

2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

УДК 621.31

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2026.2.2>



ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С НИЗКИМИ ВЫБРОСАМИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

Виктор Викторович Миханосин^{1*}, Алексей Фёдорович Бурков²

^{1,2} Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского (д. 50а, ул. Верхнепортовая, Владивосток, 690003, Российская Федерация)
¹ tetrodoksins@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6741-0061>
² burkov.22@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0004-3016-6317>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Ежегодное повышение стоимости на горюче-смазочные материалы (ГСМ) и ухудшающаяся экологическая обстановка в мире требуют разработку стратегии, инициатив и принятия международными сообществами неотложных мер. В документах, принимаемых, в частности, советом Европейского союза о морском регулировании FuelEU Maritime и комитетом по защите морской среды Международной морской организации, отражена необходимость модернизации судовых энергетических и электроэнергетических установок и систем. Несмотря на свою актуальность, тема декарбонизации морских перевозок часто подвергается критике в связи с тем, что морским транспортом перевозится большая часть грузов – порядка 80 % от объема мировой торговли. При этом доля выбросов в атмосферу парниковых газов судовыми энергетическими установками составляет около 3 % от мировых антропогенных выбросов, а применяемые для очистки выхлопных газов устройства (скрубберы и др.), характеризуются рядом принципиально неустраняемых недостатков. **Цель.** Анализ технических решений для определения таких из них, применение которых на морском транспорте позволит уменьшать выбросы в атмосферу вредных веществ и сократить потребление ГСМ судовыми энергетическими установками. **Материалы и методы.** Анализ отечественных и зарубежных научно-технических источников, справочных материалов и нормативных документов показал, что к наиболее перспективным следует отнести энергетические установки, у которых дизельные (приводные) двигатели работают с регулируемой частотой вращения в функции мощности на валу в соответствии с кривыми наименьшего удельного расхода топлива, а также гибридные энергетические установки. **Результаты и обсуждение.** Обоснованы концепции построения энергоэффективных судов с повышенными экологическими классами, в одной из которых используются асинхронизированные синхронные генераторы, а в другой – гибридные электростанции с промежуточными шинами постоянного тока. **Заключение.** Разработка и внедрение на судах предлагаемых энергетических установок позволит повысить технико-экономические характеристики морских перевозок и снизить негативное воздействие морского транспорта на окружающую среду.

Ключевые слова: генераторная установка, комбинированная энергетическая установка, судовая электроэнергетическая система, химический источник тока, энергоэффективность

Для цитирования: Миханосин В. В., Бурков А. Ф. Энергоэффективные судовые электроэнергетические системы с низкими выбросами вредных веществ в атмосферу // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2026. № 2(113). С. 20–28. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2026.2.2>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.01.2026;
одобрена после рецензирования 22.02.2026;
принята к публикации 02.03.2026.

Research article

ENERGY-EFFICIENT MARINE POWER SYSTEMS WITH LOW EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES INTO THE ATMOSPHERE

Viktor V. Mikhannoshin^{1*}, Aleksey F. Burkov²

^{1,2} Admiral Nevelskoy Maritime State University (50a, Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation)
¹ tetrodoksins@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6741-0061>
² burkov.22@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0004-3016-6317>
* Corresponding author

Abstract. Introduction. The annual increase in the cost of fuel and lubricants and the deteriorating environmental situation in the world require the development of strategies, initiatives and urgent measures by international community. The documents adopted by the European Union Council on Maritime Regulation FuelEU Maritime and the Maritime Environment Protection Committee of the International Maritime Organization reflect the need to modernize maritime energy and electrical systems. Despite its relevance, the topic of decarbonization of maritime transportation is often criticized due to the fact that maritime transport carries most of the cargo, accounting for about 80% of global trade. However, the share of greenhouse gas emissions from ship engines is about 3% of global anthropogenic emissions, and the devices used to clean exhaust gases (scrubbers, etc.) have several fundamental drawbacks. **Goal.** Analysis of technical solutions to determine those of them, the application of which in maritime transport will allow to reduce emissions of harmful substances into the atmosphere and reduce fuel consumption by ship power plants. **Materials and methods.** Analysis of domestic and foreign scientific and technical sources, reference materials and regulatory documents showed

that the most promising should include power plants, in which diesel (drive) engines operate with a variable rotational speed in function of the shaft power in accordance with the curves of the lowest specific fuel consumption, as well as hybrid power plants. **Results and discussion.** The concepts of building energy-efficient vessels with increased environmental classes are substantiated, one of which uses asynchronous synchronous generators, and the other uses hybrid power plants with intermediate DC buses. **Conclusion.** The development and implementation of the proposed power plants on ships will improve the technical and economic characteristics of maritime transportation and reduce the negative environmental impact of maritime transport.

Keywords: generator set, combined power plant, ship's power system, chemical current source, energy efficiency

For citation: Mikhanoshin VV, Burkov AF. Energy-efficient marine power systems with low emissions of harmful substances into the atmosphere. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2026;2(113):20-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2026.2.2>

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

The article was submitted 21.01.2026;

approved after reviewing 22.02.2026;

accepted for publication 02.03.2026.

Введение / Introduction. Необходимость решения задач, направленных на совершенствование судовых электроэнергетических систем (комплексов) (СЭЭС) с точки зрения улучшения их технико-экономических и экологических характеристик, обусловлена физическим и моральным старением компонентов СЭЭС, включая электрооборудование, разработкой, производством и внедрением на основе современных элементов полупроводниковой техники высокоэффективных преобразовательных устройств, новых электрохимических и электрических накопителей с высокой плотностью энергии, что отражено в нормативно-правовых актах, Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2036 г. и на дальнейшую перспективу до 2050 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 12.05.2025 № 1181-р. Учитывая высокую энерговооруженность и степень электрификации морских судов [1], можно предположить, что технико-экономические и экологические показатели судов, преимущественно электроходов, существенно зависят от компоновки их СЭЭС.

Совершенствованию эксплуатационно-технических и экологических показателей СЭЭС в силу обозначенных причин в настоящее время уделяется повышенное внимание. В [2, 3] описаны варианты комбинированных (гибридных) энергетических установок (КЭУ), выполненных на основе дизельных генераторных установок (ДГУ) и химических источников тока (ХИТ) (электрических аккумуляторных батарей). Наименьший удельный расход топлива судовых дизельных двигателей g обычно обеспечивается при их нагрузке P_H в диапазоне от 70 % до 90 % номинальной (рис. 1). Фактически судовые дизельные двигатели значительную часть времени эксплуатации функционируют с 20...50 % нагрузкой относительно номинальной мощности. При относительно низком коэффициенте загрузки ДГУ в КЭУ (при $P_H < (50...55) \%$), ХИТ, используемые в буферном режиме, позволяют загружать дизельные двигатели дополнительной мощностью, которая идет при этом на их подзарядку, за счёт чего обеспечивается минимальный удельный расход топлива $g_{\min}$, и, как следствие, наименьшие выбросы в атмосферу вредных веществ.

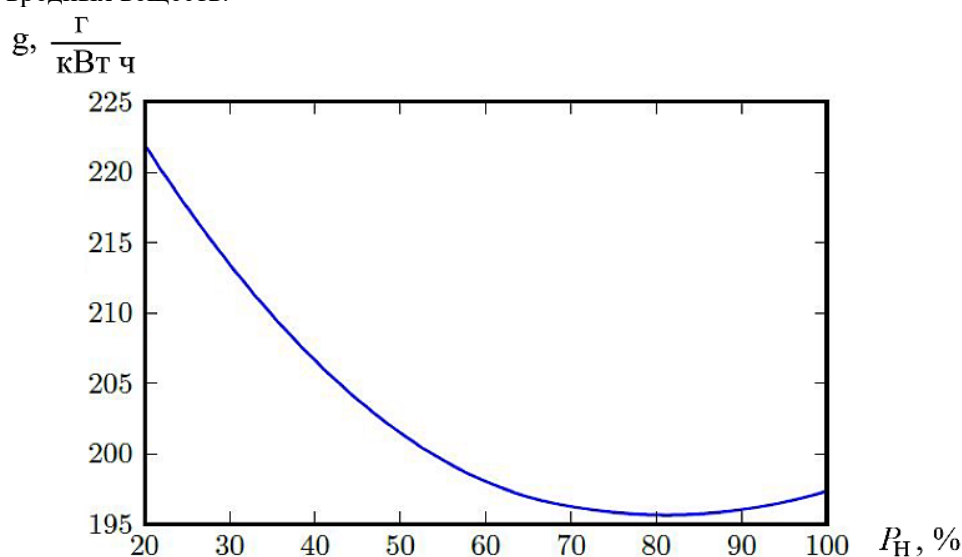


Рис. 1. Типовая зависимость удельного расхода топлива g судового дизельного двигателя от мощности P_H на его валу / Fig. 1. Typical dependence of the specific fuel consumption g of a marine diesel engine on the power P_H on its shaft

Наиболее целесообразно использование КЭУ на судах, эксплуатирующихся с частыми маневренными и долевыми режимами, что позволяет повысить их энергоэффективность и уменьшить вредные выбросы в атмосферу.

Значительное число зарубежных публикаций посвящено разработке стратегий и алгоритмов управления гибридными энергетическими установками, в том числе на основе нечёткой логики, целью которых является оптимизация энергопотребления [4, 5, 6]. Классификация этих стратегий и алгоритмов приведена, например, в [7, 8].

Дополнительным аспектом, усложняющим выбор в пользу какой-либо одной стратегии управления, является то, что одновременно приходится учитывать несколько конфликтных между собой целей, в числе которых, с одной стороны, минимизация расхода топлива дизельного двигателя, а с другой – обеспечение наибольшего срока службы электрической аккумуляторной батареи.

С учетом изложенного необходим обоснованный выбор решения приоритетных задач в конфликтующих целевых функциях управления. Решению задач многокритериальной оптимизации в КЭУ посвящены работы [9, 10, 11]. В [9] предложена двухуровневая система определения оптимальных размеров компонентов КЭУ с алгоритмом управления, а также векторизованная система нечеткого вывода. В [10] предложена модель «скоординированной навигации» и планирования выработки электроэнергии, направленная на достижение компромисса между инвестиционными затратами, эксплуатационными расходами и выбросами парниковых газов в условиях неопределенности распределения энергии между её источниками. В [11] исследовано скоординированное оптимальное управление энергопотреблением судна-электрохода на основе алгоритма дифференциальной эволюции и классического метода.

Относительно новыми являются предложения по применению ДГУ с переменной частотой вращения [12, 13]. Благодаря регулированию частоты вращения приводного дизельного двигателя ДГУ в функции мощности на валу и в соответствии с кривыми наименьшего удельного расхода топлива g , определяемыми по многопараметровой (универсальной) характеристике, достигается минимальный удельный расход потребляемых ГСМ (рис. 2) и наименьшее содержание в выхлопных газах оксидов азота NO_x (рис. 3) [14].

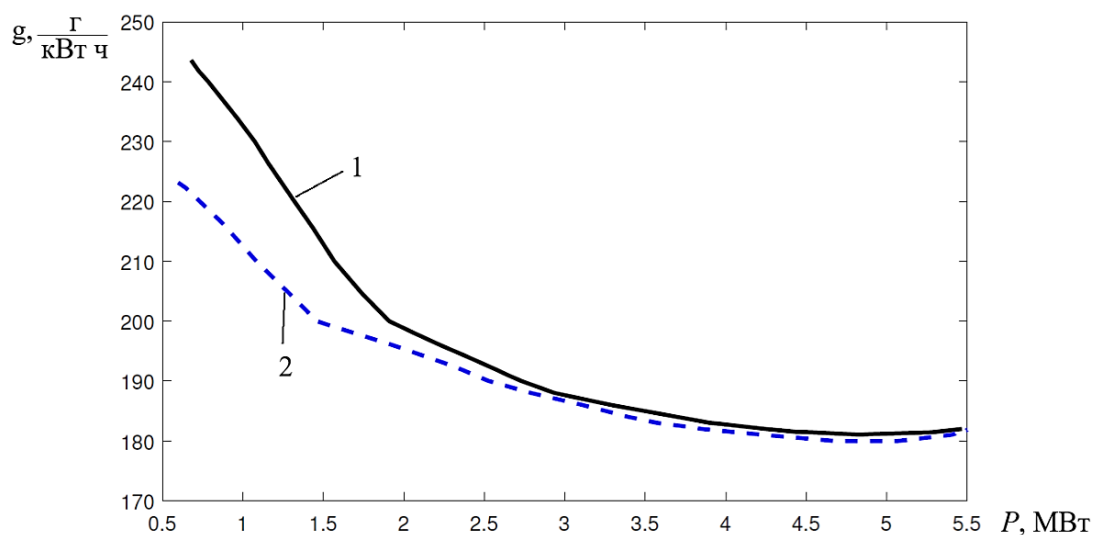


Рис. 2. Зависимость удельного расхода топлива g от развиваемой мощности P дизельного двигателя «Bergen B32:40V12A» ($P_n = 6 \text{ MW}$), работающего с неизменной (1) и с регулируемой (2) частотой вращения вала / Fig. 2. Dependence of specific fuel consumption g on the developed power P of the Bergen B32:40V12A diesel engine ($P_n = 6 \text{ MW}$), operating with a constant (1) and variable (2) shaft speed

Перспективным является использование СЭЭС с отбором мощности от главной энергетической установки. Варианты валогенераторных установок (ВГУ), их преимущества и недостатки достаточно подробно описаны [15]. Отдельно следует отметить то, что ВГУ, выполненные на основе асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ), способны вырабатывать электроэнергию со стабильными параметрами при изменении частоты вращения приводного вала.

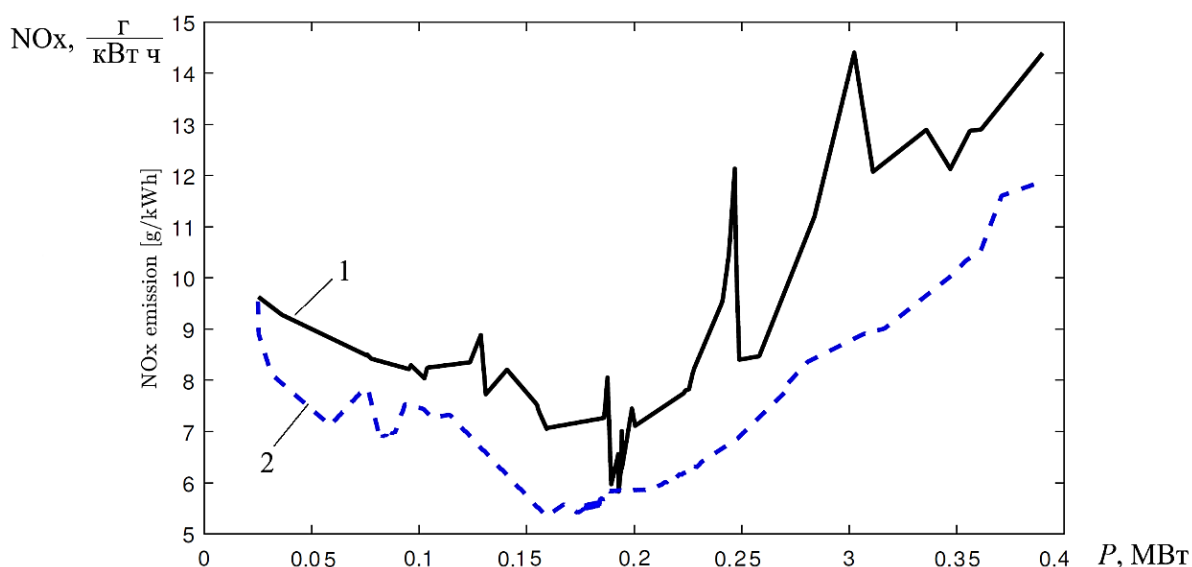


Рис. 3. Сравнение выбросов NOx дизельного двигателя «Perkins 2506C» ($P_n = 0,4 \text{ MBm}$), работающего с неизменной (1) и с регулируемой (2) частотой вращения вала / Fig. 3. Comparison of NOx emissions of a Perkins 2506C diesel engine ($P_n = 0.4 \text{ MW}$) operating at constant (1) and variable (2) shaft speed

Из рис. 3 видно, что при переходе дизеля ДГУ с постоянной частоты вращения на переменную, удельный выброс NOx может быть снижен до 40 %.

В [16] предложена конструкция бесщеточного самовозбуждающего АСГ с системой возбуждения, отличающаяся от рассмотренной в [15, стр. 63] схемы и имеющая более широкие функциональные возможности, в частности возможность распределения активной и реактивной мощности между параллельно работающими с АСГ генераторами. ВГУ, выполненные на основе АСГ, могут быть использованы на судах, оборудованных винтом фиксированного шага, составляющих большую часть эксплуатируемых судов, т. е. имеют потенциальную возможность более широкого применения.

Постановка задачи. Выявление на основе анализа структуры энергоустановки, которая обеспечивает наибольшую технико-экономическую и экологическую эффективность первичных двигателей электрогенераторов.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. В литературных источниках [12, 13] стабилизация необходимого уровня вырабатываемого ДГУ напряжения обеспечивается регулированием тока в обмотке возбуждения генератора, а стабилизация частоты этого напряжения производится с помощью двухзвенного полупроводникового преобразователя частоты (ППЧ). При значительных мощностях ДГУ постоянное использование ППЧ приводит к снижению их коэффициента полезного действия (КПД). Кроме того, стоимость ППЧ мощностью $10^2 \dots 10^3 \text{ кВт}$ достаточно велика.

Одно из решений поставленной задачи заключается в том, чтобы выполнить ДГУ или ВГУ, работающие с переменной частотой вращения, с АСГ, предложенной в [16] конструкции. Структура СЭЭС с такими генераторами изображена на рис. 4а).

Следует отметить, что АСГ уже находят широкое применение в ветроэнергетике для выработки электроэнергии со стабильными параметрами [17], однако описания их использования в СЭЭС в известной литературе не найдено. Отсутствие АСГ в СЭЭС может быть объяснено двумя причинами. Во-первых, до недавнего времени они выполнялись в подавляющем большинстве случаев на основе машин двойного питания, которые конструктивно представляют собой асинхронную машину с фазным ротором. По надежности такие машины существенно проигрывают бесщеточным синхронным генераторам из-за наличия в их конструкции контактных колец, щеткодержателей и самих щеток. Во-вторых, бесщеточные АСГ, содержащие вращающийся трансформатор или бесщеточное возбуждающее устройство (обращенный синхронный генератор), до недавнего времени были малоприменимы для СЭЭС по той причине, что отсутствовала возможность распределения активных мощностей между синхронными генераторами (СГ) и АСГ. При реализации параллельной работы АСГ должен работать в режиме «ведущего», а СГ в режиме «ведомого». Распределение активных мощностей было возможно только путём воздействия на топливную рейку ДГУ с СГ.

Быстродействие такого способа невелико, а учитывая инерционность дизеля и эпизодические воздействия на гребном валу, обусловленные качкой судна, можно сделать вывод, что параллельная работа ДГУ с СГ и ВГУ с АСГ характеризовалась низкой устойчивостью.

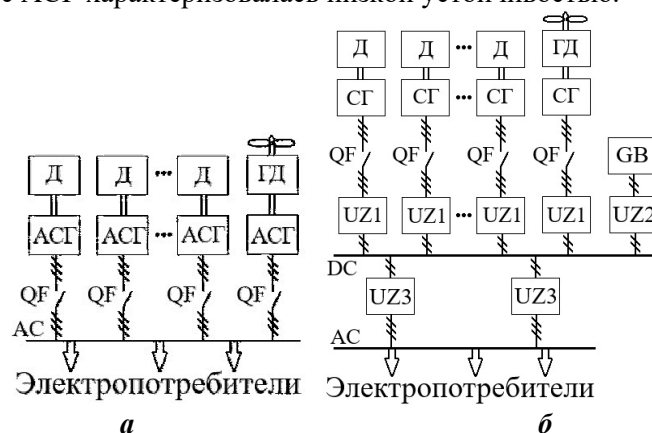


Рис. 4. Концепции энергоэффективных СЭЭС: а – с АСГ, б – с СГ:

Д – дизель ДГУ, ГД – главный дизель, QF – автоматический выключатель, АС, DC – шина переменного и постоянного тока соответственно, UZ1 – выпрямитель переменного тока, UZ2 – конвертор (DC-DC преобразователь), UZ3 – инвертор, GB – аккумуляторная батарея (ХИТ) / Fig. 4. Energy-efficient power systems (SEPS) concepts: a – with a self-powered generator (ASH), b – with a self-powered generator (SG): D – diesel generator, MG – main diesel generator, QF – circuit breaker, AC, DC – alternating current (AC) and direct current (DC) busbars, respectively, UZ1 – AC rectifier, UZ2 – converter (DC-DC converter), UZ3 – inverter, GB – storage battery (SBC)

Одиночная же работа АСГ на судовую суть в установках с переменной частотой вращения вполне возможна и, как показано выше, целесообразна. Однако, вероятно, в силу инерционности мышления в судостроительной электротехнической отрасли в качестве основных источников электроэнергии на судах повсеместно продолжают применяться и устанавливаются только СГ. Появившиеся на рынке частотные преобразователи с векторным управлением должны способствовать внедрению АСГ в СЭЭС.

Схема на рис. 4а целесообразна в том случае, если отклонение частоты вращения приводных АСГ дизелей от номинальной относительно невелико, в пределах 15...20 %. Такое ограничение обусловлено тем, что мощность обмотки возбуждения $P_{ОВ}$ прямо пропорциональна скольжению s :

$$P_{ОВ} = sP_{АСГ.Н}, \quad (1)$$

где $P_{АСГ.Н}$ – номинальная мощность АСГ.

Соответственно, при большом скольжении будут увеличиваться потери в роторной цепи АСГ, и потребуется больший по мощности, и соответственно, более дорогостоящий, частотный преобразователь, устанавливаемый в цепи обмотки возбуждения.

Достоинствами СЭЭС, выполненной по схеме рис. 4а, является её простота, высокий КПД и устойчивость, относительно невысокая стоимость. Раздельное управление параметрами генерируемой АСГ электроэнергии, с одной стороны, и частотами вращения их приводных дизелей – с другой, позволяет существенно упростить синхронизацию таких генераторов. Кроме того, благодаря тому, что регуляторы частоты вращения дизелей обеспечивают их работу с наименьшим удельным расходом топлива в зависимости от коэффициента их загрузки, а функции регулирования активной мощности, знака и величины реактивной мощности ($\cos \phi$) возложены на быстродействующие цифровые системы возбуждения каждого АСГ, достигается минимизация выбросов вредных веществ в атмосферу, а также лучшее качество электроэнергии в переходных режимах.

Другое решение поставленной задачи заключается в том, чтобы установить на выходе ДГУ и / или ВГУ, работающих с переменной частотой вращения, трёхфазные мостовые выпрямители переменного тока UZ1 (рис. 4б). Синхронизация генераторов на постоянном токе, как известно, намного проще, чем на переменном токе, а связанные через выпрямители переменного тока СГ могут работать несинхронно или с различными частотами, при одинаковых средних значениях выпрямленных напряжений их выпрямителей. В такую структуру могут быть легко интегрированы химические источники тока GB – электрические аккумуляторы или топливные элементы [18]. DC-DC преобразова-

тель UZ3 в первом случае выполняют двунаправленным, т. е. способным пропускать ток в обоих направлениях, во втором случае – однонаправленным.

Изображенная на рис. 4б схема может быть использована при значительно больших отклонениях частоты вращения приводных СГ дизелей от номинальной. При этом следует учитывать, что по мере снижения частоты вращения СГ должен быть увеличен на соответствующую величину ток его возбуждения, поскольку мгновенное значение генерируемой им ЭДС e пропорционально произведению угловой скорости ω и мгновенного магнитного потока:

$$e = \omega \Phi_m \sin \omega t, \quad (2)$$

где t – время.

Выполнение этого условия обеспечит неизменное выпрямленное напряжение и стабильную параллельную работу с другими генераторами.

Таким образом, предполагаемый диапазон отклонения частоты вращения каждого приводного дизеля от номинальной должен быть обеспечен соответствующим диапазоном изменения тока возбуждения каждого СГ.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.

Основным достоинством гибридной СЭЭС, выполненной по схеме рис. 4б, по сравнению с рассмотренной ранее схемой, является её большая гибкость, заключающаяся в возможности запасать избытки генерируемой СГ энергии в аккумуляторах, а также в возможности выдавать ими (аккумуляторами) большую мощность в энергосистему, когда это необходимо, снижая, тем самым, провалы напряжения в судовой сети. При этом обеспечивается лучший коэффициент загрузки работающих генераторов, а также лучшее качество электроэнергии в переходных режимах работы. А недостатком, ограничивающим широкое её применение, является высокая стоимость, обусловленная наличием дорогостоящих полупроводниковых преобразователей UZ1, UZ2, UZ3 и энергоёмкого ХИТ.

Оптимизация энергопотребления представленной на рис. 4б схемы гибридной СЭЭС может быть выполнена, например, на основе стратегии минимума эквивалентного потребления топлива (ГСМ).

Основная идея этой стратегии заключается в определении эквивалентного расхода топлива, необходимого для поддержания требуемого уровня заряда аккумуляторной батареи ΔSOC (**SOC – State of Charge**) относительно её емкости, заряжаемой только от судовой сети. Типовой график изменения уровня заряда SOC аккумуляторной батареи в процессе работы гибридной энергоустановки изображен на рис. 5.

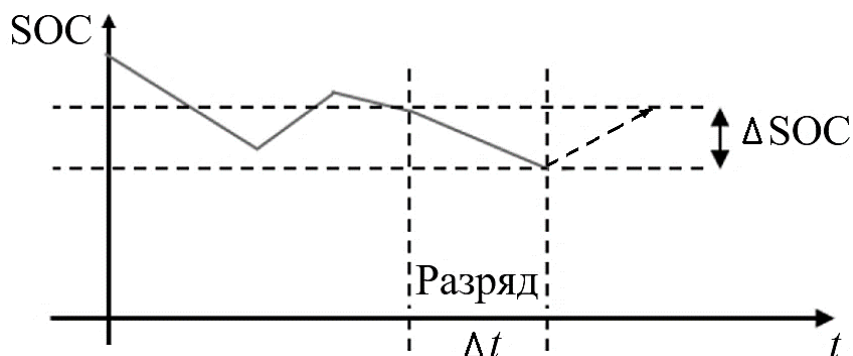


Рис. 5. График зависимости $SOC = f(t)$ аккумуляторной батареи в процессе работы гибридной энергоустановки /
Fig. 5. Graph of the $SOC = f(t)$ dependence of the battery during the operation of the hybrid power plant

Общий эквивалентный расход ГСМ, определяющий функцию стоимости (затрат) J , равен сумме фактического расхода ГСМ C_{eng} дизельного двигателя и эквивалентного расхода ГСМ C_{GB} , необходимого для поддержания требуемого уровня заряда аккумулятора. При минимизации общего эквивалентного расхода топлива, функция стоимости J (затрат) имеет вид

$$\min J = C_{eng} + C_{GB}. \quad (3)$$

Причем расход ГСМ C_{eng} может быть приблизительно определён с использованием кривой удельного расхода топлива (рис. 2), а расход ГСМ C_{GB} рассчитан по выражению [18]:

$$C_{GB} = k_1 \frac{SFC \cdot P_e}{k_2} \begin{cases} \text{if } M_e < 0: k = \frac{1}{\eta_e \eta_{GB}}, SFC = SFC_s \\ \text{if } M_e > 0: k = \eta_e \eta_{GB}, SFC = SFC_p \end{cases}, \quad (4)$$

где k_1 – коэффициент эквивалентности; k_2 – коэффициент пропорциональности ($k_2 = 3,6 \cdot 10^6$); P_e – мощность тягового (гребного) электродвигателя; SFC_s , SFC_p – средний расход ГСМ во время зарядки и разрядки аккумуляторной батареи, соответственно; M_e – вращающий (крутящий) момент тягового (гребного) электродвигателя (положительное значение M_e соответствует разрядке аккумуляторной батареи, а отрицательное – её зарядке); η_e и η_{GB} – КПД электродвигателя и аккумуляторной батареи, соответственно.

Закключение / Conclusion. В рассмотренных концепциях построения энергоэффективных СЭЭС в условиях переменной нагрузки возможна работа дизелей главных энергетических установок и ДГУ с переменной частотой вращения с наименьшим удельным расходом ГСМ, и соответственно, с наименьшими денежными издержками на их содержание. Гибридная СЭЭС, несмотря на её большую стоимость, характеризуется большей гибкостью, и позволяет улучшить коэффициент загрузки генераторов и их дизельных двигателей, что приводит к увеличению моторесурса последних и к дополнительному уменьшению концентрации вредных веществ в выхлопных газах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурков А. Ф. Оценка электрификации судов // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 2 (45). С. 76–78.
2. Бурков А. Ф., Миханюшин В. В. Гребные электрические установки: обзор, анализ, перспективы развития: монография. М.: ИНФРА-М, 2022. 199 с.
3. Миханюшин В. В., Бурков А. Ф. Гибридный пропульсивный комплекс прибрежного судна // Новое в российской электроэнергетике. 2025. № 9(333). С. 28–36.
4. Kanellos F. D., Anvari-Moghaddam A. & Guerrero J. M. A Cost-effective and emission-aware power management system for ships with integrated full electric propulsion // Electric power systems research. 2017. Vol. 150. P. 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.05.003>
5. Diju Gao, Xuyang Wang, Tianzhen Wang, Yide Wang and Xiaobin Xu. An energy optimization strategy for hybrid power ships under load uncertainty based on load power prediction and improved NSGA-II algorithm // Energies. 2018. No. 11(7). P. 1699. <https://doi.org/10.3390/en11071699>
6. Yupeng Yuan, Tianding Zhang, Boyang Shen, Xinping Yan and Teng Long. A fuzzy logic energy management strategy for a photovoltaic/diesel/battery hybrid ship based on experimental database // Energies. 2018. No. 11(9). P. 2211. <https://doi.org/10.3390/en11092211>
7. Qicheng Xue, Xin Zhang, Teng Teng, Jibao Zhang, Zhiyuan Feng and Qinyang Lv. A comprehensive review on classification, energy management strategy, and control algorithm for hybrid electric vehicles // Energies. 2020. No. 13(20). P. 5355. <https://doi.org/10.3390/en13205355>
8. Al-Falahi M., Tarasiuk T., Jayasinghe S., Jin Z., Enshaei H. and Guerrero J. AC ship microgrids: control and power management optimization // Energies. 2018. No. 11(6). P. 1458. <https://doi.org/10.3390/EN11061458>
9. Huilong Yu, Francesco Castelli-Dezza, Federico Cheli, Xiaolin Tang and oth. Dimensioning and power management of hybrid energy storage systems for electric vehicles with multiple optimization criteria // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. No. 36(5). P. 5545-5556.
10. Pan X, Zhu X and Zhao F. More environmental sustainability routing and energy management for all electric ships // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.821236> (In China).
11. Manasa B., Vaisakh K. Optimal shipboard power management by classical and differential evolution methods // International research journal of engineering and technology (IRJET). 2019. No. 6(9). P. 269-279.
12. Хватов О. С., Тарпанов И. А. Сравнительный анализ энергетических показателей судовой электростанции на базе классических дизель-генераторных установок и электростанции с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 79–84.
13. Обухов С. Г., Плотников И. А. Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 6. С. 95–102.
14. Zhenying Wu, Laxminarayan Thorat, Roger Skjetne. Comparison of fuel consumption on a hybrid marine power plant with low power versus high-power engines // NTNU. Norwegian University of Science and Technology, 2017. P. 97.
15. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография. СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. 176 с.
16. Миханюшин В. В., Бурков А. Ф., Нгуен Ван Ха. Повышение энергоэффективности судовых электростанций // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы VII Национальной (Все-

русской) научно-технической конференции (14–15 ноября 2024 г.). Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2025.

17. Котов А. А. Проектирование и анализ АСГ для ветроэнергетических установок большой мощности: дис ... канд. техн. наук: 05.09.01. Екатеринбург, 2021. 172 с.
18. Chua W. Y., Liza. A strategy for power management of electric hybrid marine power systems. Doctoral thesis. Nanyang Technological University. Singapore, 2019. P. 207.

