

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-961-973

MAIN DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SHIP ELECTROTECHNICS AND AUTOMATION

A. V. Grigoryev^{1,2}

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

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

In recent decades, the level of electrification and automation of ships has grown significantly. This is due to the increased requirements for technical, operational and technical and economic characteristics on the part of shipowners. The implementation of the requirements has become possible due to the development of related branches of science, engineering and technology: materials science, power converter technology, microprocessor electronics, and information technology. The main directions of development of ship electrical engineering and automation, namely, improvement of power generation and distribution systems, improvement of electric propulsion systems and propulsion systems, improvement of automation systems are considered in the paper. The expediency of using valve generator sets and the transition to electric power distribution on direct current is shown. Static power sources of new generation are actively developing and spreading both in industry and in maritime transport. Good control characteristics, no restrictions on the number of reverses and minimum speed, high efficiency when operating at fractional loads, high torque overload capacity on the propeller significantly expand the scope of modern AC electric propulsion systems. The desire to combine the advantages of different types of propulsion systems has stimulated the creation of combined (hybrid) propulsion systems. Combined installations incorporate a traditional thermal main engine and a propulsion electric motor. The activation of one or another engine is carried out depending on the mode of operation and the speed of the vessel. The introduction of information technologies makes it possible to automate the management and control of maintenance and repair of ship equipment. The modern development of software and hardware and algorithmic support makes it possible to create unmanned ships that can be controlled remotely and move independently (autonomously) according to predetermined algorithms, including algorithms for divergence from other ships at sea. It is concluded that the main tasks within the framework of the directions for development of ship electrical engineering and automation are increasing the energy efficiency of the process for generating electricity by introducing valve generator sets, introduction of innovative sources of electricity with high rates of efficiency and environmental friendliness, including static sources of electricity, the use of rowing electric motors with permanent magnets and inductor type, the use of combined propulsion systems with reversible electric propulsion systems, and increasing the level of automation through the introduction of information technology and artificial intelligence.

Keywords: direction of development, electric power system, valve generator, static power source, electric propulsion system, combined propulsion system, automation system, unmanned vessel.

For citation:

Grigoryev, Andrey V. "Main directions for the development of ship electrotechnics and automation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 961–973. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-961-973.

УДК 629.123:621.31

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НА СУДАХ

А. В. Григорьев^{1,2}

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

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

Темой работы является обзор и анализ основных направлений развития судовой электротехники. Отмечается, что в последние десятилетия значительно вырос уровень электрификации и автоматизации

судов ввиду повышения требований к технико-эксплуатационным и технико-экономическим характеристикам со стороны судовладельцев. Реализация предъявляемых требований стала возможной благодаря развитию смежных отраслей науки, техники и технологии: материаловедения, силовой преобразовательной техники, микропроцессорной электроники, информационных технологий. В статье рассмотрены основные направления развития судовой электротехники и автоматизации: совершенствование систем генерирования и распределения электроэнергии, совершенствование систем электродвижения и пропульсивных установок, совершенствование систем автоматизации. Показана целесообразность применения вентильных генераторных агрегатов и перехода к распределению электроэнергии на постоянном токе. Активное развитие и распространение как в промышленности, так и на морском транспорте получают статические источники электроэнергии нового поколения. Отмечается, что хорошие регулировочные характеристики, отсутствие ограничения по количеству реверсов и минимальной частоте вращения, высокий КПД при работе на долевых нагрузках, высокие перегрузочные способности по моменту на гребном винте значительно расширяют область применения современных систем электродвижения переменного тока. Стремление сочетать достоинства пропульсивных установок разных типов стимулировало создание комбинированных (гибридных) пропульсивных установок. Комбинированные установки имеют в своем составе традиционный тепловой главный двигатель и гребной электродвигатель. Задействование того или иного двигателя осуществляется в зависимости от режима эксплуатации и скорости хода судна. Внедрение информационных технологий позволяет автоматизировать управление и контроль процессов технического обслуживания и ремонта судового оборудования. Современное развитие программно-аппаратных средств и алгоритмического обеспечения дают возможность создавать безэкипажные суда, способные управляться дистанционно и двигаться самостоятельно (автономно) по заранее заданным алгоритмам, в том числе расхождения с другими судами в море. Сделан вывод, что основными задачами в рамках направлений развития судовой электротехники и автоматизации являются: повышение энергоэффективности процесса генерирования электроэнергии путем внедрения вентильных генераторных агрегатов; внедрение инновационных источников электроэнергии с высокими показателями экономичности и экологичности, включая статические источники электроэнергии; применение гребных электродвигателей на постоянных магнитах и индукторного типа; применение комбинированных пропульсивных установок с обратимыми системами электродвижения; повышение уровня автоматизации путем внедрения информационных технологий и искусственного интеллекта.

