

Научная статья
УДК 621.316.1.05
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-58-66>

Пути повышения энергетической эффективности электроэнергетических систем судов с электродвижением

Анатолий Иванович Лебедев^{1✉}, Анатолий Вячеславович Радаев²

^{1,2} Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова,
Санкт-Петербург, Россия, LebedevAI@gumrf.ru ✉

Аннотация. Негативное влияние парниковых газов и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу вынуждает международные организации предпринимать меры для их сокращения. Международная морская организация (ИМО) разработала стратегию, положения которой направлены на снижение вредных выбросов в атмосферу с морских судов до нулевого значения. Достижение поставленной цели напрямую связано с повышением энергоэффективности судовых электроэнергетических систем как основных элементов, генерирующих, распределяющих и преобразующих разные виды энергии. Концепция судов с электродвижением становится наиболее перспективным вариантом для реализации «зеленой энергетики» на судах. Рассматривается современное состояние решения технической задачи по достижению нулевого уровня выбросов при помощи использования судовых единых электроэнергетических систем с распределительной шиной постоянного тока, применения накопителей энергии, ионисторов. Проиллюстрированы однолинейные схемы электроэнергетической системы судов: с автономной гребной электрической установкой, с общими распределительными шинами постоянного тока. Приведены зависимости коэффициента полезного действия синхронного генератора типа МСК103-4 от частоты выходного напряжения для мощностей нагрузки 20, 80, 140, 200 кВт. Проанализированы колебания частоты выходного напряжения газодизель-генераторного агрегата при 100 % нагрузки. Обозначены основные направления повышения энергоэффективности. Сделаны выводы о необходимости применения современных технологий и материалов для повышения энергетической эффективности электроэнергетических систем морских судов и снижения выбросов в атмосферу вредных веществ.

Ключевые слова: энергоэффективность, распределительная шина постоянного тока, двухтопливный двигатель, система электродвижения, электроэнергетическая система, накопители энергии

Для цитирования: Лебедев А. И., Радаев А. В. Пути повышения энергетической эффективности электроэнергетических систем судов с электродвижением // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-58-66>.

Original article

Ways to improve energy efficiency of electric power systems of ships with electric propulsion

Anatoly I. Lebedev^{1✉}, Anatoly V. Radaev²

^{1,2} Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russia, LebedevAI@gumrf.ru ✉

Abstract. The negative impact of greenhouse gases and emissions of pollutants into the atmosphere force international organizations to take measures to reduce them. The International Maritime Organization (IMO) has worked out the strategy, whose provisions are aimed at reducing harmful emissions from ships into the atmosphere to zero. Achieving this goal is directly related to improving the energy efficiency of marine electric power systems, as the main elements generating, distributing and converting different types of energy. The concept of vessels with electric propulsion is becoming the most promising option for the implementation of “green energy” on ships. There has been considered the current state in solving technical problems to achieve zero emissions through the use of marine unified electric power systems with a DC distribution bus, the use of energy storage devices, supercapacitors. There have been illustrated the single-line diagrams of the electric power system of ships: with an autonomous propeller electric unit, with general DC distribution buses. The dependences of the efficiency of a synchronous generator MSK103-4 type on the frequency of the output voltage for load capacity of 20, 80, 140, 200 kW are given. The frequency fluctuations of the output voltage of a gas-diesel generator at 100% load have been analyzed. The main directions for improving power efficien-

cy are outlined. It has been inferred that using modern technologies and materials is necessary to improve the energy efficiency of the electric power systems of ships and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere.

Keywords: energy efficiency, DC distribution bus, dual-fuel engine, electric propulsion system, electric power system, energy storage

For citation: Lebedev A. I., Radaev A. V. Ways to improve energy efficiency of electric power systems of ships with electric propulsion. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2022;1:58-66. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-58-66>.

Введение

Доля вредных выбросов и парниковых газов с морских судов достигает 2,8 % всех мировых выбросов в атмосферу [1]. Значительную долю загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу с судов, составляют углекислый газ (CO₂), оксиды азота (NO_x) и оксиды серы (SO_x). На долю международного морского транспорта приходится до 87 % выбросов, в то время как на внутренний водный транспорт и рыболовные суда – 8 и 5 % соответственно [2, 3].

