

СУДОВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

SHIP POWER EQUIPMENT

УДК: 621.317.629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi84.637

Анализ переходных процессов судовых дизель-генераторных установок

В.И. Брежнев¹

В.А. Жуков²

ORCID: 0000-0002-4045-4504

¹«Транснефть-Балтика», г. Санкт-Петербург, Россия

²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена описанию результатов исследования переходных процессов дизель-генераторной установки в процессе пуска. Проведен анализ изменения активной мощности, крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала с момента запуска до выхода на установившийся режим работы. Для регистрации параметров переходного процесса использовалась SCADA-система, обеспечившая получение достоверных данных в режиме реального времени. Полученные результаты показали, что переходные процессы по исследованным параметрам имеют различную продолжительность. Наиболее длительным является переходный процесс по частоте вращения коленчатого вала. Графики, полученные в процессе исследований, представляют информацию, необходимую для оценки качества переходных процессов. Проведенные исследования способствует выявлению возможностей для повышения эффективности системы управления дизель-генераторными установками в процессе пуска и перехода на установившийся режим.

Ключевые слова: дизель-генераторные установки, переходные процессы, активная мощность, флуктуации мощности, пусковая нестабильность, частота вращения вала, SCADA-система, устойчивость системы, серверно-сетевое управление

Analysis of transient processes of marine diesel generator sets

Vladislav I. Brezhnev¹

Vladimir A. Zhukov²

ORCID: 0000-0002-4045-4504

¹Transneft-Baltika, St. Petersburg, Russia

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Abstract. The article describes the results of a study of transient processes of a diesel generator set during start-up. The analysis of changes in the active power, torque and speed of rotation of the crankshaft from the moment of start-up to reaching steady-state operation is carried out. To register the parameters of the transient process, a SCADA system was used, which provided reliable data in real time. The results showed that the transients in the studied parameters have different durations. The longest is the transient process in terms of crankshaft speed. The graphs obtained in the course of the research provide the information necessary to assess the quality of the transients. The conducted research helps to identify opportunities for improving the efficiency of the control system of diesel generator sets during start-up and transition to steady-state operation.

Keywords: diesel generator sets, transients, active power, power fluctuations, starting instability, shaft speed, SCADA system, system stability, server and network management

Введение

Одной из современных тенденций развития судовой энергетики является повышение роли дизель-генераторных установок, которые в настоящее время используются не только для обеспечения судовых потребителей электроэнергией, но и для выработки энергии, потребляемой движителями, в качестве которых достаточно часто используются винторулевые колонки [1]. Сложные условия работы винторулевых колонок и резкопеременные нагрузки дизель-генераторов приводят к появлению переходных процессов, качество которых оказывают значительное влияние на эффективность и надежность судовой энергетической установки. Вопросам влияния изменений нагрузки на работу дизель-генераторных установок посвящены работы [2-4]. Одним из важнейших требований, предъявляемых к дизель-генераторам является его способность адаптироваться к различным нагрузочным режимам и преодолевать пусковые неустойчивости. Проведенный анализ переходных процессов дизель-генераторных установок позволил выявить их характерные особенности, оценить эффективность системы управления установкой и наметить направления ее совершенствования.

Методы и материалы

Объектом исследований являлась энергетическая установка, в состав которой входят две винторулевые колонки (ВПК) и четыре дизель-генератора (рис. 1).

