

УДК 378.147.026.7:621.3:004

DOI: 10.37890/jwt.vi82.580

## **Виртуальный тренажерный комплекс главной энергетической установки судна с винто-рулевой колонкой**

**С. В. Попов**

*ORCID: 0009-0004-5274-2783*

**Ю. С. Малышев**

*ORCID: 0000-0001-9008-1198*

**О. А. Бурмакин**

*ORCID: 0009-0003-4405-7674*

*Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** Рассмотрены современные технологии обучения в условиях ограниченной возможности применения оборудования, имеющего значительные массогабаритные, энергетические и стоимостные показатели. Подтверждена целесообразность применения в образовательном процессе тренажера на основе VR/AR-технологий и имитационного моделирования. Разработан виртуальный тренажерный комплекс судовой энергетической установки на базе морского пассажирского судна, имеющего два винто-рулевых комплекса. Разработаны структура и состав системы генерирования и распределения электроэнергии по судовым потребителям. Спроектирован внешний вид судна, машинного отделения, главных дизель-генераторов и другого технологического оборудования. Реализованы алгоритмы введения в действие систем, обеспечивающих работу дизель-генераторов, а также алгоритм запуска и остановки первичного двигателя. Обеспечено интерактивное воздействие на органы управления судовым оборудованием. Визуализированы работа устройств и вращение валов дизель-генераторного агрегата. Смоделирована поэлементная конструкция высоковольтного синхронного генератора и реализована возможность тестирования обучающихся. Описаны основные направления развития, предложенного виртуального тренажерного комплекса. Показана целесообразность использования тренажерного комплекса в учебном процессе для подготовки квалифицированных кадров.

**Ключевые слова:** тренажерный комплекс, судовая электроэнергетическая система, VR/AR-технология, виртуальный тренажер, имитационная модель, дизель-генераторный агрегат.

## **Virtual training complex of the ship's main power plant with a helical steering column**

**Sergey V. Popov**

*ORCID: 0009-0004-5274-2783*

**Yurii S. Malyshev**

*ORCID: 0000-0001-9008-1198*

**Oleg A. Burmakin**

*ORCID: 0009-0003-4405-7674*

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article considers modern training technologies in conditions of limited possibility of using equipment with significant weight, size, energy and cost indicators. The expediency of using a simulator based on VR/AR technologies and simulation modeling in the educational process is confirmed. A virtual training complex for a marine power plant has been developed based on a marine passenger vessel with two propeller-steering systems. The

structure and composition of the power generation and distribution system for ship consumers have been developed. The exterior of the vessel, engine room, main diesel generators and other technological equipment were designed. Algorithms for putting into operation the systems that ensure the operation of diesel generators and the algorithm for starting and stopping the prime mover have been implemented. Interactive impact on the controls of ship equipment has been provided. The operation of the devices and the rotation of the shafts of the diesel generator unit are visualized. The element-by-element design of a high-voltage synchronous generator has been modeled and the possibility of testing students has been implemented. The main directions of development of the proposed virtual simulator complex are described. The expediency of using the training complex in the educational process for training qualified personnel is shown.

**Keywords:** training complex, ship electric power system, VR/AR technology, virtual simulator, simulation model, diesel generator unit.

### Введение

Современные технологии, такие как компьютерное моделирование, среда виртуальной и дополненной реальности все чаще занимают место в процессах обучения и подготовки квалифицированных кадров, курсах повышения квалификации и др., при невозможности обеспечения учебных лабораторий промышленным оборудованием, имеющим существенные массогабаритные и стоимостные показатели [1-4]. Известно, что восприятие информации, имеющей детальной визуализации, происходит с более высокой эффективностью. Возможности тренажерных комплексов оказывают влияние на качество подготовки, при анализе сложившихся нештатных ситуаций, аварийных режимов работы оборудования, влияющих на живучесть судна и безопасность командного состава.

### Методы

Разработанный тренажерный комплекс главной энергетической установки судна использует технологию виртуальной реальности, поэтому позволяет создать графические модели помещений судна, установленного в них оборудования, а также устройств, которые могут находиться и вне корпуса судна, например, винто-рулевые колонки (ВРК). За основу разрабатываемой 3D модели было выбрано пассажирское судно водоизмещением 30 тыс.т с двумя ВРК в кормовой части судна и двумя тоннелями подруливающего устройства в носовой. На указанном судне главная энергетическая система используется для вращения дизель генераторов питающих гребную электрическую установку, что может рассматриваться как единая электроэнергетическая система.

План судна, смоделированного в тренажере, с примерным расположением технических помещений, относящихся к электроэнергетической системе, показан на рис. 1.