Неудивительно, что наибольшее внимание со стороны Международной морской организации (ИМО) уделяется именно морским судам как основным источникам загрязнения атмосферы. Продолжающееся стремительное развитие морского транспорта и увеличение количества судов приводит к необходимости внедрять новые технологии, которые позволяют отказаться от использования углеводородов в качестве основного топлива судовых энергетических установок (СЭУ), что в свою очередь связано с внедрением систем электродвижения, возобновляемых источников энергии, энергосберегающих электрических машин, единых электроэнергетических систем с общей распределительной шиной постоянного тока, накопителей энергии, а также применением в качестве топлива энергоносителей с низким или нулевым содержанием углерода. Все эти инициативы сформировали концепцию судов с нулевыми выбросами вредных ве-

ществ в атмосферу. Изучение этих инициатив, а также оценка их эффективности представляют наибольший интерес, т. к. позволяют определить наиболее перспективные технологии, способствующие достижению нулевых выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов с морских судов.

В статье рассмотрены современные пути повышения энергоэффективности электроэнергетических систем судов с электродвижением, а также проблемы и преимущества реализации концепции судна с нулевыми выбросами в атмосферу.

Постановка задачи

Сегодня в большинстве случаев в качестве приводных двигателей СЭУ используются тепловые двигатели, которые преобразуют химическую энергию углеводородов в механическую. Выхлопные газы тепловых двигателей являются основным источником загрязнений атмосферы.

Следует учитывать, что под энергоэффективностью судна нужно понимать не только рациональное использование энергии при транспортировке груза из одной географической точки в другую, но также и операции по перевалке груза, стоянке судна на рейде или у причала и другие эксплуатационные процессы.

Международная морская организация (ИМО) разработала стратегию снижения парниковых газов с судов, основные мероприятия которой отражены в таблице [4].

Таблица
Table

Основные мероприятия стратегии снижения парниковых газов с судов

General provisions of the strategy on reducing greenhouse gases from ships

Период	Срок внедрения	Мероприятия
Краткосрочные	2018–2023 гг.	<ul style="list-style-type: none"> – внедрение конструктивного коэффициента энергоэффективности EEDI; – внедрение достигнутого коэффициента энергоэффективности EEXI; – внедрение плана энергоэффективности SEEMP; – снижение выбросов, отличных от CO₂; – активное использование береговых источников энергии при стоянке судна в порту; – исследование и развитие пропульсивных установок; – исследование альтернативных видов топлива
Среднесрочные	2023–2030 гг.	<ul style="list-style-type: none"> – внедрение альтернативных видов топлива с низким или нулевым содержанием углерода; – улучшение эффективности новых и эксплуатирующихся судов
Долгосрочные	После 2030 г.	<ul style="list-style-type: none"> – развитие и применение топлив с нулевым содержанием углерода; – адаптация новых механизмов, снижающих выбросы в атмосферу

Достижение заявленных краткосрочных и среднесрочных целей в наибольшей степени затрагивает суда, находящиеся в настоящее время в эксплуатации. Поэтому поиск наиболее рациональных вариантов модернизации их энергетических установок становится весьма значимым.

Анализ полученных результатов

Одним из вариантов модернизации СЭУ может стать применение автономных гребных электрических установок (АГЭУ), у которых в качестве гребных двигателей используются электрические машины (рис. 1).

