

---

---

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

---

УДК [621.311.236+629.5]:371.693.4

EDN FOTLBI

### УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТРЕНАЖЕР ОТРАБОТКИ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ ОПЕРАТОРОВ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СИМУЛЯЦИИ

**А.О. Рогожников**ORCID: 0009-0002-8354-3766 e-mail: [aleksei17\\_90@mail.ru](mailto:aleksei17_90@mail.ru)Камчатский государственный технический университет  
*Петропавловск-Камчатский, Россия***О.А. Белов**ORCID: 0000-0002-7382-9034 e-mail: [boa-1@mail.ru](mailto:boa-1@mail.ru)Камчатский государственный технический университет  
*Петропавловск-Камчатский, Россия*

Судовая электроэнергетическая система играет ключевую роль в работе других судовых систем, устройств и отдельных механизмов. Ее основная задача заключается в обеспечении непрерывной подачи высококачественной электроэнергии для нужд судна. Работа судовой электростанции не только влияет на качество эксплуатации, но и напрямую связана с надежностью и общей безопасностью судна. Рассматривается опытный образец тренажера судовой электростанции, предназначенный для практической подготовки и приобретения навыков контроля и управления судовыми электростанциями. Реализована конструкция элементов тренажера: блока управления и индикации, электрической нагрузки, блока модели дизель-генератора, состоящего из асинхронного двигателя и трехфазного синхронного генератора. Элементы конструкции тренажера произведены по технологии 3D-печати. Определены задачи для совершенствования опытной конструкции и дальнейшей доработки тренажера.

**Ключевые слова:** судовая электроэнергетическая система, судовая электростанция, электрическая энергия, автоматизация, тренажерная подготовка.

**Для цитирования:** Рогожников А.О., Белов О.А. Универсальный тренажер отработки практических навыков операторов судовой электростанции с использованием программной симуляции // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 93-104. EDN FOTLBI

# UNIVERSAL SIMULATOR FOR TRAINING PRACTICAL SKILLS OF MARINE POWER STATION OPERATORS USING SOFTWARE SIMULATION

**A.O. Rogozhnikov**

ORCID: 0009-0002-8354-3766 e-mail: [aleksei17\\_90@mail.ru](mailto:aleksei17_90@mail.ru)

Kamchatka State Technical University  
*Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

**O.A. Belov**

ORCID: 0000-0002-7382-9034 e-mail: [boa-1@mail.ru](mailto:boa-1@mail.ru)

Kamchatka State Technical University  
*Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

**Abstract.** The ship's electric power system plays a key role in the operation of other ship systems, devices and individual mechanisms. The main task of the electric power system is to provide a continuous supply of high-quality electricity for the needs of the vessel. The operation of the ship's power plant affects not only the quality of operation, but is also directly related to the reliability and overall safety of the vessel. A prototype of a ship's power plant simulator is considered, designed for practical training and acquisition of skills in monitoring and managing ship's power plants. The design of the simulator elements has been implemented: a control and indication unit, electrical load, a diesel generator model unit consisting of an asynchronous motor and a three-phase synchronous generator. The design elements of the simulator are manufactured using 3D printing technology. Tasks for improving the prototype design and for further refinement of the simulator have been defined.

**Key words:** ship electric power system, ship power plant, electric energy, automation, short circuit, simulator training.

**For citation:** A.O. Rogozhnikov and O.A. Belov, "Universal simulator for practicing practical skills of ship power plant operators using software simulation", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 93-104, 2025. EDN FOTLBI

## I. Введение

Подготовка операторов судовой электростанции является важной задачей [1-3]. Разработка методов их практической подготовки ведется в различных странах мира [4, 5]. Эффективным решением является интеграция в учебный процесс подготовки электромехаников специальных тренажеров [6-8]. Их использование направлено на освоение аварийных режимов эксплуатации судовой электростанции и формирование у обучаемых понимания физических процессов, происходящих во время ее работы. Задачей дан-

ного исследования является разработка опытного образца тренажера судовой электростанции.

Анализ структуры и функциональности основных прототипов разрабатываемого тренажера показал, что, несмотря на однотипную структурную схему и близкий элементный состав, у рассматриваемых тренажеров имеются существенные отличия. Так тренажер, производимый компанией «ДВК-электро» [9], позволяет моделировать номинальные режимы работы судовой электростанции. Тренажер компании «Галсен» [10] также предназначен для моделирования работы судовой электростанции в номинальных режимах работы. Тренажеры «ДВК-электро» и «Галсен» состоят из дизель-генераторных (ДГ) агрегатов, имитируемых асинхронным электродвигателем, выступающим в качестве дизельного двигателя и синхронного генератора. Управление нагрузкой на тренажерах возможно как в ручном (тумблерами и контакторами), так и в автоматическом режиме с помощью контроллеров управления генераторным агрегатом. Тренажеры в составе имеют главный распределительный щит с панелями синхронизации, приборы индикации, автоматический регулятор, который действует по изменению как генерируемого напряжения, так и по току.

На основании анализа функционала тренажеров выявлен основной недостаток: невозможность отработки режимов, связанных с коротким замыканием цепи нагрузки и перегрузки генератора.

Основная задача, которая решалась при разработке универсального тренажера связана с расширением функциональных возможностей тренажера для подготовки операторов различных видов автономных электростанций. В табл. 1 приведены общие сравнительные характеристики рассматриваемых тренажеров, которые применяются для подготовки операторов автономных электростанций.

**Таблица 1.**  
**Сравнение характеристик тренажеров электростанции**

**Table 1.**  
**Comparison of power plant simulator characteristics**

<b>Критерий сравнения</b>	<b>Тренажер «Галсен»</b>	<b>Тренажер «ДВК электро»</b>	<b>Предлагаемый тренажер</b>
Возможность моделирования аварийных режимов работы электростанции	Частичная возможность до срабатывания защиты	Частичная возможность до срабатывания защиты	Обеспечивается микроконтроллером

Продолжение табл. 1

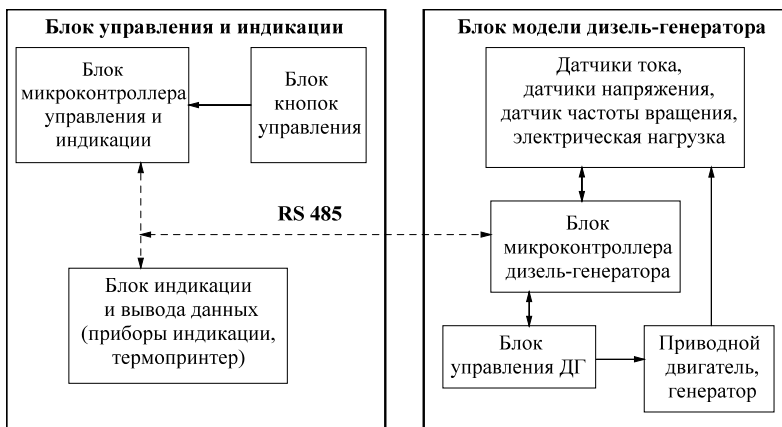
Table 1 (continued)

Возможность фиксации действий обучающегося	Нет устройства вывода отчета	Нет устройства вывода отчета	Обеспечивается микроконтроллером и термопринтером
Возможность симуляции высокооборотистого двигателя	Отсутствует данный модуль	Отсутствует данный модуль	Обеспечивается дополнительным модулем
Возможность изменения параметров симулируемой электростанции	Отсутствует возможность	Отсутствует возможность	Обеспечивается микроконтроллером
Возможность управления приборами индикации микроконтроллером	Отсутствует возможность	Отсутствует возможность	Приборы индикации управляются микроконтроллером
Возможность моделирования неисправности оборудования электростанции	Отсутствует возможность из-за автоматической защиты	Обеспечивается индикаторами (срабатывает сигнал аварии на панели)	Обеспечивается микроконтроллером (изменяются параметры работы оборудования)

Целью разработки данного тренажера является увеличение набора технических средств для специализированных задач. Данная цель подразумевает создание стенда, способного моделировать работу судовой электростанции с расширенными функциональными возможностями.

## II. Опытный образец тренажера судовой электростанции

Структурная схема для моделирования судовой электростанции показана на рис. 1. Она включает приводной асинхронный двигатель (*C.E.SET. CIM 2/55-132/AD4*), частотный преобразователь ПЧВ1-1К5-А, трехфазный синхронный генератор (*Transmotor GE-12-400VAC 0-30V VDC*), соединенный с электрической нагрузкой и регулятором напряжения. В частности, используется микроконтроллер ДГ, который измеряет основные электрические показатели системы с помощью датчиков тока и напряжения. Также микроконтроллер ДГ управляет приводным двигателем и возбуждением генератора на основании данных, поступаемых с микроконтроллера управления и индикации. Приборы индикации управляются микроконтроллером управления и индикации по данным, поступающих с блока управления и датчиков.



**Рис. 1. Структурная схема предлагаемого тренажера**

**Fig. 1. Block diagram of the proposed simulator**

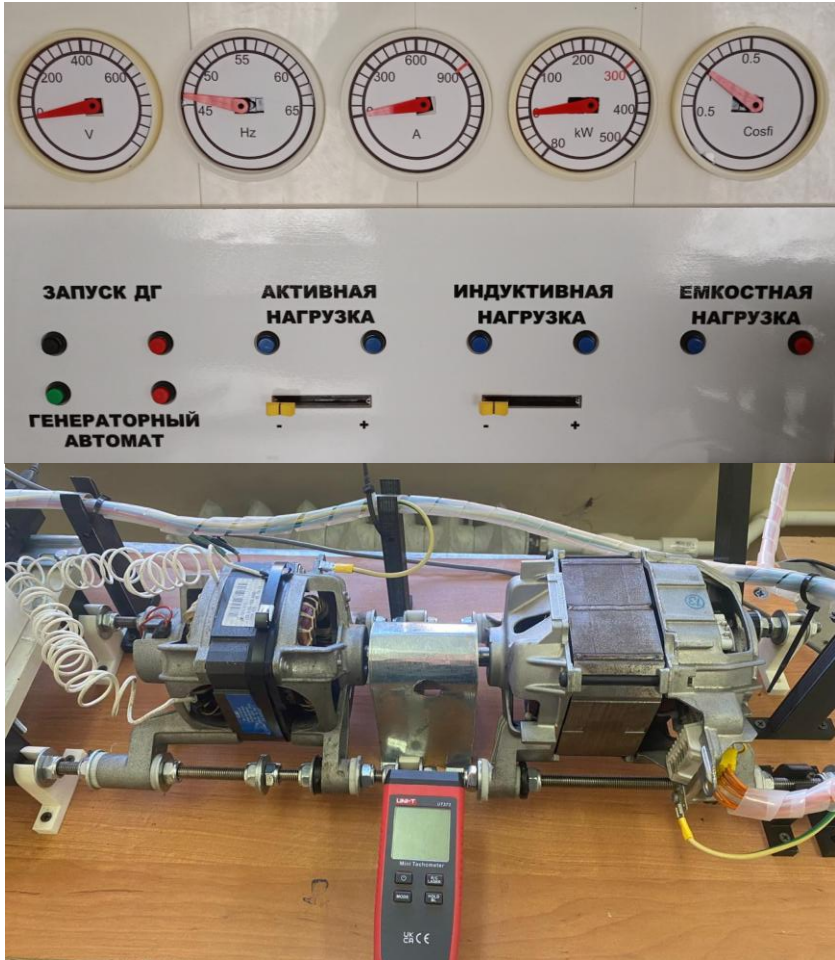
В зависимости от цели проводимой работы выбирается режим работы тренажера: нормальный режим или симуляция аварийных режимов работы.

В нормальном режиме тренажер работает как физическая модель. С блока управления вводятся параметры электростанции соответствующие нормальному режиму работы, а физическая модель ДГ имитирует работу электростанции. Датчики используются для сбора основных параметров работы электростанции и исключают переход в аварийный режим работы электростанции.

Функциональные возможности тренажера расширяются за счет реализации аварийных режимов, таких как короткое замыкание, длительная перегрузка, повышенное напряжение сети, превышение частоты генератора. Переход тренажера в режим симуляции происходит по превышению нормальных параметров электростанции или при выборе инструктором тренажера данной настройки. В режиме симуляции микроконтроллеры позволяют изменять характеристики электростанции (мощность напряжение, частота) и управляют показаниями приборов индикации.

Общий вид предлагаемого тренажера показан на рис. 2. Массогабаритные характеристики предлагаемого тренажера: 1200x1000x300 мм, масса тренажера не более 50 кг.

Далее описано проектирование и изготовление основных блоков тренажера.



**Рис. 2. Общий вид предлагаемого тренажера:**  
*сверху – модуль индикации и управления тренажера; снизу – блок модели ДГ*

**Fig. 2. General view of the proposed simulator:**  
*the upper part – the indication and control unit of the simulator;*  
*the lower part – the diesel generator model*

Корпус модуля индикации и управления тренажера, представленный на рис. 2 сверху, изготовлен по технологии 3D-печати на принтере *Picaso-3D Designer X* из ABS пластика. Область печати принтера *Picaso-3D*

*Designer X* 200x200x210 мм. Печать корпусов блоков управления и индикации осуществлялась из частей с последующим соединением. ABS пластик хорошо поддается растворению в ацетоне с целью сглаживания неровностей при печати и прочно склеивается ацетон содержащими клеями. Корпус модуля индикации и управления состоит из четырех частей, соединенных между собой пазами и паз дополнительно проклеен.

Лицевая часть панели управления изготовлена на станке лазерной резки по чертежам в масштабе 1:1 из PETG пластика с гравировкой надписей указывающих вид электрической нагрузки и обозначения кнопок. На лицевой панели в отверстия, вырезанные на станке лазерной резки, монтируются:

- кнопки запуска/отключения ДГ;
- кнопки включения/отключения генераторного автомата;
- кнопки включения/отключения активной, индуктивной, емкостной нагрузок;
- органы управления величиной нагрузки – ползунковые потенциометры.

Такой способ изготовления позволяет снизить стоимость изготовления за счет автоматизации производства, а также повышает износостойкость готовой детали.

Лицевая часть панели индикации и корпуса приборов индикации также изготовлена на 3D принтере. Замена аналоговых стрелочных приборов цифровыми управляемыми микроконтроллером позволила расширить перечень моделируемых электростанций путем изменения шкал на приборах и настройкой алгоритмов работы модели под различные проекты судов и мощности энергоустановок при необходимости обучения специалистов электромехаников. Кнопки управления изменяют величину тока возбуждения генератора, частоту оборотов приводного двигателя, включают/отключают генераторный автомат. Ползунковые потенциометры изменяют величину электрической нагрузки генератора, синхронизированного с шинами электростанции тренажера. Левый потенциометр регулирует активную нагрузку, правый индуктивную. В нормальном режиме работы подключаются лампы и катушки индуктивности ступенчато с помощью реле нагрузки. В режиме перегрузки по току генератора потенциометр влияет на данные, поступающие в модель, что изменяет показания приборов и поведение ДГ.

Элементы виброгашения электродвигателей, составляющих модель ДГ, были изготовлены методом литья силикона твердостью 20 по Шору в форму, напечатанную на 3D-принтере. 3D модель формы (слева) и готовый образец элементов виброгашения (справа) показаны на рис. 3.

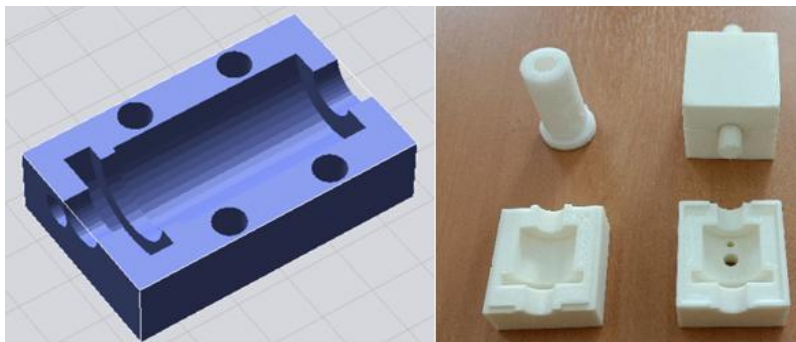


Рис. 3. Элементы виброгашения электродвигателей

Fig. 3. Vibration damping elements of electric motors

Такой метод изготовления деталей повышает скорость изготовления и повторяемость конечного изделия, что положительно влияет на стоимость готового тренажера судовой электростанции.

Готовый блок модели ДГ показан на рис. 2 снизу и состоит из асинхронного приводного двигателя мощностью 600 Вт, напряжением питания 400 В и генератора мощностью 400 Вт, соединенных между собой с помощью гибкой муфты. Двигатель и генератор закреплены к основанию модуля на металлических резьбовых шпильках с опорой на пластиковые детали, изготовленные на 3D принтере.

Для управления блоком индикации выбрана плата микроконтроллера *Arduino Mega pro 2560 rev 3*, поскольку стандартная версия микроконтроллера *Arduino Mega 2560 rev 3* имеет недостатки:

- увеличенные габариты (110x53 мм) по сравнению с про-версией контроллера (54x38 мм);
- контакты выполнены на распаянных штыревых колодках и не отличаются надежностью по сравнению с контактами, подготовленными под пайку на используемой плате микроконтроллера;
- неудобное расположение контактов стандартной версии платы микроконтроллера (в используемой версии платы контакты расположены по краям в два ряда, что более удобно).

При этом плата микроконтроллера *Arduino Mega pro 2560 rev 3* оснащена 54 цифровыми выходами, 16 аналоговыми портами, 4 портами UART, что позволяет производить подключение всех периферийных устройств, используемых в разработанном тренажере. Программа для платы написана на языке C++. Программирование блока управления и индикации проводится в среде *Arduino ide*, которая обеспечивает подключение библиотек и возможность отладки программного кода [11, 12].



Алгоритм работы программы включает следующие основные операции:

- инициализация всех переменных, датчиков и периферии тренажера;
- опрос датчиков и преобразование сигнала аналого-цифровым преобразователем платы;
- проверка данных, поступающих с датчиков на превышение основных параметров электростанции (в случае превышения основных параметров электростанции происходит переход в режим симуляции, либо аварийное отключение электростанции в зависимости от выбора программы инструктором тренажера);
- обработка и адаптация данных с датчиков под сервоприводы стрелочных приборов индикации;
- опрос кнопок панели управления;
- изменение переменных и формирование сигнала для реле нагрузок, сигнала для частотного преобразователя и блока возбуждения генератора.

### III. Заключение

Высокий уровень профессиональной подготовки персонала играет важнейшую роль в качественной эксплуатации и обеспечении надежности систем. Применение современных цифровых технологий в образовательном процессе снижает уровень аварийности на действующих электростанциях [13, 14].

