

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES



2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.31

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.5.1>

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СУДОВ

Виктор Викторович Миханосин^{1*}, Алексей Фёдорович Бурков²,
Виктор Александрович Седов³

^{1, 2, 3} Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского (д. 50а, ул. Верхнепортовая, Владивосток, 690003, Российская Федерация)
¹ tetrodoksia@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6741-0061>
² burkov.22@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0004-3016-6317>
³ Sedov@msun.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1503-6626>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Несмотря на ряд разработанных нормативно-правовых актов, в числе которых «Первоначальная стратегия ИМО (Международной морской организации) по сокращению выбросов парниковых газов с судов», поправки к приложению VI «Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ)», НД 2-020101-163 «Правила по предотвращению загрязнения с судов, эксплуатирующихся в морских районах и на внутренних водных путях Российской Федерации» и др., изменения в отечественном судостроении в этом направлении малозаметны, а морской транспорт продолжает эксплуатироваться и в неэкономичных режимах с относительно высокими вредными выбросами. Такие режимы характерны прежде всего судам технического флота (СТФ), а также судам прибрежного и внутрипортового плавания (СПВП), которые работают с частыми маневренными и долевыми режимами. Поэтому актуальными являются задачи модернизации силовых электроэнергетических установок таких судов с целью повышения их энергоэффективности и экологичности. Однако развитие сухопутных дорог иногда приводит к тому, что прибрежные морские сообщения, широко использовавшиеся в недалеком прошлом, могут быть практически полностью необоснованно прекращены. А устаревающий флот прибрежного плавания перестает обновляться. **Цель.** Обоснование необходимости развития прибрежных морских сообщений, а также исследование основных направлений модернизации силовых электроэнергетических установок STF и СПВП. **Материалы и методы.** Один из способов решения данной многофакторной задачи заключается в применении комбинированных электроэнергетических установок. На примере г. Владивостока показано, что прибрежные грузопассажирские перевозки, несмотря на их сезонность, имеют существенные преимущества перед сухопутными перевозками. **Результаты и обсуждения.** Суда, оборудованные предложенной комбинированной электростанцией, содержащей разнотипные источники энергии, свободны от вышеперечисленных недостатков и отвечают требованиям нормативно-правовых актов. Достигается ряд положительных эффектов. Во-первых, снижение таких вредных выбросов в атмосферу дизельными двигателями, как оксиды азота (NOx), серы (SOx), углерода (CO и CO₂) и сажи. Во-вторых, снижение расхода горюче-смазочных материалов. В-третьих, больший моторесурс дизельных двигателей. **Заключение.** Модернизация электроэнергетических установок путём их гибридизации позволяет повысить эколого-экономические показатели судов, работающих с частыми маневренными и долевыми режимами. Суда с предложенной структурой силовой дизель-аккумуляторной энергоустановки, несмотря на несколько большую их строительную стоимость по сравнению с обычными дизельными судами, характеризуются пониженными эксплуатационными затратами на их содержание и отвечают требованиям отечественных и международных нормативно-правовых актов по сокращению выбросов парниковых газов с судов.

Ключевые слова: коэффициент загрузки, аккумуляторная батарея, гибридная энергоустановка, судно, энергоэффективность

Для цитирования: Миханосин В. В., Бурков А. Ф., Седов В. А. Модернизация электроэнергетических установок судов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 5(110). С. 9–17. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.5.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025;

одобрена после рецензирования 20.06.2025;

принята к публикации 01.08.2025.

Research article

MODERNIZATION OF ELECTRIC POWER INSTALLATIONS OF SHIPS

Viktor V. Mikhannoshin^{1*}, Aleksey F. Burkov², Viktor A. Sedov³

^{1, 2, 3} Admiral G. I. Nevelsky Maritime State University (50a Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690003, Russian Federation)
¹ tetrodoksia@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6741-0061>
² burkov.22@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0004-3016-6317>
³ Sedov@msun.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1503-6626>
* Corresponding author

Abstract. Introduction. Despite a number of developed regulatory and legal acts, including the “Initial IMO (International Maritime Organization) Strategy for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships”, amendments to Annex VI of the “International Convention for the Prevention

of Pollution from Ships (MARPOL)", ND 2-020101-163 "Rules for the Prevention of Pollution from Ships Operating in Marine Areas and Inland Waterways of the Russian Federation", etc., changes in domestic shipbuilding in this area are barely noticeable, and maritime transport continues to be operated, including in uneconomical modes with relatively high harmful emissions. Such modes are typical primarily for technical fleet vessels, as well as coastal and in-port navigation vessels, which operate with frequent maneuvering and share modes. Therefore, the tasks of modernizing the power plants of such vessels in order to increase their energy efficiency and environmental friendliness are urgent. However, the development of land roads sometimes leads to the fact that coastal sea communications, widely used in the recent past, can be almost completely unjustifiably terminated. The aging coastal navigation fleet ceases to be updated. **Goal.** The study aims to provide the reasoning for the need to develop coastal sea communications, as well as the study of the main directions of modernization of power electric power plants of technical fleet vessels and coastal and in-port navigation vessels. **Materials and methods.** One of the ways to solve this multifactorial problem is to use combined electric power plants. Using the example of Vladivostok, it is shown that coastal cargo and passenger transportation, despite its seasonality, has significant advantages over land transportation. **Results and discussions.** Vessels equipped with the proposed combined power plant containing different types of energy sources are free from the above-mentioned shortcomings and meet the requirements of regulatory and legal acts. **Conclusion.** Modernization of electric power plants by their hybridization allows improving the ecological and economic indicators of vessels.

