

УДК 629.12

EDN KYELRP

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В СОСТАВЕ СУДОВОЙ ГИБРИДНОЙ ПРОПУЛЬСИВНОЙ УСТАНОВКИ

А.О. РогожниковORCID: 0009-0002-8354-3766 e-mail: aleksei17_90@mail.ruКамчатский государственный технический университет
*Петропавловск-Камчатский, Россия***А.Н. Рак**ORCID: 0000-0003-2809-6529 e-mail: lion15ua@rambler.ruКамчатский государственный технический университет
*Петропавловск-Камчатский, Россия***Е.У. Чье**ORCID: 0000-0003-2055-6789 e-mail: 000487@pnu.edu.ruТихоокеанский государственный университет
Хабаровск, Россия

В статье рассматривается работа синхронной машины с системой векторного управления в составе судовой гибридной пропульсивной установки, состоящей из традиционного дизельного и электрического двигателей. Для обеспечения движения судна на низких частотах вращения, вплоть до достижения дизельным двигателем минимально устойчивой частоты вращения, применяется электрический. При достижении равенства частот вращения дизельного и электрического двигателей осуществляется переход с электрического движения на дизельное с помощью специальной муфты. Для осуществления плавного перехода необходимо обеспечить точное позиционирование гребного вала и коленчатого вала дизельного двигателя, чтобы избежать резких толчков, ударов и возможных повреждений оборудования.

Ключевые слова: векторное управление; гибридная пропульсивная установка; переходный процесс; синхронная машина; судовой электропривод; частотный преобразователь.

Для цитирования: Рогожников А.О., Рак А.Н., Чье Е.У. Исследование работы синхронной машины в составе судовой гибридной пропульсивной установки // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 3. С. 15-28. EDN KYELRP

STUDY OF OPERATION OF SYNCHRONOUS MACHINE IN SHIP HYBRID PROPULSION SYSTEM

A.O. Rogozhnikov

ORCID: 0009-0002-8354-3766 e-mail: aleksei17_90@mail.ru
Kamchatka State Technical University
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

A.N. Rak

ORCID: 0000-0003-2809-6529 e-mail: lion15ua@rambler.ru
Kamchatka State Technical University
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

E. U. Chye

ORCID: 0000-0003-2055-6789 e-mail: 000487@pnu.edu.ru
Pacific National University
Khabarovsk, Russia

Abstract. This article examines the operation of a synchronous machine with a vector control system as part of a marine hybrid propulsion system consisting of a traditional diesel and electric motor. To ensure the vessel's propulsion at low speeds, until the diesel engine reaches its minimum stable speed, an electric motor is used. When the speeds of the diesel and electric motors are equal, a transition from electric to diesel propulsion occurs using a special clutch. To ensure a smooth transition, precise positioning of the propeller shaft and the diesel engine crankshaft is required to avoid sudden jolts, impacts, and possible equipment damage.

Keywords: vector control; hybrid propulsion system; transient process; synchronous machine; marine electric drive; frequency converter.

For citation: A.O. Rogozhnikov, A.N. Rak and E.U. Chye, "Study of operation of synchronous machine in ship hybrid propulsion system", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 15-28, 2026. EDN KYELRP

I. Введение

Эксплуатация современных пропульсивных установок (ПУ) на морских судах требует реализации комплекса организационных и технических мероприятий и учета правовых аспектов, направленных на обеспечение надежности и выполнение экологических требований. На большинстве морских судов применяются двигатели, работающие на углеводородном топливе. Стабильный рост цен на такое топливо предполагает меры по рацио-

нальному использованию таких двигателей. Фирмы-производители судовых двигателей (ДВС) особое внимание уделяют вопросам автоматизации и поиску оптимальных решений при управлении теплоэнергетическими процессами в них.

На современных крупнотоннажных судах в первой четверти XXI в. широкое распространение получили комбинированные ПУ, в состав которых кроме ДВС могут входить и синхронные машины (СМ), с различными способами установки [1]. Важно отметить, что вследствие принципа обратимости электрические машины могут работать в режимах генератора или двигателя. На рис. 1 представлена судовая гибридная дизель-электрическая ПУ, в состав которой входит: главный двигатель *Wärtsilä-Sulzer RT-flex96C* и электрическая машина фирмы *Siemens* [2].



