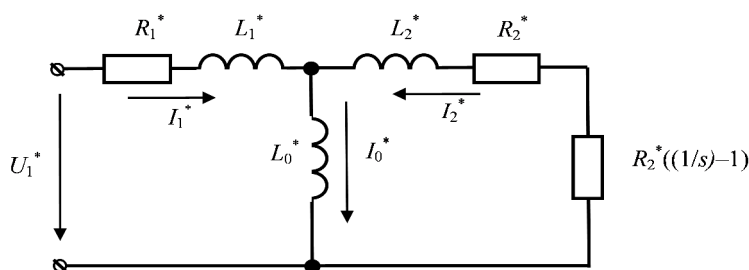


Рис. 1. Схема замещения фазы асинхронного электродвигателя, где $s = \omega_2 / \omega_1$ – скольжение

Fig. 1. Phase replacement circuit of an asynchronous electric motor, where $s = \omega_2 / \omega_1$ – slip

Вышеобозначенной схеме соответствует система уравнений напряжений в комплексной форме записи, составленных согласно законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + j\omega_1 L_1 \dot{I}_1 + j\omega_1 L_0 \dot{I}_0; \\ 0 = R_2' \dot{I}_1 + j\omega_2 L_2' \dot{I}_2' + j\omega_2 L_0 \dot{I}_0; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2', \end{cases} \quad (1)$$

где ω_1 и ω_2 – частота токов обмоток статора и ротора, рад/с; \dot{I}_1 и \dot{I}_2' – комплексы токов обмоток статора и ротора, А; \dot{U}_1 – комплекс фазного напряжения обмотки статора, В. Эти уравнения записаны для статического режима работы асинхронного двигателя при подключении к обмотке статора синусоидального напряжения с угловой частотой ω_1 . Модули векторов токов и напряжений являются амплитудами синусоидальных токов и напряжений.

Комплексы токов и напряжения

Систему уравнений (1) преобразуем к виду, который используется далее при проектировании асинхронного двигателя. Напряжениям и токам соответствуют векторы на комплексной плоскости. Действительную ось будем обозначать d и называть продольной. Мнимую ось будем обозначать q и называть поперечной. Пример графического изображения вектора тока в обмотке статора приведен на рис. 2.

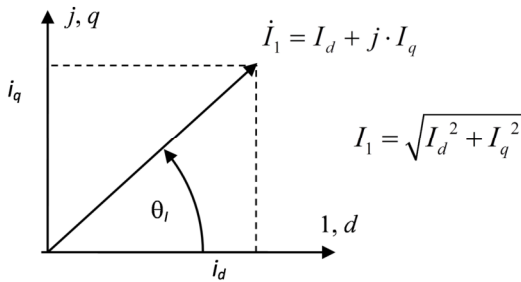


Рис. 2. Представление вектора тока на плоскости $d - q$, где θ_l – угол токовой нагрузки

Fig. 2. Representation of the current vector on the plane $d - q$, where θ_l – angle of the current load

Аналогично изображаются на плоскости $d - q$ все векторы токов и напряжений. Обозначим

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = U_d + jU_q; \\ \dot{I}_1 = I_d + jI_q; \\ \dot{I}_2' = J_d + jJ_q, \end{cases} \quad (2)$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица. При вращении векторов их проекции будут синусоидальными функциями с угловой частотой, равной угловой скорости вращения вектора. Если принять, что оси $d - q$ вращаются с угловой частотой напряжения (тока) обмотки статора, то проекции векторов на оси $d - q$ будут постоянными числами.

Будем полагать, что оси координат вращаются с угловой частотой напряжения (тока) обмотки статора. Положение магнитных осей $d - q$ в силу симметрии магнитной системы асинхронного двигателя может быть выбрано произвольно. Выберем начальное положение векторов так, что действительная часть вектора тока ротора $J_d = 0$. Если переменные из системы уравнений (2) подставить в (1) и разделить первые два уравнения на уравнения действительной и мнимой частей, то получим систему из четырех уравнений:

$$\begin{cases} u_d = R_1 I_d - \omega_1 L_{01} I_q - \omega_1 L_0 I_q; \\ u_q = R_1 I_q + \omega_1 L_{01} I_d; \\ 0 = \omega_2 L_{02} J_d + \omega_2 L_0 I_q; \\ 0 = R_2' J_d + \omega_2 L_0 I_d. \end{cases} \quad (3)$$