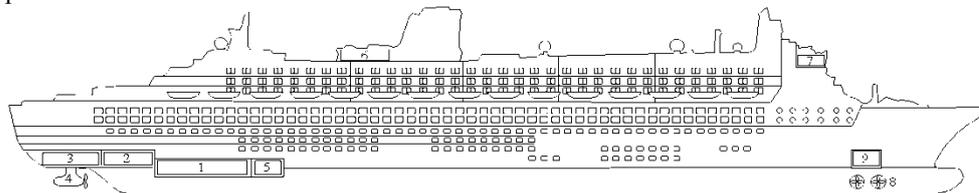


Рис. 1. Внешний вид судна с техническими помещениями

1 – машинное отделение (МО), 2 – отделение главного распределительного щита (ГРЩ) и щитов электродвижения (ЩЭД), 3 – румпельное отделение (РО), 4 – винто-рулевая колонка (ВРК); 5 – помещение центрального поста управления (ЦПУ), 6 – отделение аварийной электростанции, 7 – рулевая рубка (РР) (пульт управления судоводителя (СПУ)), 8 – подруливающее устройство (ПУ), 9 – отделение щитов управления ПУ.

Однолинейная схема единой судовой электроэнергетической системы (ЕСЭС), выполняющей генерирование и распределение электроэнергии между судовыми потребителями, показана на рис. 2. Электростанция состоит из четырех дизель-генераторных (ДГ) агрегатов мощностью 3,5 МВт. Каждый генератор G1-G4 подключен к шинам главного распределительного щита (ГРЩ) через автоматические выключатели Q1-Q4, установленные в отдельных секциях. При этом генераторы G1 и G2 подключены через выключатели Q1 и Q2 к группе сборных шин I, а генераторы G3 и G4 через выключатели Q3 и Q4 к группе сборных шин II. Секционный выключатель Q5, установленный в секции №3, выполняет функцию объединения сборных шин обеих групп. Автоматический выключатель Q5 может быть включен для повышения запаса мощности на объединенных шинах ГРЩ при параллельной работе генераторов, работающих на шины группы I и группы II. При работе электростанции в раздельном режиме, когда Q5 разомкнут, потребители получают электроэнергию только от тех источников, которые работают на питающие шины своей группы. В таком режиме генераторы могут работать попарно параллельно – G1 с G2 и G3 с G4. Следует отметить, что включение Q5 без синхронизации возможно только при отсутствии напряжения на одной из групп сборных шин. В противном случае, для включения Q5 необходимо выполнять процедуру синхронизации [5,6].

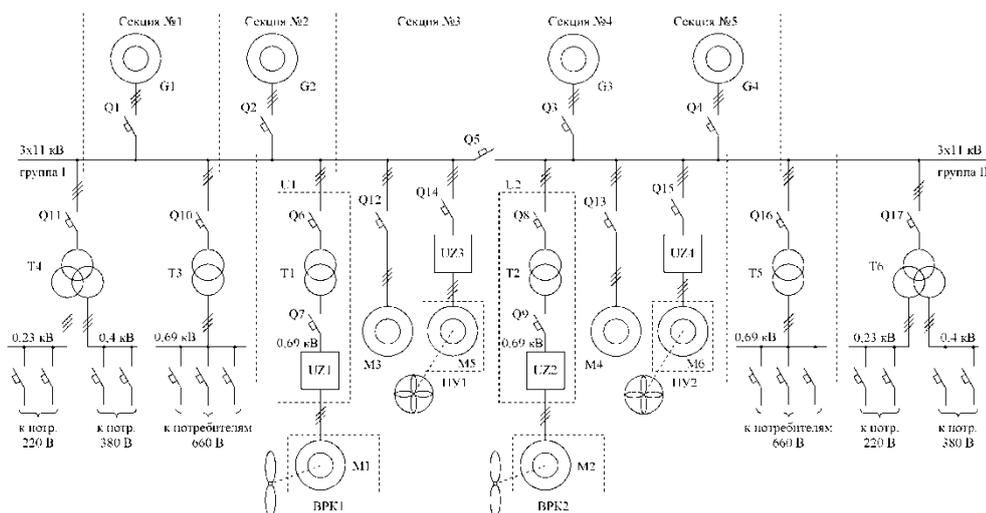


Рис. 2. Однолинейная схема единой судовой электроэнергетической системы

Электродвигатели M1 и M2 ВРК получают питание от преобразователей UZ1 и UZ2, которые подключены через защитные автоматические выключатели Q6 и Q8 к шинам ГРЩ группы I и группы II, соответственно. Для согласования напряжений питания с напряжением питания электродвигателей в преобразователях установлены понижающие трансформаторы T1 и T2 - 11 кВ / 0,69 кВ. Для защиты вторичных обмоток T1 и T2 от коротких замыканий установлены автоматические выключатели Q7 и Q9. Преобразователи частоты UZ1 и UZ2 обеспечивают регулирование величины и частоты напряжения [7-9] в диапазоне 0÷0,69 кВ при 0÷60 Гц. Задание на изменение выходных параметров напряжения преобразователей UZ1 и UZ2 поступает от пульта управления для регулирования скорости вращения винтов ВРК.

Подключение электродвигателей M3 и M4 компрессоров к шинам ГРЩ выполняется автоматическими выключателями Q12 и Q13.

Управление скоростью вращения винтов ПУ выполняется регулированием параметров напряжения питания электродвигателей M5 и M6, за счет

преобразователей частоты UZ3 и UZ4, подключенных к шинам ГРЩ через автоматические выключатели Q14 и Q15. Сигналы управления преобразователями UZ3 и UZ4 поступают от пульта судовождения, либо пульта механика.