Рис. 1. Судовая гибридная дизель-электрическая пропульсивная установка:

1 – главный двигатель; 2 – валогенератор/двигатель

Fig. 1. Marine hybrid diesel-electric propulsion system:

1 – main engine; 2 – shaft generator/engine

Главный двигатель представляет собой малооборотный двухтактный судовый дизель, с номинальной мощностью 61.774 кВт и частотой вращения 98,5 об/мин. Использование двигателя такого класса характерно для крупнотоннажных судов, где требуется высокая мощность и значительный крутящий момент при малой частоте вращения. Электрическая часть установки представлена генератором *Siemens* серии *1DK* с рабочим напряжением 6,6 кВ, номинальным током 450 А, коэффициентом мощности $\cos\phi = 0,7$ и частотой 60 Гц. Таким образом, в исследуемом объекте взаимодействуют дизельный привод большой мощности и электрическая часть, обеспечивающая преобразование и передачу энергии в различных эксплуатационных режимах.

На рис. 2 показаны границы применения различных видов движения в гибридной установке, где по оси x – мощность ПУ в относительных единицах, по оси y (слева) – объем в относительных единицах, по оси y (справа) – частота вращения в относительных единицах [3].

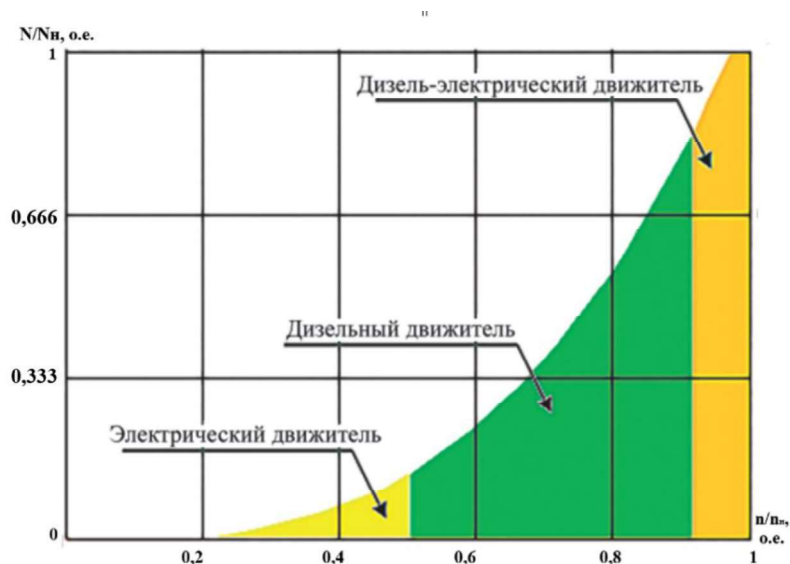


Рис. 2. Границы применения различных видов движения в гибридной установке

Fig. 2. The boundaries of the application of various types of motion in a hybrid installation

Целью работы является исследование режимов работы синхронной машины в составе судовой гибридной пропульсивной установки при электрическом, дизельном и гибридном режимах, а также оценка возможностей системы векторного управления при согласовании частот вращения и переключении на дизельный привод.

Научная новизна работы заключается в том, что, в отличие от известных исследований, в которых векторное управление электрическими машинами рассматривается преимущественно в общем виде либо применительно к автономному электроприводу, в настоящей работе данный подход рассмотрен применительно к судовой гибридной пропульсивной установке с совместной работой малооборотного дизельного двигателя и синхронной машины. Новым являются акценты на переходных режимах согласования частот вращения электрической машины и дизельного двигателя перед включением муфты, а также на оценке динамических перегрузок в момент перехода от электрического хода к дизель-механическому. В работе уточнены особенности применения системы векторного управления в условиях судовой гибридной установки и получены количественные оценки показателей переходного процесса, позволяющие судить об устойчивости системы и возможности плавного переключения режимов движения.

II. Анализ режимов работы гибридных ПУ

Рассмотрим обобщенную электроэнергетическую систему судна, включающую гибридную ПУ (рис. 3).