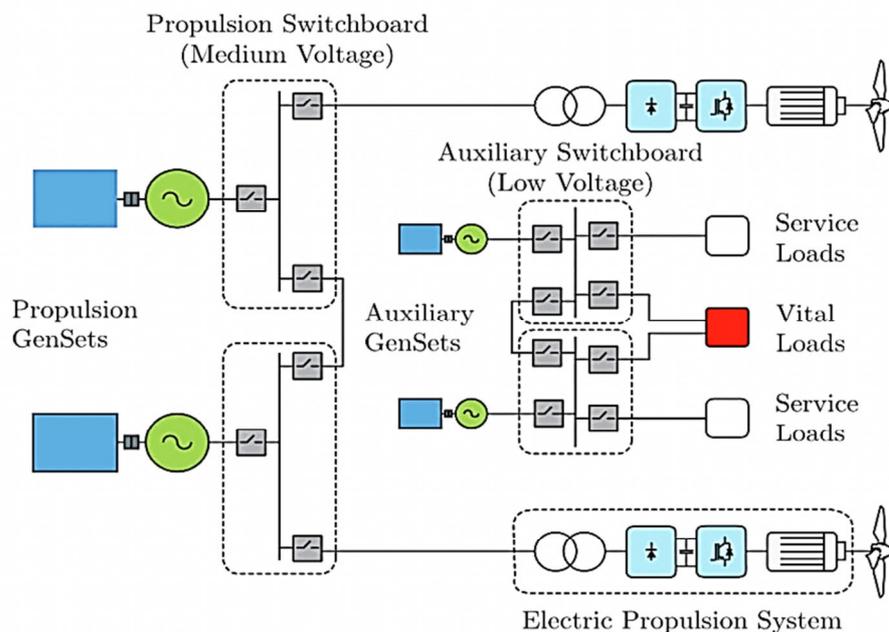


Рис. 1. Однолинейная схема электроэнергетической системы судна с автономной гребной электрической установкой

Fig. 1. Single-line diagram of the electric power system of a ship with an autonomous propeller electric unit

Судовая энергетическая установка такого рода судов разделена на две части, одна из которых предназначена для обеспечения энергией пропульсивной установки, а другая – для снабжения судовой электроэнергетической системы. Как правило, в подобных системах малооборотные дизельные главные двигатели заменяются многополюсными электрическими машинами. Такого рода системы получили наибольшее распространение на ледоколах и буксирах, к маневренным и динамическим характеристикам которых предъявляются повышенные требования. Пропульсивная установка рассматриваемых судов потребляет примерно 90 % всей энергии, генерируемой СЭУ. Несмотря на высокие динамические характеристики, приводные двигатели большую часть работают в режимах малых нагрузок, при которых наблюдаются низкая тепловая эффективность и повышенные выбросы в атмосферу.

Таким образом, предложенный вариант модернизации не может удовлетворить требования по снижению парниковых газов и выбросов в атмосферу с судов.

На смену АГЭУ пришли единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС), в которых основные источники электроэнергии обеспечивают энергией все судовые потребители и систему электродвижения. На рис. 2. представлена однолинейная схема ЕЭЭС судна с электродвижением.

При такой конфигурации наблюдается более эффективное использование приводных двигателей за счет большей загрузки и гибкости. Применение преобразователей частоты гребных электродвигателей на основе активных выпрямителей с технологией Active front end (AFE) позволяет поддерживать коэффициент мощности равный единице во всех рабочих диапазонах, а также коэффициент несинусоидальных искажений ниже 5 %, что в свою очередь повышает энергоэффективность ЕЭЭС за счет меньших потерь. Помимо этого, использование технологии AFE позволяет работать в четырех квадрантах, т. е. обеспечивает режим рекуперации энергии и возможность применения накопителей энергии.

