

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ МНОГОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СУДОВЫХ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

В. В. Миханович¹, А. Ф. Бурков², А. Ю. Филоженко¹

¹Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Преимущества гребных электрических установок способствуют их применению на судах и кораблях морского флота — ледоколах, паромах, буксирах, крейсерах и др., которым необходима повышенная маневренность и живучесть. Одним из существенных недостатков гребных электрических установок, ограничивающих их более широкое применение, является пониженный, по сравнению с прямой передачей вращающего момента главного приводного двигателя на гребной винт, коэффициент полезного действия. Кроме того, по сравнению с другими вариантами пропульсивных установок гребные электрические установки занимают больше внутреннего пространства судна. Также актуальными являются вопросы, касающиеся повышения надежности гребных электрических установок. Если в береговых электроэнергетических системах наибольшее распространение получила трехфазная система электроснабжения благодаря экономичности передачи электроэнергии на большие расстояния, то на электроходах ввиду значительно меньших расстояний между источниками (главными генераторами) и основными электропотребителями (гребными электродвигателями) представляется целесообразным применение систем электроснабжения с числом фаз, большим трех. В статье на основе выполненного анализа существующих типов предложена новая конструкция электрических машин с несколькими встроенными друг в друга статорно-роторными парами, защищенная патентом на изобретение. Применение таких машин на электроходах, сердечники статора которых снабжены при этом многофазными обмотками (с числом фаз больше трех), позволит решить вышеуказанные задачи.

Ключевые слова: многофазная обмотка, надёжность, полупроводниковый преобразователь, рабочее состояние, электрическая машина, энергоэффективность.

Для цитирования: Миханович В. В., Бурков А. Ф., Филоженко А. Ю. Применение мощных многофазных электрических машин в судовых гребных электроустановках // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 60–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-60-65. EDN: GEZWIK.



© Миханович В. В., Бурков А. Ф., Филоженко А. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF POWERFUL MULTIPHASE ELECTRIC MACHINES IN MARINE ROWING ELECTRIC INSTALLATIONS

V. V. Mikhanoshin¹, A. F. Burkov², A. Yu. Filozhenko¹

¹Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

The advantages of electric propulsion systems contribute to their use on ships and ships of the navy — icebreakers, ferries, tugboats, cruisers, etc., which require increased maneuverability and survivability. One of the significant disadvantages of electric propulsion systems, limiting their wider application, is the reduced efficiency compared to the direct transmission of the torque of the main drive motor to the propeller. In addition, compared to other variants of propulsive installations, rowing electric installations occupy more of the interior space of the vessel. Issues related to improving the reliability of electric propulsion systems are also relevant. If the three-phase power supply system is most widespread in coastal electric power systems, due to the cost-effectiveness of transmitting electricity over long distances, then on electric ships, due to the much shorter distances between sources (main generators) and main electric consumers (rowing electric motors), it seems advisable to use power supply systems with a number of phases greater than three. Based on the analysis of existing types, a new design of electric machines with several stator-rotor pairs integrated into each other, protected by a patent for the invention, is proposed. The use of such machines on electric

drives, the stator cores of which are equipped with multiphase windings (with more than three phases), will solve the above tasks.

Keywords: multiphase winding, reliability, semiconductor converter, working condition, electric machine, energy efficiency.

For citation: Mikhанoshin V. V., Burkov A. F., Filozhenko A. Yu. Application of powerful multiphase electric machines in marine rowing electric installations. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 60–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-60-65. EDN: GEZWIK.