Keywords: load factor, rechargeable battery, hybrid power plant, ship, energy efficiency

For citation: Mikhaynoshin VV, Burkov AF, Sedov VA. Modernization of Electric Power Installations of Ships. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;5(110):9-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.5.1>

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

The article was submitted 20.05.2025;

approved after reviewing 20.06.2025;

accepted for publication 01.08.2025.

Введение / Introduction. На современном этапе развития судостроения общепризнанного определения в группировании судов по водоизмещению и мощности силовых установок не существует. Исходя из действующих классификационных признаков, суда, функционирующие в частых маневренных и долевых режимах, можно условно объединить в отдельную группу. К характерным эксплуатационным особенностям таких судов относятся относительно низкие технико-экономические и экологические показатели. Нередко суда технического флота (СТФ) и суда прибрежного и внутриводного плавания (СПВП) оснащены гребными электрическими установками (ГЭУ). Это объясняется преимущественно тем фактом, что, несмотря на относительно большую их первоначальную стоимость по сравнению с дизельными установками, суда с ГЭУ (электроходы) имеют ряд неоспоримых преимуществ, основные из которых приведены в [1]. В частности, в переходных режимах первичные дизельные двигатели синхронных генераторов менее нагружены, а в установившихся режимах нагрузка на них может достигать практически номинальных значений, что сопровождается минимальным содержанием в выхлопных газах вредных веществ. При этом увеличивается моторесурс этих двигателей и снижается скорость закоксовки их поршневых колец.

На электроходах большого водоизмещения, у которых в составе пропульсивных установок, как правило, несколько источников энергии (дизель-генераторных агрегатов (ДГА)), номинальные значения нагрузок первичных двигателей в различных режимах работы судов обеспечиваются их одиночным или групповым функционированием. В долевых режимах часть ДГА находится в отключенном состоянии, а оставшиеся в работе имеют коэффициент загрузки k_z , близкий к номинальному k_{zn} . Однако на СТФ и СПВП с ГЭУ обычно применяются более простые схемные решения пропульсивных установок, включающие, как правило, один главный двигатель и один гребной электродвигатель, поэтому обеспечить номинальный k_{zn} во многих эксплуатационных режимах не представляется возможным, т. е. технико-экономическая эффективность таких судов сравнительно низкая.

Загрязнение действующими судами акваторий и районов крупных морских портов, в частности, Владивостока, ухудшает их и без того напряженную экологическую обстановку, увеличивая загрязнение окружающей среды, снижая туристическую привлекательность и т. д. Извилистая береговая линия города Владивостока с её глубоко врезающимися бухтами и заливами (рис. 1) обуславливает целесообразность применения прибрежных морских сообщений, так как расстояние по воде до расположенных, например, на побережье по обе стороны полуострова Муравьев-Амурский населенных пунктов, составляющее десятки километров, значительно меньше длины автодорог. До постройки вантовых мостов через бухту Золотой Рог и пролив Босфор Восточный малыми грузопассажирскими и пассажирскими судами (катерами и паромками) перевозилось порядка 8 млн пассажиров в год. Однако после введения этих мостов в эксплуатацию прибрежные морские сообщения были значительно сокращены или отменены как нерентабельные.

Отказ от такого морского пассажирского транспорта привел к тому, что переместиться с одного мыса (полуострова) на другой близлежащий или отдаленный мыс (полуостров) стало возможным только по автодорогам. С учетом их значительной длины и транспортных заторов временные и финансовые затраты горожан значительно возросли.

Отсюда целью статьи является обоснование необходимости и целесообразности развития прибрежного морского сообщения, а также исследование основных направлений модернизации силовых электроэнергетических установок СТФ и СПВП.

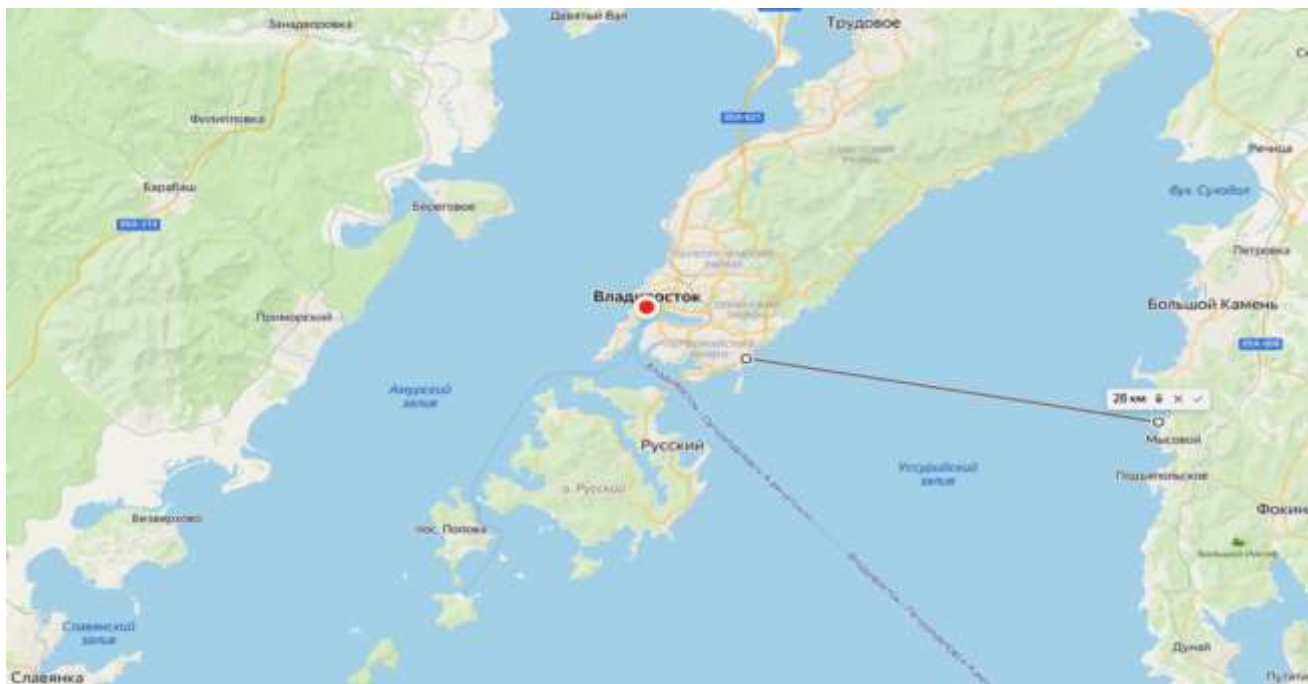


Рис. 1. Географическое расположение города-порта Владивосток /

Fig. 1. Geographical location of the port city of Vladivostok

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Основной альтернативой перегруженным автомобильным дорогам дальневосточной столицы в силу полуостровного её положения, отсутствия метрополитена и других географических особенностей является морской прибрежный транспорт. Прибрежные морские сообщения характеризуются рядом преимуществ по сравнению с другими видами транспорта: пониженные риски как порчи и повреждения транспортируемых грузов, так и возникновения аварийных ситуаций; относительно низкая себестоимость транспортировки; доступность и отсутствие необходимости затрат на постоянное поддержание морских транспортных путей; более широкие возможности перевозки негабаритных грузов и т. д. Кроме того, морские транспортные сообщения в отличие от сухопутных имеют практически неограниченные пропускные способности грузопотокам (объемам перевозимых грузов) и пассажиропотокам.

В общем случае к морским сообщениям (перевозкам), включая прибрежные, относятся грузовые или пассажирские обмены между прибрежными населенными пунктами (портами), которые осуществляются по морским путям (воде).

К отличительным особенностям Приморья относится продолжительность навигационных периодов, составляющая ориентировочно шесть месяцев. Использование нескольких различных видов транспорта в этом регионе позволяет существенно снизить нагрузку на автодорожную транспортную сеть прибрежных населенных пунктов (портов) в этот временной промежуток, уменьшить транспортные заторы на автодорогах, снижая при этом загазованность атмосферного воздуха выхлопными газами автотранспорта.

Учитывая географические особенности акватории Владивостока, характеризующиеся изрезанностью береговых линий, наличием узких и длинных Амурского и Уссурийского заливов и бухт (Золотой Рог, Новик, Улисс и др.), морские сообщения позволяют за значительно меньшее время преодолевать расстояния между пунктами отправления и назначения.

Регулярные морские сообщения до отдалённых населенных пунктов, расположенных на островах Русский, Попова и Рейнеке, будут определенно способствовать улучшению качества жизни проживающих на островах, развитию туризма и, как следствие, росту пополнения городского бюджета.

При развитии судовых комбинированных установок целесообразно использовать – с учетом специфики условий эксплуатации морских судов, включая СТФ и СПВП, – опыт сухопутного транспортного гибридоустройства, так как комбинированные (гибридные) установки, обычно дизель-аккумуляторные, в настоящее время получают всё большее распространение на сухопутном автотранспорте: от легковых автомобилей до карьерных самосвалов, – и на рельсовом транспорте: контактно-аккумуляторных электропоездах и др. [2, 3, 4]. Такой гибридный транспорт представляется более экономичным по сравнению с обычным дизельным, в частности, при движении по коротким маршрутам.

Модернизация силовых электроэнергетических установок СТФ и СПВП может быть обеспечена путем включения в структуры их электростанций (ЭС) помимо традиционных ДГА дополнительных источников электрической энергии в виде химических источников тока – аккумуляторных батарей (АБ).

На современном этапе развития судовой электротехники применяются структуры ЭС как с разнотипными источниками (ДГА и АБ) [5], так и выполненные только на АБ [6, 7]. Современные АБ (литий-титанатные (ЛТО), литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (LiNiCoAlO₂, NCA), литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (Li-NMC), литий-железо-фосфатные (LiFePO₄ или LFP) и др.) имеют гораздо лучшие энергетические характеристики по сравнению с ранее использовавшимися свинцово-кислотными, никель-кадмиевыми и железоникелевыми аккумуляторами [8]. Так, Li-NMC батареи имеют плотность энергии 150–220 кВт·ч/кг, а количество циклов «заряд – разряд» превышает 1000 при глубине разряда до 80 %. Поэтому главными источниками энергии ЭС прибрежных судов, эксплуатирующихся в акватории Владивостока, могут быть преимущественно АБ.

Суда, снабженные, например, АБ литий-титанатного типа, с числом циклов «заряд – разряд» порядка 25 000, способны осуществлять транспортные перевозки без выбросов в атмосферу до 25 лет. Туристические катера на АБ без традиционных дизельных установок на борту обладают повышенной комфортностью для пассажиров, так как бесшумны в работе, имеют пониженную вибрацию и практически не имеют вредных выбросов в окружающую атмосферу, свойственных судам с дизельными главными двигателями. Для эффективной зарядки АБ, позволяющей при этом непрерывно контролировать техническое состояние отдельных входящих в неё элементов, предложено зарядное устройство, защищенное патентом на изобретение [9].

Для СТФ с относительно большими мощностями ЭС (плавающих кранов, якорезаводчиков и др.) использование одних АБ экономически нецелесообразно по причине их высокой стоимости. Компромиссный вариант структуры ЭС, имеющий относительно невысокую стоимость и характеризующийся лучшими эколого-энергетическими характеристиками по сравнению с дизельными ЭС, может быть выполнен на основе другого технического решения, также защищенного патентом на изобретение [10]. Суть данного решения заключается в том, что, вместо того чтобы поддерживать «горячий» резерв ДГА, расходуя при этом дорогостоящее дизельное топливо, на судне устанавливается буферный накопитель энергии в виде АБ с инвертором (рис. 2).

В долевых и маневренных режимах работы судна двигатели ДГА 1 и 2 (рис. 2) могут быть отключены, а источником энергии ЭС и электропотребителей I является АБ 4, которая подключена к шинам главного распределительного щита (ГРЩ) через обратимый полупроводниковый преобразователь (ОПП) 5, работающий в инверторном режиме, и включенные силовые коммутационные аппараты (КА) 10, 12, 13 и 14.

При разрядке АБ 4 (рис. 2) до некоторого фиксированного значения системой дистанционного автоматизированного управления запускаются, синхронизируются с ОПП 5 и подключаются посредством замыкания силовых КА 7 и 8 на шины ГРЩ один или два ДГА 1 и 2. Благодаря параллельной работе нескольких источников энергии мощность ЭС увеличивается. При снижении мощности потребителей избыточной электроэнергией с шин ГРЩ производится подзарядка АБ 4 от работающих ДГА посредством ОПП 5, работающего при этом в выпрямительном режиме. От ДГА отбирается такое количество электроэнергии, при котором их коэффициент загрузки k_z остается практически номинальным ($k_z \approx k_{zn}$). Таким образом, АБ 4 используется в буферном режиме, аналогично её использованию в гибридных установках автотранспорта, для повышения энергетической эффективности и экологических показателей ЭС.

При полной зарядке АБ 4 (рис. 2) ДГА 1 и 2 отключаются от шин ГРЩ и останавливаются. Источником энергии ЭС для электропотребителей I вновь будет являться АБ 4. Кроме того, при работе судна в номинальном ходовом режиме при необходимости может быть также использован валогенератор 3, который синхронизируется с работающими на шины ГРЩ ДГА и/или ОПП 5 и подключается

на эти шины посредством замыкания силового КА 9. ДГА 1 и 2 при этом могут быть отключены и остановлены.

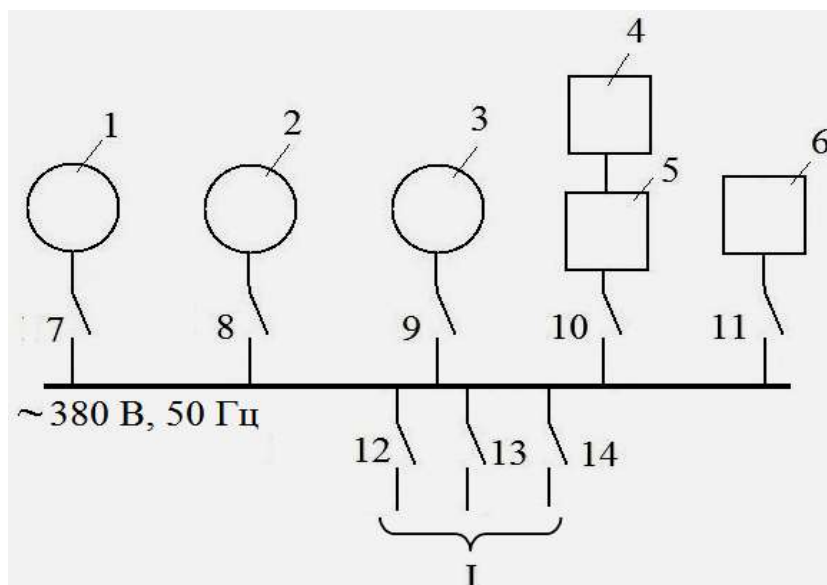


Рис. 2. Структура СЭС с несколькими ДГА и АБ / Fig. 2. Ship power plant structure with multiple diesel generator sets and a battery bank

Таким образом, благодаря возможности отключения ДГА в долевых режимах и снижения на них нагрузки в переходных режимах обеспечивается возможность повышения энергоэффективности и улучшения экологических характеристик пропульсивных установок судов.

Следует отметить, что предложенная структура может быть применена и на судах большого водоизмещения, например, перегружателях, грейферных земснарядах и пр. Электроэнергетическим установкам таких судов характерен резко переменный, циклический график нагрузки, а k_z их ДГА не превышает 0,5...0,6, что обусловлено необходимостью наличия в судовой ЭС достаточного резерва мощности. Очевидно, что первичные дизели генераторов при этом работают не в оптимальных по удельному расходу топлива режимах. Приводы мощных технологических установок таких судов могут вырабатывать электроэнергию при каждом опускании тяжёлого груза, работая в рекуперативном режиме. Генерируемую ими при этом электроэнергию, а также излишки электроэнергии, вырабатываемой ДГА, целесообразно запасать в АБ, работающей в буферном режиме. Для судов с комбинированными электроэнергетическими установками разработан ряд топологий силовых схем и стратегий управления ими [11]. Шины ГРЩ могут быть выполнены на постоянном или на переменном токе (рис. 3).

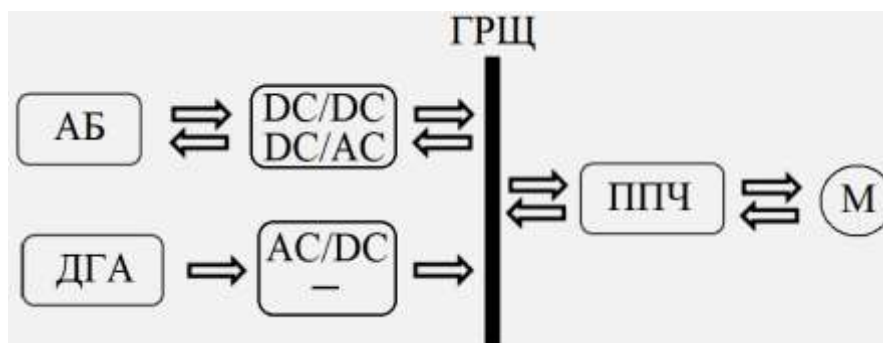


Рис. 3. Обобщенная структурная схема комбинированной электроэнергетической установки / Fig. 3. Generalized structural diagram of a combined power plant

В первом случае АБ связана с ГРЩ через обратимый (двунаправленный) конвертор постоянного тока (DC/DC-преобразователь), ДГА связан с ГРЩ через выпрямитель постоянного тока (AC/DC-преобразователь), а электродвигатель М получает питание от шин ГРЩ через полупроводниковый преобразователь частоты (ППЧ), выполненный в виде обратимого (двунаправленного) инвертора.

Во втором случае АБ связана с шинами ГРЩ через обратимый инвертор (DC/AC-преобразователь), ДГА подключен к шинам напрямую, а электродвигатель М получает питание от шин ГРЩ через ППЧ, выполненный в виде обратимого двухзвенного преобразователя частоты.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Далее приведен пример приближенного расчета экономии электроэнергии и параметров АБ при мощности P асинхронного привода технологической установки, равной 90 кВт, и напряжении U на шинах, равном 380 В.

Активная составляющая тока асинхронного двигателя I_a , работающего в рекуперативном режиме, рассчитывается по формуле

$$I_a = \frac{P}{\sqrt{3}U\eta_m} \approx 147 \text{ А}, \quad (1)$$

где $\eta_m = 0,93$ – коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя, работающего в рекуперативном режиме.

Выходной ток трехфазного мостового выпрямителя (AC/DC) I_d полагается равным зарядному току I_z АБ, и определяется как

$$I_z = I_d = \frac{I_a}{\sqrt{2/3}} \approx 180 \text{ А}. \quad (2)$$

Ёмкость C_{AB} АБ литий-ионного типа может быть выражена из соотношения

$$C_{AB} = \frac{I_z}{(0,5...2,0)} \approx (90...360) \text{ А} \cdot \text{ч}. \quad (3)$$

При выборе наименьшего значения ёмкости C_{AB} , составляющего 90 А·ч, АБ будет иметь небольшую стоимость, относительно быстро заряжаться / разряжаться, и, как следствие, достаточно быстро изнашиваться.

Выходное напряжение выпрямителя при холостом ходе U_{d0}

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_\phi \approx 514 \text{ В}, \quad (4)$$

где U_ϕ – фазное напряжение асинхронного двигателя.

При зарядном напряжении одного элемента $U_{зАБ1}$, равном 4,2 В, число последовательно соединенных элементов, с учетом (4), будет составлять около 123.

Полагая, что КПД преобразователей $\eta_{ППЧ}$, $\eta_{DC/DC}$ и АБ η_{AB} имеют одинаковые значения, составляющие 0,96, а суммарная продолжительность опускания груза t_{on} за смену равна 1,5 ч, количество энергии Q , полученное АБ, определяется как

$$Q = P t_{on} \eta_m \eta_{ППЧ} \eta_{DC/DC} \eta_{AB} \approx 111 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (5)$$

Данное количество энергии Q позволяет оценить сэкономленный объем и стоимость горюче-смазочных материалов, а также снижение вредных выбросов в атмосферу.

Предложенная комбинированная энергоустановка также может быть использована и для судов на подводных крыльях. В этом случае суммирование мощности источников энергии целесообразно выполнять не электрическим путём, как показано на рис. 3, а механическим (рис. 4).

Благодаря высокой токоотдаче современных АБ, достигающей (5-10)С и более, где C – ёмкость АБ в А·ч, обеспечивается высокая мощность электрической машины 7 при достаточно компактных размерах аккумуляторного блока. А подключение этой машины 7, работающей в двигательном режиме, к дизелю через суммирующий редуктор при разгоне судна позволяет достаточно быстро преодолеть горб сопротивления и встать ему на крыло. При этом нет необходимости иметь мощный ГД. Достигаемая экономия топлива гибридного судна по сравнению с дизельным показана на рис. 5 [12].

Лучший эколого-экономический эффект достигается за счет того, что используется меньший по мощности практически в два раза ГД, работающий в режимах, близких к номинальному. Динамические нагрузки (разгон судна) реализуются за счет электрической части схемы рис. 4, т. е. за счет подключаемой с помощью муфты 8 и редуктора 4 синхронной машины 7 как электродвигателя с её АБ 10 и ОПП 9.

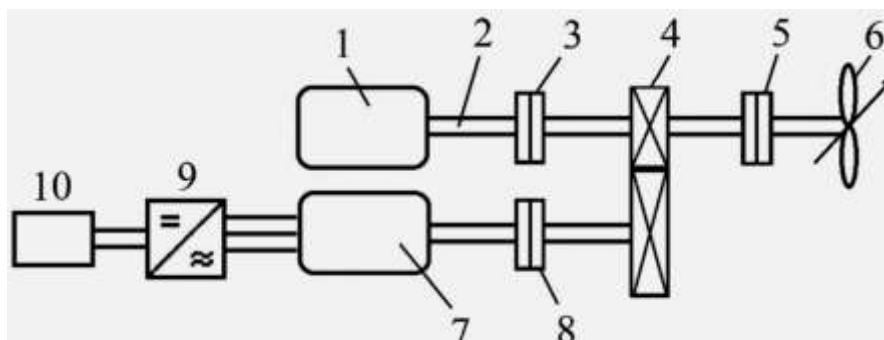


Рис. 4. Структурная схема гибридной силовой установки: 1 – главный дизельный двигатель (ГД), 2 – валопровод, 3 – разобщительная муфта, 4 – суммирующий редуктор, 5 – разобщительная муфта, 6 – гребной винт регулируемого шага, 7 – синхронная машина обратимого типа, 8 – разобщительная муфта, 9 – ОПП, 10 – АБ / Fig. 4. Structural diagram of a hybrid power plant: 1 – main diesel engine (HD), 2 – shaft line, 3 – uncoupling clutch, 4 – summing gearbox, 5 – uncoupling clutch, 6 – adjustable pitch propeller, 7 – reversible synchronous machine, 8 – uncoupling clutch, 9 – OPP, 10 – AB

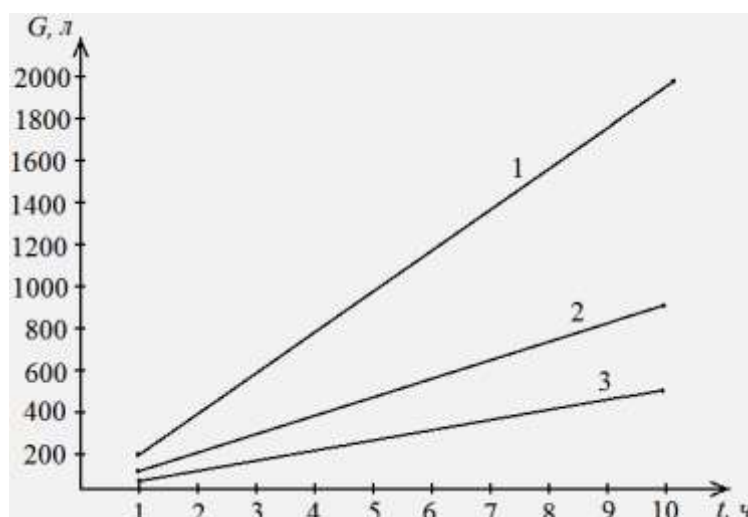


Рис. 5. Зависимость экономии топлива от продолжительности рейса судов на подводных крыльях: 1 – «Комета», 2 – «Восход», 3 – «Полесье» / Fig. 5. Dependence of fuel savings on the duration of a hydrofoil voyage: 1 – Kometa, 2 – Voskhod, 3 – Polesye

При движении судна с относительно небольшой скоростью и, соответственно, при наличии избыточной мощности ГД, она может быть полезно использована для подзарядки АБ. Синхронная машина 7 при этом работает как генератор, создавая дополнительный тормозной момент на валу ГД. Таким образом, обеспечивается коэффициент загрузки ГД, близкий к номинальному независимо от потребляемой двигателем мощности. А требуемая скорость судна устанавливается путём регулирования угла атаки лопастей винта регулируемого шага и изменения режима (двигательный или генераторный) и мощности синхронной машины 7.

Работающий в номинальном установившемся режиме дизельный двигатель характеризуется, как известно, минимальным удельным расходом топлива, минимальным нагарообразованием, наименьшим содержанием вредных веществ в выхлопных газах и наибольшим моторесурсом.

Следует отметить, что изображенная на рис. 4 схема предложенной гибридной силовой установки, на которую также получен патент [13], характеризуется более высоким КПД по сравнению с обобщенной схемой на рис. 3 благодаря меньшему числу полупроводниковых преобразователей, и тому, что ГД связан с двигателем напрямую.

Заклучение / Conclusion. На основании выполненных исследований, основные результаты которых приведены в статье, обоснована необходимость и целесообразность развития прибрежного морского сообщения. Определены основные направления модернизации силовых электроэнергетических установок СТФ и СПВП с целью повышения их технико-экономических и экологических показателей.

лей, связанные с использованием современных химических источников тока и достижениями в области полупроводниковой техники [14]. Применение в судовых пропульсивных установках разнотипных источников энергии, включая АБ, способствует повышению их энергетической эффективности и улучшению экологических характеристик, имеет широкие перспективы использования, в частности, для судов прибрежного плавания, используемых для акваторий городов-портов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурков А. Ф., Миханюшин В. В. Гребные электрические установки: обзор, анализ, перспективы развития. М.: ИНФРА-М, 2022. 199 с.
2. Селифонов В. В. [и др.]. Гибридные автомобили – решение экологической проблемы автомобильного транспорта // Известия МГТУ «МАМИ». 2007. № 2(4).
3. Павлюченко В. С., Сапрыкин И. К., Федоринов В. Н. Гибридные автомобили – решение экологической проблемы // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Воронеж, 2018. С. 336–340.
4. Алямкина Д. И. [и др.]. Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта // Электротехника. 2015. № 1. С. 5–8.
5. Geertsma R. D., Negenborn R. R., Visser K. & Hopman J. J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*. 2017. No. 194. P. 30–54.
6. Coraddu A., Gil A., Akhmetov B., Yang L., Romagnoli A., Ritari A., Huotari J. & Tammi K. Energy storage on ships. *Sustainable Energy Systems on Ships: Novel Technologies for Low Carbon Shipping*. Elsevier. 2022. P. 197–232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824471-5.00012-8>.
7. Zhenying Wu. Comparison of Fuel Consumption on A Hybrid Marine Power Plant with Low-Power versus High-Power Engines. Norwegian University of Science and Technology, 2017. 97 p.
8. Craig B. The Future of Batteries in the Marine Sector: What Lies Beyond the Horizon? University of Southampton, 2020. 66 p.
9. Патент Ru 2759580. Устройство контроля технического состояния элементов последовательной аккумуляторной батареи / Шастун А. И., Клименко С. А., Угай С. А., Каминский Н. С., Миханюшин В. В. Опубл. 15.11.2021. Бюл. № 32.
10. Патент Ru 2784445. Способ повышения эффективности судовой электростанции / Миханюшин В. В. Опубл. 24.11.2022. Бюл. № 33.
11. Siyang Liu. Model-based Design of Hybrid Electric Marine Propulsion System Using Modified Low-Order Ship Hull Resistance and Propeller Thrust Models. University of Victoria, 2020. 118 p.
12. Бурков А. Ф., Миханюшин В. В., Нгуен Ван Ха. Повышение энергоэффективности силовых электроэнергетических установок малотоннажных пассажирских судов // Омский научный вестник. 2021. № 4(178).
13. Патент Ru 2716514. Способ разгона глиссирующего судна / Миханюшин В. В., Наумов И. М. Опубл. 12.03.2020 Бюл. № 8.
14. Бурков А. Ф., Аветисян В. Р. Повышение энергоэффективности корабельного и судового электрооборудования // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского. 2017. № 2(2). С. 132–135.

REFERENCES

1. Burkov AF, Mikhaynoshin VV. Rowing electric installations: review, analysis, development prospects. Moscow: INFRA-M; 2022. 199 p. (In Russ.).
2. Selifonov VV [et al.]. Hybrid cars – a solution to the environmental problem of motor transport. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2007; 2(4) (In Russ.).
3. Pavlyuchenko VS, Saprykin IK, Fedorinov VN. Hybrid cars – the solution to an environmental problem. Innovative technologies and technical means for agriculture: materials International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists. Voronezh; 2018. P. 336–340. (In Russ.).
4. Alyamkin DI [et al.]. Directions of development and optimization of electric drive systems for urban hybrid and electric transport. *Electrical Engineering*. 2015;(1):5–8. (In Russ.).
5. Geertsma R, Negenborn R, Visser K. & Hopman J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*. 2017;(194):30–54.
6. Coraddu A, Gil A., Akhmetov B., Yang L, Romagnoli A, Ritari A, Huotari J. & Tammi K. Energy storage on ships. *Sustainable Energy Systems on Ships: Novel Technologies for Low Carbon Shipping*. Elsevier. 2022:197–232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824471-5.00012-8>.
7. Zhenying Wu. Comparison of Fuel Consumption on A Hybrid Marine Power Plant with Low-Power versus High-Power Engines. Norwegian University of Science and Technology. 2017. 97 p.

8. Craig B. The Future of Batteries in the Marine Sector: What Lies Beyond the Horizon? University of Southampton. 2020:66.
9. Patent Ru 2759580. A device for monitoring the technical condition of the elements of a serial battery / Shastun AI, Klimenko SA, Ugai SA, Kaminsky NS, Mikhannoshin VV. Publ. 11/15/2021. Byul. No. 32.
10. Patent Ru 2784445. A way to increase the efficiency of a marine power plant / Mikhannoshin VV. Publ. 11/24/2022. Byul. No. 33.
11. Siyang Liu. Model-based Design of Hybrid Electric Marine Propulsion System Using Modified Low-Order Ship Hull Resistance and Propeller Thrust Models. University of Victoria. 2020. 118 p.
12. Burkov AF, Mikhannoshin VV, Nguyen VH. Improving the Energy Efficiency of Power Electrical Installations on Small Passenger Vessels. Omsk Scientific Bulletin. 2021;4(178). (In Russ.).
13. Patent Ru 2716514. Method of accelerating a planing vessel / Mikhannoshin V. V., Naumov I. M. Publ. 12.03.2020 Bull. No. 8.
14. Burkov AF, Avetisyan VR. Improving the energy efficiency of ship and ship electrical equipment. Problems of the Far East transit port. Vladivostok: Nevelsky Moscow State University. 2017;2(2):132-135. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктор Викторович Миханношин** – кандидат технических наук, доцент кафедры Морского государственного университета им. адмирала 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. адмирала Г. И. Невельского, Scopus ID: 56800300900, Researcher ID: AAN-7374-2019
- Виктор Александрович Седов** – кандидат физико-математических наук, и. о. заведующего кафедрой электрооборудование и автоматика судов Морского государственного университета им. адмирала Г. И. Невельского, Scopus ID: 7103244543, Researcher ID: S-1178-2018

ВКЛАД АВТОРОВ

- Виктор Викторович Миханношин**
Поиск способов и технических решений, направленных на повышение энергоэффективности и экологичности силовых электроэнергетических установок судов. Подготовка и редактирование текста
- Алексей Фёдорович Бурков**
Проведение исследования – анализ эксплуатационных недостатков силовых электроэнергетических установок судов технического флота, судов прибрежного и внутрипортового плавания. Постановка целей и задач исследования.
- Виктор Александрович Седов**
Расчетная часть. Утверждение окончательного варианта статьи, принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и её окончательный вариант.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Viktor V. Mikhannoshin** – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Marine state university named after Admiral G.I. Nevelskoy, Scopus ID: 0000-0001-6741-0061, Researcher ID: NES-8102-2025
- Aleksey F. Burkov** – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Marine state university named after Admiral G.I. Nevelskoy, Scopus ID: 56800300900, Researcher ID: AAN-7374-2019
- Viktor A. Sedov** – Cand. Sci. (Physical and math.), Associate Professor, Acting Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships, Marine state university named after Admiral G.I. Nevelskoy, Scopus ID: 7103244543, Researcher ID: S-1178-2018.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

- Viktor V. Mikhannoshin**
Search for methods and technical solutions aimed at improving the energy efficiency and environmental friendliness of ship power plants. Text preparation and editing.
- Aleksey F. Burkov**
The research is an analysis of the operational disadvantages of power electric power installations of vessels of the technical fleet, coastal and inland navigation vessels. Setting research goals and objectives.
- Viktor A. Sedov**
Calculation part. Approval of the final version of the article, acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.