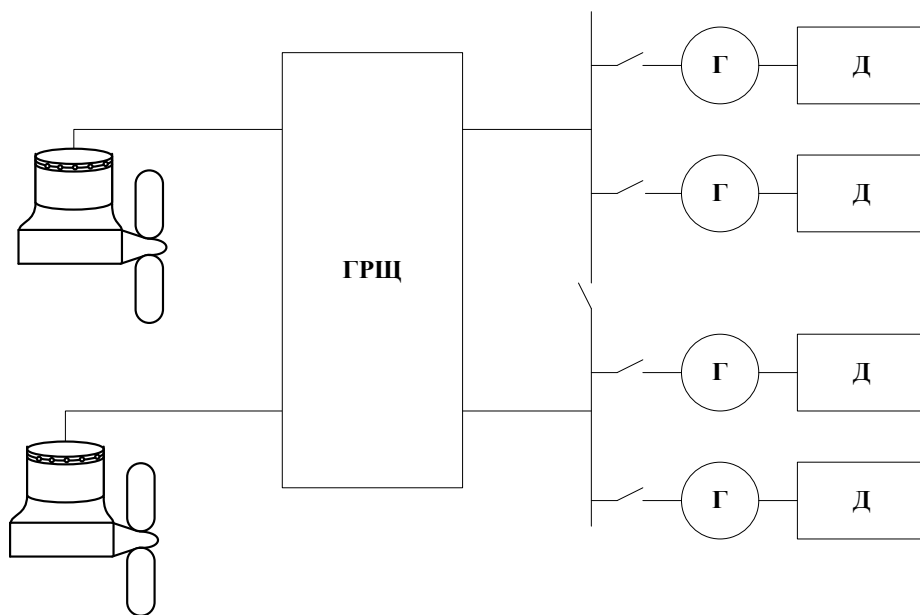


Рис. 1. Схема судовой энергетической установки с четырьмя дизель-генераторами

В представленной энергетической установке предусматривается параллельная работа дизель-генераторов. Особенности параллельной работы дизель-генераторов рассмотрены в работах [5-7]. Представленные в работах материалы свидетельствуют о необходимости совершенствования систем управления дизель-генераторами, работающими параллельно. Реализация различных способов регулирования работы дизель-генераторных установок рассмотрены в работах [8-10]. Наиболее

перспективными являются системы управления дизель-генераторами, созданные на основе нейронных сетей и искусственного интеллекта [11,12].

Основным критерием совершенства систем управления дизель-генераторных установок является качество переходных процессов, характеризующее их длительностью и величиной заброса регулируемого параметра. Именно поэтому для оценки эффективности систем управления необходимо анализировать переходные процессы, сопровождающие изменение нагрузки на дизель-генераторную установку.

В процессе стендовых испытаний дизель-генераторных установок были получены данные об изменении в процессе запуска и перехода на установившийся режим работы таких параметров как активная мощность, крутящий момент на выходном валу дизельного двигателя и частота вращения вала дизель-генератора.

Важнейшим параметром электрического тока, подаваемого потребителю, является частота, которая, в свою очередь, непосредственно зависит от частоты вращения вала первичного двигателя. В процессе испытаний частота вращения определялась при помощи датчика положения коленчатого вала, который считывал импульсы частоты вращения с маховика. Мощность, вырабатываемая двигателем определяется частотой вращения и крутящим моментом. Крутящий момент на валу двигателя определялся при помощи датчика, установленного на муфте между дизельным двигателем и генератором.

При работе на газотопливном и дизельном режимах измерялся расход топлива, с использованием расходомеров, установленных в каждом контуре подачи топлива.

Информация, получаемая от датчиков в процессе испытаний, передавалась в блок управления для последующей обработки.

Для комплексного мониторинга и записи всех рабочих параметров была применена SCADA-система (Supervisory Control and Data Acquisition), интегрированная с электронным блоком управления. Данная система обеспечивала:

- автоматизированный сбор данных с датчиков (ваттметры, вольтметры, тахометры, ДКМ, расходомеры);
- визуализацию параметров в реальном времени;
- централизованную обработку и регистрацию данных в архиве;
- синхронную временную привязку показаний для построения графиков;
- экспорт результатов в цифровом виде для дальнейшего анализа и построения графиков в программной среде.

Графики, представленные на рисунках 2–4, были получены на основе реальных измерений, зафиксированных с помощью SCADA-системы. Это позволило достичь высокой точности временной и параметрической корреляции данных, что является критически важным при анализе переходных процессов в энергетических установках.

Колебания активной мощности (той части электрической мощности, которая преобразуется в полезную работу) получены на основе реальных измерений и представлены на рисунке 2.