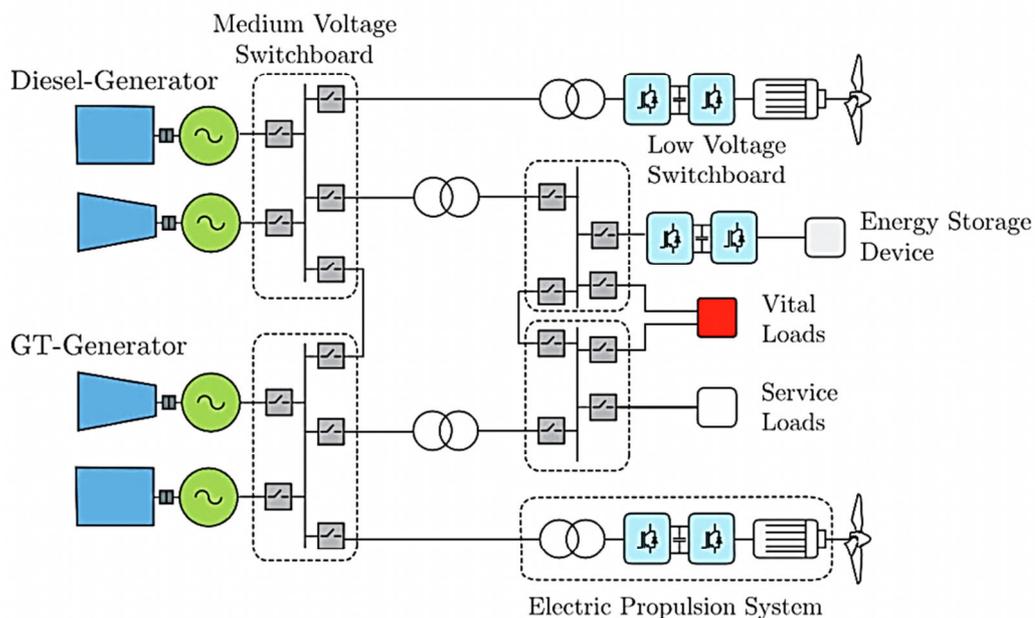


Рис. 2. Однолинейная схема единой электроэнергетической системы судна

Fig. 2. Single-line diagram of the unified electric power system of the ship

Определенный интерес вызывают гибридные пропульсивные установки [5, 6], в которых энергия

может вырабатываться как вспомогательными генераторами, так и главным двигателем (рис. 3).

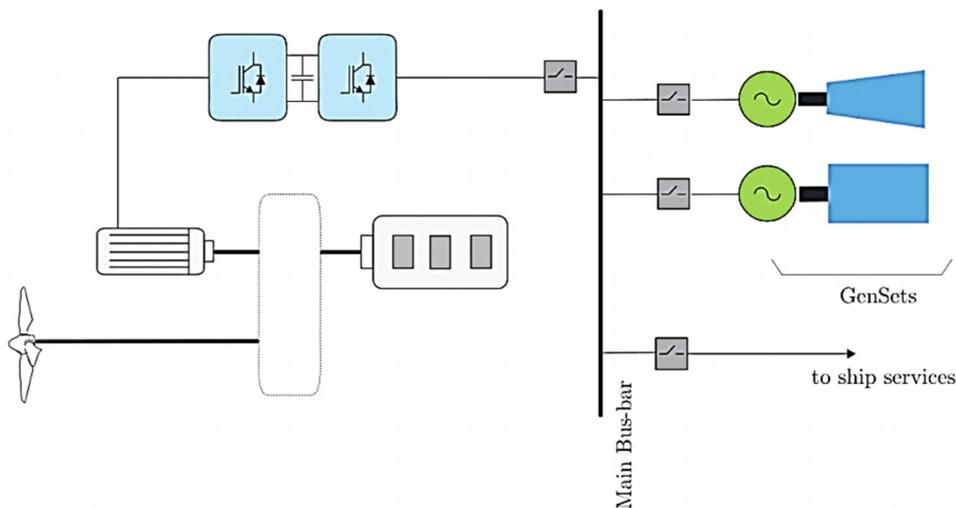


Рис. 3. Однолинейная схема гибридной энергетической установки судна

Fig. 3. Single-line diagram of a hybrid power plant of a ship

В режимах малых скоростей выгоднее использовать электрическую машину в двигательном режиме, которая получает энергию от вспомогательных генераторов. При скоростях движения судна, близких к номинальному, и длительных переходах предпочтительнее использовать главный двигатель, при этом электрическая машина благодаря

принципу обратимости может быть использована в качестве валогенератора. Благодаря применению преобразователей частоты скорость вращения гребного вала не влияет на частоту электроэнергетической системы, поэтому могут быть использованы гребные винты как фиксированного, так и регулируемого шага. Подобная концепция как

средство достижения среднесрочных показателей энергетической эффективности может быть предпочтительной для модернизации действующих судов.

Для решения задачи по повышению энергоэффективности электроэнергетического комплекса

необходимо уменьшить количество промежуточных элементов ЕЭЭС и ступеней преобразований электроэнергии, что может быть достигнуто при внедрении электроэнергетических систем с обобщенной шиной постоянного тока (рис. 4).