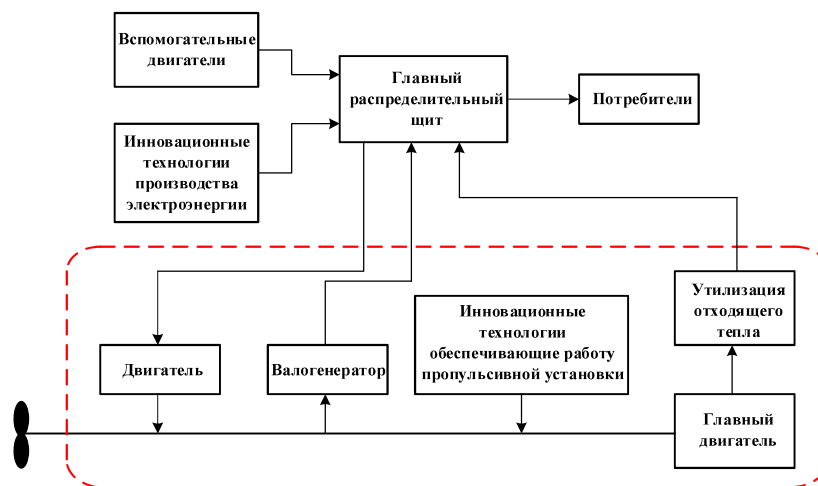


Рис. 3. Обобщенная электроэнергетическая система судна

Fig. 3. Generalized electric power system of the vessel

На рис. 3 показаны основные узлы, уже ставшие традиционными на флоте, например, валогенератор и инновационные, например, турбогенератор. Исследования, приведенные, в частности, в [4] показывают, что такие инновационные системы, как генераторы на основе органического цикла Ренкина и фотовольтаические системы в силу своей ограниченной мощности, не могут обеспечить данный режим. Как показывает практика, они позволяют в ряде случаев сократить стоимость обслуживания в морских портах и, таким образом, обеспечить требуемый уровень энергоэффективности эксплуатации судна. На некоторых судах источники электрической энергии – турбогенератор, валогенератор или они оба – могут отсутствовать. В этом случае мы имеем классическую конвенционную судовую электростанцию.

На рис. 4 представлена диаграмма режимов работы СМ в гибридной пропульсивной установке.

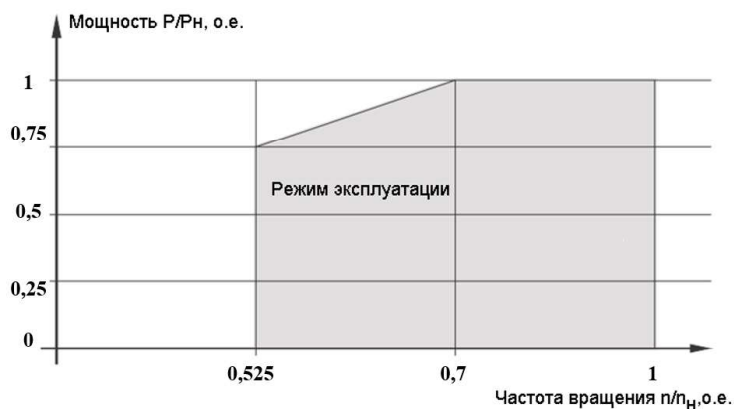


Рис. 4. Диаграмма режимов работы синхронной машины в гибридной пропульсивной установке

Fig. 4. Diagram of the operating modes of a synchronous machine in a hybrid propulsion system

Из рис. 4 следует, что СМ может устойчиво обеспечивать генерацию только при устойчивой частоте вращения ДВС, которая достигается при частоте вращения 52,5 % от номинальной $n_{ном}$.

На большинстве современных крупнотоннажных судов для обеспечения рассмотренных выше режимов применяются частотные преобразователи, с так называемым, активным выпрямителем и инвертором (рис. 5) [5].