Эффективность разработки достигается за счет того, что предлагаемый стенд для симуляции работы судовой электростанции оснащен микроконтроллером, который позволяет моделировать аварийные режимы работы, например, перегрузки генератора или короткого замыкания. В дальнейшем предполагается доработка модели тренажера за счет внедрения датчиков температуры обмоток и колец генератора, что позволит более полно воспроизвести модель электростанции.

© Рогожников А.О., 2025

© Белов О.А., 2025

*Поступила в редакцию 09.12.2024*

*Принята к публикации 13.01.2025*

*Received 09.12.2024*

*Accepted 13.01.2025*

### Библиографический список

- [1] Белов О.А., Белова Е.П. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Десятая нац. (всерос.) науч.-практ. конф. «Наука, образование, инновации: пути развития», Май 21-23, 2019, Петропавловск-Камчатский, Россия. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. С. 106-108.

- [2] Белов О.А., Толстова Л.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации // Вестник Государственного Морского Университета имени Адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2016. № 3 (16). С. 78-81.
- [3] International convention on standards of training, certification and watchkeeping for seafarers. London: IMO, 2013. – 413 p.
- [4] Mullajonov B.A., Mamirov N.H. Modern technologies in automation systems // Современные Научные Исследования и Инновации. 2020. № 5 (109). [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/05/92668> (дата обращения 15.12.2024).
- [5] Ibrahim D. ARM-based microcontroller multitasking projects: Using the FreeRTOS multitasking kernel. Newnes, 2020. – 524 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03224-4
- [6] Поляков Б.Н. Перспективы применения микропроцессорных систем программного управления приводами энергоемкого оборудования сложных объектов машиностроения и металлургии // Современные Научные Исследования и Инновации. 2020. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/en/issues/2020/11/93946> (дата обращения 15.12.2024).
- [7] Fa-Qun Q., Xue-Dong J., Shi-qing Z. Design of stepping motor control system based on AT89C51 microcontroller // Procedia Engineering. 2011. Vol. 15. P. 2276-2280. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.426
- [8] Guerrero J.M., Jin Z., Liu W., Othman M., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J.C. Shipboard microgrids: Maritime islanded power systems technologies // PCIM ASIA 2016, June 28 – Aug. 30, 2016, Shanghai, China. VDE Verlag GMBH, 2016. P. 135-142.
- [9] Тренажеры электростанций серии DGS // ООО «Компания ДВК-электро». [Электронный ресурс]. URL: <https://dvk-electro.ru/simulators.html> (дата обращения 22.10.2024).
- [10] Тренажер-модель судовой электрической станции (с валогенератором, с двумя вспомогательными и аварийным дизель-генераторами) // ООО «ИПЦ «Учебная техника». [Электронный ресурс]. URL: <https://galsen.ru/catalog/elektrooborudovanie-avtomatika-vodnyh-sudov/trenazher-sudovoi-elektrostantsii2> (дата обращения 22.10.2024).
- [11] Chin R. Arduino and Raspberry Pi sensor projects for the evil genius. McGraw-Hill Education TAB, 2017. – 237 p.
- [12] Cicolani J. Beginning robotics with Raspberry Pi and Arduino. Apress Inc., 2018. – 363 p.
- [13] Титов В.Г., Степанов С.Е., Васенин А.Б. Пути повышения надежности систем электроснабжения с использованием цифровых терминалов релейной защиты и автоматики // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2020. № 5. С. 3-12.
- [14] Дарьенков А.Б., Ходькина И.В., Храмов А.Е., Еретин Д.С. Интегрирование средств дополненной реальности в практикум по дисциплине «Электрические и электронные аппараты» // XXVI Межд. науч.-метод. конф. «Инновационные технологии в образовательной деятельности», Февраль 07, 2024, Нижний Новгород, Россия. Н. Новгород: НГТУ, 2024. С. 37-39.

## References

- [1] O.A. Belov and E.P. Belova, "Engineering education as a factor of engineering and technologies development", in proc. *Tenth Nat. (All-Russian) scient. and pract. Conf. "Nauka, Obrazovanie, Innovacii: Puti Razvitiya [Science, Education, Innovation: Development Paths]*", May 21-23, 2019, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, pp. 106-108 (in Russian).
- [2] O.A. Belov and L.A. Tolstova, "The modeling of the process of students' training for formation of skills of technical maintenance", *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova [Bulletin of the Admiral F.F. Ushakov State Maritime University]*, vol. 3, no. 16, pp. 78-81, 2016 (in Russian).
- [3] *International convention on standards of training, certification and watchkeeping for seafarers*. London: IMO, 2013.
- [4] B.A. Mullajonov and H.H. Mamirov, "Modern technologies in automation systems", *Modern Scientific Researches and Innovations*, vol. 5 (109), May 2020. [Online]. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2020/05/92668>
- [5] D. Ibrahim, *ARM-based microcontroller multitasking projects: Using the FreeRTOS multitasking kernel*. Newnes, 2020. DOI: 10.1016/C2019-0-03224-4
- [6] B.N. Poliakov, "Prospects for the use of microprocessor-based software control systems for drives of energy-intensive equipment of complex objects of mechanical engineering and metallurgy", *Modern Scientific Researches and Innovations*, vol. 11, Nov. 2020. [Online]. Available at: <https://web.snauka.ru/en/issues/2020/11/93946>
- [7] Q. Fa-Qun, J. Xue-Dong and Z. Shi-qing, "Design of stepping motor control system based on AT89C51 microcontroller", *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 2276-2280, 2011. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.426
- [8] J.M. Guerrero, Z. Jin, W. Liu, M. Othman, M. Savaghebi, A. Anvari-Moghaddam, L. Meng and J.C. Vasquez, "Shipboard microgrids: Maritime islanded power systems technologies", in proc. *PCIM ASIA 2016*, June 28 – Aug. 30, 2016, Shanghai, China, pp. 135-142.
- [9] Trenazhery elektrostancij serii DGS [Simulators of power plants of the DGS series]. [Online]. Available at: <https://dvk-electro.ru/simulators.html> [Accessed: Oct. 22, 2024] (in Russian).
- [10] Trenazher-model' sudovoj elektricheskoy stancii (s valogeneratorom, s dvumya vspomogatel'nymi i avarijnym dizel'-generatorami) [Simulator-model of a ship's electrical power station (with a shaft generator, with two auxiliary and emergency diesel generators)]. [Online]. Available at: <https://galsen.ru/catalog/elektrooborudovanie-avtomatika-vodnyh-sudov/trenazher-sudovoi-elektrostancii2> [Accessed: Oct. 22, 2024] (in Russian).
- [11] R. Chin, *Arduino and Raspberry Pi sensor projects for the evil genius*. McGraw-Hill Education TAB, 2017.
- [12] J. Cicolani, *Beginning robotics with Raspberry Pi and Arduino*. Apress Inc., 2018.
- [13] V.G. Titov, S.E. Stepanov and A.B. Vasenin, "Ways to improve the reliability of power supply systems using digital terminals relay protection and automation", *Elektrooborudovanie: Eksploatatsiya i Remont [Electrical equipment: Operation and Repair]*, no 5, pp. 3-12, 2020 (in Russian).
- [14] A.B. Dar'enkov, I.V. Khodykina, A.E. Khramov and D.S. Eretin, "Integrirovaniye sredstv dopolnenoj real'nosti v praktikum po discipline "Elektricheskie i elektronnyye"

apparaty” [Integration of augmented reality tools into the practical training on the discipline “Electrical and electronic devices”], in proc. *XXVI Int. scientific-method. Conf. “Innovacionnye tekhnologii v obrazovatel’noj deyatel’nosti [Innovative technologies in educational activities]”*, Feb. 07, 2024, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 37-39 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

**Белов Олег Александрович, Oleg A. Belov**, head of department of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.