Лебедев А. И., Радаев А. В. Пути повышения энергетической эффективности электроэнергетических систем судов с электродвижением

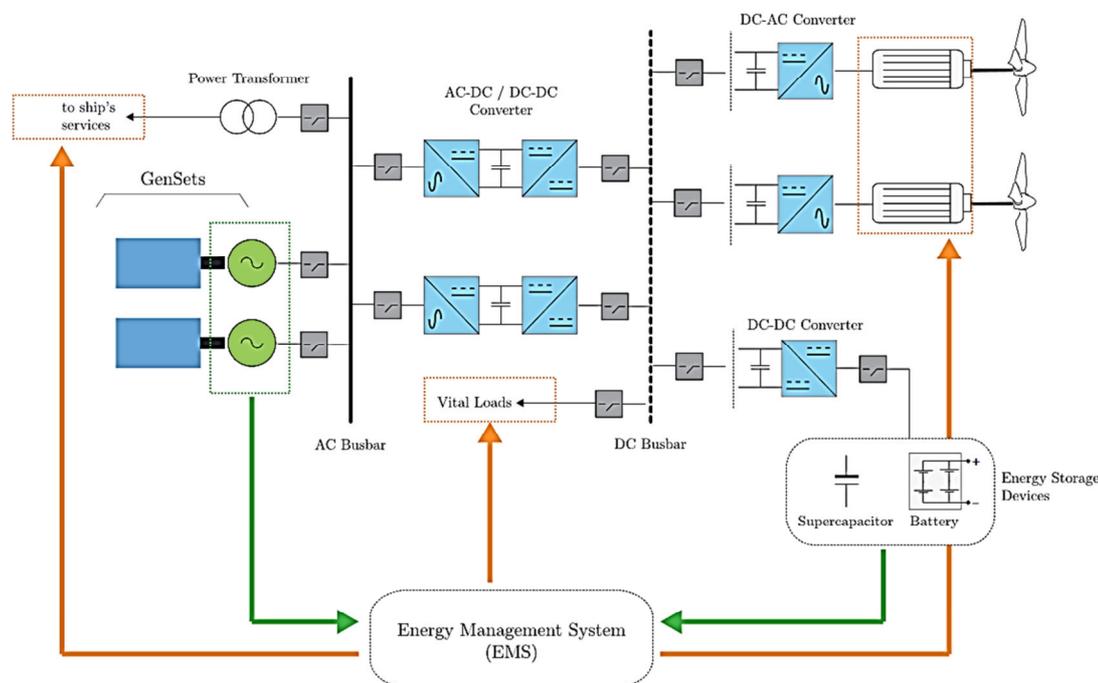


Рис. 4. Однолинейная схема единой электроэнергетической системы судна с общими распределительными шинами постоянного тока

Fig. 4. Single-line diagram of a unified electric power system of a ship with general DC distribution buses

В такого рода системах основные источники электроэнергии работают на выпрямителе соизмеримой мощности, а электроэнергия между всеми потребителями судна распределяется по шинам постоянного тока. Для каждого потребителя предусмотрен инвертор напряжения, который преобразует постоянное напряжение в переменное [7, 8].

Применение общей распределительной шины постоянного тока позволяет отказаться от необходимости работы приводных двигателей генераторов на постоянной частоте вращения, т. е. появляется возможность менять частоту приводных двигателей в зависимости от фактической нагрузки. Такой подход позволяет более эффективно использовать приводные двигатели при различных нагрузках, а также снижает удельный расход топлива и количество вредных выбросов в атмосферу. В работе [8] проведен анализ дизель-генераторных агрегатов с приводными двигателями Cat 3406 при переменной частоте вращения, который подтвердил снижение удельного расхода топлива до 20 %.

Помимо этого, регулирование частоты основных источников электроэнергии при изменении

нагрузки также целесообразно и с позиции повышения КПД электрических машин. В работе [9] представлены результаты расчетов КПД синхронного генератора в зависимости от нагрузки и частоты выходного напряжения (рис. 5), которые доказывают, что при снижении нагрузки точки наибольшего КПД достигаются при меньших частотах.

При использовании ЕЭЭС с общей распределительной шиной постоянного тока уменьшается количество ступеней трансформации электроэнергии, появляется возможность плавного регулирования частоты вращения приводных двигателей основных источников электроэнергии, а также возможность использования накопителей энергии на базе ионисторов или электрохимических элементов.