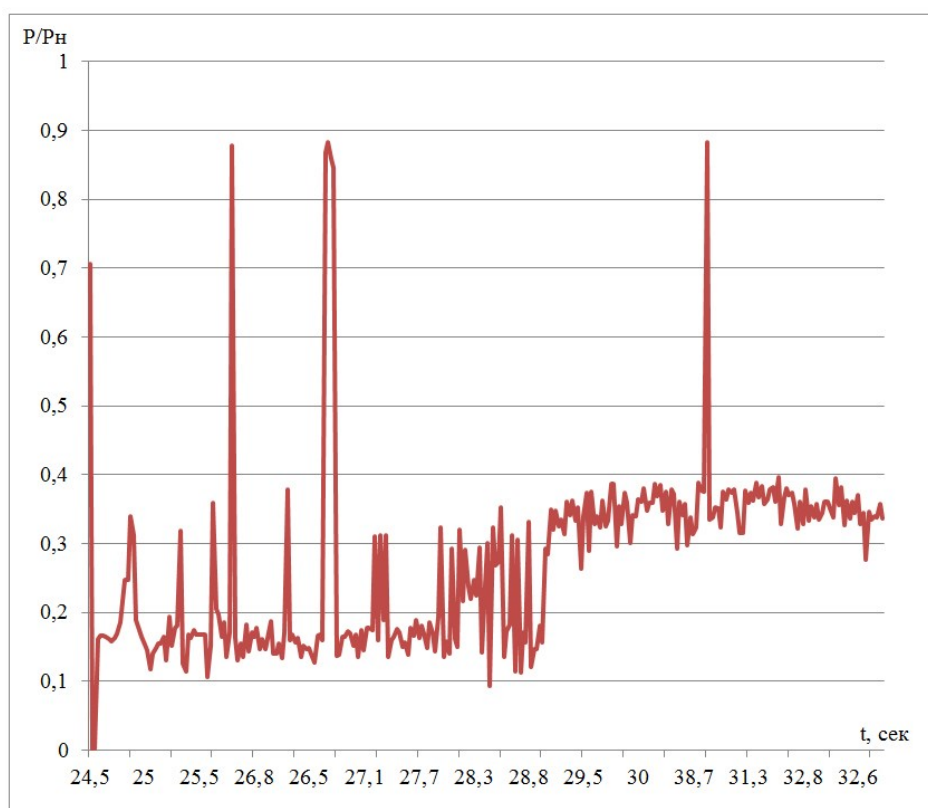


Рис. 2. Колебания активной мощности ВРК в период пуска: P/P_n – относительная мощность

Начальный резкий скачок мощности около 24,6 сек — момент включения установки, сопровождающийся значительным увеличением мощности.

Частые флуктуации между 24,6 и 29 секундами — период пусковых нестабильностей и адаптации оборудования, характерный для начального этапа работы.

Выраженные пики мощности в интервалах 25,6, 26,0, 26,5 и 30,6 секунд — кратковременные, но значительные увеличения мощности, вызванные изменениями нагрузки.

Стабилизация сигнала после 29 секунды — мощность стабилизируется в пределах 32-35 % от номинальной, что свидетельствует о переходе системы в устойчивый рабочий режим.

Последний скачок активной мощности на 31-ой секунде — является завершающим переходным моментом предшествующим полной стабилизацией режима работы дизель-генераторной установки.

На графике чётко виден начальный скачок мощности, который происходит примерно через 24 секунды после старта генератора. Этот момент соответствует преодолению инерционных сил после запуска установки.

В течение последующего периода времени наблюдаются интенсивные колебания мощности, которые характеризуют период нестабильности. Колебания мощности представляют собой реакцию установки на изменение нагрузочного режима и ее адаптацию к увеличившейся нагрузке. Скачки мощности, приходящиеся на 25,6, 26,0, 26,5 и 30,6 секунд являются отражением изменения подачи топлива, как реакции первичного двигателя на увеличение нагрузки. Амплитуда скачков мощности и их

частота важны для анализа реакции системы управления дизель-генераторной установки на изменение нагрузочных режимов.

После 29 секунды график демонстрирует стабилизацию мощности, которая устанавливается на уровне 32-35 % от номинальной мощности генератора. Этот процесс свидетельствует о завершении этапа пусковых нестабильностей и успешном переходе системы в устойчивый рабочий режим. Статус стабилизации означает, что дизель-генератор может поддерживать необходимые параметры работы и адаптироваться к нормальным эксплуатационным условиям.

Последний выброс мощности, зафиксированный на 30,6 секунде, представляет собой заключительный переходный процесс перед окончательной стабилизацией работы установки. Этот пик может быть вызван внутренними корректировками работы системы или кратковременным изменением внешней нагрузки, после чего система приходит к установившемуся режиму работы.

На рисунке 3 представлен переходный процесс по крутящему моменту. Полученные результаты свидетельствуют, что переход на новый установившийся режим осуществляется с двумя пиковыми забросами крутящего момента, первый из которых наблюдается с 26 по 29 секунду переходного процесса, второй, более продолжительный – с 31 по 36 секунду. Переходный процесс по крутящему моменту более длительный по сравнению с переходным процессом по активной мощности и продолжается 39 с. Большую инерционность изменения крутящего момента необходимо учитывать при модернизации систем управления дизель-генераторными установками.