Питание потребителей напряжением 230 и 400 В осуществляется через установленные в распределительных секциях ГРЩ понижающие трансформаторы Т3-Т6, имеющие по две вторичные обмотки с напряжением 230 и 400 В соответственно. Каждый трансформатор имеет защитный автоматический выключатель, установленный в первичной обмотке. Вторичные обмотки Т3-Т6 подключаются к собственной группе шин, имеющие определенный набор потребителей. Каждый отходящий фидер имеет свой защитный автоматический выключатель.

### Результаты

Машинное отделение имеет два помещения, расположенные по левому и правому бортам. На рис. 3 показано помещение МО левого борта, где расположены два дизель-генератора мощностью 3,5 МВт каждый и дополнительное оборудование для обеспечения работы ДГ: компрессор, баллоны высокого давления, насосы и др. Управление запуском и остановкой ДГ выполняется от местного пульта управления (МПУ) или дистанционно с пульта судоводителя (ДПУ).

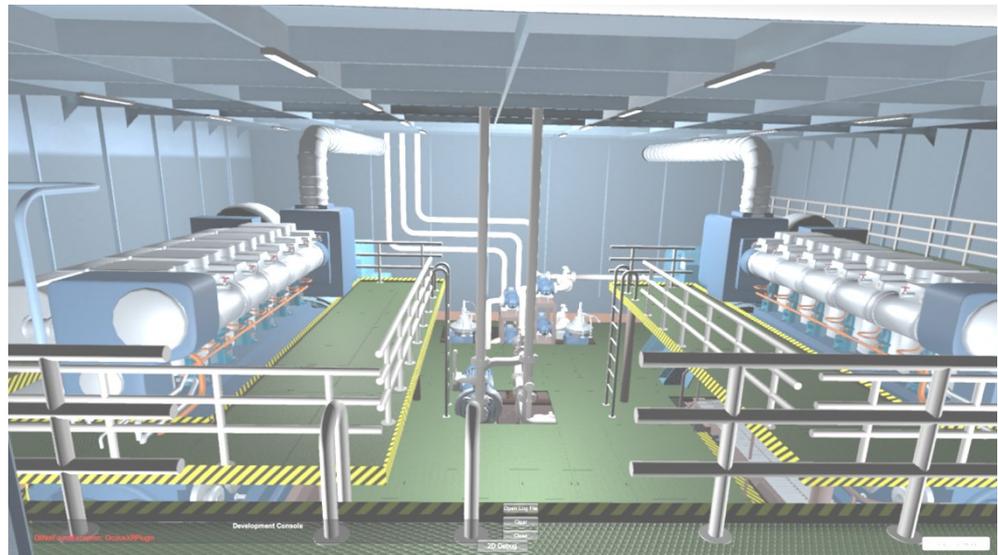


Рис. 3. Внешний вид машинного отделения

В настоящий момент реализована возможность запуска дизеля по штатному алгоритму, регулирование его скорости вращения и остановка при достижении контролируемых параметров предельно-допустимых значений. На рис. 4 показана блок-схема алгоритма запуска и остановки дизеля.

Для штатной работы дизеля необходима работа вспомогательных систем для обеспечения охлаждения двигателя, смазки элементов двигателя и подачи топлива [6, 10-12]. Пуск дизеля выполняется за счет подачи в цилиндры воздуха высокого давления, который закачивается компрессором в баллоны. Для поддержания необходимого давления включается система автоматического контроля величины давления, которая управляет электроприводом компрессора. Алгоритмы работы систем отражены в виде блок-схем на рисунках 5 и 7.