В качестве выпрямителей и инверторов следует использовать активные преобразователи с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), позволяющие снизить коэффициент несинусоидальных искажений и поддерживать коэффициент мощности равный единице во всех диапазонах работы. При этом происходит значительное уменьшение потерь в питающих кабельных линиях.

Следующим этапом повышения энергоэффективности может стать внедрение энергосберегающих электродвигателей, в которых на 25–30 % больше активных материалов (железа и меди). За счет большего количества активных материалов потери в энергосберегающих двигателях снижаются примерно на 30 %, а КПД возрастает до 5 %. Однако стоит отметить, что стоимость таких двигателей выше, чем у обычных, на 30 %. В качестве гребных электродвигателей предпочтительнее всего использовать вентильно-индукторные машины [10] или синхронные двигатели с постоянными магнитами (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM),

расположенные в гондолах [11]. Такого рода гребные электродвигатели обеспечивают более высокие экономические и энергетические показатели на протяжении всего эксплуатационного цикла за счет отсутствия обмотки возбуждения и конструкции гондолы, позволяющей отводить тепло непосредственно при помощи забортной воды, без использования промежуточных сред. В большинстве случаев гребной электродвигатель, расположенный в гондоле, выполняет также и функции рулевого устройства, в таком случае весь комплекс преобразуется в винторулевую колонку.



Рис. 5. Зависимости КПД синхронного генератора типа MSK103-4 от частоты выходного напряжения для мощностей нагрузки 20, 80, 140, 200 кВт

Fig. 5. Dependences of the efficiency of a synchronous generator type MSK103-4 on the frequency of the output voltage for load capacity of 20, 80, 140, 200 kW

Наибольшую популярность в настоящее время приобрели СЭУ с двухтопливными двигателями, позволяющими работать как на дизельном, так и на газомоторном топливе [12], а также газотурбинные двигатели [13], работающие на природном газе. Применение природного газа в качестве топлива позволяет снизить удельные выбросы загрязняющих веществ в 3 раза, а удельные выбросы парниковых газов – в 1,7 раз [14]. При работе газодизель-генераторных агрегатов (ГДГА) на газомоторном топливе наблюдаются колебания частоты выходного напряжения, связанные с колебаниями крутящего

момента приводного двигателя (рис. 6) [15]. При резких изменениях нагрузки ГДГА возможны срабатывания защитных устройств по частоте напряжения, которые приводят к нештатным режимам работы судовой ЕЭЭС.

Для демпфирования колебаний частоты выходного напряжения и стабилизации работы ГДГА в состав ЕЭЭС предлагается использовать накопители энергии (Energy storage), которые выравнивают нагрузку на ГДГА и повышают энергоэффективность буровой лебедки [6].

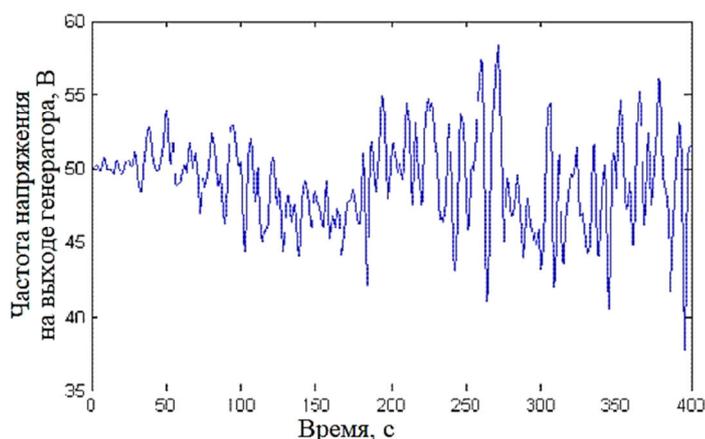


Рис. 6. Колебания частоты выходного напряжения газодизель-генераторного агрегата при нагрузке 100 %

Fig. 6. Frequency fluctuations of the output voltage of the gas-diesel generator under 100% load

Использование ЕЭЭС с общей распределительной шиной постоянного тока позволяет подключать накопители энергии непосредственно к звену постоянного тока, в котором, как правило, находятся конденсаторы большой емкости. В динамических режимах накопители энергии позволяют сглаживать нагрузку на первичные двигатели ЕЭЭС, демпфировать колебания частоты и более эффективно использовать энергию.