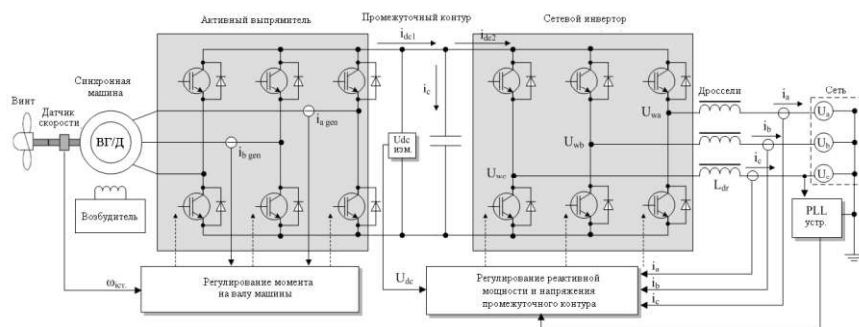


Рис. 5. Силовая часть преобразователя частоты

Fig. 5. The power part of the frequency converter

[illegible]

Fig. 6. Vector diagram of the stator current in stationary α, β and rotating x, y coordinate systems

Второй метод [9] заключается в использовании математической модели СМ и определении направлений векторов тока статора и магнитного потока ротора ψ_r (рис. 7).

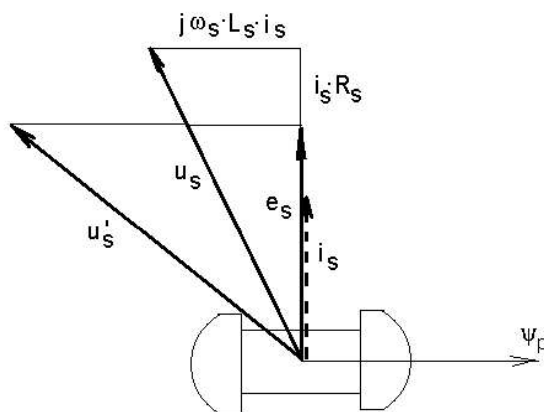


Рис. 7. Направление векторов тока и магнитного потока в математической модели

Fig. 7. The direction of the current and magnetic flux vectors in a mathematical model

Вращающий момент синхронной машины в этом случае можно будет определить с помощью выражения:

$$M_{\text{вт}} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \psi_p \cdot i_{sq}, \quad (1)$$

где i_{sq} – проекции тока статора на поперечную ось; Z_p – число пар полюсов машины; ψ_p – поток возбуждения;

Из (1) следует, что регулировать вращающий момент можно влиянием не на ток, а на его проекцию [10, 11].

Функциональная схема системы с векторным регулированием примет вид (рис. 8).

Работа систем управления с векторным регулированием в соответствии с [6] должна выполняться во вращающейся системе координат и зависит от сигналов рассогласования в соответствующих контурах (рис. 8). При положительном рассогласовании СМ будет работать в двигательном режиме, а при отрицательном – в генераторном. Блок компенсации ЭДС и пропорционально-интегральные регуляторы обеспечивают необходимое быстродействие в контурах. Модулятор, работающий на частоте 8 кГц, задает пространственную ориентацию вектора напряжения [12, 13].