Из третьего уравнения системы (3) следует

$$J_q = -\frac{L_0}{L_{02}} I_q. \quad (4)$$

Из четвертого уравнения системы (3) следует

$$\omega_2 = -\frac{R_2' J_q}{L_0 I_q} = \frac{R_2' I_q}{L_{02} I_q} = \frac{R_2'}{L_{02}} \tan(\theta_l),$$

где θ_l – угол токовой нагрузки, рад.

Если в первое и второе уравнения системы (3) подставить выражение (4), то получим уравнения напряжений для обмотки статора:

$$\begin{cases} u_d = R_1 I_d - \omega_1 L_q I_q; \\ u_q = R_1 I_q + \omega_1 L_d I_d, \end{cases}$$

где $L_d = L_{01} \approx L_{02}$ – продольная индуктивность обмотки статора, Гн; $L_q = (L_{01} L_{02} - L_0^2) / L_{02} \approx L_1 + L_2'$ – поперечная индуктивность обмотки статора (индуктивность короткого замыкания), Гн; $L_1 \approx L_2'$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора, Гн.

Связь продольной и поперечной индуктивности с номинальными токами в относительных единицах:

$$I_0^* \approx I_d^* \approx \cos(\theta_l) \approx \sqrt{\frac{1 - L_q^{*2}}{L_d^{*2} - L_q^{*2}}} \approx \frac{1}{L_d^*}; \quad (5)$$

$$I_q^* \approx \sin(\theta_I) \approx \sqrt{\frac{L_d^{*2} - 1}{L_d^{*2} - L_q^{*2}}} \approx \sqrt{1 - \frac{1}{L_d^{*2}}}. \quad (6)$$

Знаки приближения в данных формулах обусловлены допущением $R_1 = 0$.

Параметры L_d^* и L_q^* определяют коэффициент мощности проектируемой машины:

$$k_M = \cos(\varphi) \approx \frac{\sqrt{(L_d^{*2} - 1)(1 - L_q^{*2})}}{L_d^* + L_q^*}. \quad (7)$$

Намагничивающий ток определяется выражением

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = I_d + j \frac{L_1}{L_{02}} I_q, \quad (8)$$

где $L_{02} = L_0 + L_2$ – полная индуктивность обмотки ротора, Гн.

Из выражения (8) следует, что в намагничивании машины участвуют продольный и поперечный токи. Однако вклад поперечного тока в намагничивание машины ничтожно мал, поэтому далее примем, что $I_0 = I_d$.

Магнитная проводимость воздушного зазора связана с геометрическими размерами машины соотношением

$$\lambda_\delta = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\mu_0 S_\tau}{2\delta_0 k_z} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\mu_0 \pi r l}{2p\delta_0 k_z},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; $S_\tau = \pi r l / p$ – площадь под полюсом в воздушном зазоре, м²; p – число пар полюсов; r – внутренний радиус цилиндра магнитопровода статора, м; l – длина цилиндра магнитопровода, м; δ_0 – геометрический воздушный зазор между магнитопроводом статора и ротора, м; $k_z > 1$ – коэффициент зубчатости магнитопровода статора и ротора.

Основная магнитная проводимость машины определяется магнитной проводимостью воздушного зазора и магнитопровода:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_\delta \lambda_M}{\lambda_\delta + \lambda_M} = \frac{\lambda_\delta}{k_\mu} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\mu_0 S_\tau}{2\delta_0 k_\delta} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\mu_0 \pi r l}{2p\delta}, \quad (9)$$

где λ_M – магнитная проводимость магнитопровода, Вб/А; $\delta = \delta_0 k_\delta$ – расчетный воздушный зазор, м; $k_\delta = k_\mu k_z$ – коэффициент воздушного зазора; k_μ – коэффициент магнитного насыщения.

Коэффициент воздушного зазора определяется выражением

$$k_\delta = k_z k_\mu.$$

Коэффициент магнитного насыщения определяется выражением

$$k_\mu = 1 + \frac{\lambda_M}{\lambda_\delta} = 1 + \frac{U_{Z1} + U_{Z2} + U_{a1} + U_{a2}}{U_\delta},$$

где U_{Z1} , U_{Z2} , U_{a1} , U_{a2} , U_δ – магнитные напряжения в зубах и ярме статора и ротора, а также в воздушном зазоре, А/м.

Намагничивающая сила m -фазной обмотки статора разделяется на ортогональные составляющие: продольную F_d и поперечную F_q . Основное намагничивание машины осуществляется продольной намагничивающей силой.

Модуль вектора намагничивающей силы:

$$F_a = \sqrt{F_d^2 + F_q^2},$$

где $F_d = F_a \cos(\theta_I)$ и $F_q = F_a \sin(\theta_I)$ – продольная и поперечная намагничивающая сила, А.

Намагничивающие силы m -фазной обмотки статора связаны с токами статора соотношениями

$$F_a = \frac{m}{2} k_{об} w_1 I_a;$$

$$F_d = \frac{m}{2} k_{об} w_1 I_d;$$

$$F_q = \frac{m}{2} k_{об} w_1 I_q,$$

где m – число фаз; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент; w_1 – число витков фазной обмотки статора; I_a – модуль вектора тока, А; I_d и I_q – продольный и поперечный токи, А.

Магнитный поток, протекающий через полюсное деление воздушного зазора, создается продольной намагничивающей силой обмотки и определяется выражением

$$\Phi = B_\delta S_\tau = \frac{\lambda_0 F_d}{p} = \frac{\lambda_0 F_a \cos(\theta_I)}{p},$$

где B_δ – максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл.

Можно записать выражение для закона полного тока в следующем виде:

$$\frac{B_\delta}{\mu_0} 2\delta = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{F_d}{p} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{F_a}{p} \cos(\theta_I).$$

Определение внутреннего радиуса магнитопровода статора

Связь площади поперечного сечения пазов статора с модулем намагничивающей силы:

$$S_{01} = \frac{2m w_1 I_a}{\sqrt{2} \cdot k_{3.M} j_1} = \frac{\sqrt{8} \cdot F_a}{k_{об} k_{3.M} j_1},$$

где $k_{3,м} \approx (0,18 \div 0,3)$ – коэффициент заполнения пазов статора медью; $j_1 \approx (4,5 \div 5,8) \cdot 10^6$ – плотность тока в обмотке статора, А/м²; w_1 – число витков на фазу.

Расчетный воздушный зазор между статором и ротором стремятся задать таким образом, чтобы его можно было реализовать технически. Эмпирическая формула

$$\delta_0^* \approx \frac{1}{600} \left(1 + \frac{9}{2p} \right)$$

определяет минимальный относительный геометрический воздушный зазор между магнитопроводом статора и ротора, который может быть технически реализован.

Относительный расчетный воздушный зазор может быть оценен по формуле

$$\delta^* \approx k_\delta \delta_0^*, \quad (10)$$

где k_δ – коэффициент воздушного зазора, принимаемый в диапазоне 1,3–1,6 и учитывающий зубчатость магнитопровода и его магнитное сопротивление.

Электромагнитный момент в системе координат $d - q$ запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} M &= p \frac{m}{2} (L_d - L_q) I_d I_q = \\ &= \frac{\lambda_0}{2} \left(1 - \frac{\xi}{2} \right) F_a^2 \sin(2\theta_l), \end{aligned} \quad (11)$$

где λ_0 – основная магнитная проводимость машины (9).

Из выражений (9)–(11) можно вывести внутренний радиус магнитопровода статора:

$$r = \sqrt[3]{\frac{4M\mu_0}{\pi^3 B_\delta^2 p l^* \delta^* \tan(\theta_l) (1 - (\xi/2))}}$$

где $l^* = l / r$ – заданное относительное значение длины магнитопровода; δ – заданное относительное значение расчетного воздушного зазора.

Обсуждение

Статор машины состоит из медной обмотки, уложенной в пазы, и магнитопровода. Угол токовой нагрузки θ_l (обычно этот угол называют $\cos\varphi$) влияет на распределение объема меди обмотки и объема магнитопровода. Уменьшение θ_l ведет к увеличению объема магнитопровода и уменьшению объема меди обмотки. Справедливо также

обратное: увеличение θ_l ведет к уменьшению объема магнитопровода и увеличению объема меди обмотки.