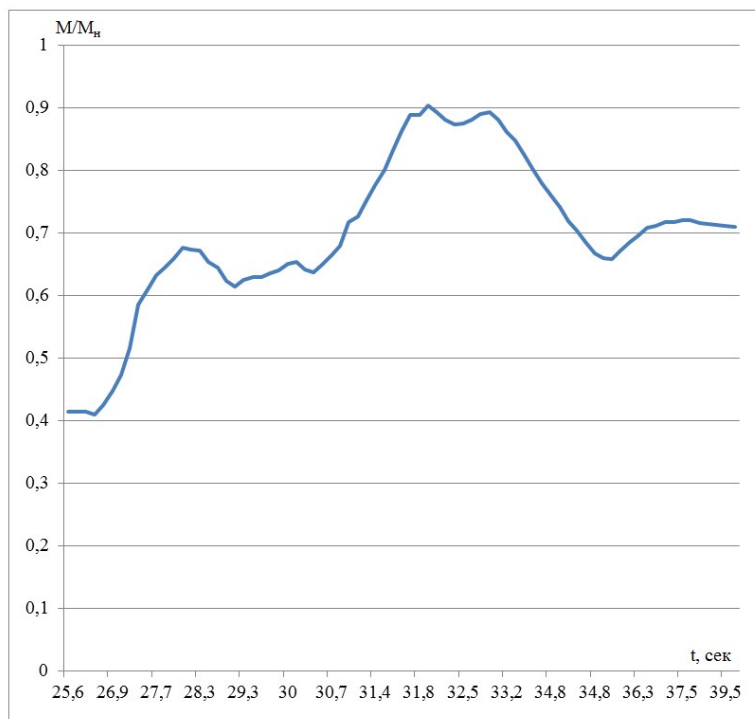


Рис. 3. Переходный процесс по крутящему моменту на валу дизельного двигателя: M/M_n – относительный крутящий момент

Рисунок 4 иллюстрирует изменение частоты вращения вала дизель-генератора при переходных режимах работы установки. График отображает реакцию системы на изменения внешней нагрузки и корректировку работы регулятора, предоставляя

важную информацию о стабильности и адаптивности двигателя в процессе его эксплуатации.

На начальном участке графика (первые 28 секунд) частота вращения вала стабильно находится на уровне около 500 мин⁻¹, что соответствует номинальному значению работы дизель-генератора. Этот участок можно трактовать как фазу установления режима работы, когда система достигает исходного стабильного состояния.

В промежутке времени с 28 по 50 секунду наблюдаются небольшие колебания частоты вращения в диапазоне от 490 до 505 мин⁻¹. Это является нормальным явлением, отражающим адаптационные процессы системы, регулирующей работу двигателя. Периодические понижения частоты вращения (в окрестности 29 и 47 секунд) и последующие её восстановления демонстрируют реакции на мелкие изменения нагрузки и настройки работы регулятора.

В районе 55-57 секунд график показывает резкий скачок частоты вращения до 530 мин⁻¹, что указывает на существенное изменение режима работы двигателя. Это может быть связано с кратковременной разгрузкой системы или переходом на новый рабочий режим, требующий повышенных оборотов для обеспечения необходимой мощности.

После резкого увеличения частоты вращения, на 57-63 секундах наблюдается её плавное снижение до уровня около 500 мин⁻¹, что подтверждает достижение нового устойчивого режима работы двигателя. Устойчивость системы управления оборотами в данном участке графика говорит о корректной настройке и адаптации к изменениям внешней нагрузки.