© Mikhанoshin V. V., Burkov A. F., Filozhenko A. Yu., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Традиционным, наиболее эффективным способом повышения надежности оборудования в судовых электроэнергетических системах, является резервирование. Например, в гребных электрических установках (ГЭУ) постоянного тока в качестве электромеханических преобразователей применяются двухъякорные гребные электродвигатели (ГЭД) и несколько главных генераторов. Известны также двухстаторные асинхронные ГЭД, содержащие на каждом из статоров одинаковые трёхфазные обмотки. Выполненные на основе таких ГЭД пропульсивные установки сохраняют свое рабочее состояние при выходе из строя одной якорной (статорной) обмотки. К относительно новым способам повышения надежности электрических машин (ЭМ) следует отнести их многофазное исполнение [1–3]. При этом, в отличие от трехфазных, такие ЭМ сохраняют свое рабочее состояние в случаях выхода из строя одной или даже двух фаз. Кроме того, их внедрение, в частности в ГЭУ систем «дизель-генератор — преобразователь частоты — ГЭД», позволит получить следующие основные преимущества:

- меньшую амплитуду пульсаций входного тока инвертора, благодаря чему снижаются пульсационные потери в звене постоянного тока и, соответственно, требуется меньший по массо-размерным показателям сглаживающий фильтр в звене постоянного тока;

- больший электромагнитный момент ГЭД и, соответственно, большую номинальную мощность, которые прямо пропорциональны числу его фаз;

- уменьшение пульсаций крутящего момента ГЭД при увеличении числа фаз [4];

- лучшую форму (синусоидальность) магнитодвижущей силы в воздушном зазоре, преимущественно в машинах с нечётным количеством фазных обмоток, повышая тем самым коэффициент полезного действия (КПД) этих ЭМ и ГЭУ в целом [5];

- возможность использования для статорных обмоток проводников меньшего сечения благодаря снижению фазных токов ЭМ;

- меньшую токовую нагрузку на силовые полупроводниковые приборы (ключи) в схемах многофазных выпрямителей и инверторов;

- повышенную надёжность, обусловленную многофазностью ГЭД [6].

Например, при выходе из строя одной фазы 17-фазной ЭМ её мощность снизится на 6 %, а мощность работающей на двух фазах трёхфазной машины уменьшится на 33,3 % относительно номинальной мощности.

Несмотря на ряд публикаций [1–3], посвященных разработке теории многофазных ЭМ, а также

вышеперечисленные их преимущества по сравнению с трёхфазными, последние продолжают использоваться практически повсеместно, в том числе и мощных: генераторных агрегатах и судовых электроприводах (ГЭУ, якорно-швартовых и грузоподъемных механизмов, подруливающих устройств, траловых лебедок и др.) [7].

Необходимость совершенствования мощных судовых ЭМ с целью повышения их надежности и энергетических характеристик отражена, в частности, в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утверждённой распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 года № 3363-р, в Морской доктрине Российской Федерации, утверждённой Указом Президента РФ от 31 июля 2022 г. № 512, и в других действующих нормативных документах, направленных на обновление и развитие российского транспортного флота, повышение его конкурентоспособности на мировом рынке.

Постановка задачи

Несмотря на очевидные преимущества многофазных ЭМ для их внедрения в судовые электроэнергетические системы необходимо преодолеть инерционность производства и технического мышления. Учитывая введённые санкции, направленные, в частности, на ограничения в области развития высоких технологий, включая электроэнергетику, актуальным представляется вопрос дальнейшего развития отечественного производства в целом и электромашиностроения в частности.

Основной задачей статьи является техническое обоснование целесообразности использования мощных многофазных ЭМ в судовых гребных электроустановках.

Теория

Из теории ЭМ известны несколько видов многофазных систем (машин) [8]:

- связанные и несвязанные (рис. 1);

- с четным и с нечетным числом фаз;

- с симметричным расположением m -фазных обмоток и со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками на $t = 120/N$ электрических градусов, где N — число трехфазных обмоток (рис. 2).

Согласно общепринятым определениям, у связанных цепей все три фазы электрически соединены друг с другом, а у несвязанных отдельные фазные обмотки генератора и/или двигателя электрически не соединены между собой.

К преимуществам связанных многофазных систем (рис. 1а) относится наименьшее число проводов, связывающих генераторы и потребители (ЭД),

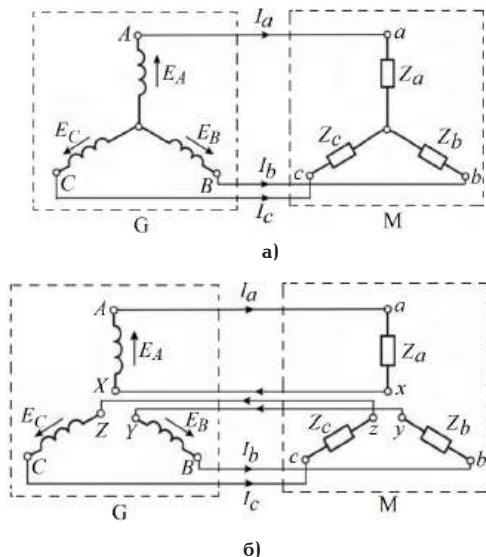


Рис. 1. Связанные (а) и несвязанные (б) трёх-фазные электрические цепи: G — трёхфазный генератор; M — электродвигатель
Fig. 1. Connected (a) and unconnected (b) three-phase electric circuits:
G — three-phase generator; M — electric motor

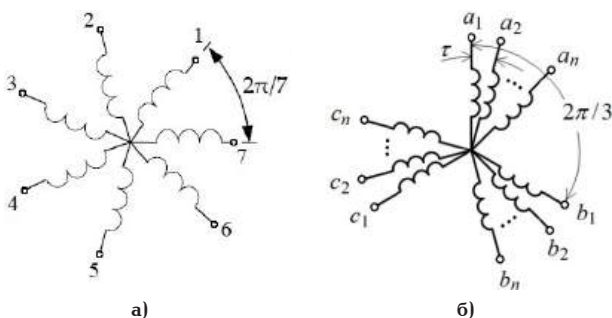


Рис. 2. Многофазные системы: а — симметричные; б — со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками
Fig. 2. Multiphase systems: a — symmetrical; б — with several three-phase windings offset from each other

а несвязанных (рис. 1б) — независимость от соседних контуров токов I_a , I_b и I_c в каждом отдельно образованном.

В симметричных многофазных системах (рис. 2а) фазы смещены друг относительно друга на угол α , определяемый как

$$\alpha = q \frac{2\pi}{m}, \quad (1)$$

где $q = 1, 2...n$ — кратность фазового смещения; m — число фаз [9].

Для схем ГЭУ с такими симметрично распределёнными многофазными обмотками ЭМ могут быть использованы как обычные двухуровневые выпрямители и инверторы, так и многоуровневые преобразователи (рис. 3). Структура многоуровневых преобразователей и описывающий их математический аппарат известны и достаточно подробно описаны, например, в [8, 9].

Определяющим при выборе числа фаз преобразователей UZ1 и UZ2 является число фаз, соответствующих конструкциям ЭМ, которые, в общем случае, могут быть не равны друг другу.

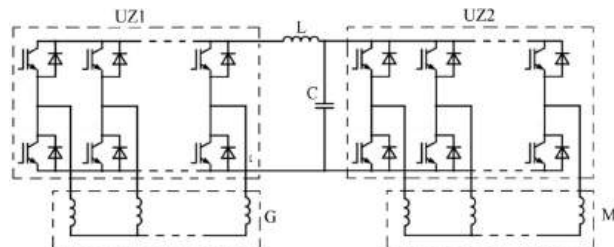


Рис. 3. Силовая схема ГЭУ с двухуровневыми m -фазными преобразователями
Fig. 3. Power circuit of electric propulsion installations with two-level m -phase converters

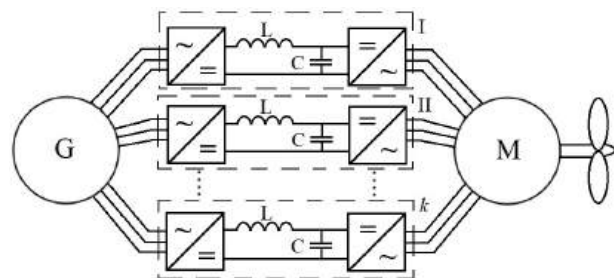


Рис. 4. Силовая схема ГЭУ с ЭМ (G и M), каждая из которых выполнена со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками
Fig. 4. Power circuit of the electric propulsion installations with electric machines (G and M), each of which is made with several three-phase windings offset from each other

На рис. 3: UZ1 — выпрямитель переменного тока; G — m -фазный генератор; UZ2 — инвертор; M — m -фазный ГЭД.