Ключевые слова: направление развития, электроэнергетическая система, вентильный генератор, статический источник электроэнергии, система электродвижения, комбинированная пропульсивная установка, система автоматизации, безэкипажное судно.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Основные направления развития электротехники и автоматизации на судах / А. В. Григорьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 961–973. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-961-973.

Введение (Introduction)

В последние десять лет отмечается стремительный рост уровня электрификации и автоматизации судов. Расширяется область применения судовых систем электродвижения (СЭД) и единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС). Традиционно СЭД применяются на ледоколах и судах ледового плавания, вместе с тем они все чаще находят применение на научно-исследовательских и гидрографических судах, пассажирских и транспортных судах, паромов, судах снабжения, буксирах и лоцмейстерских судах. Появляются новые типы электрических машин, в частности широкое применение в регулируемом приводе находят синхронные электродвигатели с возбуждением на постоянных магнитах, имеются проектные решения применения данных электрических машин в качестве генераторов. На некоторых судах нашли применение в качестве гребных электродвигателей (ГЭД) индукторные электрические машины. Появляются новые типы движительных (комплексов в частности, комбинированные пропульсивные установки и кольцевые двигатель-движительные системы).

С развитием полупроводниковой техники находят применение обратимые модули: активные выпрямители и автономные инверторы. Внедряются новые типы источников электроэнергии, к которым следует отнести вентильные генераторы и статические источники электроэнергии. К последним относятся аккумуляторные батареи (АБ) на новой элементной базе, суперконденсаторы, солнечные батареи и топливные элементы. С внедрением статических источников электроэнергии

находят применение судовые электроэнергетические системы (СЭС) с распределением электроэнергии на постоянном токе. На современных судах значительно повышается уровень автоматизации и интеграции систем управления, на разных уровнях внедряются микропроцессорные системы управления нового поколения.

Целью данной работы является обзор и анализ основных направлений развития электротехники и автоматизации на судах. К данным направлениям относятся:

1. Совершенствование систем генерирования и распределения электроэнергии.
2. Совершенствование систем электродвижения и пропульсивных установок.
3. Повышение уровня систем автоматизации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Системы генерирования и распределения электроэнергии

Вентильные генераторные агрегаты. Основным источником электроэнергии на современных судах являются дизель-генераторы (ДГ), работающие с постоянной частотой вращения. Нагрузка на судовую электростанцию (СЭС) меняется в широком диапазоне в разных режимах эксплуатации судна, что приводит к изменению нагрузки на ДГ. Работа ДГ с постоянной частотой вращения при работе на долевой нагрузке имеет ряд недостатков, среди которых увеличение расхода горюче-смазочных материалов, снижение КПД и ресурса приводного дизеля.

Решение проблемы связано с увеличением количества ДГ в составе СЭС или изменением их режима эксплуатации. В первом случае увеличивается стоимость оборудования и эксплуатационные расходы, во втором — необходимо реализовать режим работы ДГ с переменной частотой вращения. Вентильный ДГ может работать с переменной частотой вращения в функции изменения нагрузки. Для стабилизации электрических параметров (напряжения и частоты) в судовой сети при переменной частоте вращения вентильного ДГ применяется полупроводниковый преобразователь (ПП). Приводной двигатель вместе с генератором и ПП образуют вентильный генераторный агрегат (ВГА) [1]–[5].

В качестве приводного двигателя в составе ВГА помимо автономного дизеля могут также применяться газовые и паровые турбины и дизельные главные двигатели (ГД). В качестве генератора в составе ВГА могут применяться электрические машины разных типов, в том числе синхронные с электромагнитным возбуждением, синхронные с возбуждением на постоянных магнитах, асинхронные, индукторные. Структурная схема вентильного дизель-генераторного агрегата (ВДГА) приведена на рис. 1, а.