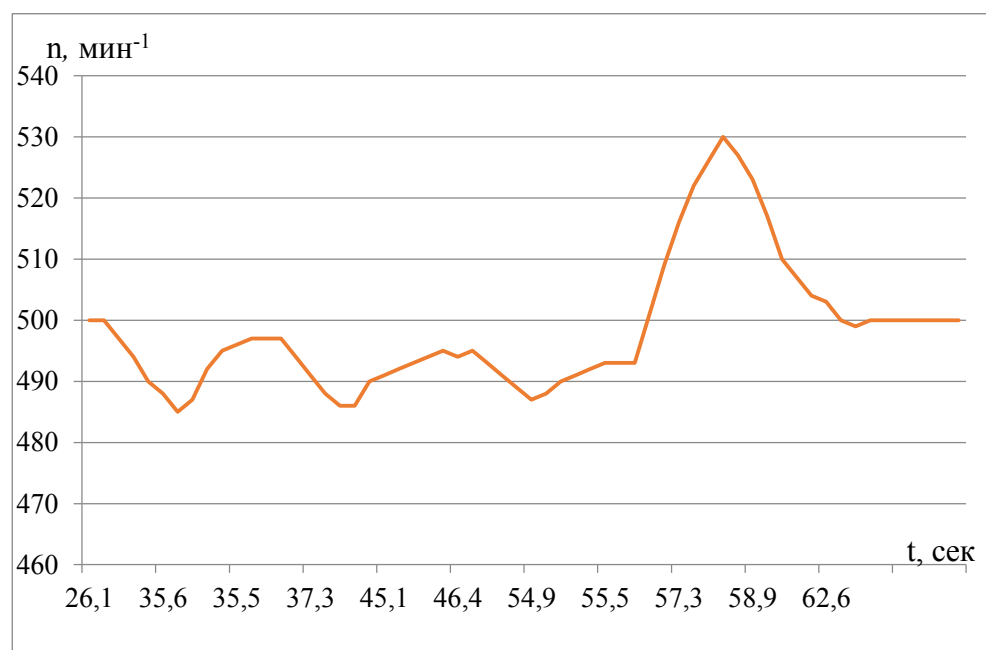


Рис. 4. Изменения частоты вращения вала на переходном режиме

Результаты

В ходе анализа переходных процессов были получены следующие результаты.

На начальном этапе работы установки (примерно через 25 секунд после пуска) был зафиксирован резкий скачок мощности, что соответствует включению дизель-генератора. Период с 24,6 до 29 секунд характеризуется частыми флуктуациями мощности, что связано с пусковыми нестабильностями и адаптацией оборудования.

Пиковые значения мощности в 25,6, 26,0, 26,5 и 30,6 секундах указывают на кратковременные изменения нагрузки, вызванные переходными процессами в системе. Стабилизация мощности происходит после 29 секунды на уровне 32-35 % от номинальной мощности, что свидетельствует о переходе системы в устойчивый рабочий режим.

Крутящий момент стабилизируется через 39 секунд, пройдя через два пиковых подъема, которые продолжаются от 3 до 5 секунд.

Частота вращения вала дизель-генератора: На начальном этапе (первые 28 секунд) частота вращения вала стабилизировалась на уровне около 500 мин-1. В интервале с 28 до 50 секунд наблюдаются небольшие колебания частоты вращения, что отражает нормальные адаптационные процессы системы. На 55-57 секундах был зафиксирован резкий скачок частоты вращения до 530 мин-1, что указывает на значительное изменение режима работы двигателя. После 57 секунд частота вращения постепенно снизилась до уровня около 500 мин-1, что подтверждает достижение нового устойчивого режима работы.

Обсуждение

Проведенные исследования переходных процессов дизель-генераторных установок позволили установить закономерности изменения их важнейших эксплуатационных характеристик, таких как активная мощность, крутящий момент и частота вращения.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что изменения всех указанных параметров при изменении нагрузочного режима дизель-генератора носят колебательный характер с пиковыми значениями исследованных характеристик.

Колебания параметров, характеризующих работу дизель-генератора, соответствуют промежутку времени, необходимому для адаптации установки к новому нагрузочному режиму. Результатом аperiodических изменений параметров является их стабилизация, свидетельствующая о переходе дизель-генератора на установившийся режим работы.

Частота колебаний исследованных параметров и амплитуды их значений определяются инерционностью дизель-генераторной установки и эффективностью работы системы управления, обеспечивающей изменение подачи топлива к первичному дизельному двигателю при изменении нагрузки на генератор.

Переходные процессы для исследованных параметров имеют различную продолжительность. Переход на новый мощностной режим составляет около 30 секунд, крутящий момент стабилизируется в течение примерно 40 секунд, а для стабилизации частоты вращения требуется около 60 секунд. При этом необходимо отметить, что с точки зрения качества электроэнергии именно частота вращения играет определяющую роль, так как именно ее значение определяет частоту тока в сети.

Инерционные характеристики дизель-генераторных установок обусловлены их конструктивными особенностями и не могут быть существенно изменены, поэтому основным инструментом повышения качества переходных процессов является совершенствование их систем управления.