Заключение

Для превышения энергетической эффективности электроэнергетических систем морских судов необходимо применять современные технологии и материалы.

Среди основных направлений повышения энергоэффективности можно отметить следующие:

- внедрение ЕЭЭС с общей распределительной шиной постоянного тока;
- разработка алгоритмов адаптивного регулирования частоты вращения приводных двигателей основных источников электроэнергии, позволяю-

щих обеспечивать максимальное значение КПД во всех рабочих режимах;

- разработка и совершенствование энергосберегающих электродвигателей;
- использование двухтопливных дизельных двигателей, работающих на газомоторном топливе;
- разработка и внедрение накопителей энергии большой мощности (ионисторы и электрохимические элементы).

Реализация этих положений встречает ряд сложностей, среди которых можно отметить следующие:

- применение распределительной шины постоянного тока требует разработки компактных и надежных автоматических выключателей;
- снижение стоимости энергосберегающих электродвигателей;
- увеличение мощности и ресурса накопителей энергии.

Перечисленные выше проблемы должны быть решены в ближайшее время, что позволит реализовать предложенные меры повышения энергетической эффективности.

Список источников

1. Shell. Greenhouse Gas Emissions in Shipping. URL: www.shell.com/energy-and-innovation.html (дата обращения: 23.10.2021).
2. Transport and Environment. Shipping and Climate Change. URL: www.transportenvironment.org (дата обращения: 23.10.2021).
3. Det Norske Veritas. Energy Transition Outlook. URL: <https://www.dnv.com/Publications/energy-transition-outlook-2020-186774> (дата обращения: 23.10.2021).
4. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships; Annex 11; International Maritime Organization: London, UK, 2018. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx> (дата обращения: 23.10.2021).
5. Geertsma R. D., Necenborn 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. N. 194. P. 30–54.
6. Бежик А. С. Гибридные гребные электроэнергетические установки с системой накопления электроэнергии // Теоретический и практический потенциал современной науки: сб. науч. ст. / под ред. А. Х. Цечоевой. М.: Перо, 2019. Т. 2. С. 98–101.
7. Reusser Carlos A., Joel R. Pérez Osses. Challenges for Zero-Emissions Ship // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. N. 10. P. 1042.
8. Григорьев А. В., Малышев С. М., Зайнуллин Р. Р. Судовая электростанция с вентильными дизель-генераторами переменной частоты вращения // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 1. С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.

9. Дарьенков А. Б. Оценка расхода топлива дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения на основе матричного преобразователя частоты // Интеллектуал. электротехника. 2019. № 1. С. 4–17. DOI: 10.46960/2658-6754-2019-1-4.

10. Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М. Вентильно-индукторный привод ВИП-1000-1100 в системе электродвижения // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 3. С. 573–581. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.

11. Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М. Перспективы развития систем электродвижения // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2018. Т. 10. № 3. С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

12. Иванченко, А. А., Ватолин Д. С. Опыт эксплуатации двухтопливных дизельных установок судов проекта S1910 // Материалы VI Междунар. Балтий. мор.

форума (Калининград, 03–06 сентября 2018 г.). Калининград: Изд-во КГТУ, 2018. С. 285–297.

13. Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р., Малышев С. М. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2016. № 1 (35). С. 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.

14. Ишков А. Г., Пыстина Н. Б., Романов К. В., Тетеревлев Р. В. Экологические аспекты использования природного газа в качестве моторного топлива на основе оценки полного жизненного цикла // Трансп. на альтернатив. топливе. 2018. № 6 (66). С. 45–54.

15. Бордюг А. С., Масленников А. А., Доровской В. А. Анализ и синтез методов оценки стохастических процессов судовой электроэнергетической системы газодизельных двигателей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2016. № 4. С. 44–53.

References

1. Shell. Greenhouse Gas Emissions in Shipping. Available at: www.shell.com/energy-and-innovation.html (accessed: 23.10.2021).

2. Transport and Environment. Shipping and Climate Change. Available at: www.transportenvironment.org (accessed: 23.10.2021).