Для ЭМ со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками (рис. 2б) целесообразно использование полупроводниковых преобразователей I, II...k (рис. 4) двухзвенного и других типов, которые, в общем случае, также могут быть многоуровневыми или выполненными на основе каскадной топологии [9].

К преимуществам таких машин, наряду с повышенной надёжностью, относится возможность использования для них типовых серийно выпускаемых трехфазных преобразователей. Энергетические характеристики таких ЭМ соизмеримы с аналогичными характеристиками обычных трёхфазных машин. Следует отметить, что известны машины и с большим числом фаз, чем известных обмоток, смещённых друг относительно друга. Например, в [10] приведено описание 15-фазной ЭМ с тремя пятифазными симметричными обмотками, каждая из которых питается от отдельного пятифазного преобразователя.

Энергетические показатели таких машин выше аналогичных показателей трёхфазных машин.

Для судовых ГЭУ возможен также вариант силовой схемы, выполненной на основе несвязанных многофазных ЭМ, в которой каждая фаза генератора G соединена с соответствующей фазой ГЭД M через отдельный полупроводниковый преобразователь I, II...k [11] (рис. 5).

Представленные на рис. 3, 4 и 5 силовые схемы ГЭУ характеризуются большей отказоустойчивостью по сравнению со схемами, выполненными на основе трёхфазных машин.

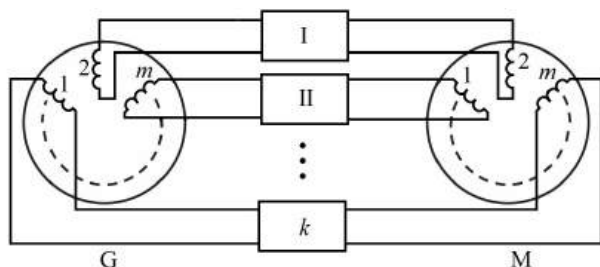


Рис. 5. Силовая схема ГЭУ на основе несвязанных многофазных электрических машин
Fig. 5. Power circuit of the electric propulsion installations based on uncoupled multiphase electric machines

При выборе главных ЭМ и полупроводниковых преобразователей для ГЭУ необходимо учитывать концепцию единого электроснабжения судна. Кроме того, по мере увеличения числа фаз m в симметричных системах (рис. 2а) изменяется не только междуфазовый угол α (табл. 1), но и соотношение между линейными и фазными напряжениями, что необходимо учитывать при разработке мер по безопасности и обслуживанию судовых сетей.

Значения линейных напряжений U_Δ могут быть найдены, например, по теореме косинусов:

$$U_\Delta = \sqrt{U_\phi^2 + U_\phi^2 - 2U_\phi U_\phi \cos \alpha}, \quad (2)$$

где U_ϕ — фазное напряжение.

При $U_\phi = 1$ выражение (2) имеет следующий вид:

$$U_\Delta = \sqrt{1 + 1 - 2 \cos \alpha}. \quad (3)$$

Зависимость соотношения U_Δ / U_ϕ от числа фаз m в симметричных системах представлена на рис. 6.

Многофазные ЭМ в генераторном режиме, так же как и обычные трехфазные машины, позволяют получить два уровня напряжений, но отличающихся друг от друга более чем в $\sqrt{3}$ раз. Причем можно подобрать такие m , при которых эти напряжения будут близки к стандартным значениям.

Например, полагая $U_\Delta = 400$ В, при $m = 19$ получим:

$$U_\phi = \frac{U_\Delta}{m} = \frac{400}{0,329} \approx 1200 \text{ В},$$

$$\text{а при } m = 15: \quad U_\phi = \frac{U_\Delta}{m} = \frac{400}{0,416} \approx 962 \text{ В}.$$

Из рис. 6 видно, что при $m > 5$ линейное напряжение меньше фазного. При этом низкий уровень напряжения получают при соединении фазных обмоток генератора в схему «звезда», а высокий уровень — при их соединении в «многоугольник». Следовательно, многоугольные схемы соединения

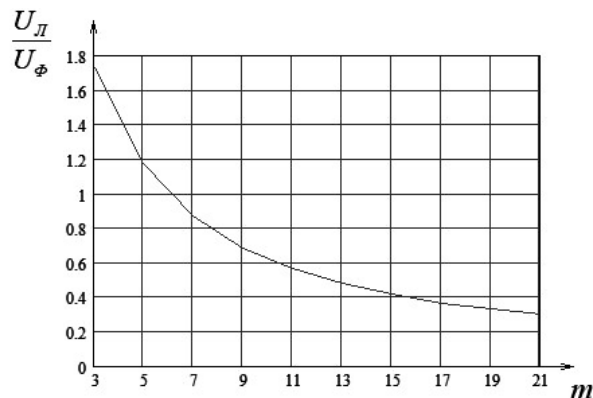


Рис. 6. Зависимость соотношения U_Δ / U_ϕ от числа фаз в симметричных системах

Fig. 6. Dependence of the ratio U_Δ / U_ϕ on the number of phases in symmetrical systems

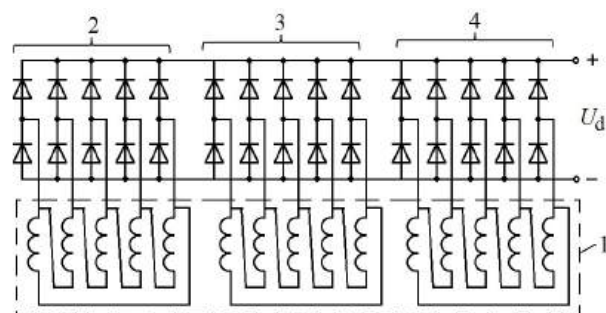


Рис. 7. Вариант схемы соединений 15-фазного генератора (1) с диодными мостовыми выпрямителями (2, 3 и 4)

Fig. 7. Option of the connection circuit of a 15-phase generator (1) with diode bridge rectifiers (2, 3 and 4)

характеризуются меньшими омическими потерями в обмотках статора, чем звездообразные, а также имеют более высокий $\cos \phi$ (коэффициент мощности), что также отмечено в [2].

Кроме того, при работе машины в генераторном режиме на выпрямители переменного тока могут быть получены различные уровни постоянных напряжений путем изменения конфигурации её обмоток. Например, обмотки 15-фазной машины могут быть соединены следующим образом: в первом случае как три пятифазных генератора со сдвигом каждых соседних фаз каждого одного из них $2\pi/5$, и сдвигом каждых соседних фаз соседних генераторов $2\pi/15$ (рис. 7). А во втором случае как пять трёхфазных генераторов со сдвигом каждых соседних фаз каждого одного из них $2\pi/3$, и сдвигом каждых соседних фаз соседних генераторов также $2\pi/15$.

В изображенной на рис. 7 схеме одинаковые выпрямители 2, 3 и 4 соединены между собой параллельно, что позволяет получить больший в 3 раза ток

Таблица 1. Соотношения между числом фаз m и междуфазовым углом α в симметричных системах

Table 1. Relations between the number of phases m and the interphase angle α in symmetrical systems

m	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$\alpha, ^\circ$	120,00	72,00	51,43	40,00	32,73	27,69	24,00	21,18	18,95	17,14

нагрузки. При последовательном соединении этих выпрямителей выходное напряжение будет равно сумме каждого из них $U_d = U_{d1} + U_{d2} + U_{d3}$, что дает возможность подключения к ним высоковольтного инвертора, нагруженного на ГЭД и питающегося от относительно низковольтного генератора. А последний может одновременно использоваться для других (низковольтных) электропотребителей.

Еще больше уровней напряжений в самом генераторе можно получить за счет использования машин с несколькими вставленными друг в друга статорно-роторными парами [12], но не с трехфазными обмотками на сердечниках статора, а с многофазными. Кроме того, такой генератор характеризуется большей удельной мощностью по сравнению с обычным генератором, имеющим один статор и один ротор, за счет полезного использования внутреннего его пространства, а также большей надежностью благодаря наличию нескольких статорных обмоток, каждая из которых размещена на отдельном сердечнике.

Требуемое напряжение получают за счет того, что, во-первых, каждая такая обмотка может быть соединена в m -лучевую «звезду» или в m -угольник. А во-вторых, подключенные к этим обмоткам выпрямители могут быть соединены последовательно или параллельно.

Заключение

Таким образом, применение многофазных ЭМ в судовых гребных электроустановках позволит получить ряд преимуществ энергетического и экономического характера: увеличить КПД генераторов и двигателей, выполненных на их основе, повысить качество судовой электроэнергетики и, соответственно, уменьшить коэффициент гармонических искажений (THD) благодаря тому, что многофазные полупроводниковые преобразователи генерируют существенно меньшие по амплитуде гармоники и, соответственно, меньше искажают форму питающего их напряжения, а также вызывают меньшие дополнительные потери в электрической сети. При этом массогабаритные показатели фильтров высших гармоник или фальтсрокомпенсирующих устройств могут быть значительно уменьшены. Соответственно образом снизятся и их стоимость.

Кроме того, снижение амплитуды высших гармоник приводит к соответствующему снижению их влияния на токи утечки и на скорость износа изоляции кабельных линий, ЭМ и другого электрооборудования, благодаря чему обеспечивается больший срок их службы. Благодаря тому, что расстояния между источниками электроэнергии и мощными электродвигателями относительно малы, то невелики будут и затраты на приобретение кабельных линий с требуемым числом фаз.

Дополнительным преимуществом многофазных ЭМ является возможность их выполнения одновременно на несколько уровней напряжения, благодаря чему из силовой схемы могут быть исключены дорогостоящие трансформаторы.

Предложены новые ЭМ с несколькими вставленными друг в друга статорно-роторными парами и с многофазными обмотками на сердечниках их статоров.

Наиболее целесообразно применение таких машин на электроходах, т.к. последние имеют наибольшую электровооруженность и вышеперечисленные преимущества проявляются наиболее ярко.