Заключение

Проведенный анализ изменения показателей работы дизель-генераторных установок во время переходных процессов позволяет сделать следующие выводы:

- переходные процессы дизель-генераторов имеют колебательный характер, типичный для большинства энергетических установок;
- колебания параметров отражают способность системы адаптироваться к новым нагрузочным режимам;

- переход на новый нагрузочный режим обеспечивается реакцией системы топливоподачи на изменение нагрузки в результате управляющих сигналов;
- анализ данных, полученных при исследовании переходных процессов, таких как длительность переходного процесса и величина забросов параметров, позволяет оценить совершенство системы управления и наметить направления ее модернизации;
- исследования переходных процессов позволяют оценить динамику изменения важнейших показателей их работы, выявить критические аспекты переходных процессов и повысить их качество с целью сокращения времени, необходимого для восстановления заданной частоты вращения при изменении нагрузки.

Перспективным способом повышения качества переходных процессов дизель-генераторных установок является использование серверно-сетевых систем управления, обеспечивающих связанное воздействие на топливные системы дизельных двигателей, работающих параллельно и электрические характеристики генераторов.

Список литературы

1. Брежнев, В. И. Перспективы использования винторулевых колонок в составе судовых энергетических установок / В. И. Брежнев, В. А. Жуков // Морская радиоэлектроника. – 2022. – № 3(81). – С. 2-5. – EDN ACOODY.
2. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
3. Белей, В. Ф. Оценка режимов работы судового дизель-генератора на основе диаграммы располагаемых мощностей / В. Ф. Белей, К. В. Коротких // Известия КГТУ. – 2021. – № 62. – С. 135-145. – DOI 10.46845/1997-3071-2021-62-135-145. – EDN STRJXY
4. Малышев, Ю. С. Имитационная модель дизель-генератора, работающего на судовую сеть при подключении импульсной нагрузки / Ю. С. Малышев, О. А. Бурмакин, С. В. Попов // Транспорт. Горизонты развития : Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток-Самара, 23–26 апреля 2024 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. – С. 37. – EDN QRALGP.
5. Виноградов А. А. Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе / А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №2(42). - С. 373-379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379
6. Попов, С. В. Исследование параллельной работы дизель-генераторов судовой электростанции / С. В. Попов, О. А. Бурмакин, Ю. С. Малышев // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. – № 66. – С. 108-122. – DOI 10.37890/jwt.vi66.148. – EDN XGSQRR.
7. Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Особенности параллельной работы дизель-генераторных агрегатов судовой электростанции. Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 73 (4). – Н. Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2022. – с. 67 – 78, DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.313>
8. Белей, В. Ф. Повышение эффективности судовых дизель - генераторов за счет использования централизованной системы компенсации реактивной мощности / В. Ф. Белей // Известия КГТУ. – 2019. – № 54. – С. 145-153. – EDN LTXLZW.
9. Коробко, Г. И. Разработка и моделирование дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической системе / Г. И. Коробко, О. С. Хватов, И. Г. Коробко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 1. – С. 55-61. – DOI 10.17588/2072-2672.2017.1.055-061. – EDN XSTWUH.

10. Перспективные варианты судовых электростанций с дизель-генераторами переменной частоты вращения / О. С. Хватов, Е. М. Бурда, И. А. Тарпанов, Н. И. Кшталтный // Труды 19-го международного научно-промышленного форума "Великие реки-2018" : Труды международного научно-промышленного форума. Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов, Волжский, 15–18 мая 2018 года. – Волжский: Волжский государственный университет водного транспорта, 2018. – EDN ZCDYBV.
11. Kuznetsov, S. E. System of load distribution of ship diesel generators based on neural networks / S. E. Kuznetsov, N. A. Alekseev, A. A. Vinogradov // Modern Information Technologies and IT-Education. – 2018. – Vol. 14, No. 3. – P. 603-608. – DOI 10.25559/SITITO.14.201803.603-608. – EDN YYNQPZ.
12. Жуков, В. А. Использование искусственного интеллекта для оценки надежности систем охлаждения судовых дизель-генераторов / В. А. Жуков, С. Г. Черный, Д. А. Мазин // Морская радиоэлектроника. – 2024. – № 3(89). – С. 22-26. – EDN VPUJDI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Брежнев Владислав Игоревич, инженер 1-й категории, «Транснефть-Балтика», Санкт-Петербург, наб. Арсенальная, д. 11, литера А, e-mail: vladislav_br@list.ru

Жуков Владимир Анатольевич, докт. техн. наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: Zhukov_vla@mail.ru

Vladislav I. Brezhnev, engineer of the 1st category, Transneft-Baltika, St. Petersburg, Arsenalnaya Embankment, 11, letter A, e-mail: vladislav_br@list.ru

Vladimir A. Zhukov, Dr Tech. Sc., Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Dvinskaya St., 5/7, e-mail: Zhukov_vla@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 01.08.2025; published online 20.09.2025.