Определить угол токовой нагрузки θ_l можно решением оптимизационных задач с различными критериями, такими как стоимость меди обмотки и стали магнитопровода, потери мощности, габариты магнитопровода.

Другой подход состоит в задании значения угла токовой нагрузки θ_l из соображений получения нужных эксплуатационных характеристик. Так, если задано относительное значение продольной индуктивности L_d^* , то угол токовой нагрузки θ_l можно оценить, используя соотношение (5). Относительное значение продольной индуктивности L_d^* определяет относительное значение тока намагничивания и тока нагрузки (6). Опыт проектирования электрических машин подтверждает, что $L_d^* \approx 1,5 \div 3,0$.

Относительная поперечная индуктивность L_q^* слабо влияет на величину угла токовой нагрузки θ_l и является у асинхронного двигателя величиной, которая может быть выбрана из интервала 0,14–0,2. Кроме того, если задать параметры L_d^* и L_q^* , то коэффициент мощности проектируемой машины определится формулой (8). Поэтому далее полагается, что при проектировании машины задаются продольная и поперечная индуктивности L_d^* и L_q^* и оцениваются по формулам (5)–(7) продольный и поперечный токи в относительных единицах, а также коэффициент мощности.

Заключение

Согласно вышеописанной методике проектирования гребных электродвигателей возможно осуществлять расчет электрических машин с заданным коэффициентом мощности, что позволит получить ощутимую экономическую выгоду при разработке единых электроэнергетических систем с системами электродвижения судов. Представленная в настоящей работе методика может быть использована также для проведения расчетов электродвигателей общепромышленного назначения. Она позволяет в результате проектирования электрических машин получать расчетные параметры, близкие к параметрам аналогичных по частоте вращения, мощности и другим характеристикам двигателей из каталогов различных компаний-производителей электрических машин, что свидетельствует об адекватности применяемого метода.

Список источников

1. Zhumagaliyev Ye., Yessengaliyev D., Kambar R., Yermetov S. Voltage Regulation As a Source to Increase the Quality of Electric Power // Тр. ун-та. 2021. № 4 (85). С. 286–291.

2. Железко Ю. С. Научно-методические основы стратегии снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1996. 46 с.

3. Прохоренков А. М., Ремезовский В. М. Программно-аппаратная реализация системы повышения качества электроэнергии на судах // *Вестн. МГТУ. Тр. Мурманск. гос. техн. ун-та.* 1998. Т. 1. № 1. С. 17–20.

4. Алиев Д. С., Хаитов К. Х. Повышение коэффициента мощности в асинхронных электродвигателях переменного тока // *Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России – 2021: сб. ст. II Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конф. (Сургут, 22–23 апреля 2021 г.). М.: Знание-М, 2021. С. 95–100.*

5. Папуловский А. С., Папуловский С. С. Способы повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // *Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики: материалы Междунар. науч.-метод. конф. (Оренбург, 23 марта 2021 г.). Оренбург: Изд-во ОР ИПС – филиал СамГУПС, 2021. С. 140–143.*

6. Verma M., Phares D., Dick B. Medium Voltage Adjustable Speed Drives: Power Factor and Motor Control – A Beautiful Combination, 2019 IEEE-IAS/PCA Cement

Industry Conference (IAS/PCA), St. Louis, MO, USA, 2019. P. 1–11.

7. Коваленко А. С., Моргунова М. О., Грибковская В. В. Инфраструктурная синергия Северного морского пути в международном контексте // *Энергет. политика.* 2018. № 4. С. 57–67.

8. Митько А. В. Обновление арктического флота // *Деловой журн. Neftegaz.RU.* 2021. № 6 (114). С. 48–52.

9. Левшенков В. Н. 60 лет атомному ледокольному флоту // *Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях: сб. ст. Нац. науч.-практ. конф. (Ставрополь, 03–05 июня 2020 г.). Ставрополь: Ставролит, 2020. С. 408–411.*

10. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин. М.: Юрайт, 2011. 767 с.

11. Гольдберг О. Д., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин. М: Высш. шк., 2006. 430 с.

12. Проектирование тяговых электрических машин / под ред. М. Д. Находкина. М.: Транспорт, 1976. 624 с.

References

1. Zhumagaliyev Ye., Yessengaliyev D., Kambar R., Yermetov S. Voltage Regulation As a Source to Increase the Quality of Electric Power. *Trudy universiteta*, 2021, no. 4 (85), pp. 286-291.

2. Zhelezko Iu. S. *Nauchno-metodicheskie osnovy strategii snizheniya poter' i povysheniya kachestva elektroenergii v elektricheskikh setiakh: avtoreferat dissertatsii ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific and methodological foundations of strategy for reducing losses and improving quality of electricity in electrical networks: Diss. Abstr. ... Dr. Tech. Sci.]. Moscow, 1996. 46 p.

3. Prokhorenkov A. M., Remezovskii V. M. Programno-apparatnaia realizatsia sistemy povysheniya kachestva elektroenergii na sudakh [Software and hardware implementation of system for improving quality of electricity on ships]. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 17-20.

4. Aliiev D. S., Khaitov K. Kh. Povyshenie koeffitsienta moshchnosti v asinkhronnykh elektrodvigateliakh peremennogo toka. *Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsii Severa Rossii – 2021* [Increasing power factor in asynchronous AC motors. Problems of electric power industry and telecommunications of North of Russia - 2021]. *Sbornik statei II Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii (Surgut, 22–23 apreliya 2021 g.)*. Moscow, Znanie-M Publ., 2021. Pp. 95-100.

5. Papulovskii A. S., Papulovskii S. S. Sposoby povysheniya koeffitsienta moshchnosti asinkhronnykh dvigatelei s korotkozamknutym rotorom. *Nauka i obrazovanie: aktual'nye voprosy teorii i praktiki* [Methods for increasing power factor of asynchronous motors with squirrel-cage rotor. Science and education: topical issues of theory and practice]. *Materialy*

Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii (Orenburg, 23 marta 2021 g.). Orenburg, Izd-vo OriPS – filial SamGUPS, 2021. Pp. 140-143.

6. Verma M., Phares D., Dick B. *Medium Voltage Adjustable Speed Drives: Power Factor and Motor Control – A Beautiful Combination*, 2019 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA), St. Louis, MO, USA, 2019. Pp. 1-11.

7. Kovalenko A. S., Morgunova M. O., Gribovskaya V. V. Infrastrukturnaia sinergiia Severnogo morskogo puti v mezhdunarodnom kontekste [Infrastructural synergy of Northern Sea Route in international context]. *Energeticheskaya politika*, 2018, no. 4, pp. 57-67.

8. Mit'ko A. V. Obnovlenie arkticheskogo flota [Renovation of Arctic fleet]. *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU*, 2021, no. 6 (114), pp. 48-52.

9. Levshenkov V. N. 60 let atomnomu ledokol'nomu flotu. *Innovatsionnye napravleniya razvitiia v obrazovanii, ekonomike, tekhnike i tekhnologiiakh* [Sixty years of nuclear icebreaker fleet. Innovative directions of development in education, economics, engineering and technology]. *Sbornik statei Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Stavropol', 03–05 iyunia 2020 g.)*. Stavropol', Stavrolit Publ., 2020. Pp. 408-411.

10. Kopylov I. P., Klovov B. K., Morozkin V. P., Tokarev B. F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Iurait Publ., 2011. 767 p.

11. Gol'dberg O. D., Sviridenko I. S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 430 p.

12. *Proektirovanie tiagovykh elektricheskikh mashin* [Design of traction electric machines]. Pod redaktsiei M. D. Nakhodkina. Moscow, Transport Publ., 1976. 624 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Вениамин Францевич Самосейко — доктор технических наук, профессор; профессор кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; samoseyko@mail.ru

Veniamin F. Samoseiko — Doctor of Sciences in Technology, Professor; Professor of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Power Plants; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; samoseyko@mail.ru

Сергей Владимирович Шарашкин — кандидат технических наук; старший преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; s_sharashkin@mail.ru

Sergey V. Sharashkin — Candidate of Sciences in Technology; Senior Lecturer of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Power Plants; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; s_sharashkin@mail.ru