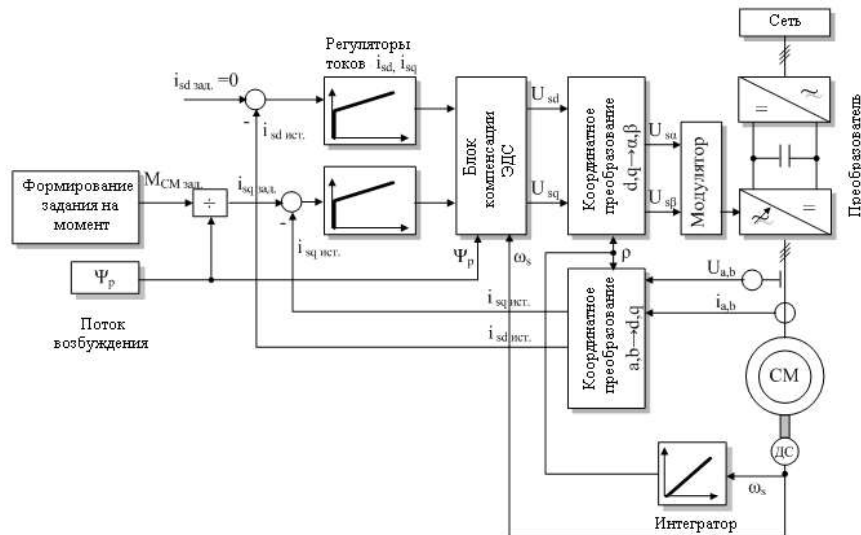


Рис. 8. Функциональная схема системы с векторным регулированием

Fig. 8. Functional diagram of a vector-controlled system

III. Моделирование

В качестве исходных данных приняты параметры судовой гибридной дизель-электрической пропульсивной установки, включающей главный двигатель *Wärtsilä-Sulzer RT-flex96C* и электрическую машину *Siemens* серии *1DK*. Моделирование выполнено для режима разгона синхронной машины, последующего согласования частот вращения электрической и дизельной частей установки и перехода на дизель-механический привод при включении муфты. При построении модели приняты следующие допущения: параметры электрической машины и силового преобразователя в пределах рассматриваемого переходного процесса считаются постоянными; механические потери и внешние возмущения учитываются интегрально в составе нагрузки; система управления реализована в виде классической структуры векторного регулирования с внутренними контурами тока, регулятором скорости, блоком компенсации ЭДС и пространственно-векторной модуляцией. Переходный процесс анализируется в предположении, что переключение на дизельный привод осуществляется после достижения согласованной частоты вращения, а основное внимание уделяется динамике тока статора, электромагнитного момента и скорости вращения.

Полученные с помощью программы Matlab результаты приведены на рис. 9 и 10, соответственно.

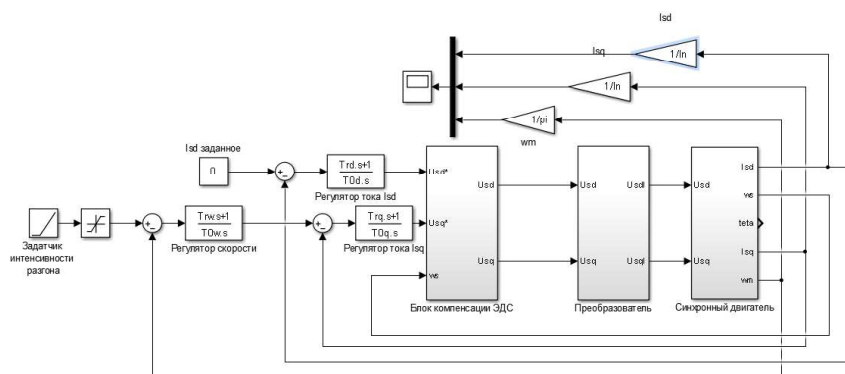
Рис. 9. Модель системы регулирования в программной среде *Matlab*

Fig. 9. A model of the control system in the Matlab software environment

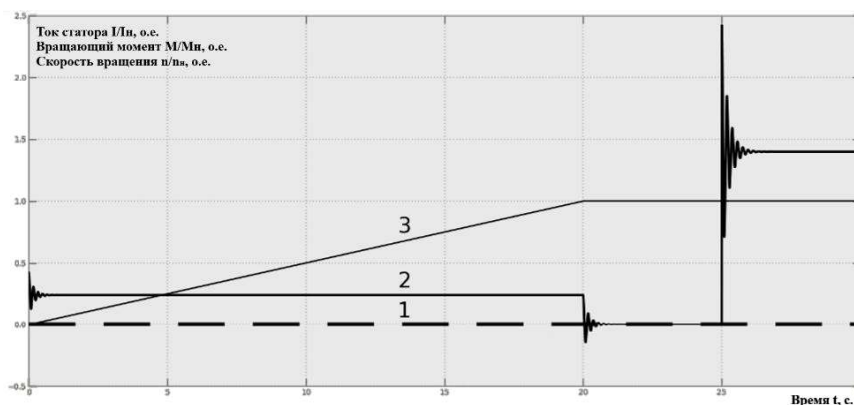


Рис. 10. Зависимости изменения:

1 – тока статора; 2 – вращающего момента; 3 – скорости вращения

Fig. 10. Dependences of change:

1 – stator current; 2 – torque; 3 – rotation speed

Колебания, представленные на рис. 10, соответствуют процессу включения муфты при переходе от электрического к дизель-механическому приводу. Критериями оценки качества переходного процесса в работе приняты длительность выхода на установившийся режим, наличие и величина перерегулирования по току и электромагнитному моменту, амплитуда колебаний скорости вращения, отсутствие срыва синхронизации в момент включения муфты, а также характер динамических нагрузок, возникающих

при переходе от электрического движения к дизель-механическому. Указанные критерии позволяют оценить не только устойчивость системы векторного управления, но и практическую допустимость рассматриваемого способа переключения режимов в составе судовой гибридной пропульсивной установки.

Исходя из графика переходных процессов на рис. 10, разгон синхронной машины завершается примерно за 20 с. Скорость вращения (кривая 3) возрастает практически линейно до уровня около $n/n_{ном} = 1$ и далее удерживается без заметного провала, что указывает на устойчивость системы регулирования. В начальный момент пуска наблюдается кратковременный затухающий переходный процесс длительностью порядка 0,3...0,5 с. После 20 с, при выходе на согласованную частоту вращения перед включением муфты, наблюдается кратковременное отрицательное отклонение регулируемой величины по кривой 2 до уровня порядка $-0,15...-0,20$ о.е. с последующим затуханием менее чем за 0,5 с. Наиболее напряженный режим имеет место при $t \approx 25$ с, когда происходит включение муфты и переход с электрического хода на дизель-механический привод. В этот момент фиксируется максимальный колебательный всплеск до уровня около 2,4...2,45 о.е. с последующим затуханием до установившегося значения порядка 1,4...1,45 о.е. за время около 0,8...1,0 с. Амплитуда колебательной составляющей после включения муфты составляет ориентировочно 1,0 о.е. относительно установившегося уровня. При этом частота вращения остается близкой к 1,0 о.е., поэтому срыва синхронизации в рассматриваемом режиме не наблюдается. Полученный характер переходного процесса свидетельствует о возможности плавного перехода с электрического движения на дизельное.

IV. Заключение

В данной статье выполнено моделирование принципа векторного управления, заключающееся в воздействии влияния не на ток статора, а на его проекцию. Показана обоснованность преимуществ данного технического решения в гибридном ПУ.

Показано, что система векторного управления обеспечивает функционирование электрического, дизельного и дизель-электрического движения судовой гибридной пропульсивной установки с плавными переходами из одного режима в другой.

© Рогожников А.О., 2026

© Рак А.Н., 2026

© Чье Е.У., 2026

Поступила в редакцию 29.05.2026

Принята к публикации 03.07.2026

Received 29.05.2026

Accepted 03.07.2026

Библиографический список

- [1] Рак А.Н., Царенко С.Н. Особенности расчета параметров вспомогательно-аварийного движения на морских судах с комбинированным дизель-электрическим двигателем // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. № 13 (1). С. 115-125. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-115-125
- [2] 'M' class container ship. Operating manual lind newbuilding L. 216. m/s "Mathilde Maersk". Odense Steel Shipyard Ltd, 2008. – 561 p.
- [3] Vessel System Design & Application of Technology for a Responsible and Sustainable Maritime Industrial Sector.
- [4] Труднев С.Ю., Рак А.Н., Марченко А.А. Судовые автоматизированные электро-энергетические системы: судовые источники электрической энергии. Новокузнецк: «Знание-М», 2021. – 236 с.
- [5] Cabinet Modules Application Shaft Generator Drive For energy-efficient and reliable marine solutions // SINAMICS S120. [Электронный ресурс]. URL: <http://siemens.com/sinamics-s120-cabinet-modules> (дата обращения 20.04.2026).
- [6] Hasse K. Zur Dynamik drehzahlgeregelter Antriebe mit stromrichter-gespeisten Asinchron Maschinen: dissertation, TH Darmstadt, 1969.
- [7] Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136 с.
- [8] Козярук А.Е., Кузнецов Н.М., Федоров О.В., Свириденко А.О. Искажение формы питающего напряжения в сетях электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 6. С. 30-35.
- [9] Blaschke F. Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmaschine: dissertation, TU Braunschweig, 1974.
- [10] Okuyama T., Fuimoto N., Matsui T., Kubota Y. A high-performance speed control scheme of induction motor without speed and voltage sensors // 1986 Annual Meeting Industry Applications Society, Sep. 28-Oct. 03, 1986, Denver, CO, USA: IEEE, 1986. P. 106-111.
- [11] Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford: Oxford University Press, 1998. – 729 p.
- [12] Buja G., Indri G. Optimal pulsewidth modulation for feeding AC motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 1977. № IA-13 (1). P. 38-44.
- [13] Gekeler M.W. Raumzeiger-Modulation bei Frequenzumrichern // Antriebstechnik. 1988. № 4. P. 329-331.