3. Det Norske Veritas. Energy Transition Outlook. Available at: <https://www.dnv.com/Publications/energy-transition-outlook-2020-186774> (accessed: 23.10.2021).

4. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships; Annex 11; International Maritime Organization, London, UK, 2018. Available at: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx> (accessed: 23.10.2021).

5. Geertsma R. D., Necenborn 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, pp. 30-54.

6. Bezhik A. S. Гибридные гребные электроэнергетические установки с системой накопления электроэнергии [Hybrid rowing electric power plants with accumulating electricity system]. *Теоретический и практический потенциал современной науки: сборник научных статей*. Под редакцией А. Kh. Tsechoevoi. Moscow, Pero Publ., 2019. Vol. 2. Pp. 98-101.

7. Reusser Carlos A., Joel R. Pérez Osses. Challenges for Zero-Emissions Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, vol. 9, no. 10, p. 1042.

8. Grigor'ev A. V., Malyshev S. M., Zainullin R. R. Судовая электростанция с вентильными дизель-генераторами переменной частоты вращения [Ship power plant with valve diesel generators of variable speed]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 193-201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.

9. Dar'enkov A. B. Otsenka raskhoda topliva dizel'-generatornoi elektrostantsii peremennoi chastoty vrashcheniia na osnove matrichnogo preobrazovatelya chastoty [Estimating fuel consumption of variable speed diesel-generator unit by using matrix frequency converter]. *Intellektual'naiia elektrotehnika*, 2019, no. 1, pp. 4-17. DOI: 10.46960/2658-6754-2019-1-4.

10. Romanovskii V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Ventil'no-induktornyi privod VIP-1000-1100 v sisteme elektrodvizeniia [Valve-inductor drive VIP-1000-1100 in electric propulsion system]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 573-581. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.

11. Romanovskii V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Perspektivy razvitiia sistem elektrodvizeniia [Prospects for development of electric propulsion systems]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 586-596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

12. Ivanchenko, A. A., Vatin D. S. Opyt ekspluatatsii dvukhtoplivnykh dizel'nykh ustanovok sudov proekta S1910 [Practice of operating two-fuel diesel units on ships project S1910]. *Materialy VI Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma (Kaliningrad, 03–06 sentyabrya 2018 g.)*. Kaliningrad, Izd-vo KGTU, 2018. Pp. 285-297.

13. Grigor'ev A. V., Zainullin R. R., Malyshev S. M. Perspektivy vnedreniia ventil'nykh gazoturbogeneratorov na morskome flote [Prospects for introducing valve gas turbine generators in marine fleet]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, no. 1 (35), pp. 165-169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.

14. Ishkov A. G., Pystina N. B., Romanov, K. V. Teterlev R. V. Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniia prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva na osnove otsenki polnogo zhiznennogo tsikla [Environmental aspects of using natural gas as motor fuel based on assessment of full life cycle]. *Transport na alternativnom toplive*, 2018, no. 6 (66), pp. 45-54.

15. Bordiug A. S., Maslennikov A. A., Dorovskoi V. A. Analiz i sintez metodov otsenki stokhasticheskikh protsessov sudovoi elektroenergeticheskoi sistemy gazodizel'nykh dvigatelei [Analysis and synthesis of methods for assessing stochastic processes of ship electric power system of gas-diesel engines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiya*, 2016, no. 4, pp. 44-53.

Статья поступила в редакцию 25.10.2021; одобрена после рецензирования 24.11.2021; принята к публикации 11.01.2022
The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 24.11.2021; accepted for publication 11.01.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Иванович Лебедев – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры электродвижения и автоматизации судов; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; LebedevAI@gumrf.ru

Anatoly I. Lebedev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electric Propulsion and Automation of Ships; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 198035, Saint-Petersburg, Dvinskaya St., 5/7; LebedevAI@gumrf.ru

Анатолий Вячеславович Радаев – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры судовых автоматизированных электроэнергетических систем; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; RadaevAV@gumrf.ru

Anatoly V. Radaev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Ship Automated Electric Power Systems; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 198035, Saint-Petersburg, Dvinskaya St., 5/7; RadaevAV@gumrf.ru