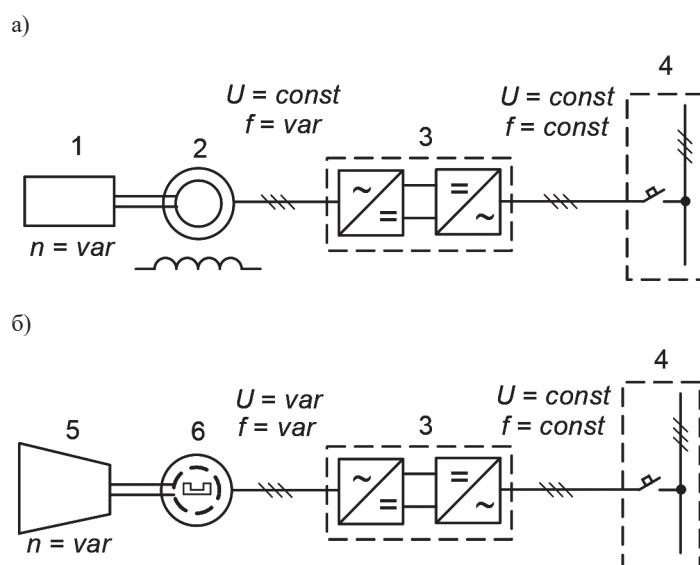


Рис. 1. Вентильный генераторного агрегата: а — на базе дизеля; б — на базе турбины;
1 — дизель; 2 — синхронный генератор с электромагнитным возбуждением;
3 — полупроводниковый преобразователь; 4 — распределительный щит; 5 — турбина;
6 — синхронный генератор с постоянными магнитами

В состав ВДГА входит приводной дизель, работающий с переменной частотой вращения, синхронный генератор с электромагнитным возбуждением и полупроводниковый преобразователь. Фотография первого ВДГА отечественной разработки, установленной на шаланде «Сильная» пр. НВ600 мощностью 100 кВт, приведен на рис. 2.

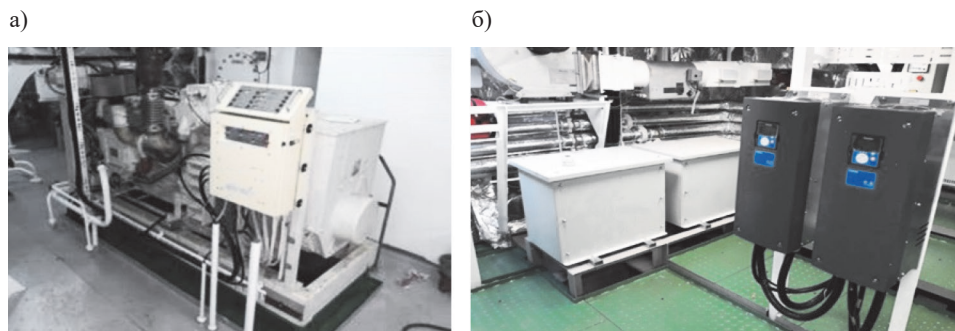


Рис. 2. Вентильный дизель-генераторный агрегат:
а — дизель-генератор; б — фильтры и преобразователи частоты

Генератор в составе вентильного турбогенераторного агрегата (ВТГА) целесообразно выполнять высокооборотным с возбуждением на постоянных магнитах. Структурная схема вентильного дизель-генераторного агрегата (ВДГА) приведена на рис. 1, б. В состав ВТГА входит приводная турбина, работающая с переменной частотой вращения, синхронный генератор с возбуждением постоянных магнитах и полупроводниковый преобразователь. Фотография первого отечественного вентильного генератора на постоянных магнитах мощностью 4 МВт с частотой вращения 14 000 об/мин представлена на рис. 3.

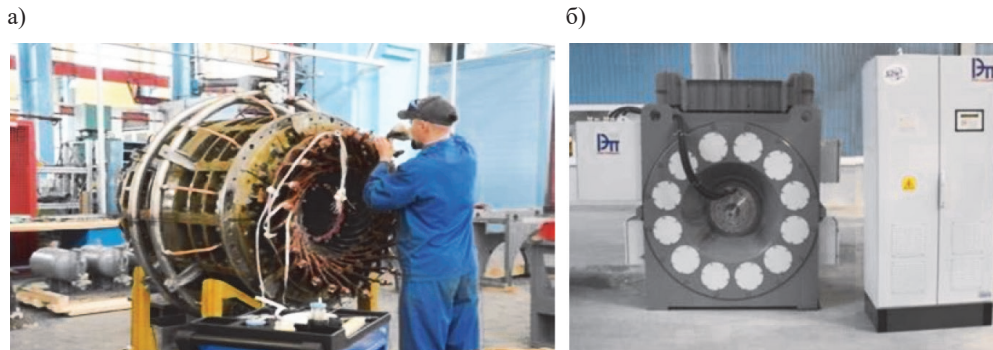


Рис. 3. Внешний вид вентильного турбогенератора на постоянных магнитах:
а — процесс сборки; б — готовое изделие

ВГА с приводом от ГД образуют валогенераторную установку (ВГУ). Применение ВГА позволяет снизить расход горюче-смазочных материалов, повысить КПД, ресурс и надежность приводных двигателей генераторных агрегатов, реализовать распределение электроэнергии на постоянном токе. В состав современных ВГУ входят синхронные генераторы на постоянных магнитах и полупроводниковые преобразователи на базе активных выпрямителей.

Статические источники электроэнергии. Помимо источников на базе вращающихся электрических машин на судах устанавливаются статические источники и накопители 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).

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 [5]–[10].

К СИЭ нового поколения следует отнести:

- аккумуляторные батареи (АБ) на новой элементной базе;
- суперконденсаторы (СК);
- солнечные батареи (СБ);
- топливные элементы (ТЭ).

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 ДГ или совместно с ними).

Внешний вид шкафа СИЭ, установленного на судне и предназначенного для питания гребной электрической установки, приведен на рис. 4.



Рис. 4. Блок пропульсивных аккумуляторных батарей в машинном отделении судна

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 является особенно актуальным 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 ДГ 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. Особенности СИЭ является то, что они, как правило, вырабатывают электроэнергию постоянного тока, а напряжение не превышает 1000 В.

Передача и распределение электроэнергии. Традиционным способом передачи и распределения электроэнергии на судне является применение трехфазных электрических сетей переменного тока. Для регулирования частоты вращения, контроля и защиты гребных электродвигателей применяются полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) со звеном постоянного тока. В такой электроэнергетической системе ДГ, по сути, являются вентильными источниками электроэнергии, работающими на неуправляемые или управляемые выпрямители ППЧ. При этом на сборных шинах главных распределительных устройств возникают несинусоидальные искажения формы кривой напряжения, что снижает качество электроэнергии в судовой сети и надежность работы судового электрооборудования и систем автоматизации.

Мощность ППЧ, входящих в состав СЭД, соизмерима с мощностью судовой электростанции. Для снижения негативного воздействия на энергосистему от выпрямителей и обеспечения электромагнитной совместимости в составе СЭД используются трансформаторы, выполненные на полную мощность, в том числе трех- и многообмоточные, а для защиты судовых электроприемников — понижающие трансформаторы гальванической развязки, в том числе с фильтрами гармоник. Масса, габариты и объемы, занимаемые трансформаторами как издержки борьбы с гармониками в ЕЭЭС являются весьма значительными.

Важными вопросами при ее создании являются вопросы синхронизации, распределения мощности при параллельной работе, обеспечения требуемого качества электроэнергии, защиты. Одним из возможных решений этих задач является переход к распределению электроэнергии на постоянном токе [9], которое, в свою очередь, позволяет реализовать режимы параллельной работы источников с различными характеристиками и основанных на различных физических принципах. Переход к распределению электроэнергии на постоянном токе позволит отказаться от использования силовых пропульсивных трансформаторов и значительно улучшить массогабаритные показатели ЕЭЭС с СЭД. Кроме того, упрощается система управления ЕЭЭС, поскольку исключается распределение реактивной мощности и синхронизации генераторов по фазе и частоте.

При создании ЕЭЭС необходимо обеспечить бесперебойность электроснабжения при изменяющихся внешних условиях и нагрузки, совместив при этом преимущества источников различных типов. Структурная схема унифицированной судовой электроэнергетической системы на базе генераторных агрегатов и СИЭ с распределением электроэнергии на постоянном токе показана на рис. 5.

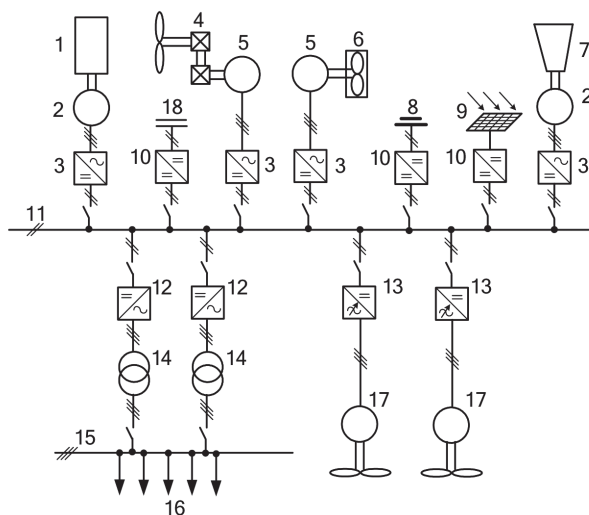
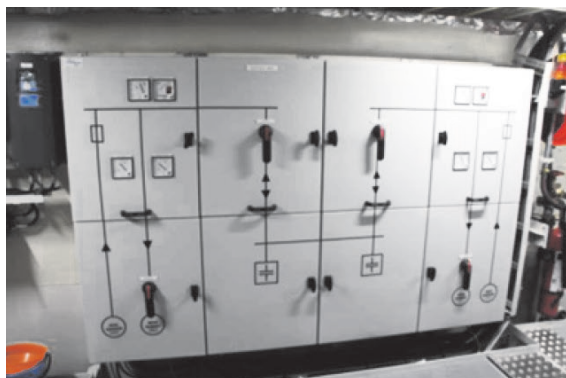