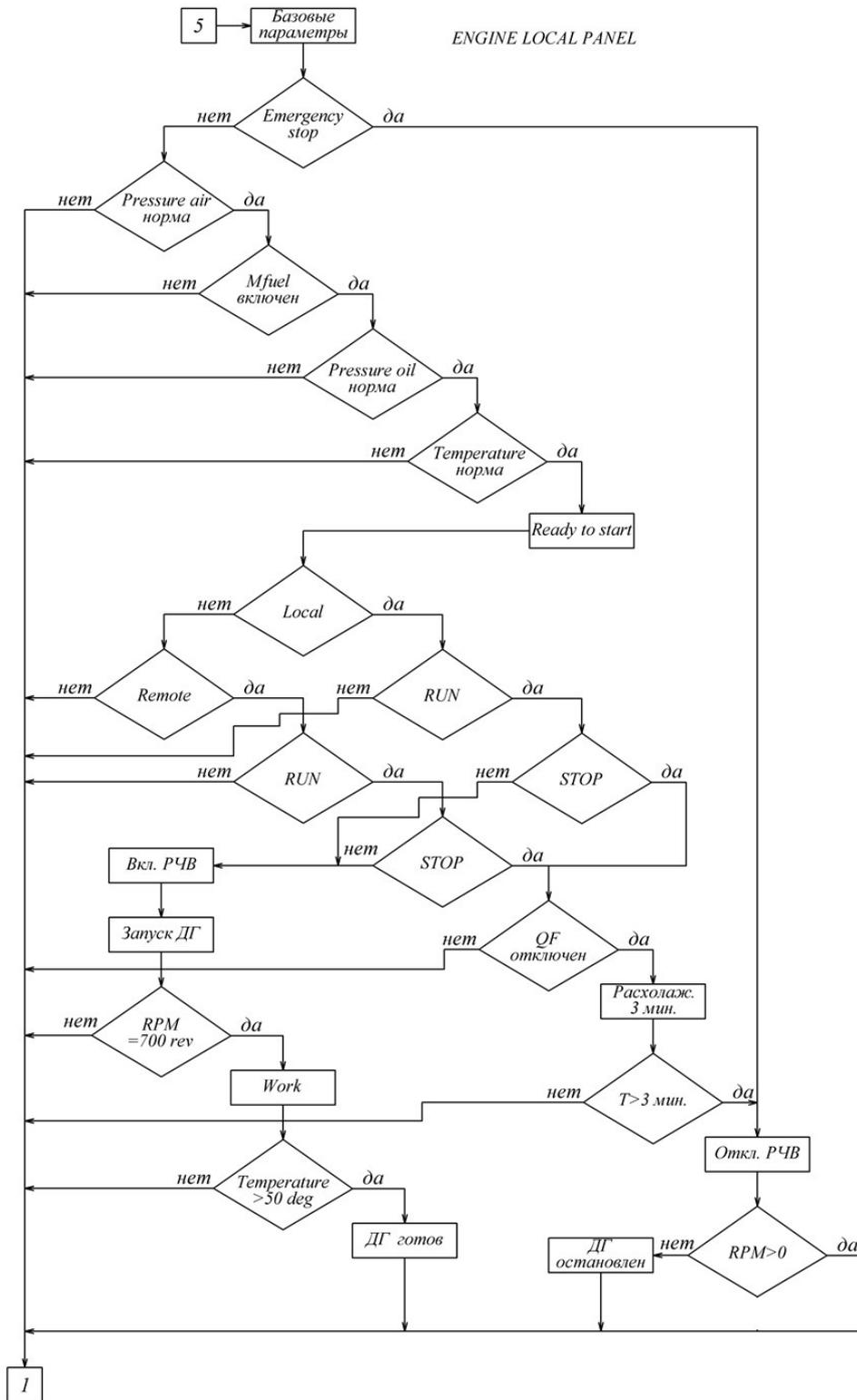


Рис. 4. Блок-схема алгоритма запуска и остановки двигателя

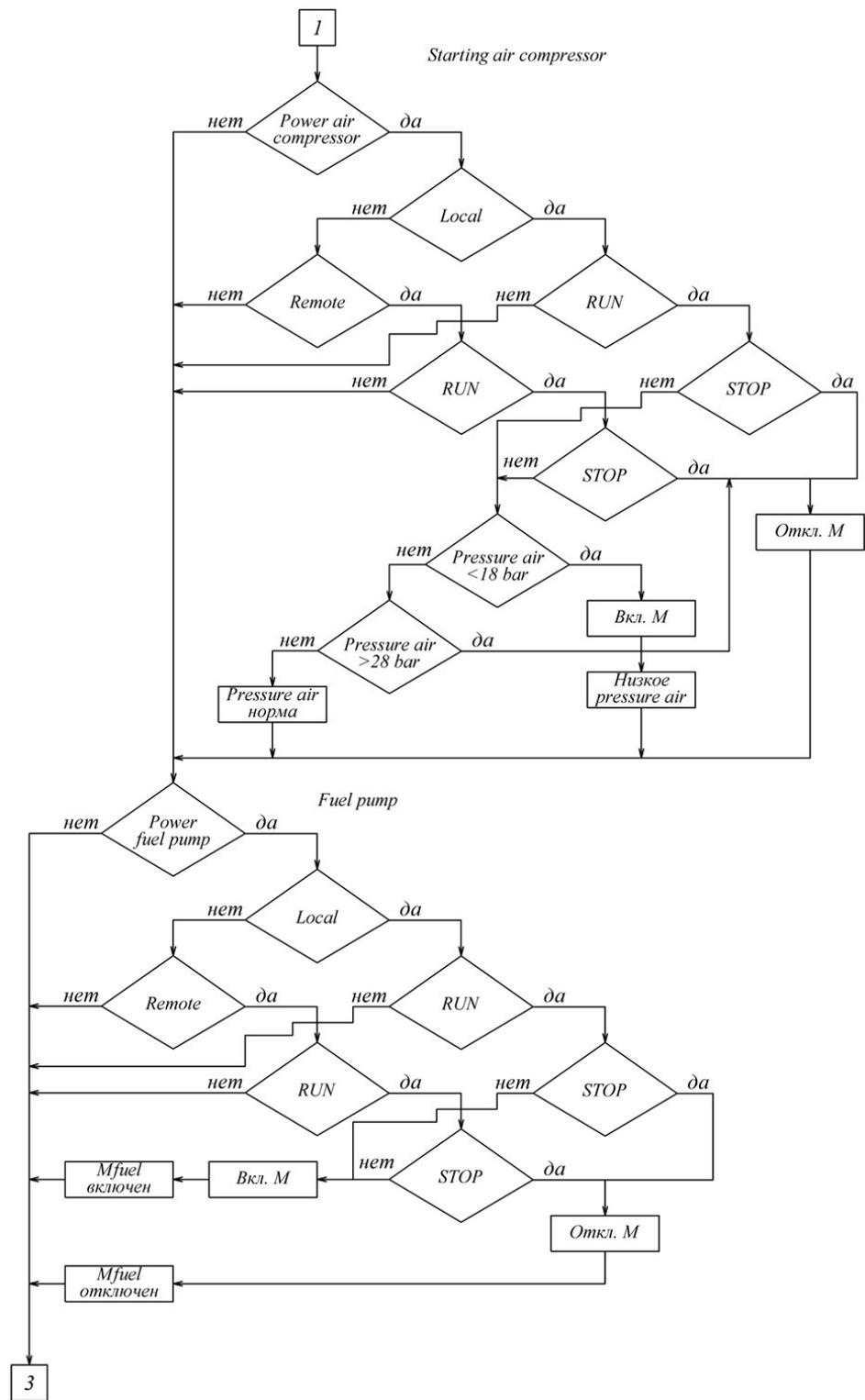


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы систем подготовки воздуха высокого давления и подачи топлива

На рис. 6, а показан внешний вид панели пульта управления компрессором. Выбор пульта управления выполняется переключателем, имеющим положения «LOCAL» - местное управления и «REMOTE» - дистанционное управление.

Для пуска электродвигателя компрессора с местного пульта необходимо подать силовое питание поворотом выключателя «POWER» при этом включается лампа «SUPPLY» и нажатием на кнопку «RUN». После успешного запуска компрессора засвечивается лампа «RUN». Стрелка амперметра будет показывать значение потребляемого электродвигателем электрического тока. В случае необходимости отключения компрессора нужно нажать на кнопку «STOP». Основной режим работы компрессора – автоматический, когда при достижении установленного уровня давления электродвигатель компрессора отключается. В автоматическом режиме выполняется поддержание давления в пределах 18-28 bar.

Следует отметить, что панели управления другими приводами имеют схожий внешний вид и набор органов управления и индикации.

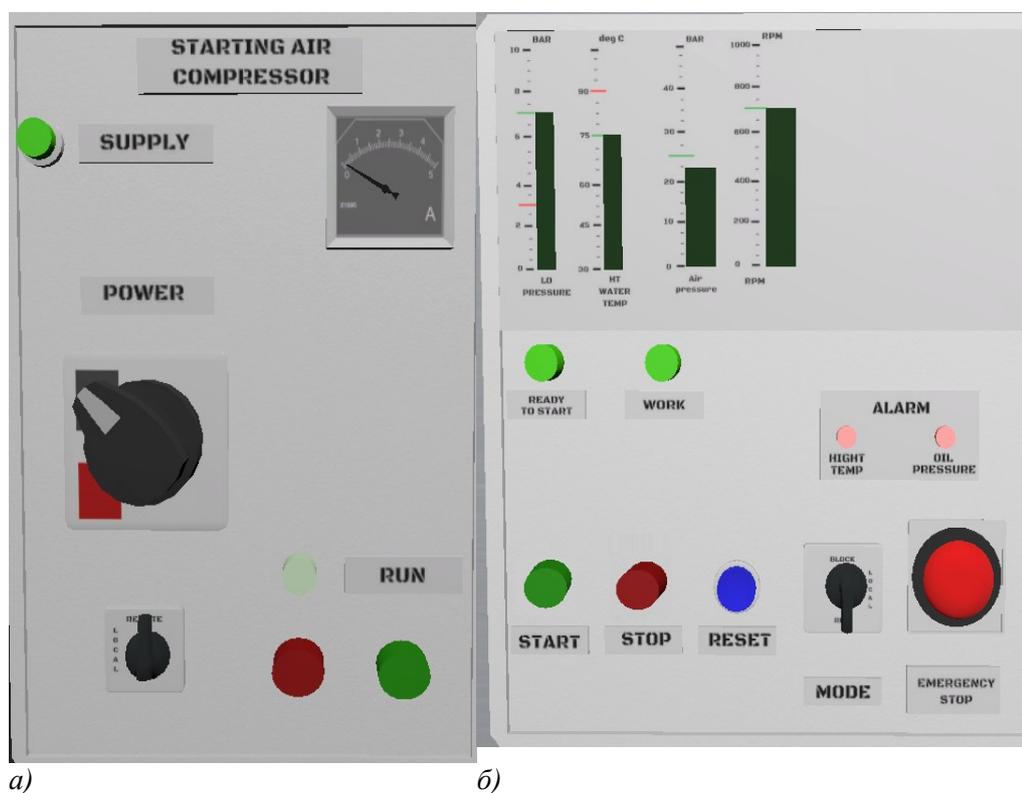


Рис. 6. Местный пульт управления: а) компрессором, б) двигателем

На лицевой панели пульта управления двигателем (см. рис. 6, б) установлен переключатель выбора поста управления «MODE», имеющий три положения: «LOCAL» - местное, «BLOCK» - заблокировано, «REM» - дистанционный. Также на панели расположены: лампа готовности двигателя к пуску «READY TO START», лампа состояния дизеля «WORK», лампы аварийного предупреждения повышенной температуры охлаждающей жидкости «HIGHT TEMP» и низкого давления масла «OIL PRESSURE», кнопка аварийного останова «EMERGENCY STOP». Также на панели установлены индикаторы контролируемых параметров с отображением рабочих и предельных величин.

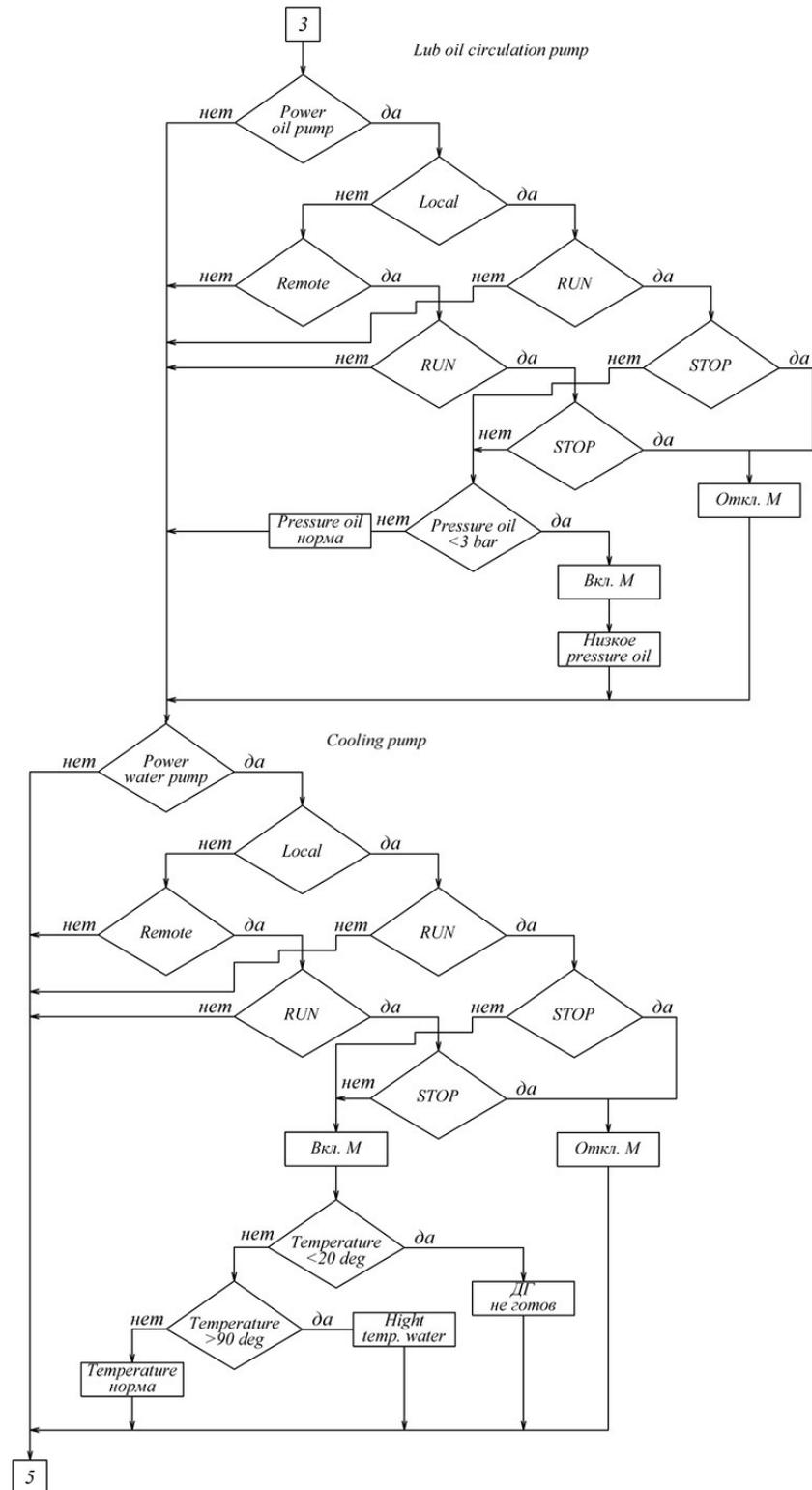


Рис. 7. Блок-схема алгоритмов работы систем подачи масла и воды охлаждения двигателя

В случае выполнения всех необходимых условий для пуска двигателя загорается лампа «READY TO START», что разрешает нажатие на кнопку «START». В ходе пуска на индикаторе «BAR» отображается снижение значения давления воздуха, а по мере разгона на индикаторе «PRM» – скорость вращения. При достижении двигателем установленных оборотов холостого хода засвечивается лампа «WORK», что говорит о готовности ДГ установки к приему нагрузки. Кнопка «RESET» предназначена для квитирования сигнала аварии, вызванного чрезмерным снижением давления или повышением температуры, после устранения ошибки.

Для штатной остановки двигателя необходимо нажать кнопку «STOP», при этом запустится процесс расхолаживания дизель-генератора. Когда двигатель остановится на панели управления погаснет лампа «RUN». После этого отключаются электроприводы вспомогательных систем нажатием на кнопки «STOP» и отключением питания выключателем «POWER» в положение «0».

