

PERSPECTIVES OF USING THE STATIC ELECTRIC POWER SOURCES ON SHIPS WITH ELECTRIC PROPULSION PLANTS

A. V. Grigoryev^{1,2}, R. R. Zaynullin³, S. M. Malyshev^{2,3}

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation,

² — Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

³ — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

It is noted that to date the electric power sources based on heat engines and rotating electrical machines, first of all diesel-generators, have received the most wide spread in the marine fleet. Tightening the environmental requirements and increasing the fuel prices in the recent years condition the necessity and expediency of searching for alternative kinds of electric power sources that can be used as the main ones including on ships with electric propulsion plants. The feasibility of using the static electric power sources for above mentioned purpose is researched in the paper. The types are considered, the principle of operation is described, the advantages, disadvantages and scope are listed for the following types of static electric power sources: accumulator batteries based on a new element base, supercapacitors, solar batteries, fuel cells, direct heat conversion generators. The choice of a source type is determined by the operation modes for which it is intended, and by the power of the supplied electrical consumers. Electric power sources of new generation can be used in buffer mode or in autonomous mode as the main electric power source. The use of static electric power sources in the buffer operation mode can significantly reduce the fuel consumption of electric propulsion plants in the dynamic modes, including on icebreakers and ice-going vessels during moving in ice or on waving. In this case saving is achieved by absorbing the excess energy during braking of an electric propulsion motor and its subsequent release during acceleration. Application in the second operation mode is especially relevant in connection with the tightening the environmental requirements for marine vessels. Switching the main generators off and transition to supplying from static electric power sources can reduce harmful emissions to the atmosphere and the overall level of underwater noise emitted by the vessel, which is important in biological and geophysical researches. The composition and structure of a typical circuit design solution for a ship electric power system built using the static electric power sources of new generation are given in the paper. It is concluded that the introduction of static electric power sources of new generation lets to optimize operating modes and increase the structural flexibility of the electric power installation, reduce the consumption of fuels and lubricants, increase the reliability and service life of drive engines of generating sets, reduce harmful emissions into the atmosphere, and also increase propulsive power in full speed modes.

Keywords: static electric power source, accumulator battery, charge, li-ion accumulator battery, supercapacitor, solar battery, direct heat conversion generator, fuel cell, ship electric power system, electric propulsion plant.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. “Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

УДК 629.123:621.31

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СУДАХ С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

А. В. Григорьев^{1,2}, Р. Р. Зайнуллин³, С. М. Малышев^{2,3}

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что к настоящему времени наибольшее распространение на морском флоте получили источники электроэнергии на базе тепловых двигателей и вращающихся электрических машин, в первую очередь, дизель-генераторы. Ужесточение экологических норм и рост цен на топливо в последние годы обуславливают необходимость и целесообразность поиска альтернативных видов источников электроэнергии, которые можно использовать в качестве основных, в том числе на судах с системами электродвижения. В статье исследована целесообразность применения для указанной цели статических источников. Рассмотрены типы, описан принцип действия, преимущества, недостатки и область применения статических источников электроэнергии нового поколения, таких как аккумуляторные батареи на новой элементной базе, суперконденсаторы, солнечные батареи, топливные элементы, генераторы прямого преобразования теплоты. Выбор типа источника определяется режимами работы, для которых он предназначен, и мощностью питаемых приемников электроэнергии. Статические источники электроэнергии нового поколения могут использоваться в автономном режиме эксплуатации в качестве основного источника электроэнергии или в буферном режиме. Применение статических источников электроэнергии в буферном режиме позволяет существенно снизить расход топлива в динамических режимах работы системы электродвижения, в том числе на ледоколах и судах ледового плавания при ходе во льдах или на волнении. При этом экономия обеспечивается за счет поглощения избытка энергии в процессе торможения гребного электродвигателя и последующего ее выделения в процессе разгона. Применение в автономном режиме особенно актуально в связи с ужесточением экологических требований к морским судам. Отключение главных дизель-генераторов и переход на питание от статических источников электроэнергии позволяет снизить выбросы в атмосферу и снизить общий уровень подводного шума, излучаемого судном, что важно при проведении биологических и геофизических исследований. В статье приведены состав и структура типового схмотехнического решения судовой электроэнергетической системы, построенной с применением статических источников электроэнергии нового поколения. Сделан вывод о том, что внедрение статических источников электроэнергии нового поколения позволит оптимизировать режимы работы и повысить структурную гибкость электроэнергетической установки, снизить расход горюче-смазочных материалов, повысить надежность работы и ресурс приводных двигателей генераторных агрегатов, снизить вредные выбросы в атмосферу, а также повысить пропульсивную мощность в режимах полного хода.

Ключевые слова: статический источник электроэнергии, аккумуляторная батарея, заряд, литий-ионный аккумулятор, суперконденсатор, солнечная батарея, топливный элемент, генератор прямого преобразования теплоты, судовая электроэнергетическая система, система электродвижения.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

Введение (Introduction)

В настоящее время на морском флоте в качестве основных источников электроэнергии наибольшее распространение получили дизель-генераторы (ДГ). Помимо ДГ на транспортных судах большого водоизмещения с системами электродвижения (СЭД), в частности танкерах-газовозах, находят применение газотурбогенераторы (ГТГ) [1]. На судах с ядерными энергетическими установками основными источниками электроэнергии являются паротурбогенераторы (ПТГ) [2].

Помимо источников на базе вращающихся электрических машин на судах устанавливаются также статические источники электроэнергии (СИЭ), в первую очередь, щелочные и кислотные аккумуляторные батареи (АБ). Относительно низкие технико-эксплуатационные характеристики АБ традиционных типов, такие как низкая удельная емкость, низкий ток заряда-разряда, а также ограниченное количество циклов заряда-разряда, ограничивают область их применения аварийным электроснабжением судна и электростартерным запуском тепловых двигателей. Вместе с тем ужесточение экологических норм и рост цен на топливо обуславливают необходимость и целесообразность поиска для судов и морских объектов других видов источников электроэнергии, которые можно использовать в качестве основных, в том числе для питания систем электродвижения (СЭД) [3] и гребных электроприводов в составе комбинированных пропульсивных установок (КПУ) [4]–[6].

Благодаря достижениям силовой преобразовательной техники и появлению новых и перспективных электротехнических материалов с высокими удельными показателями, в последние годы активное развитие и распространение как в промышленности, так и на морском транспорте получают СИЭ нового поколения. Для определения перспектив применения СИЭ нового поколения необходимо выполнить анализ их технических характеристик и разработать основные схемотехнические решения судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) на их базе.

Методы и материалы (Methods and Materials)

К СИЭ нового поколения относятся:

- аккумуляторные батареи на новой элементной базе;
- суперконденсаторы;
- солнечные батареи;
- топливные элементы;
- генераторы прямого преобразования теплоты.

Среди перспективных аккумуляторных батарей (АБ) на новой элементной базе следует выделить:

- литиевые (Li);
- серебряно-цинковые (Ag-Zn);
- никель-металлгидридный (Ni-MH);
- свинцово-кислотные батареи.

АБ литиевого типа (Li) включают большую группу химических источников в зависимости от применяемых материалов, в том числе литий-ионные (Li-Ion), литий-кобальтовые (Li-Co), литий-полимерные (Li-pol), литий-марганцевые (Li-Mn), литий-железно-фосфатные (LFP, LiFeP), литий-титанатные (Li-Ti), литий-хлорные (Li-Cl), литий-серные (Li-S). Электролит в АБ литиевого типа находится в загущенном или твердом состоянии.

АБ серебряно-цинкового типа (Ag-Zn) позволяют получать большие токи при кратковременных режимах разряда, постоянное до конца разряда напряжение и малую скорость саморазряда. Конструктивно такие батареи представляют собой герметичную емкость с жидким электролитом.

Никель-металлгидридные АБ (Ni-MH) не содержат жидкого электролита.

Свинцово-кислотные батареи представлены двумя типами технологий, позволяющими работать в тяговом режиме: AGM батареи, гелевые (GEL) батареи. Электролит в таких батареях, как правило, находится в загущенном или абсорбированном состоянии. Сравнительные технические характеристики рассматриваемых АБ по конструктивным показателям представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительные технические характеристики АБ
на новой элементной базе по конструктивным показателям**

Тип	Удельная запасаемая энергия, Вт·ч / кг	Плотность запасаемой энергии, Вт·ч / дм ³	Рабочая температура окружающей среды, °С
Li-Ion	До 280	До 350	–20...+40
Ag-Zn	До 150	До 650	–40...+50
Ni-MH	До 70	До 150	–60...+55
Pb	До 60	До 75	–40...+40

Из табл. 1 видно, что наибольшую удельную запасаемую энергию (на единицу массы) имеют АБ литий-ионного типа [7]. Данный тип аккумуляторов позволяет создавать источники электроэнергии с наименьшей массой при равной емкости. Серебряно-цинковые АБ имеют наибольшую плотность запасаемой энергии (на единицу объема), что позволяет создавать источники энергии с наименьшим занимаемым объемом при равной емкости. Никель-металлгидридные и свинцово-кислотные АБ уступают двум ранее указанным типам АБ по всем показателям. Сравнительные технические характеристики литий-ионных и серебряно-цинковых АБ по эксплуатационным показателям приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики литий-ионных и серебряно-цинковых аккумуляторов
по эксплуатационным показателям**

Показатель	Тип АБ	
	Li-Ion	Ag-Zn
Ресурс по циклу заряд / разряд	1000 – 7000	100 – 300
Срок службы, лет	5 – 20	3 – 5
Ток заряда, в долях от номинального	0,7 – 1	0,05 – 0,1
Время полного заряда, ч	1 – 2	10 – 20
Ток разряда, в долях от номинального	До 50	До 50
Саморазряд, %, за месяц	1 – 2	5 – 15

Основным недостатком серебряно-цинковых АБ является большое время полного заряда и низкий ресурс по циклам заряда-разряда. Данные АБ в основном применяются в авиационной, ракетно-космической и военной технике, где требуется минимизация занимаемого объема.

Для судов наиболее подходящим типом АБ являются батареи литий-ионного типа (Li-Ion), выпускаемые в виде отдельных элементов, для достижения требуемых показателей по уровню напряжения и электрической емкости собираемые в аккумуляторные группы с последовательно-параллельным соединением. АБ литий-ионного типа допускается устанавливать в любом положении. Пример расположения аккумуляторной группы в шкафу АБ литий-ионного типа для источников бесперебойного питания серии Galaxy фирмы Schneider Electric показан на рис. 1¹.



Рис. 1. Шкаф с АБ литий-ионного типа для источников бесперебойного питания серии Galaxy фирмы Schneider Electric

Суперконденсатор (СК) представляет элемент с двумя электродами, между которыми располагается электролит. Электроды выполнены в виде пластин различной формы, изготовленных из специального материала. Для улучшения электрических параметров, пластины могут дополнительно покрываться пористым материалом. В качестве электролита могут применяться неорганические или органические вещества. СК отличаются от АБ большим сроком службы и существенно более высокими скоростями заряда и разряда, т. е. СК способны поглощать и выделять большое

¹ Сайт фирмы «Schneider Electric» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.se.com/ww/en/product-range/63732-galaxy-vx/> (дата обращения: 24.12.2019).

количество электроэнергии за короткий промежуток времени, поэтому их целесообразно использовать в буферном режиме. Диапазон рабочих температур СК существенно шире, чем аналогичный показатель у АБ.

СК, в отличие от АБ, не могут применяться в качестве основного источника электроэнергии на судне в связи с тем, что они имеют значительно худшие показатели по удельной запасаемой энергии. Для увеличения мощности суперконденсаторные элементы объединяют в модули, модули — в системы [8]. Технические характеристики суперконденсаторных модулей фирмы Skeleton Technologies¹ приведены в табл. 3, суперконденсаторных систем — в табл. 4, внешний вид шкафа с суперконденсаторной системой — на рис. 2.

Таблица 3

Технические характеристики суперконденсаторных модулей типа SMA102V88F серии SkelMod фирмы Skeleton Technologies

Наименование параметра	Значение
Напряжение рабочее, В	102
Напряжение максимальное, В	108
Мощность номинальная, кВт	464,5
Практическая удельная мощность, кВт / кг	16,1
Практическая плотность мощности, кВт / дм ³	15,7
Запасаемая энергия, Вт·ч	127,1
Удельная запасаемая энергия, Вт·ч / кг	4,4
Плотность запасаемой энергии, Вт·ч / дм ³	4,3
Масса, кг	28,8
Объем, дм ³	29,6
Рабочая температура окружающей среды, °С	–40...+65
Расчетный срок службы, циклов	1 000 000
Тип элементов	SCA3200
Количество элементов, шт.	36

Таблица 4

Технические характеристики суперконденсаторных систем серии SkelGrid фирмы Skeleton Technologies

Модель	SkelGrid 1500	SkelGrid 1200	SkelGrid 1050	SkelGrid 520
Мощность максимальная, кВт	1500	1200	1050	520
Ток максимальный, А	5000	2500	1700	1400
Мощность номинальная, кВт	380	220	150	75
Ток номинальный, А	1250	750	500	250
Напряжение номинальное, В	612	612	612	612
КПД при максимальной мощности, %	74,3	81,7	90,6	92,4
КПД при номинальной мощности, %	93,1	95,9	97,2	98,6
Количество модулей в ряду, шт.	6	6	6	6
Общее количество модулей, шт.	6	6	6	6
Количество элементов в ряду, шт.	216	216	216	216
Емкость, Ф	14,8	14,8	14,8	14,8

На основе использования принципа преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию построен другой тип СИЭ нового поколения — солнечные батареи (СБ). СБ выпу-

¹ Сайт фирмы «Skeleton Technologies» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.skeletontech.com/skelgrid-ultracapacitor-system> (дата обращения: 24.12.2019).

скаются виде отдельных солнечных элементов, соединенных в солнечные модули¹. Внешний вид солнечного модуля показан на рис. 3, технические характеристики даны в табл. 5.



Рис. 2. Шкаф с суперконденсаторной системой SkelGrid фирмы Skeleton Technologies



Рис. 3. Солнечный модуль типа FSM фирмы Sunways

Таблица 5

Технические характеристики солнечных модулей фирмы Sunways

Модель	FSM 240M	FSM 330M TP	FSM 400M TP
Мощность номинальная, Вт	240	330	400
Напряжение номинальное, В	24	24	24
Напряжение при пиковой мощности $V_{max P}$, В	26,1	38,13	41,6
Ток при пиковой мощности ($I_{max P}$), А	9,2	9,67	9,62
Напряжение холостого хода (V_0), В	32,1	40,84	49,1
Размеры (Д × Ш × Г), мм	1324 × 992 × 35	1689 × 992 × 35	2015 × 1002 × 40
Рабочая температура окружающей среды, °С	−40...+85	−40...+85	−40...+85
Масса, кг	15	18,7	23
Количество элементов, шт.	72	72	144
КПД солнечного модуля, %	15,7	19	19
КПД солнечного элемента, %	18,1	20,7	20,7

Японская компания Eco Marine Power разработала так называемый *солнечный парус* (EnergySail), использующий энергию солнца и ветра², который конструктивно состоит из СБ и жесткого паруса. Применение *солнечного паруса* позволяет одновременно повысить пропульсивную мощ-

¹ Сайт фирмы «Sunways» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://s-ways.ru/products/solnechnye-moduli-sunways-serii-fsm/?PAGEN_3=2 (дата обращения: 24.12.2019).

² Сайт фирмы Eco Marine Power [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ecomarinepower.com/en/energysail> (дата обращения: 24.12.2019).

ность судна и вырабатывать электроэнергию для питания общесудовых потребителей [9]. Модель транспортного судна, оснащенного *солнечным парусом*, представлена на рис. 4.

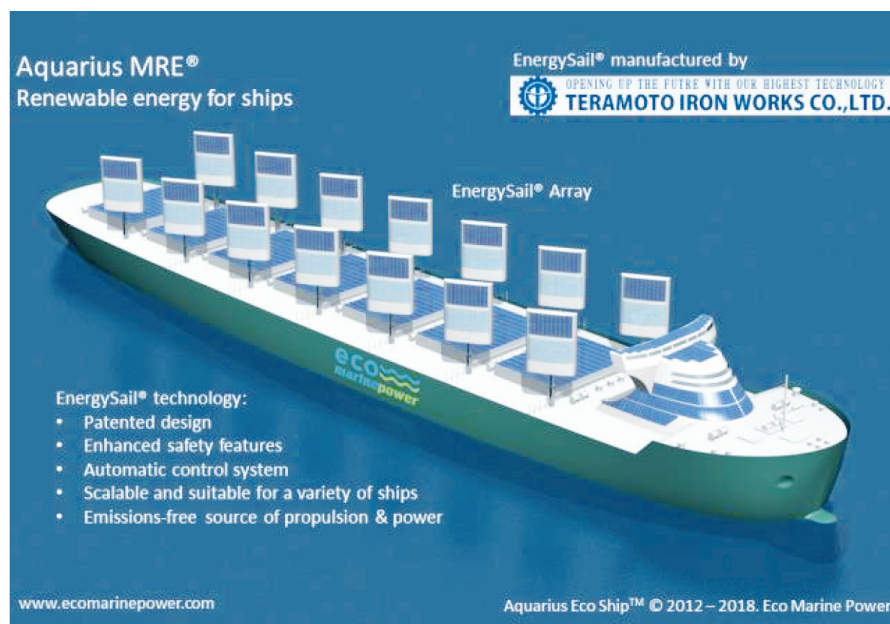


Рис. 4. Модель транспортного судна, оснащенного *солнечным парусом* фирмы Eco Marine Power

К преимуществам моделей, оснащенных системой *солнечного паруса* на морских судах, можно отнести:

- отсутствие вредных выбросов;
- высокую маневренность;
- высокую надежность;
- экономичность (сокращение затрат на топливо);
- простоту обслуживания;
- низкие эксплуатационные затраты.

Недостатком СБ является большая занимаемая площадь и зависимость процесса выработки электроэнергии от факторов окружающей среды.

Принцип действия топливных элементов (ТЭ) основан на преобразовании химической энергии жидкого или газообразного топлива (водород, органические вещества и др.) в электрическую энергию в ходе химической реакции с окислителем [10]. Благодаря этому при работе ТЭ не выделяется большого количества газов, таких как двуокись углерода (CO_2), метан (CH_4) и окиси азота (NO_x), как в случае сжигания органического топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) или газовых турбинах. Выбросы из топливных элементов представляют собой воду в форме пара и двуокись углерода (при использовании органического топлива).

Принципиальная схема простейшего ТЭ водородно-кислородного типа представлена на рис. 5. ТЭ состоит из корпуса, анода (отрицательного электрода) 1, катода (положительного электрода) 2, протонообменной мембраны 3. ТЭ функционирует следующим образом. Подаваемый внутрь водород под действием катализатора разлагается на положительно заряженные ионы (протоны) водорода H^+ и электроны. Специальная мембрана в силу своих свойств пропускает через себя протоны, но задерживает электроны. Таким образом, скопившиеся на аноде электроны создают избыточный отрицательный заряд, а ионы водорода — положительный заряд на катоде. При соединении анода и катода через проводник потечет постоянный электрический ток, который завершит процесс окисления водорода кислородом. Для увеличения номинальной мощности ТЭ объединяют между собой в модули.

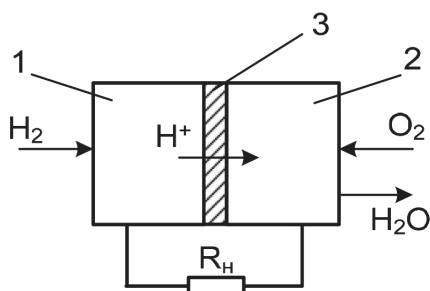


Рис. 5. Принципиальная схема простейшего ТЭ

водородно-кислородного типа:

1 — анод; 2 — катод;

3 — протонообменная мембрана;

R_n — сопротивление нагрузки

ТЭ отличаются от АБ тем, что для выработки электроэнергии в них требуется постоянная подача топлива и окислителя для поддержания химической реакции. Топливные элементы имеют следующие преимущества по сравнению с тепловыми двигателями:

- высокий КПД;
- низкий уровень шума;
- отсутствие вредных выбросов;
- отсутствие подвижных частей;
- возможность выработки тепловой энергии;
- простота технического обслуживания.

Количество вырабатываемой электроэнергии определяется только имеющимися запасами топлива и окислителя и может значительно превышать аналогичный параметр у АБ. Техническое обслуживание топливных элементов является простым и не требует больших затрат.

В последние десятилетия ведется разработка генераторов прямого преобразования тепловой энергии (ГППТ) в электрическую, не имеющих вращающихся частей [11]. Среди них необходимо выделить:

- термоэлектрические (ТЭГ);
- термоэмиссионные (ТЭМГ);
- магнитогидродинамические (МГДГ).

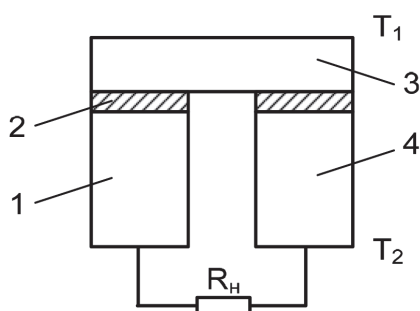


Рис. 6. Принципиальная схема термоэлектрического генератора:

1, 4 — термоэлектроды

с электронной и дырочной проводимостью;

2 — коммутационный подслой;

3 — коммутационное соединение;

R_n — сопротивление нагрузки;

T_1 и T_2 — температура

Принцип действия ТЭГ основан на термоэлектрическом эффекте, который заключается в возникновении разности потенциалов (термоЭДС) на концах термоэлектродов, имеющих разную температуру (T_1 и T_2). При замыкании термоэлемента на внешнюю цепь в ней под действием термоЭДС возникает постоянный ток. Принципиальная схема ТЭГ приведена на рис. 6. Значение термоЭДС одного термоэлемента составляет менее 1 В, поэтому для практического использования их соединяют в системы последовательно-параллельно.

Принцип действия ТЭМГ основан на использовании явления термоэлектронной эмиссии твердых тел, возникающей при их нагреве до высокой температуры.

МГДГ представляют собой устройства, в которых для получения электроэнергии электропроводящее рабочее тело (жидкий металл, плазма и т. д.), перемещается поперечно магнитному полю.

Наиболее широкое практическое применение среди ранее указанных СИЭ нового поколения на современных судах получили АБ на новой элементной базе и СК. Переход на новую элементную базу в АБ позволяет существенно расширить область их применения. АБ на новой элементной базе могут использоваться в двух режимах эксплуатации:

- *буферном*, в котором статический источник работает параллельно с основными, поглощая избыток электроэнергии (при торможении системы электродвижения) и восполняя недостаток электроэнергии (при перегрузке системы электродвижения);
- *автономном*, в котором статический источник функционирует в качестве основного, вырабатывая электроэнергию (при отключенных дизель-генераторах или совместно с ними).

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Применение СИЭ в буферном режиме позволяет существенно снизить расход топлива в динамических режимах эксплуатации СЭД, например, на ледоколах и судах ледового плавания при ходе во льдах или на волнении. Применение СИЭ в автономном режиме особенно актуально в связи с ужесточением экологических требований к морским судам. В частности, в ряде акваторий полностью запрещены как сбросы веществ в воду, так и выбросы в атмосферу, т. е. полностью запрещено применение тепловых двигателей. Единственным возможным вариантом обеспечения хода судна в таких условиях является применение СИЭ. Кроме того, отключение главных дизель-генераторов и переход на питание от СИЭ позволяют снизить общий уровень излучаемого судном подводного шума, что необходимо для обеспечения точности измерений при проведении морских геофизических и биологических исследований с помощью погружных измерительных приборов.

В настоящее время аккумуляторными батареями, работающими в качестве основного источника электроэнергии, в том числе для питания СЭД, оснащаются рабочие катера проекта WB23MT-H, строящиеся на АО «Онежский судостроительно-судоремонтный завод». Планируются к строительству пассажирские суда малого и среднего водоизмещения с основными источниками электроэнергии с АБ на новой элементной базе для эксплуатации в Черном море и акватории Финского залива. Типовое схмотехническое решение судовой единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) на базе СИЭ с системой электродвижения (СЭД) с распределением электроэнергии на постоянном токе приведено на рис. 7.

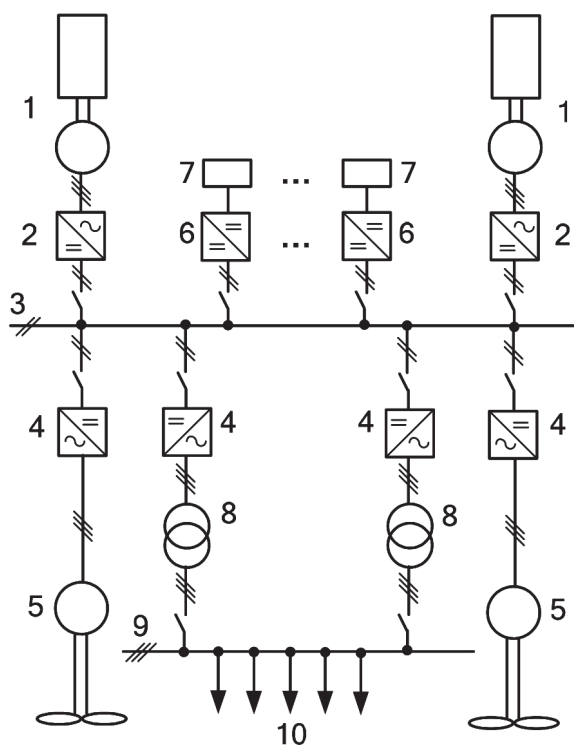


Рис. 7. Типовая структура ЕЭЭС с распределением на постоянном токе на базе статических источников электроэнергии и системы электродвижения:
1 — дизель-генератор; 2 — АВ; 3 — ГРЩ постоянного тока; 4 — АИ; 5 — ГЭД;
6 — регулятор постоянного напряжения; 7 — СИЭ; 8 — трансформатор;
9 — ГРЩ переменного тока; 10 — общесудовые потребители

В качестве основных источников электроэнергии применяются дизель-генераторы (ДГ), подключаемые к главному распределительному щиту (ГРЩ) постоянного тока через полупроводниковые устройства. В качестве таких устройств наиболее целесообразным является применение

активных выпрямителей (АВ). Помимо ДГ в составе судовой электростанции могут применяться различные СИЭ. В целях согласования уровней напряжения, контроля, защиты обеспечения специфических режимов эксплуатации и других функций подключение к ГРЩ постоянного тока осуществляется через соответствующие полупроводниковые регуляторы постоянного напряжения. Для управления, контроля и защиты гребных электродвигателей (ГЭД) предусматриваются автономные инверторы (АИ). Для питания общесудовых потребителей используются АИ, работающие в режиме стабилизации выходного напряжения и частоты. В целях согласования уровня напряжения и обеспечения гальванической развязки между АИ и ГРЩ переменного тока устанавливаются согласующие трансформаторы. Распределение на постоянном токе позволяет реализовать режимы параллельной работы СИЭ различных типов между собой и с ДГ.

Необходимо отметить, что действующие Правила Российского морского регистра судоходства (РС)¹ не в полной мере отражают требования к СИЭ нового поколения. В связи с этим целесообразно выполнить корректировку Правил РС в части требований к СИЭ с учетом современного состояния науки и техники, в том числе к следующим характеристикам и процессам:

- конструктивному исполнению;
- стойкости к климатическим воздействиям;
- размещению на судне;
- режимам заряда и разряда;
- надежности и контролепригодности [12];
- безопасности;
- испытаниям и предъявлениям.

Выводы (Summary)

1. Применение статических источников электроэнергии нового поколения на судах с электродвижением позволяет существенно повысить технико-эксплуатационные характеристики судовых электроэнергетических установок за счет уменьшения количества и номинальной мощности генераторных агрегатов и снижения расхода горюче-смазочных материалов. Дополнительно снижаются выбросы в атмосферу и улучшаются вибро-шумовые характеристики судна.

2. Наиболее перспективными среди статических источников электроэнергии нового поколения являются аккумуляторные батареи на новой элементной базе и суперконденсаторы, что обусловлено их высокими удельными энергетическими показателями, высокой надежностью и удобством эксплуатации.

3. В настоящее время в «Правилах РС» отсутствуют требования к освоенным в производстве типам статических источников электроэнергии нового поколения, обеспечивающим возможность питания СЭД и общесудовых приемников в ходовых режимах эксплуатации судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Электроэнергетические установки танкеров-газовозов / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Судостроение. — 2010. — № 3 (790). — С. 39–42.
2. Кудинович И. В. Ядерные энергетические установки перспективных объектов морской техники гражданского назначения / И. В. Кудинович, А. Ж. Сутеева, В. Г. Хорошев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 4 (386). — С. 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.
3. Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10 — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 337–340.

¹ Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019.

5. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // *Energy Procedia*. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
6. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma [и др.] // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
7. Груздев А. И. Опыт создания батарей на базе литий-ионных аккумуляторов большой ёмкости // *Электрохимическая энергетика*. — 2011. — Т. 11. — № 3. — С. 128–135.
8. Силютин Д. Е. Варианты конструктивных исполнений суперконденсаторов / Д. Е. Силютин, [и др.] // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2012. — Т. 8. — № 7-2. — С. 96–100.
9. Кононенко С. В. Применение солнечных батарей на объектах морской инфраструктуры / С. В. Кононенко [и др.] // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 3. — С. 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-101-106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-101-106.
10. Беляев П. В. Исследования характеристик топливного элемента с протонообменной мембраной при изменении концентрации водорода / П. В. Беляев, Д. А. Подберезкин, Р. А. Эм // *Омский научный вестник*. — 2017. — № 6 (156). — С. 58–61.
11. Баранов А. П. Судовые системы электродвижения с генераторами прямого преобразования теплоты (режимы работы и их моделирование) / А. П. Баранов. — Л.: Судостроение, 1991. — 232 с.
12. Кузнецов С. Е. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 584 с.

REFERENCES

1. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. “Electric generating plants of gas carriers.” *Sudostroenie* 3(790) (2010): 39–42.
2. Kudinovich, Igor V., Adelina Zh. Suteeva, and Vitaly G. Khoroshev. “Nuclear power plants for advanced civil marine technology.” *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 4(386) (2018): 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106
3. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov and Arsenii M. Makarov. “Prospects for the development of electromotive systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Vestnik volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 35 (2013): 337–340.
5. Capasso, Clemente, Emilio Notti, and Ottorino Veneri. “Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats.” *Energy Procedia* 158 (2019): 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
6. Geertsma, R. D., R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman. “Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments.” *Applied Energy* 194 (2017): 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
7. Gruzdev, A. I. “Opyt sozdaniya batarei na baze litii-ionnykh akkumulyatorov bol’shoi emkosti.” *Elektrokhimicheskaya energetika* 11.3 (2011): 128–135.
8. Silyutin, D. E., M. Yu. Chayka, V.S. Gorshkov, and A. I. Dunaev. “Options design supercapacitors.” *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 8.7-2 (2012): 96–100.
9. Kononenko, S. V., S. V. Golovko, M.A. Nadeev, and V.A. Pavlenko. “Use of solar panels on facilities of marine infrastructure.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2018): 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-101-106.
10. Belyaev, P. V., D. A. Podberезкин, and R. A. Em. “Studies of the impact of changes in hydrogen concentration on the output characteristics of the fuel cell proton exchange membrane.” *Omskii nauchnyi vestnik* 6(156) (2017): 58–61.
11. Baranov, A. P. *Sudovye sistemy ehlektrodvizheniya s generatorami pryamogo preobrazovaniya teploty (rezhimy raboty i ikh modelirovanie)*. L.: Sudostroenie, 1991.
12. Kuznetsov, S. E. *Osnovy tekhnicheskoi ehkspluatatsii sudovogo ehlektrooborudovaniya i sredstv avtomatizatsii*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Зайнуллин Руслан Ринатович —

начальник отдела
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Малышев Сергей Михайлович — ассистент,

начальник отдела
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: malyshevsergey@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev, Andrey V. —

PhD, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Zaynullin, Ruslan R. —

Head of Department
JSC “RPC “Ship electric propulsion”
12 Ferskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Malyshev, Sergei M. — Assistant,

Head of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
JSC “RPC “Ship electric propulsion”
12 Ferskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: malyshevsergey@list.ru

Статья поступила в редакцию 9 января 2020 г.

Received: January 9, 2020.