References

- [1] A.N. Rak and S.N. Tzarenko, "Features of calculating the parameters of auxiliary-emergency traffic on sea-going ships with combined diesel-electric propulsor", *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, vol. 13, no. 1, pp. 115-125, 2021. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-115-125
- [2] 'M' class container ship. Operating manual lind newbuilding L. 216. m/s "Mathilde Maersk". Odense Steel Shipyard Ltd, 2008.

- [3] Vessel System Design & Application of Technology for a Responsible and Sustainable Maritime Industrial Sector.
- [4] S.Y. Trudnev, A.N. Rak and A.A. Marchenko, *Sudovye avtomatizirovannye elektro-energeticheskie sistemy: Sudovye istochniki elektricheskoy energii [Ship-based automated electric power systems: ship-based sources of electric energy]*. Novokuznetsk: "Znanie-M", 2021 (in Russian).
- [5] Cabinet Modules Application Shaft Generator Drive for energy-efficient and reliable marine solutions. SINAMICS S120. [Online] Available at: <http://siemens.com/sinamics-s120-cabinet-modules> [Accessed: Apr. 20, 2026].
- [6] K. Hasse, "Zur Dynamik drehzahlgeregelter Antriebe mit stromrichter-gespeisten Asynchron Maschinen [On the dynamics of speed-controlled drives with converter-fed asynchronous machines]", dissertation, TH Darmstadt, 1969 (in German).
- [7] V.V. Rudakov, I.M. Stolyarov and V.A. Dartau, *Asinhronnye elektropriivody s vektornym upravleniem [Asynchronous electric drives with vector control]*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningrad Branch, 1987 (in Russian).
- [8] A.E. Kozyaruk, N.M. Kuznecov, O.V. Fedorov and A.O. Sviridenko, "Distortion of the form of feeding voltage in networks of an electrical supply in the presence of semi-conductor converters", *Mining equipment and electromechanics*, no. 6, pp. 30-35, 2011.
- [9] F. Blaschke, "Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmaschine [The method of field orientation for the control of the rotating field machine]", dissertation, TU Braunschweig, 1974 (in German).
- [10] T. Okuyama, N. Fuimoto, T. Matsui and Y. Kubota, "A high-performance speed control scheme of induction motor without speed and voltage sensors", in *proc. 1986 Annual Meeting Industry Applications Society*, Sep. 28-Oct. 03, 1986, Denver, CO, USA, pp. 106-111.
- [11] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [12] G. Buja and G. Indri, "Optimal pulsewidth modulation for feeding AC motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-13, no. 1, pp. 38-44, 1977.
- [13] M.W. Gekeler, "Raumzeiger-Modulation bei Frequenzumrichern", *Antriebstechnik*, no. 4, pp. 329-331, 1988 (in German).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Рогожников Алексей Олегович, старший преподаватель Камчатского государственного технического университета, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация.

Рак Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент Камчатского государственного технического университета, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация.

Чье Ен Ун, доктор технических наук, профессор высшей школы кибернетики и цифровых технологий Тихоокеанского государственного университета, г. Хабаровск, Российская Федерация.

Alexey O. Rogozhnikov, senior lecturer of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.

Alexander N. Rak, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.

Chye En Un, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Higher School of Cybernetics and Digital Technologies at Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation.