ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181

SPECIAL STRUCTURE OF THE ELECTRICAL PROPULSION PLANT WITH DC-GRID SYSTEM

V. V. Romanovskiy, V. A. Malishev, A. S. Bezhik

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Peterburg, Russian Federation

Recently there has been a persistent trend in increasing the volume of electrical equipment used in ship needs. Thus, the most efficient and environmentally friendly ship power distribution system is the direct current (DC) system, which was adopted for the uniform electric power plant of the vessel in conjunction with an AC network. The ship power supply system using DC provides simple, flexible and functional integration of energy sources such as variable-speed generators and shaft generators, batteries and fuel cells. During the system creation, much attention was paid to the variable-speed generators, where the power transmission, as well as drive and traction propulsive devices are electric drives with variable speed, which can reduce fuel consumption on some types of vessels. The schematic solutions of electrical propulsion plants with a distributed DC bus for auxiliary fleet vessels on the example of the projects of the supply vessel Dina Star and the port icebreaker Aker ARC 124 are discussed in the paper. The possibilities are determined and the structure of the prospective system is analyzed. The issues of the electric energy accumulation in the dynamic modes of the plant operation are considered. The analysis of the electrical energy storage, as well as connection diagrams is performed. The efficiency of using the electrical propulsion plants in the dynamic modes characteristic of the selected types of vessels is shown. The use of diesel engines of variable speed on the vessels is considered.

Keywords: electrical propulsion plant, system with a distributed DC bus, DC systems, auxiliary fleet vessels.

For citation:
Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. "Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

УДК 621.315: 621. 3. 025

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ШИНОЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик

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

Рассмотрена наиболее эффективная и экологически чистая судовая система распределения электроэнергии — система постоянного тока. Наиболее эффективной и экологически чистой судовой системой распределения электроэнергии является система постоянного тока, которая была принята для единой электроэнергетической установки судна в сочетании с сетью переменного тока. Судовая установка электроснабжения с использованием постоянного тока обеспечивает простую, гибкую и функциональную интеграцию источников энергии, таких как генераторы с переменной частотой вращения и валогенераторы, батареи и топливные элементы. Электроэнергетическую систему с распределенной шиной постоянного тока применяют, главным образом, для повышения отказоустойчивости генераторов переменой частоты вращения и энергосбережения. При создании данной системы большое внимание было уделено генераторам с переменной частотой вращения, где энергетическая передача, а также приводной и тяговый движители представляют собой электрические приводы с переменной частотой вращения, что может уменьшить расход топлива на некоторых типах судов. Применение быстродействующих систем накопления электроэнергии совместно с распределенной шиной постоянного тока позволяет эффективно снизить колебания мощности нагрузки в энергосистеме, сглаживая внезапные изменения в потреблении энергии. В статье рассмотрены схемные решения гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока для судов вспомогательного флота

на примере проектов судна-снабженца Dina Star и портового ледокола Aker ARC 124. Определены возможности и выполнен анализ структуры перспективной системы. Рассмотрены вопросы накопления электроэнергии в динамических режимах работы установки. Выполнен анализ хранилищ электрической энергии, а также схем подключения. Показана эффективность использования гребных электрических установок в динамических режимах, свойственных выбранным типам судов. Рассмотрено применение на судах дизелей переменной частоты вращения.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, система с распределенной шиной постоянного тока, суда вспомогательного флота.

Для цитирования:
Романовский В. В. Анализ схемных решений гребных электрических установок 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. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

Введение (Introduction)

В последнее время наблюдается стойкая тенденция наращивания объемов электрического оборудования, используемого для судовых нужд. Вследствие этого повышаются требования к качеству вырабатываемой электрической энергии, нормы которой определены в межгосударственном стандарте (ГОСТ 32144–2013). Перед судостроителями поставлены следующие задачи: электроэнергетические системы должны обеспечивать необходимое качество вырабатываемой электрической энергии, быть надежными, в том числе обладать приемлемым сочетанием стоимости установки и эксплуатации при допустимых массогабаритных показателях. При этом технико-экономические показатели определяются, главным образом, рациональным выбором величины напряжения и родом тока [1]. Так, наиболее эффективной и экологически чистой судовой системой распределения электроэнергии является система постоянного тока (DC), которая была принята для единой электроэнергетической установки судна в сочетании с сетью переменного тока. При ее создании большое внимание было уделено генераторам с переменной частотой вращения, экономии пространства и повышению производительности установки в динамических режимах [2].

Судовая установка электроснабжения с использованием постоянного тока (рис. 1) обеспечивает простую, гибкую и функциональную интеграцию источников энергии, таких как генераторы с переменной частотой вращения и валогенераторы, батареи и топливные элементы. Кроме того, силовая система с постоянным током и силовой электроникой обеспечивает перспективную основу для цифровых решений на борту судна [3], [4].

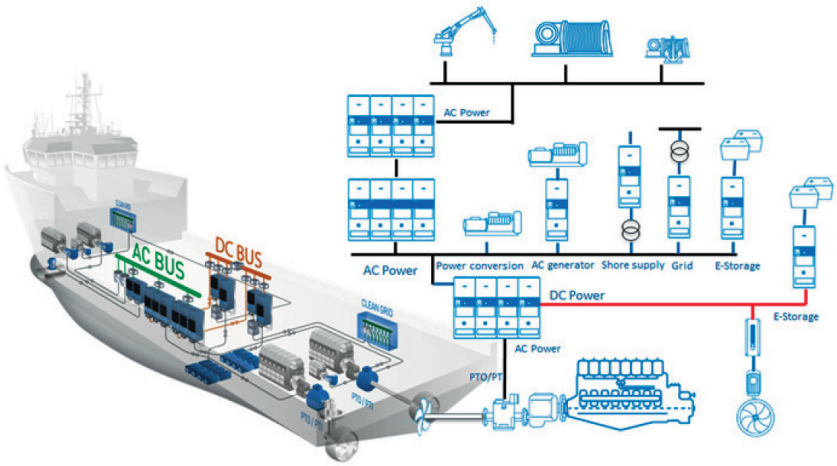

Рис. 1. Однолинейная схема ГЭУ с РШПТ

В статье рассмотрены следующие вопросы: определены возможности и выполнен анализ структуры перспективной системы, рассмотрены вопросы накопления электроэнергии в динами-

ческих режимах работы установки, выполнен анализ хранилищ электрической энергии, а также схем подключения, показана эффективность использования гребных электрических установок (ГЭУ) в динамических режимах, свойственных выбранным типам судов, рассмотрено применение на судах дизелей переменной частоты вращения, выполнен анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока для судов вспомогательного флота на примере проектов судна-снабженца Dina Star и портового ледокола Aker ARC 124.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Система DC-grid позволяет упростить использование валогенераторов с переменной частотой вращения, батарей и топливных элементов для расширенной работы с нулевым уровнем выбросов в чувствительных зонах. Эту систему применяют для повышения отказоустойчивости генераторов переменой частоты вращения и энергосбережения. Суда также получают возможность распределения основной мощности через напряжение в 1000 В постоянного тока вместо 690 В или 660 В переменного тока, что приводит к экономии до 40 % и более на кабелях.

В рассматриваемой системе (рис. 2) почти вся энергия вырабатывается генераторами с дизельными первичными двигателями. Использование электрической силовой установки, где энергетическая передача, а также приводной и тяговый движители представляют собой электрические приводы с переменной частотой вращения, может уменьшить расход топлива на некоторых типах судов. Однако в особых условиях работы, таких как динамическое позиционирование, нагрузка существенно меняется, например, под воздействием на корпус судна морских волн и при влиянии погоды [5], [6]. Внезапное изменение нагрузки представляет собой продолжительные искажения в электрической системе и в первичных двигателях. Кроме того, чтобы сохранить безопасные пределы работы энергетических установок, необходимо среднюю нагрузку рабочих приводов держать пониженной, что повышает расход топлива и выбросы вредных веществ в окружающую среду [7]. Быстродействующие системы накопления электроэнергии позволяют решить эти проблемы, эффективно снижая колебания мощности нагрузки в энергосистеме, сглаживая внезапные изменения в потреблении энергии, улучшая стабильность системы и увеличивая среднюю мощность производимой энергии с меньшим количеством работающих генераторов, и, следовательно, способствуют снижению расхода топлива [6].

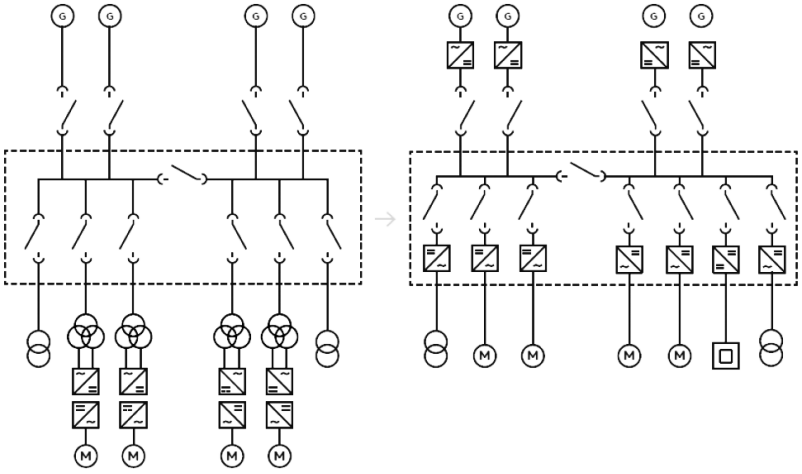

Рис. 2. Базовая трансформация АС электроэнергетической системы в DC электроэнергетическую систему

Технология специальных конденсаторов является одним из вариантов решения накопления электроэнергии. DC-DC преобразователь контролирует энергию, протекающую к специальному конденсатору, подключенному к шине постоянного тока преобразователя частоты [8], [9]. Эта конфигурация обеспечивает передачу электроэнергии в обоих направлениях. DC-DC

преобразователь представляет собой сочетание понижающего и усиливающего преобразователя. Данный конвертер испытывает повышение нагрузки, когда суперконденсатор заряжается, и разгружается в то время, как конденсатор разряжается. Направление и величина тока контролируются рабочим циклом D полупроводникового моста. В понижающем режиме, который показан на рис. 3 [10], электроэнергия протекает от сети к специальному конденсатору, который заряжается:

$$U_{sc} / U_{source} = D_1,$$

где D_1 — рабочий цикл в понижающем режиме.

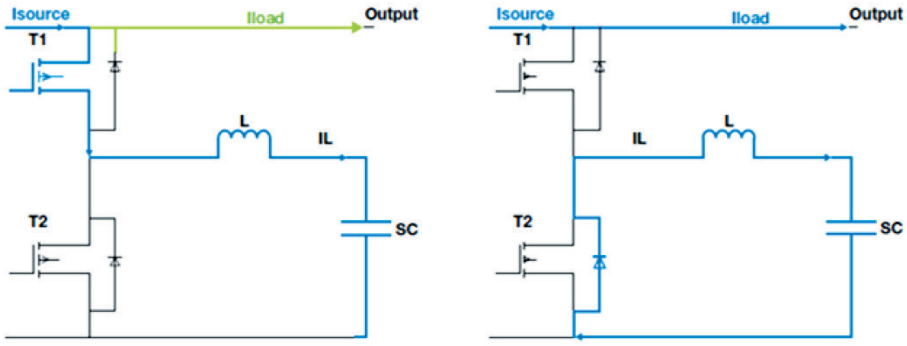

Рис. 3. Режим понижающего конвертера

В усиливающем режиме, как показано на рис. 4 [10], электроэнергия протекает от специального конденсатора в сеть, который, разряжаясь, выделяет электроэнергию:

$$U_{sc} / U_{source} = 1 / (1 - D_2),$$

где D_2 — рабочий цикл в усиливающем режиме.

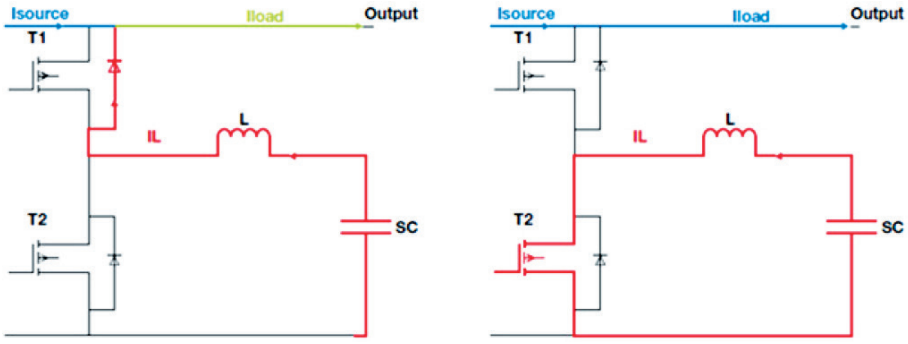

Рис. 4. Режим усиливающего конвертера

Существует несколько классических методов управления, таких как режим управления, тягой, током и мощностью [11]. В данном случае используется управление потоком мощности, поскольку более практичным является реализация данного метода как в системах управления, так и в симуляции по сравнению с контролем тяги и управлением нечетной логикой. Поток энергии системы соответствует закону сохранения энергии. Значения мощности источника, нагрузки и специального конденсатора можно представить в виде $P_{source} = P_{load} + P_{sc}$.

Чтобы регулировать рабочее напряжение, находящееся в диапазоне номинального значения, в качестве внешнего контура используется схема балансировки напряжения. Специальный конденсатор высвобождает 75 % своей энергии, когда напряжение уменьшается до 50 %. Сумма мощности суперконденсатора и мощности нагрузки должна быть равна мощности, потребляемой от источника — [12], [13]. Опорный ток суперконденсатора может быть рассчитан как его мощность, деленная на напряжение.

По сравнению с традиционным управлением потоком мощности улучшенный метод, имеющий усовершенствованную блок-схему управления, будет регулировать среднее напряжение суперконденсатора, который высвобождает 75 % своей энергии, в то время, когда напряжение уменьшается до 50 %. Энергия составляет около 25–100 %, как показано в уравнении

$$Q = 0{,}5C_{sc}U^2_{sc}.$$

Если предположить, что уровень 62,5 % считается нормальным значением хранения энергии, то среднее напряжение специального конденсатора должно поддерживаться около значения 79 %, как показано на рис. 5. Таким образом, 79 % выбрано в качестве значения заданного напряжения сверхконденсатора [14].

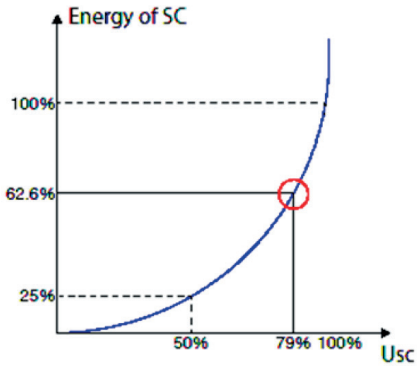

Рис. 5. График зависимости величин напряжения

Внешний контур управляет средним напряжением, тогда как внутренний является токовым контуром управления. При низком уровне энергии в конденсаторе он заряжается, напряжение повышается, и ток становится со знаком плюс. Когда нагрузка повышается, конденсатор впоследствии разряжается, ток становится со знаком минус и напряжение понижается. Этот режим управления также понижает нагрузку искажений электроэнергетической установки [15], [16]. Он позволяет более точно поддерживать нагрузку на приемлемом уровне, используя меньшее число работающих генераторов, тем самым понижая уровень потребления топлива и выброса в атмосферу вредных веществ. Два контроллера PI должны быть настроены таким образом, чтобы внутренний контур был способен выполнять мгновенные требования к управлению мощностью, в то время как внешний контур призван предотвращать дрейф напряжения [17], [18].

Оптимальная точка срабатывания дизельного двигателя будет составлять около 85 % от максимальной постоянной мощности. Кроме того, уровень эффективности быстро падает, так как нагрузка становится ниже 50 % от максимальной мощности, как показано на рис. 5. С помощью электрической системы механический движитель заменяется дизель-электрическими первичными двигателями, которые автоматически запускаются и останавливаются, поскольку спрос на нагрузку меняется [19], [20]. Это усиливает эффективность использования энергии и снижение расхода топлива за счет поддержания средней нагрузки каждого работающего дизельного двигателя вблизи его оптимальной точки нагрузки. Тем не менее на судах изменения нагрузки могут быть большими и быстрыми. Невозможно заставить генераторы включаться и выключаться каждые 5 с [21]. При использовании батареи или суперконденсатора для обеспечения вариаций нагрузки дизельные двигатели будут обеспечивать среднюю нагрузку, пиковая мощность электростанции будет уменьшена (рис. 6), что позволит увеличить среднюю загрузку двигателей до оптимальной точки с более низкой удельной мощностью расхода топлива [22].

а) б)

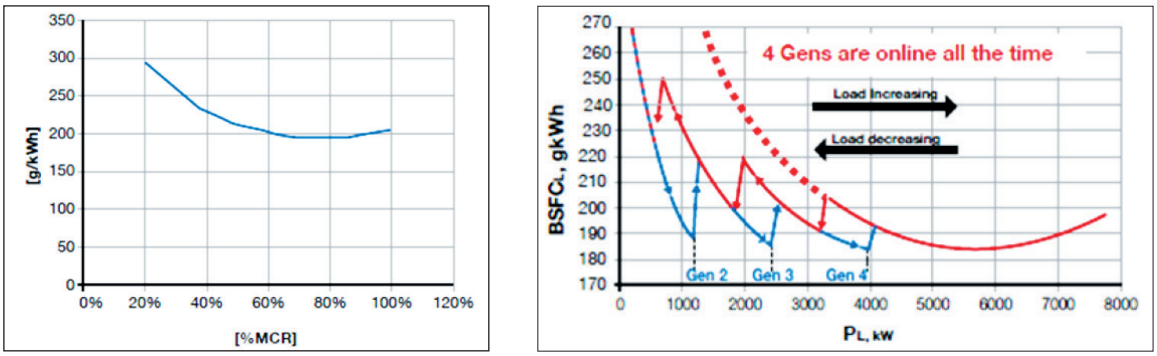

Рис. 6. Результаты испытаний, проведенные компанией *ABB*:
а — зависимость расхода топлива от номинальной нагрузки;
б — зависимость удельного расхода топлива от количества вырабатываемой электроэнергии

В дальнейшем предполагается переход к функционированию полностью электрических судов [23], [24]. Тем временем владельцы судов вкладывают все большие средства в морские гибридные системы для повышения гибкости проектирования установки, оптимизации эксплуатационных характеристик и минимизации воздействия на окружающую среду [25], [26].

Первая встроенная DC-grid система была установлена на судне-снабженце Dina Star. Компания *ABB* объявила о том, что данное судно было доставлено норвежскому владельцу *Myklebusthaug Offshore*, уточнив при этом, что система позволит судну работать на максимальном уровне энергоэффективности для минимизации выбросов. В данной схеме (рис. 7) модули преобразователей расположены в том же помещении машинного отделения, что и главный распределительный щит переменного тока.

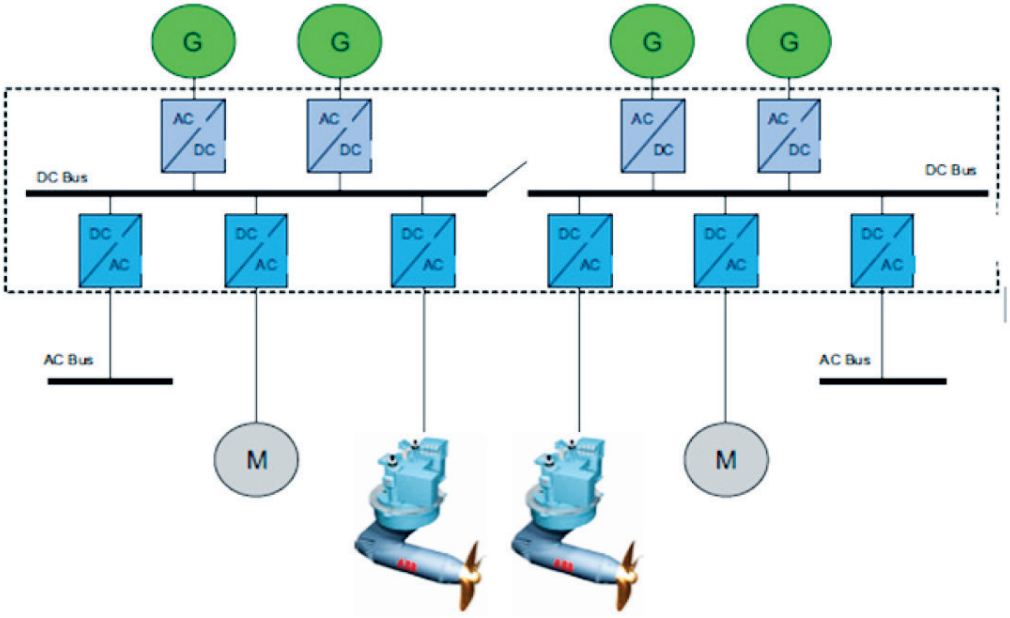

Рис. 7. Однолинейная схема ГЭУ проекта Dina Star

Для распределенной системы каждый компонент преобразователя расположен как можно ближе к соответствующему источнику питания или нагрузке. Вся генерируемая электроэнергия подается через выпрямитель в общую шину постоянного тока, которая распределяет электрическую энергию потребителям. Каждый основной потребитель затем питается отдельным инверторным блоком. ГЭУ оснащена двумя установками типа Azipod и двумя подруливающими установками. Дополнительные преобразователи для хранения энергии могут быть добавлены в сеть [27], [28]. Это хранилище энергии может быть, например, батареями или специальными конденсаторами для выравнивания изменений мощности. Кроме того, система позволяет значительно экономить вес и пространство, что приводит к увеличению грузоподъемности.

Данное судно оснащено системой управления электропотребления (рис. 8), разработанной для систем распределения энергии постоянного тока, которая имеет как обычные функции управления: резервный пуск / остановка генераторов, защита от полного отключения питания, ограничение, сброс нагрузки, так и специальные: оптимизация расхода топлива, управление альтернативными источниками электроэнергии, оптимизация электропотребления, что достигается за счет использования установленных энергоисточников в различных комбинациях на основании фактического потребления энергии и эксплуатационного профиля судна [29]. Также СУЭ использует принципы «распределенной системы управления» с одним устройством для каждого энергоисточника в электросети постоянного тока. За счет этого система PEMS становится более надежной по сравнению с обычными системами управления энергопотреблением.

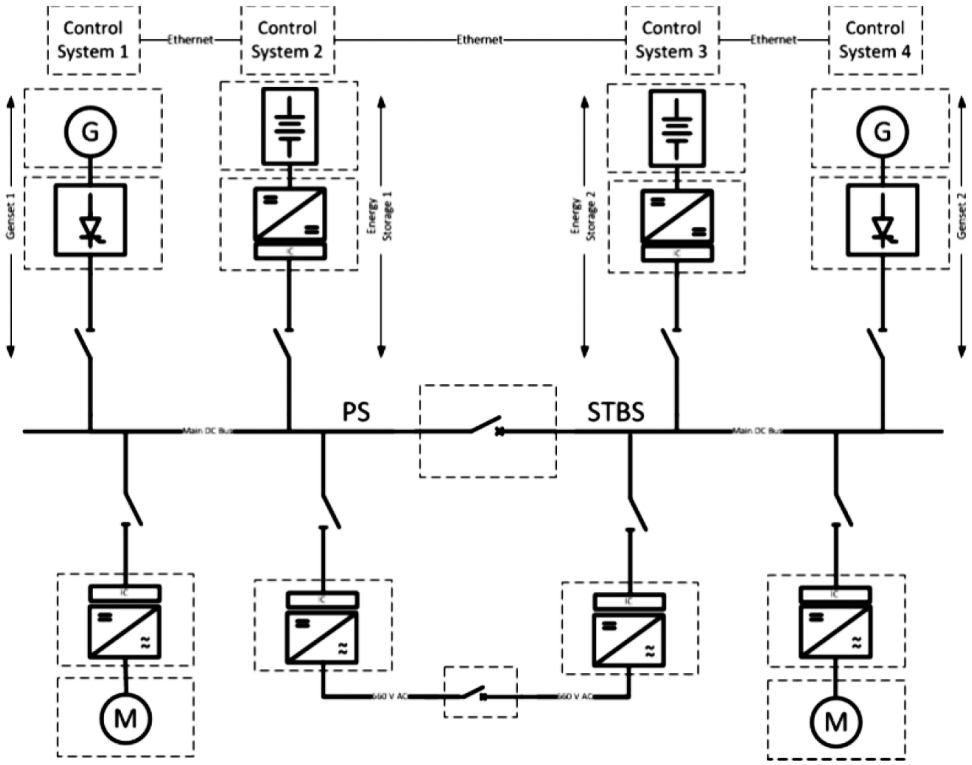

Рис. 8. Топология системы управления электроэнергией

На Выборгском судостроительном заводе осуществляется строительство портового ледокола Aker ARC 124, который предназначен для обеспечения навигации судов на подходных каналах и в акваториях портов с ледовым покровом до 1,5 м. Ледокол строится по заказу ФГУП «Атомфлот» и имеет параметры, приведенные в следующей таблице:

Наименование параметра	Значение
Длина наибольшая	89,2 м
Длина по КВЛ	77,6 м
Ширина по КВЛ	19,9 м
Осадка максимальная	7,5 м
ДВТ при максимальной осадке	2000 т
Главные ДГ	3 × 4880 кВт
Стояночный ДГ	800 кВт
ГЭУ	4 ГЭД по 3000 кВт
Ледопроходимость	2 уз в 1,5-метровом льду
Упор на швартовах	115 т
Скорость на чистой воде	15 уз
Ледовый класс	РМРС — Icebreaker 7, или МАКО — РС3

Отличительной чертой судна является движительный комплекс, состоящий из четырех независимых азимутальных пропульсивных установок с электрическим приводом Azipod ABB Ice-1400 тягового типа, мощностью около 3 МВт каждая. Винто-рулевые колонки расположены попарно в носу и корме судна, что дает возможность максимально эффективной работы во льду как кормой, так и носом (рис. 8).

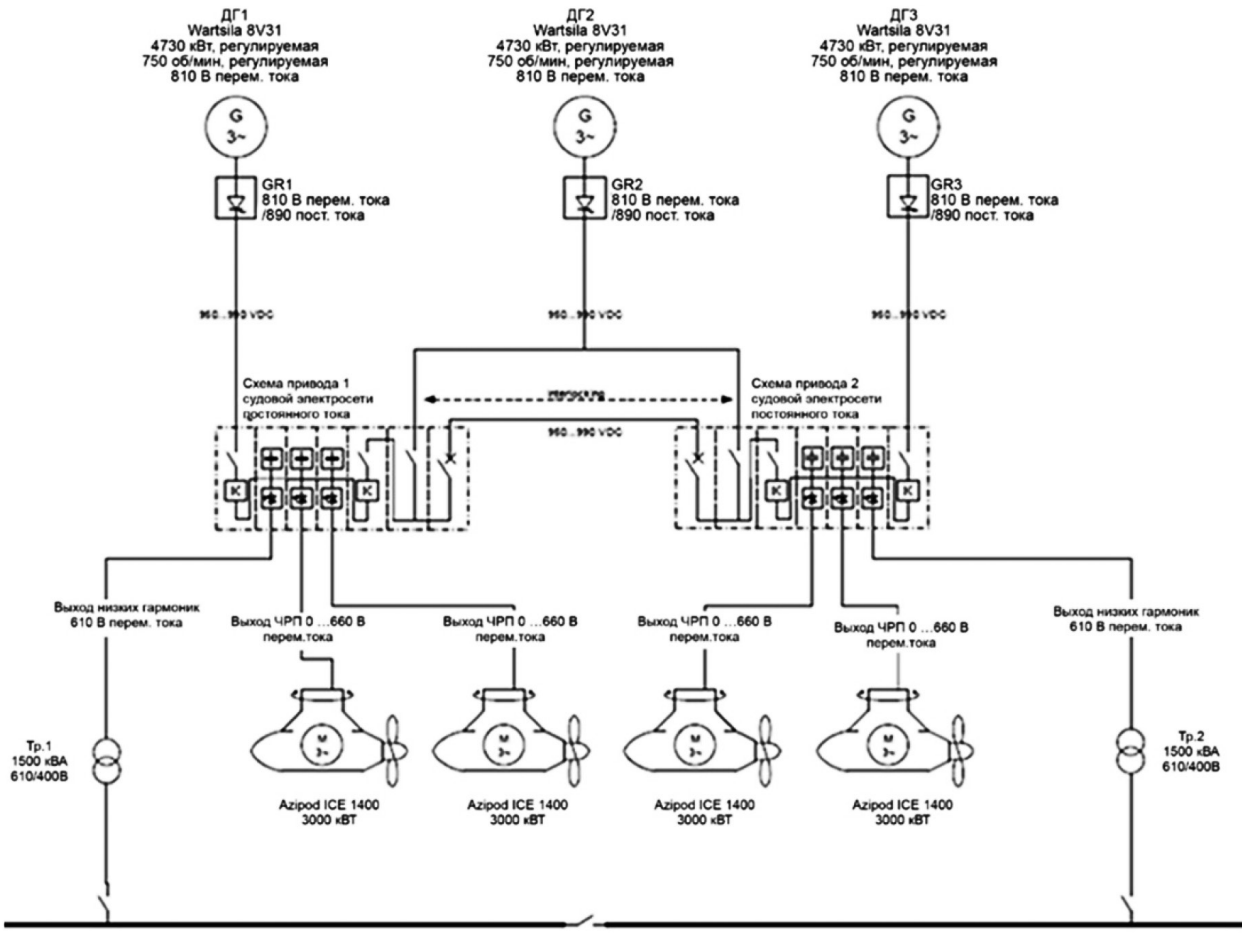

Рис. 8. Схема электроэнергетической системы ледокола

В состав схемы главного тока входят:

– три главных синхронных генератора мощностью 4730 кВт, регулируемые 750 об/мин, регулируемое выходное напряжение синхронных генераторов 810 В;

– три управляемых выпрямителя, преобразующих 810 В переменного тока в регулируемые 890 В постоянного тока;

– четыре инвертора частоты на базе ACS800 (компании ABB), преобразующих постоянное напряжение в регулируемое в пределах 0–660 В переменного напряжения для управления системами АЗИПОД;

– четыре винто-рулевые колонки типа АЗИПОД ICE 1400 3000 кВт, имеющие в своем составе двигатели с постоянными магнитами, которые существенно упрощают техническое обслуживание винто-рулевых колонок;

– для электроснабжения судовой электростанции используются два трансформатора мощностью 1500 кВ·А 610В / 400 В, на выходе которых после фильтрации от высших гармоник получают 400 В 50 Гц.

Основной задачей преобразователей частоты, работающих на электростанцию, является поддержание постоянства стандартных параметров напряжения и частоты. Качество электроэнергии должно обеспечиваться системой фильтров. Расчетные характеристики гребной электрической установки (рис. 9) показывают широкие возможности реализации необходимых для ледокола режимов работы ГЭУ, обеспечивая гиперболу постоянства мощности, ограничения момента стоянки ГЭД и требуемую частоту вращения гребного винта [30].

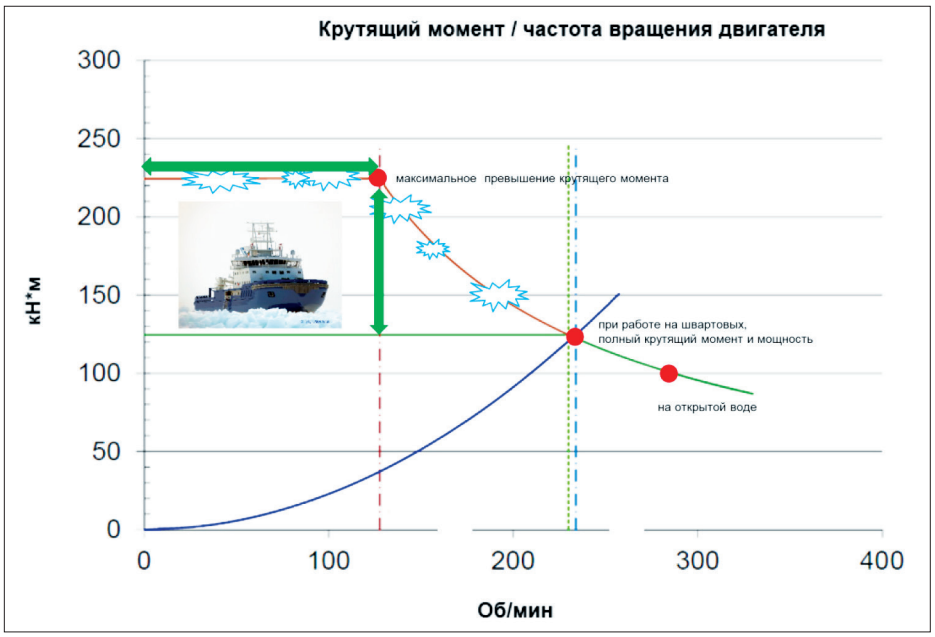

Рис. 9. Механическая и винтовая (швартовная) характеристики ГЭД

Выводы (Summary)

На основании анализа схемных решений для гребных электрических установок со встроенной распределенной шиной постоянного тока можно сделать вывод о том, что данный тип установки позволяет повысить эффективность использования единой электроэнергетической системы, сочетая в себе достоинства использования переменного и постоянного тока. Данная установка соответствует правилам и положениям селективности и защиты оборудования, она может быть использована для любого морского применения и работает при номинальном напряжении в пределах 1000 В постоянного тока и более. Применение накопителей энергии открывает новые возможности повышения эффективности системы, создания полностью электрифицированных судов.

Преимуществами данной системы управления являются:

– улучшение работы всего судового комплекса;

– снижение вредных выбросов в атмосферу и воду;

– снижение эксплуатационных расходов из-за снижения расхода топлива;

– низкие эксплуатационные расходы, связанные с дизельными двигателями;

– снижение уровня шума;

– улучшенная долгосрочная эффективность использования системы электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мясникова К. Д.* Современное состояние и развитие морского и речного флота России / К. Д. Мясникова // Молодой ученый. — 2016. — № 13–1 (117). — С. 66–69.

2. *Григорьев А. В.* Теоретические вопросы расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

3. *Романовский В. В.* Использование постоянного тока в перспективных гребных электрических установках / В. В. Романовский, О. А. Зубин, А. Г. Гостев // Морское образование: традиции, реалии перспективы: материалы науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 211–215.

4. *Игнатьева Н. А.* Современное состояние и перспективы развития судостроения в российской федерации / Н. А. Игнатьева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 4–6. — С. 1159–1162.

5. *Романовский В. В.* Гребные электрические установки для арктических ледоколов / В. В. Романовский // Морской вестник. — 2015. — № 4 (56). — С. 53–54.

6. *Гармаш Д.* Суда спасатели: новые подходы к концепции создания / Д. Гармаш, Т. Наумова, М. Темкин, П. Мартулев // Морской флот. — 2014. — № 5. — С. 36–46.

7. *Гилерович Ю. М.* Перспективы развития гребных электрических установок / Ю. М. Гилерович, В. С. Спешилов, В. А. Туманов // Судостроение. — 1997. — № 4. — С. 51–54.

8. *Романовский В. В.* Системы электродвижения для перспективных судов / В. В. Романовский, В. А. Касатов // Судостроение. — 1999. — № 4. — С. 35–37.

9. *Иванов А.* Состояние и перспективы развития судовых ГЭУ / А. Иванов, В. Самсыгин // Морской флот. — 1999. — № 2. — С. 23–24.

10. *Thounthong P.* Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications / P. Thounthong, S. Rael, B. Davat // Journal of Power Sources. — 2009. — Vol. 193. — Is. 1. — Pp. 376–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120

11. *Григорьев А. В.* Экспериментальные исследования системы электро движения переменного тока с полупроводниковым преобразователем / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2007. — № 3 (772). — С. 30–32.

12. *Chen H.* Progress in electrical energy storage system: A critical review / H. Chen, *T.* Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding // Progress in Natural Science. — 2009. — Vol. 19. — Is. 3. — Pp. 291–312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.

13. *Han J.* An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat / J. Han, J.F. Charpentier, T. Tang // Energies. — 2014. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 2799–2820. DOI: 10.3390/en7052799.

14. *Сакович И. А.* Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / И. А. Сакович, А. И. Черевко, С. В. Платоненков // Электричество. — 2016. — № 1. — С. 43–49.

15. *Петухов В. А.* Анализ и оптимизация эксплуатационных режимов судовых дизель-генераторов / В. А. Петухов, А. П. Баранов, А. В. Григорьев // Эффективность работы энергетических установок и технических средств: междунар. сб. науч. тр. — Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. — С. 98–105.

16. *Яцкевич Я.* Параметрическая модель среднего значения синхронных машинно-выпрямительных систем / Я. Яцкевич, С. Д. Пекарек, А. Давуди // Сделки по преобразованию энергии. — 2006. — № 21 (1). — С. 9–18.

17. *Иванченко А. А.* Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

18. *Григорьев А. В.* Исследование дизель-генератора, работающего с переменной частотой вращения, на компьютерной модели / А. В. Григорьев // Электросистемы. — 2006. — № 2 (14). — С. 17–19.

19. *Румянцев А. Ю.* Решение задачи оптимального управления динамической системой, обеспечивающее желаемые переходные процессы / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 4. — С. 92–94.

20. *Яровенко В. А.* Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблеми техніки. — 2013. — № 2. — С. 82–94.

21. *Григорьев А. В.* Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 39–43.

22. *Черевко А. И.* Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при четном и нечетном числе секций КО ТВМП / А. И. Черевко, М. М. Музыка, С. В. Платоненков [и др.] // Электротехника. — 2012. — № 4. — С. 41–45.

23. *Голубев К. Г.* Методология формирования схемно-технических и конструктивных решений разрабатываемой единой электроэнергетической системы для судов с электродвижением / К. Г. Голубев // Морской вестник. — 2014. — № 1. — С. 49–51.

24. *Губанов Ю. А.* Электроснабжение и электропитание корабельных потребителей: работа по исправлению нагрузки / Ю. А. Губанов, К. В. Жданов, А. Г. Сотников, Д. С. Муликов // Морской вестник. — 2014. — № 1 (49). — С. 43–48.

25. *Гольдштейн М. Е.* Функции передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения в режиме установившегося короткого замыкания в энергосистеме / М. Е. Гольдштейн, Н. В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2015. — Т. 15. — № 3. — С. 20–24. DOI: 10.14529/power150303.

26. *Коршунов В. Н.* Перспективы развития судовых электроэнергетических систем / В. Н. Коршунов, Т. Е. Кувшинов, А. Н. Шеин // Вологдинские чтения. — 2008. — № 69. — С. 139–145.

27. *Яровенко В. А.* Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблеми техніки. — 2013. — № 2. — С. 82–94.

28. *Романовский В. В.* Перспективы модернизации гребных электрических установок ледоколов / В. В. Романовский, В. С. Иванов, А. И. Лебедев // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 56–59.

29. *Китаева С. А.* Синтез оптимальной системы управления вентильной гребной электрической установкой в условиях действия случайного морского волнения / С. А. Китаева, К. В. Чупина // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2007. — № 19. — С. 59–64.

30. *Лагода Ф. И.* Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.

REFERENCES

1. Myasnikova, K. D. “Sovremennoe sostoyanie i razvitie morskogo i rechnogo flota Rossii.” *Molodoi uchenyi* 13-1(117) (2016): 66–69.

2. Grigoryev, Andrey V., Aleksej Yu. Vasilyev, and Yurii A. Kulagin. “Theoretical issues of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on a direct current.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

3. Romanovskii, V. V., O. A. Zubin, and A.G. Gostev. “Ispol’zovanie postoyannogo toka v perspektivnykh grebnykh elektricheskikh ustanovkakh.” *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015. 211–215.

4. Ignatyeva, N. A. “Current status and prospects of shipbuilding development in the Russian federation.” *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental’nykh issledovanii* 4-6 (2016): 1159–1162.

5. Romanovskii, V.V. “Grebnye elektricheskie ustanovki dlya arkticheskikh ledokolov.” *Morskoi vestnik* 4(56) (2015): 53–54.

6. Garmash, D., T. Naumova, M. Temkin, and P. Martulev. “Suda spasateli: novye podkhody k kontseptsii sozdaniya.” *Morskoi flot* 5 (2014): 36–46.

7. Gilerovich, Yu. M., V.S. Speshilov, and V.A. Tumanov. “Perspektivy razvitiya grebnykh elektricheskikh ustanovok.” *Sudostroenie* 4 (1997): 51–54.

8. Romanovskii, V.V., and V. A. Kasatov. “Sistemy elektrodvizheniya dlya perspektivnykh sudov.” *Sudostroenie* 4 (1999): 35–37.

9. Ivanov, A., and V. Samsygin. “Sostoyanie i perspektivy razvitiya sudovykh GEU.” *Morskoi flot* 2 (1999): 23–24.

10. Thounthong, Phatiphat, Stephane Rael, and Bernard Davat. “Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications.” *Journal of Power Sources* 193.1 (2009): 376–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120

11. Grygoriev, A.V. “Experimental investigations of electrical alternated current motion system provided with semiconductor converter.” *Shipbuilding* 3(772) (2007): 30–32.

12. Chen, Haisheng, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, and Yulong Ding. “Progress in electrical energy storage system: A critical review.” *Progress in natural science* 19.3 (2009): 291–312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014

13. Han, Jingang, Jean-Frederic Charpentier, and Tianhao Tang. “An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat.” *Energies* 7.5 (2014): 2799–2820. DOI:10.3390/en7052799

14. Sakovich, I. A., A. I. Cherevko, and S. V. Platonenkov. "Output Voltage Quality of a Controlled Rectifier Made Using a Transformer with Rotating Magnetic Field." *Electrical Technology Russia* 1 (2016): 43–49.

15. Petukhov, V. A., A. P. Baranov, and A. V. Grigor'ev. "Analiz i optimizatsiya ekspluatatsionnykh rezhimov sudovykh dizel'-generatorov." *Effektivnost' raboty energeticheskikh ustanovok i tekhnicheskikh sredstv: mezhdunar. sb. nauch. tr.* Kaliningrad: Izd. KGTU, 2003. 98–105.

16. Yatskevich, Ya., S. D. Pekarek, and A. Davudi. "Parametricheskaya model' srednego znacheniya sinkhronnykh mashinno-vypryamitel'nykh system." *Sdelki po preobrazovaniyu energii* 21(1) (2006): 9–18.

17. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo uni-versiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

18. Grigor'ev, A. V. "Issledovanie dizel'-generatora, rabotayushchego s peremennoi chastotoi vrashcheniya, na komp'yuternoi modeli." *Elektrosistemy* 2(14) (2006): 17–19.

19. Rumyantsev, A. Y., and V. F. Samoseyko. "Solution of the Problem of Optimal Control of a Dynamic System that Provides the Desired Transient Response." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.4 (2015): 92–94.

20. Yarovenko, V. A. "Sistemnyi podkhod k voprosam proektirovaniya grebnykh energeticheskikh ustanovok." *Problemitekhniki* 2 (2013): 82–94.

21. Grigor'ev, A. V., and V. Yu. Kolesnichenko. "Improving the efficency of marine disel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 39–43.

22. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, I. A. Sakovich, and I. Yu. Kuz'min. "Kachestvo vykhodnogo napryazheniya vypryamitelya, postroennogo na baze TVMP, pri chetnom i nechetnom chisle sektsii KO TVMP." *Elektrotekhnika* 4 (2012): 41–45.

23. Golubev, K. G. "Metodologiya formirovaniya skhemno-tekhnicheskikh i konstruktivnykh resheniy razrabatyvaemoy edinoy elektroenergeticheskoy sistemy dlya sudov s elektrodvizheniem." *Morskoy vestnik* 1 (2014): 49–51.

24. Gubanov, Yu. A., K. V. Zhdanov, A. G. Sotnikov, and D. S. Mulikov. "Elektrosnabzhenie i elektropitanie korabel'nykh potrebitelei: rabota po ispravleniyu nagruzki." *Morskoi vestnik* 1(49) (2014): 43–48.

25. Goldstein, M. E., and N. V. Korbukov. "VSC-HVDC transmission functions under short-circuit conditions in ac power system." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 15.3 (2015): 20–24. DOI: 10.14529/power150303.

26. Korshunov, V. N., T. E. Kuvshinov, and A. N. Shein. "Perspektivy razvitiya sudovykh elektroenergeticheskikh system." *Vologdinskie chteniya* 69 (2008): 139–145.

27. Yarovenko, V. A. "Sistemnyi podkhod k voprosam proektirovaniya grebnykh energeticheskikh ustanovok." *Problemitekhniki* 2 (2013): 82–94.

28. Romanovskii, V. V., V. S. Ivanov, and A. I. Lebedev. "Perspektivy modernizatsii grebnykh elektricheskikh ustanovok ledokolov." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 56–59.

29. Kitaeva, S. A., and K. V. Chupina. "Sintez optimal'noi sistemy upravleniya ventil'noi grebnoi elektricheskoi ustanovkoi v usloviyakh deistviya sluchainogo morskogo volneniya." *Nauchnye trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 19 (2007): 59–64.

30. Lagoda, F. I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauch. konf. studentov, magistrantov, aspirantov.* Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *romanovskiyvv@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovskiy, Victor V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *romanovskiyvv@gumrf.ru*

Малышев Владимир Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*
Бежик Артем Сергеевич — Аспирант
Научный руководитель:
Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7,
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

Malishev, Vladimir A. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*
Bezhik, Artem S. — Postgraduate
Supervisor:
Romanovskiy, Victor V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 31 января 2019 г.
Received: January 31, 2019.