Список источников / References

1. Gholamian M., Beik O., Arshad M. A review of State-of-the-art multiphase and hybrid electric machines. *Electronics*. 2024. Vol. 13 (18). DOI: 10.3390/electronics13183636.
2. Jordan S. Multiphase Synchronous Generators for DC Aircraft Power Systems. School of electrical and electronic engineering: thesis. The University of Manchester, 2013. 233 p.
3. Zhang X. Multiphase Synchronous Generators rectifier system for more-electric transport applications: thesis. The University of Manchester. 2019. 271 p.
4. Mohammad M., Fletcher J., Hassanain N. Novel five-phase permanent magnet generator systems for wind turbine applications. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2010. Vol. 1 (8). P. 778–782. DOI:10.24084/repqj08.473.
5. Логачева А. Г., Вафин Ш. И. Магнитные потери в многофазных электродвигателях, их учет и оценка // Тинчуринские чтения: материалы докл. VI Междунар. молодеж. науч. конф. В 4 т. Казань: Изд-во КГЭУ, 2011. Т. 1. С. 118–119.
6. Logacheva A. G., Vafin Sh. I. Magnitnyye poteri v mnogofaznykh elektrodvigatelyakh, ikh uchet i otsenka [Magnetic losses in multiphase electric engines, their calculation and evaluation]. *Tinchurinskiye chteniya*. V 4 t. *Tinchurin Readings*. In 4 vols. Kazan', 2011. Vol. 1. P. 118–119. (In Russ.).
7. Григорьев А. В. Обобщенная модель многофазной электрической машины переменного тока // Введение в энергетику: сб. материалов II Всерос. (с междунар. участием) молодеж. науч.-практ. конф. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2016. 9 с. EDN: YGEFUF.
8. Grigor'yev A. V. Obobshchennaya model' mnogofaznoy elektricheskoy mashiny peremennogo toka [Generalized model of a multiphase alternating current electric machine]. *Vvedeniye v energetiku. Introduction to Energy*. Kemerovo, 2016. 9 p. EDN: YGEFUF. (In Russ.).
9. Бурков А. Ф. Судовые электроприводы. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 372 с. ISBN 978-5-507-49889-5.
10. Burkov A. F. Sudovyye elektroprivody [Marine electric drives]. 5th ed., reprinted. Saint Petersburg, 2024. 372 p. ISBN 978-5-507-49889-5. (In Russ.).
11. Усольцев А. А., Томасов В. С. Многофазные электрические цепи и вращающиеся поля. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. 172 с.
12. Usoltsev A. A. Mnogofaznyye elektricheskiye tsepi i vrashchayushchiyesya polya [Multiphase electric circuits and rotating elds]. Saint Petersburg, 2015. 172 p. (In Russ.).
13. Вертерел Д. А. Многоуровневые и многофазные преобразователи напряжения прецизионных систем электропривода: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2024. 145 с.
14. Vertegel D. A. Mnogourovnevyye i mnogofaznyye preobrazovateli napryazheniya pretzionnykh sistem elektroprivoda [Multilevel and multiphase voltage converters of precision electric drive systems]. Saint Petersburg, 2024. 145 p. (In Russ.).
15. Figueroa J., Cros J., Viarouge P. Generalized Transformations for Polyphase Phase-Modulated Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21 (2). P. 332–341. DOI: 10.1109/TEC.2005.859965.
16. Fioriti M., Vaschetto S., Corpino S., Premoli G. Design of hybrid electric heavy fuel MALE ISR UAV enabling technologies for military operations. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2020. Vol. 92 (5). P. 745–755. DOI: 10.1108/AEAT-05-2019-0109.
17. Пат. 2716489 Российская Федерация, МПК Н 02 К 16/00, Н 02 К 21/12. Электромеханический преобразователь / Михановин В. В. № 2018117769; заявл. 14.05.2018; опубл. 14.11.2019, Бюл. № 32.
18. Patent 2716489 Russian Federation, IPC Н 02 К 16/00, Н 02 К 21/12. Elektromekhanicheskiy preobrazovatel [Electrome-

МИХАНОШИН Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов Морского государственного университета имени адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток.

SPIN-код: 3354-9524

AuthorID (РИНЦ): 564385

ORCID: 0000-0001-6741-0061

AuthorID (SCOPUS): 57216621545

Адрес для переписки: tetrodaksin@mail.ru

БУРКОВ Алексей Федорович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток.

SPIN-код: 1892-8849

AuthorID (РИНЦ): 573588

ORCID: 0000-0002-3927-563X

AuthorID (SCOPUS): 56800300900

Адрес для переписки: burkov.22@mail.ru

ФИЛОЖЕНКО Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов Морского государственного университета имени адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток.

SPIN-код: 7309-8930

AuthorID (РИНЦ): 1073342

ORCID: 0000-0003-1684-3849

AuthorID (SCOPUS): 57192304080

Адрес для переписки: filozhenko_a@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 13.05.2025; принята к публикации 25.06.2025.

MIKHANOSHIN Viktor Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Equipment and Automation of Ships Department, Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok.

SPIN-code: 3354-9524

AuthorID (RSCI): 564385

ORCID: 0000-0001-6741-0061

AuthorID (SCOPUS): 57216621545

Correspondence address: tetrodaksin@mail.ru

BURKOV Aleksey Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the School of Engineering, Far Eastern Federal University, Vladivostok.

SPIN-code: 1892-8849

AuthorID (RSCI): 573588

ORCID: 0000-0002-3927-563X

AuthorID (SCOPUS): 56800300900

Correspondence address: burkov.22@mail.ru

FILOZHENKO Aleksey Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Equipment and Automation of Ships Department, Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok.

SPIN-code: 7309-8930

AuthorID (RSCI): 1073342

ORCID: 0000-0003-1684-3849

AuthorID (SCOPUS): 57192304080

Correspondence address: filozhenko_a@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 17.04.2025; approved after reviewing 13.05.2025; accepted for publication 25.06.2025.