Рис. 5. Структурная схема судовой электроэнергетической системы на базе генераторных агрегатов и статических источников с распределением электроэнергии на постоянном токе:

- 1 — дизель; 2, 5 — генератор; 3 — активный выпрямитель; 4 — ветряная турбина;
- 6 — гидротурбина; 7 — газовая турбина; 8 — аккумуляторная батарея; 9 — солнечная батарея;
- 10 — преобразователь постоянного напряжения; 11 — ГРЩ постоянного тока;
- 12 — автономный инвертор со стабилизированными параметрами; 13 — автономный инвертор с регулируемыми параметрами; 14 — трансформатор; 15 — ГРЩ переменного тока;
- 16 — потребители общего назначения; 17 — гребной электродвигатель

Источники электроэнергии подключаются к главному распределительному щиту (ГРЩ) постоянного тока *11* через полупроводниковые устройства *3*, *10*. В качестве таких устройств для источников переменного тока наиболее целесообразным является применение активных выпрямителей *3*. В целях согласования уровней напряжения, контроля, защиты обеспечения специфических режимов эксплуатации и других функций подключение СИЭ к ГРЩ постоянного тока осуществляется через соответствующие полупроводниковые регуляторы постоянного напряжения *10*. Для управления, контроля и защиты электродвигателей в составе электроприводов предусматриваются автономные инверторы с регулируемыми параметрами *13*. Для питания потребителей общего назначения используются автономные инверторы, работающие в режиме стабилизации выходного напряжения и частоты *12*. В целях согласования уровня напряжения и обеспечения гальванической развязки между автономными инверторами и ГРЩ переменного тока устанавливаются согласующие трансформаторы *14*. Внешний вид ГРЩ постоянного тока и полупроводниковых модулей (выпрямитель — инвертор) представлен на рис. 6.

а)



б)



Рис. 6. Внешний вид главного распределительного щита постоянного тока (а) и полупроводниковые модули выпрямитель — инвертор (б)

Применение ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе целесообразно при суммарной мощности источников до 5 МВт. При мощности свыше 5 МВт целесообразен переход на высокое напряжение (свыше 1000 В) с распределением электроэнергии на переменном токе.

Системы электродвижения и комбинированные пропульсивные установки

Системы электродвижения. На судах ледового класса и судах с широким диапазоном изменения скорости, где требуется высокая маневренность и перегрузочная способность по вращающему моменту, находят применение СЭД. Механическая энергия в генераторах преобразуется в электрическую, передается по линиям электропередач, преобразуется в требуемые (регулируемые) по величине значения напряжения и частоты, а затем в гребных электродвигателях (ГЭД) происходит обратное преобразование электрической энергии в механическую [11]–[15].

В состав СЭД входят распределительные щиты, кабельные трассы, преобразователи электроэнергии (электромашинные, электромагнитные, полупроводниковые), ГЭД, гребные винты или ВРК. В зависимости от типа ПП и величины напряжения СЭЭС в СЭД применяются пропульсивные трансформаторы или дроссели. Как правило, трансформаторы выполняются трехобмоточными. Широкое распространение СЭД связано с их достоинствами по сравнению с традиционными пропульсивными установками на базе тепловых двигателей, среди которых следует выделить:

- хорошие регулировочные характеристики,
- отсутствие ограничения по количеству реверсов и минимальной частоте вращения, что повышает маневренность судна;
- высокий КПД при работе на долевых нагрузках и, как следствие, снижение эксплуатационных расходов;

– высокие перегрузочные способности по моменту на гребном винте, что позволяет судну работать в ледовых условиях;

– возможность более рационального размещения оборудования на судне и др.

Перспективными типами ГЭД являются:

– синхронные электродвигатели с возбуждением на постоянных магнитах традиционной конструкции;

– синхронные электродвигатели с возбуждением на постоянных магнитах кольцевой конструкции;

– вентильно-индукторные электродвигатели.

Синхронные ГЭД с постоянными магнитами традиционной конструкции могут выполняться с несколькими системами трехфазных обмоток. Внешний вид электродвигателей данного типа для судов малого водоизмещения приведен на рис. 7.

а)



б)



Рис. 7. Внешний вид синхронных гребных электродвигателей с постоянными магнитами:

а — шестифазный электродвигатель; б — двенадцатифазный электродвигатель

У синхронных ГЭД с постоянными магнитами кольцевой конструкции имеется возможность установить лопасти гребного винта внутри ротора, чем достигается существенное снижение гидродинамического сопротивления. Внешний вид электродвигателя данного типа мощностью 30 кВт, установленного на испытательном стенде, представлен на рис. 8.

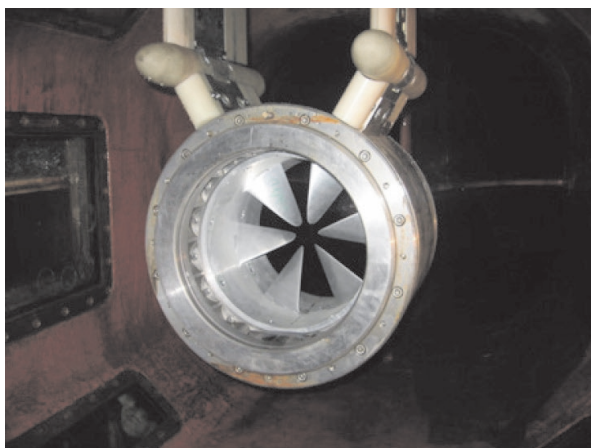


Рис. 8. Внешний вид синхронного гребного электродвигателя с постоянными магнитами кольцевой конструкции

Вентильно-индукторные ГЭД не имеют обмоток возбуждения. Данные двигатели отличает высокая надежность и высокий КПД во всем диапазоне изменения нагрузки. Фотография гребного индукторного электродвигателя мощностью 2 МВт, установленного на морском буксире пр. 745 «Виктор Конецкий», представлена на рис. 9.



Рис. 9. Вентильно-индукторный гребной электродвигателя в процессе изготовления

Наряду с имеющимися преимуществами СЭД имеют ряд недостатков, среди которых следует выделить высокие массогабаритные показатели оборудования и силовых кабельных трасс, высокие капитальные и эксплуатационные затраты, повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала и др.

Комбинированные пропульсивные установки. Для обеспечения движения судна применяются пропульсивные установки. Пропульсивной установкой называют комплекс механизмов и устройств, предназначенный для обеспечения движения судна. Судовая пропульсивная установка состоит из движителя, валопровода, главных судовых передач, главных тепловых или гребных электрических двигателей.

На судах находят применение пропульсивные установки разного типа и состава. Наибольшее распространение в настоящее время получили традиционные пропульсивные установки с главными тепловыми двигателями и пропульсивные установки с ГЭД. Каждому из указанных типов установок присущи достоинства и недостатки, которые определяют их область применения. Стремление сочетать достоинства пропульсивных установок разных типов стимулировало создание комбинированных (гибридных) пропульсивных установок (КПУ) [16]–[20].

Комбинированная пропульсивная установка (КПУ) — это судовая пропульсивная установка, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух или более разнотипных судовых двигателях — тепловых и электрических, работающих на общий движитель. Типовая структурная схема КПУ с СЭД представлена на рис. 10.

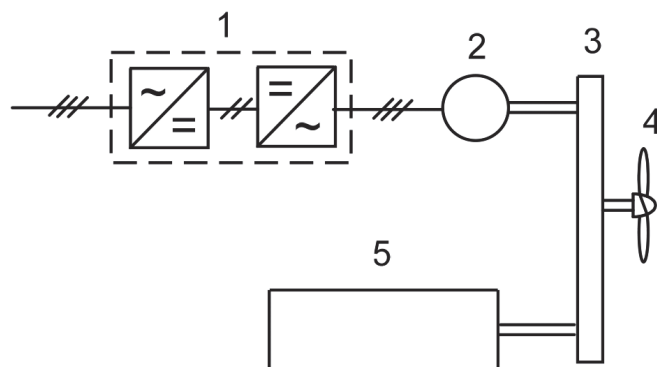


Рис. 10. Структурная схема КПУ:

- 1 — полупроводниковый преобразователь; 2 — гребной электродвигатель;
3 — суммирующий редуктор; 4 — гребной винт;
5 — тепловой главный двигатель

В состав КПУ входит тепловой ГД и электрический ГЭД. Два двигателя с разными физическими процессами, свойствами и техническими характеристиками механически связаны между собой с помощью редуктора или валопровода и работают на общий движитель (гребной винт). КПУ сочетают в себе свойства как традиционных установок на базе тепловых двигателей, так и систем электродвижения. В зависимости от соотношения мощностей ГД и ГЭД свойства традиционных пропульсивных установок и СЭД проявляются в разной степени. КПУ характеризуются большим разнообразием схмотехнических решений, конструктивным исполнением. КПУ отличаются по составу, структуре, режимам эксплуатации. В связи с этим КПУ имеют широкую номенклатуру комплектующего оборудования.

Как правило, мощность ГД значительно превосходит мощность ГЭД. В качестве движителя может применяться гребной винт или механическая ВРК. В качестве ГЭД могут применяться асинхронные электрические машины, синхронные электрические машины с постоянными магнитами, вентильно-индукторные электрические машины.

Системы автоматизации. Повышение уровня автоматизации обеспечивает существенное улучшение технико-эксплуатационных показателей судна. Исторически развитие судовых систем автоматизации прошло ряд этапов: автоматизация отдельных агрегатов путем внедрения локальных систем управления (ЛСУ); автоматизация комплексов энергетического и механического оборудования путем внедрения интегрированных систем управления техническими средствами (ИСУ ТС); автоматизация судна в целом с обеспечением взаимодействия между различными системами автоматизации, включая ИСУ ТС, систему управления электростанцией, систему управления динамическим позиционированием и др. Выбор уровня автоматизации должен быть экономически обоснован с учетом назначения судна, его размерений и характеристик.

Внедрение информационных технологий (ИТ) позволяет автоматизировать управление и контроль процессов технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) судового оборудования. Применение ИТ обеспечивает общее снижение эксплуатационных расходов, снижение издержек на снабжение запчастями, оптимизацию структуры производственных фондов, выявление, вывод из эксплуатации и замену неэффективного оборудования, увеличение межремонтных интервалов, оптимизацию ремонтных циклов, снижение доли внеплановых работ, оптимизацию загрузки ремонтного персонала, повышение качества документационного обеспечения работ.

Современное развитие программно-аппаратных средств и алгоритмического обеспечения позволяет создавать безэкипажные суда, способные как управляться дистанционно, так и двигаться самостоятельно (автономно) по заранее заданным алгоритмам, в том числе алгоритмам расхождения с другими судами в море.

Развитие технологий «искусственного интеллекта» позволяет перейти к созданию так называемого «умного судна», отличительной особенностью которого является возможность систем автоматизации решать широкий спектр задач управления судном без участия человека.

Выводы (Summary)

Обзор основных направлений развития судовой электротехники и современного состояния отечественного судового машиностроения, электромашиностроения, электроаппаратостроения, приборостроения и соотнесение их с потребностями транспортной отрасли показал, что наиболее перспективными направлениями импортозамещения в судостроении являются:

1. Создание отечественных синхронных электрических машин с постоянными магнитами.
2. Создание отечественных защитно-коммутационных аппаратов и полупроводниковых устройств, в том числе на постоянном токе и высоковольтных на переменном токе.
3. Создание отечественных модульных программируемых средств автоматизации.

Проведенный анализ показал, что основными задачами в рамках направлений развития судовой электротехники и автоматизации являются:

- повышение энергоэффективности процесса генерирования электроэнергии путем внедрения вентильных генераторных агрегатов;

- внедрение инновационных источников электроэнергии с высокими показателями экономичности и экологичности, в том числе статических источников электроэнергии на базе АБ нового поколения и суперконденсаторов;
- применение в составе гребных электрических установок гребных электродвигателей на постоянных магнитах и двигателей индукторного типа;
- применение комбинированных пропульсивных установок с обратимыми системами электродвижения, имеющими возможность работы как в двигательном (автономно или совместно с главным двигателем), так и генераторном режиме;
- повышение уровня автоматизации путем внедрения информационных технологий и искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовая электростанция с вентильными дизель-генераторами переменной частоты вращения / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.
2. Григорьев А. Первый отечественный судовой вентильный дизель-генераторный агрегат переменного тока / А. Григорьев, В. Фатов, С. Малышев // Морской флот. — 2018. — № 5 (1539). — С. 40–42.
3. Коробко Г. И. Разработка и моделирование дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической системе / Г. И. Коробко, О. С. Хватов, И. Г. Коробко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2017. — № 1. — С. 55–61.
4. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsized Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // Energy Procedia. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
5. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman // Applied Energy. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
6. Груздев А. И. Опыт создания батарей на базе литий-ионных аккумуляторов большой ёмкости / А. И. Груздев // Электрохимическая энергетика. — 2011. — Т. 11. — № 3. — С. 128–135.
7. Силютин Д. Е. Варианты конструктивных исполнений суперконденсаторов / Д. Е. Силютин, М. Ю. Чайка, В. С. Горшков, А. И. Дунаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2012. — Т. 8. — № 7–2. — С. 96–100.
8. Кононенко С. В. Применение солнечных батарей на объектах морской инфраструктуры / С. В. Кононенко, С. В. Головкин, М. А. Надеев, В. А. Павленко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 3. — С. 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-101-106.
9. Григорьев А. В. Особенности расчетов токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, С. М. Малышев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 48–49. — С. 104–108.
10. Будашко В. В. Разработка трехуровневой многокритериальной стратегии управления гибридной судовой энергетической установкой комбинированного пропульсивного комплекса / В. В. Будашко // Электротехника і Електромеханіка. — 2017. — № 2. — С. 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
11. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
12. Ancona M. A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M. A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, J. Rosati // Energy Conversion and Management. — 2018. — Vol. 164. — Pp. 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
13. Ling-Chin J. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective — A life cycle assessment case study / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 117. — Pp. 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.
14. Романовский В. В. Повышение качества электрической энергии в судовых электроэнергетических системах / В. В. Романовский, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного

флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 87–101. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101.

15. Бурков А. Ф. Развитие прибрежного морского транспорта с гибридными энергоустановками на примере Дальневосточного региона / А. Ф. Бурков, В. В. Миханюшин, Нгуен Ван Ха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 102–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-102-114.

16. Каракаев А. Б. Обзор исследований моделирования адаптивных систем автоматического управления компонентами электроэнергетических систем / А. Б. Каракаев, Г. А. Галиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 139–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153.

17. Гельвер Ф. А. Структура электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока / Ф. А. Гельвер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 174–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-174-188.

18. Иванова Т. С. Применение сверхпроводящих индуктивных накопителей в энергосети судового комплекса / Т. С. Иванова, В. И. Маларев, Б. Н. Абрамович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 402–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-402-415.

19. Романовский В. В. Судовые гибридные электроэнергетические системы с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.

20. Воробьев К. А. Система двунаправленных преобразователей электрической энергии в сетях ограниченной мощности / К. А. Воробьев, Н. А. Поляков, Р. Стжелецки // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 812–823. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4812-823.

REFERENCES

1. Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. “Ship electric power plant with valve diesel-generators of variable rotation speed.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.

2. Grigoryev, A., V. Fatov, and S. Malyshev. “Perviy otechestvenniy sudovoy ventilniy dizel-generatorniy agregat peremennogo toka.” *Morskoy flot* 5(1539) (2018): 40–42.

3. Korobko, G. I., O. S. Khvatov, and I. G. Korobko “Designing and modelling of variable speed diesel generators for ship unified electric power systems.” *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* 1 (2017): 55–61.

4. 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.

5. 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.

6. Gruzdev, A. I. “Opyt sozdaniya batarei na baze litii-ionnykh akkumulyatorov bol'shoi emkosti.” *Elektrokhimicheskaya energetika* 11.3 (2011): 128–135.

7. 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.

8. 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.

9. Grigoryev, A. V., A. Yu. Vasilyev, and S. M. Malyshev. “Calculation features for short circuit currents in shipboard electric power systems with electrical power distribution on direct current.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 48–49 (2017): 104–108.

10. Budashko, V. V. “Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.” *Elektrotehnika i Elektromehanika* 2 (2017): 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.

11. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabrielli, and Karin Andersson. "Optimal load allocation of complex ship power plants." *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
12. Ancona, Maria Alessandra, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, and J. Rosati. "Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization." *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
13. Ling-Chin, J., and A. P. Roskilly. "Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective—A life cycle assessment case study." *Energy Conversion and Management* 117 (2016): 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.
14. Romanovskiy, Victor V., and Artem S. Bezhik. "Improving the quality of electric energy in ship power systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 87–101. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101.
15. Burkov, Alexey F., Victor V. Mikhannoshin, and Nguyen Van Ha. "Development of coastal marine transport with hybrid power plants on the example of the Far Eastern region." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 102–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-102-114.
16. Karakayev, Aleksandr B., and Gleb A. Galiev. "Researches review of modelling adaptive automatic control systems of electrical power systems components." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 139–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153.
17. Gelfer, Fedor A. "Structure of the ship's electromotive complex with dual DC buses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 174–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-174-188.
18. Ivanova, Tatiana S., Vadim I. Malarev, and Boris N. Abramovich. "Using superconducting magnetic energy storage in the electric networks of a ship complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 402–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-402-415.
19. Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. "Hybrid electricity systems of vessels with dc-grid system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.
20. Vorobev, Konstantin A., Nikolai A. Poliakov, and Ryszard Strzelecki. "Bidirectional power converter system implementation in limited power grid." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 812–823. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-812-823.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, профессор
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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Grigoryev, Andrey V. —
PhD, 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

Статья поступила в редакцию 23 октября 2022 г.

Received: October 23, 2022.