Для изучения устройства высоковольтного генератора в тренажерном комплексе предусмотрена 3D модель его конструкции. В модель встроено два режима: режим обучения (см. Рис. 8, а) и тестирующий режим (см. Рис. 8, б) с участием преподавателя.

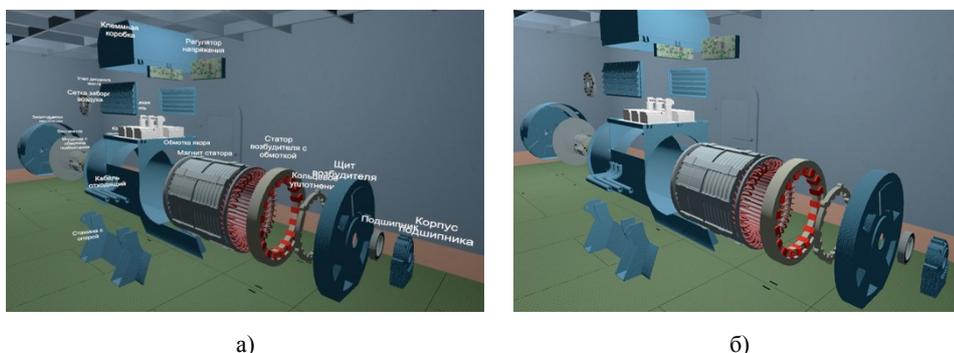


Рис. 8. Сцена виртуальной модели. Внешний вид элементов разобранного высоковольтного синхронного генератора: а) режим обучения, б) режим теста

### Обсуждение

Исходя из возможностей тренажера, он может быть использован для:

- ознакомления с устройством судна, основными техническими помещениями, оборудованием машинного отделения и формирования навыков ориентирования по судну;
- изучения состава электрооборудования, входящего в ЕСЭС;
- изучения конструкции силовых электрических машин и назначения оборудования технических помещений судна;
- ознакомления с вспомогательными системами дизель-генераторной установки и их принципом действия;
- изучения и усвоения алгоритма управления пуском/остановом судового дизельного двигателя.

### Заключение

Предложенный виртуальный тренажерный комплекс судовой единой электроэнергетической системы внедрен в учебный процесс для студентов очной и заочной форм обучения с целью изучения различных режимов работы силовых агрегатов и системы управления морского судна.

**Список литературы**

1. Молочков В.Я., Компьютерный тренажер судовой электростанции / Молочков В.Я., Молочкова И.Д. // Научные труды дальрыбвтуза. Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет. – 2009. – № 21. – С: 223-227.
2. Хватов, О.С. Управление работой виртуальной судовой электроэнергетической системы морского теплохода; метод. указания для студ.очн. обучения спец.180404; Бурмакин, О.А., Гусакова, Т.Н., Малышев, Ю.С., Хватов, О.С. - Н.Новгород, Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2010. – 105 с.
3. Григорьев А. В. Разработка научно-образовательного лабораторно-тренажерного комплекса судовых систем электродвижения и гребных электрических установок нового поколения / Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р., Малышев С. М. Вестник ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 4 (38) – С. 203-210. DOI: 10.21821 /2309-5180-2016-8-4-203-210.
4. Гребные электрические установки в составе электроэнергетической системы судна. Учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ в среде виртуальной и дополненной реальности по курсу «Гребные электрические установки»/ сост. – С.В. Попов, Ю.С. Малышев, О.С. Хватов – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2022. – 39 с.
5. Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа Azipod в нормальных и аварийных режимах работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Л. Е. Егоров. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 183 с.
6. Сугаков, В.Г.; Системы автоматического регулирования параметров электрической энергии судовых электростанций; учеб.пособие; Сугаков, В.Г. Хватов, О.С. - Н.Новгород, <http://94.100.87.24:8080/marcweb/>.
7. Wei T. Experimental Evaluation of IGCT Converters with reduced di/dt limiting inductance / T. Wei, Q. Song, J. Li, B. Zhao, Z. Chen, R. Zeng // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). — IEEE, 2018. — Pp. 1710-1716. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341248.
8. Nagel A. Characterization of IGCTs for series connected operation / A. Nagel, S. Bernet, T. Bruckner, P. K. Steimer, O. Apeldoorn // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. — IEEE, 2000. — Vol. 3. — Pp. 1923-1929. DOI: 10.1109/IAS.2000.882141.
9. Линдер С. Силовые полупроводниковые приборы. В центре тихой революции / С. Линдер. — ABB Review 4, 2003. — 29 с.
10. Wilflinger J. Simulation and control design of hybrid propulsions in boats / J. Wilflinger, P. Ortner, L. Del Re, M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 40-45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.
11. Дарьенков А. Б. Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков, В. Г. Титов, Г. М. Мирясов. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. П. Е. Алексеева, 2014. — 151 с.
12. Соловьёв, А. В., & Поселенов, Е. Н. (2021). Обзор современных систем управления двигателями внутреннего сгорания. Научные проблемы водного транспорта, (67), 42-52. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.192>.