REFERENCES

1. Burkov AF, Assessment of Ship Electrification. Transport of the Russian Federation. 2013;2(45):76-78. (In Russ.).
2. Burkov AF, Mikhanoshin VV. Rowing electric installations: overview, analysis, and development prospects: monograph. Moscow: INFRA-M; 2022. 199 p. (In Russ.).
3. Mikhanoshin VV, Burkov AF. Hybrid propulsion complex of a coastal vessel. New in Russian Electric Power Engineering. 2025; (333):28-36. (In Russ.).
4. Kanellos FD, Anvari-Moghaddam A & Guerrero JM. A Cost-effective and Emission-aware Power Management System for Ships with Integrated Full Electric Propulsion. Electric Power Systems Research. 2017. Vol. 150, P. 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.05.003>
5. Diju Gao, Xuyang Wang, Tianzhen Wang, Yide Wang and Xiaobin Xu. An energy optimization strategy for hybrid power ships under load uncertainty based on load power prediction and improved NSGA-II algorithm. Energies. 2018;11(7):1699. doi:10.3390/en11071699
6. Yupeng Yuan, Tianding Zhang, Boyang Shen, Xiping Yan and Teng Long. A fuzzy logic energy management strategy for a photovoltaic/diesel/battery hybrid ship based on experimental database. Energies. 2018;11(9):2211. <https://doi.org/10.3390/en11092211>
7. Qicheng Xue, Xin Zhang, Teng Teng, Jibao Zhang, Zhiyuan Feng and Qinyang Lv. A comprehensive review on classification, energy management strategy, and control algorithm for hybrid electric vehicles. Energies. 2020;13(20):5355. <https://doi.org/10.3390/en13205355>
8. M. Al-Falahi, T. Tarasiuk, S. Jayasinghe, Z. Jin, H. Enshaei, and J. Guerrero, AC ship microgrids: control and power management optimization. Energies. 2018;11(6):1458. <https://doi.org/10.3390/EN11061458>
9. Huilong Yu, Francesco Castelli-Dezza, Federico Cheli, Xiaolin Tang and oth. Dimensioning and power management of hybrid energy storage systems for electric vehicles with multiple optimization criteria. IEEE Transactions on Power Electronics. 2021;36(5):5545-5556.
10. Pan X, Zhu X and Zhao F. More environmental sustainability routing and energy management for all electric ships. Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.821236> (In China)
11. Manasa B., Vaisakh K. Optimal shipboard power management by classical and differential evolution methods. International research journal of engineering and technology (IRJET). 2019;6(9):269-279.
12. Khvatov OS, Tarpanov IA. Comparative analysis of the energy performance of a ship's power plant based on classic diesel-generator sets and a power plant with a variable-speed diesel-generator set. Vestnik ASTU. Series: Marine Engineering and Technology. 2022;(1):79-84. (In Russ.).
13. Obukhov SG, Plotnikov IA. Experimental studies of a diesel-generator set at variable rotational speed. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2015;326(6):95-102. (In Russ.).
14. Zhenying Wu. Comparison of fuel consumption on a hybrid marine power plant with low power versus high-power engines. NTNU. Norwegian University of Science and Technology; 2017. P. 97.
15. Grigoriev AV. Modern and promising ship shaft generator installations: monograph. St. Petersburg: publishing house of the Admiral SO. Makarov State Marine Academy; 2009. 176 p. (In Russ.).
16. Mikhanoshin VV, Burkov AF, Nguyen Van kha. Improving the energy efficiency of ship power plants. Technical operation of water transport: problems and development paths : Proceedings of the seventh national (All-Russian) scientific and technical conference (November 14–15, 2024). Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatGTU; 2025. (In Russ.).
17. Kotov AA. Design and analysis of ASG for high-power wind energy plants: 05.09.01. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences; 2021. 172 p. (In Russ.).
18. Chua WY, Liza. A strategy for power management of electric hybrid marine power systems. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore; 2019. P.207.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Викторович Миханосин – кандидат технических наук, доцент кафедры Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского, Scopus ID: 0000-0001-6741-0061, Researcher ID: NES-8102-2025

Алексей Фёдорович Бурков – доктор технических наук, профессор, Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского, Scopus ID: 56800300900, Researcher ID: AAH-7374-2019

ВКЛАД АВТОРОВ

Виктор Викторович Миханович

Поиск технических решений, направленных на повышение энергоэффективности и экологичности энергетических установок морских судов. Подготовка и редактирование текста.

Алексей Фёдорович Бурков

Проведение исследования – анализ эксплуатационных недостатков эксплуатирующихся энергетических и электроэнергетических установок и систем морского транспорта. Постановка целей и задач исследования. Утверждение окончательного варианта статьи.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Mikhanoshin – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Admiral Nevelskoy Maritime State University, Scopus ID: 0000-0001-6741-0061, Researcher ID: NES-8102-2025

Aleksey F. Burkov – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Admiral Nevelskoy Maritime State University, Scopus ID: 56800300900, Researcher ID: AАН-7374-2019

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Viktor V. Mikhanoshin

Search for technical solutions aimed at improving the energy efficiency and environmental friendliness of marine vessels' power plants. Text preparation and editing.

Aleksey F. Burkov

Conducting research – analysis of operational shortcomings of operating energy and electric power installations and systems of sea transport. Setting the goals and objectives of the study. Approval of the final version of the article.