**References**

1. Molochkov V.YA., Komp'yuternyi trenazher sudovoi ehlektrostantsii [Computer simulator of ship power plant] / Molochkov V.YA., Molochkova I.D. // Nauchnye trudy dal'rybvтуza. Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii rybokhozyaistvennyi universitet. – 2009. – № 21. – pp. 223-227. (in Russ.)
2. Khvatov, O.S. Upravlenie rabotoi virtual'noi sudovoi ehlektroenergeticheskoi sistemy morskogo teplokhoda [Management of the operation of a virtual ship's electric power system of a sea vessel]; metod. ukazaniya dlya stud.ochn. obucheniya spets.180404; Burmakin, O.A., Gusakova, T.N., Malyshev, YU.S., Khvatov, O.S. - N.Novgorod, Izd-vo FGOU VPO «VGAVT», 2010. – 105 p. (in Russ.)

3. Grigor'ev A. V. Razrabotka nauchno-obrazovatel'nogo laboratorno-trenazhernogo kompleksa sudovykh sistem ehlektrodvizheniya i grebnykh ehlektricheskikh ustanovok novogo pokoleniya [Designing of scientific-educational laboratory-training complex of ship electric propulsion systems and electric propulsion plants of new generation] / Grigor'ev A. V., Zainullin R. R., Malyshev S. M. Vestnik GUMRF im. admirala S. O. Makarova. – 2016. – № 4 (38) – pp. 203-210. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-203-210
4. Grebnye ehlektricheskie ustanovki v sostave ehlektroenergeticheskoi sistemy sudna [Propelling electric installations as part of the vessel's electrical power system] / Uchebno-metodicheskoe posobie dlya vypolneniya laboratornykh rabot v srede virtual'noi i dopolnnoi real'nosti po kursu «Grebnye ehlektricheskie ustanovki» [A teaching aid for performing laboratory work in the virtual and augmented reality environment on the course "Rowing Electric Installations"] / sost. – S.V. Popov, YU.S. Malyshev, O.S. Khvatov – N. Novgorod: FGBOU VO «VGUVT», 2022. – 39 p. (in Russ.)
5. Egorov, L. E. Komp'yuternoe modelirovanie edinoi vysokovol'noi sudovoi elektro-energeticheskoi sistemy s propul'sivnymi kompleksami tipa Azipod v normal'nykh i avariinykh rezhimakh raboty. PhD diss. SPb.: FGBOU VO «GUMRF im. admirala S.O. Makarova», 2014. – 183 p.
6. Sugakov, V.G.; Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya parametrov ehlektricheskoi ehnergii sudovykh ehlektrostantsii [Systems of automatic regulation of electrical energy parameters of ship power plants]; ucheb.posobie; Sugakov, V.G. Khvatov, O.S. - N.Novgorod, <http://94.100.87.24:8080/marcweb/>. (in Russ.)
7. Wei T. Experimental Evaluation of IGCT Converters with reduced di/dt limiting inductance / T. Wei, Q. Song, J. Li, B. Zhao, Z. Chen, R. Zeng // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). — IEEE, 2018. — Pp. 1710-1716. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341248.
8. Nagel A. Characterization of IGCTs for series connected operation / A. Nagel, S. Bernet, T. Bruckner, P. K. Steimer, O. Apeldoorn // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. — IEEE, 2000. — Vol. 3. — Pp. 1923-1929. DOI: 10.1109/IAS.2000.882141.
9. Linder, S. Silovye poluprovodnikovye pribory. Chast pervaja: osnovnye svedeniya i oblast primeneniya. ABB Review 4, 2006. – 29 p/
10. Wilflinger J. Simulation and control design of hybrid propulsions in boats / J. Wilflinger, P. Ortner, L. Del Re, M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 40-45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.
11. Dar'enkov, A. B., G. M. Miryasov, V. G. Titov, M. N. Okhotnikov, and D. V. Umyarov. Grebnye elektricheskie ustanovki [Electric Propelling Units]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014. – 151 p. (in Russ.)
12. Solov'yov, A. V., & Poselenov, Ye. N. (2021). Obzor sovremennykh sistem upravleniya dvigatelyami vnutrennego sgoraniya [Overview of modern control systems for internal combustion]. Nauchnyye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport], (67), 42-52. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.192>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Попов Сергей Васильевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [Popovsev3@ya.ru](mailto:Popovsev3@ya.ru)

**Малышев Юрий Сергеевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО

**Sergey V. Popov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: [Popovsev3@ya.ru](mailto:Popovsev3@ya.ru)

**Yuriy S. Malyshev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov

«ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул.  
Нестерова, 5, e-mail: elektrikasp@mail.ru

**Бурмакин Олег Анатольевич**, к.т.н., доцент,  
доцент кафедры электротехники и  
электрооборудования объектов водного  
транспорта, Волжский государственный  
университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО  
«ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул.  
Нестерова, 5, e-mail: boa\_71@mail.ru

st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail:  
elektrikasp@mail.ru

**Oleg A. Burmakin**, Ph.D. in Engineering  
Science, Associate Professor of the Department  
of Electrical Engineering and Electrical  
Equipment of Water Transport Objects, Volga  
State University of Water Transport, 5, Nesterov  
st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail:  
boa\_71@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.02.2025; опубликована онлайн 20.03.2025.  
Received 11.02.2025; published online 20.03.2025.