

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122

УДК 629.5.035-83

В.И. Вершинин, С.В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

СОЗДАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ ДЛЯ СУДОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом работы, результаты которой приведены в статье, являются системы электродвижения судов различного назначения, разработанные в процессе выполнения НИОКР, проводимых филиалом «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в 2001–2018 гг. Цель работы заключается в рассмотрении технических требований, предъявляемых к судовым системам электродвижения, в анализе проблем, возникавших перед проектантами этих систем и обусловленных необходимостью выполнения указанных требований, а также в описании схемных и конструкторских решений, направленных на их разрешение.

Материалы и методы. Исходными материалами являются конструкторская документация (технические задания, пояснительные записки технических проектов, принципиальные схемы, габаритные чертежи и пр.), разработанная в ходе проведения ОКР по созданию судовых систем электродвижения, а также научно-техническая информация, представленная в трудах, посвященных теории гребных электрических установок. Решения поставленных перед проектантами систем электродвижения задач, описанные авторами, базируются на использовании последних достижений науки и техники в электротехнической области (микропроцессорные системы управления, статические преобразователи на основе активных выпрямителей, многоуровневых инверторов напряжения, собранных на полупроводниковых ключах последнего поколения, а также современные алгоритмы управления гребными электроприводами).

Основные результаты. Кратко проанализировано состояние работ, проводимых ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по созданию систем электродвижения судов различного назначения. Рассмотрены технические проблемы, стоящие перед проектантами систем электродвижения и обусловленные необходимостью выполнения совокупности жестких требований, зачастую противоречивых, а порой и эксклюзивных. Описаны схемные и конструкторские решения, направленные на разрешение рассмотренных проблем. Оценены возможности и перспективы ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (филиал «ЦНИИ СЭТ») в работах по созданию систем электродвижения судов нового поколения.

Закключение. Ценность практических результатов, полученных авторами статьи, заключается в обоснованном подтверждении возможности и целесообразности участия ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (филиал «ЦНИИ СЭТ») в создании систем электродвижения для перспективных судов нового поколения как предприятия, обладающего кадровым потенциалом, многолетним опытом, а также соответствующими производственной и экспериментальной базами.

Ключевые слова: система электродвижения, гребной электропривод, винторулевая колонка, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, векторное управление, автономный инвертор напряжения, активный выпрямитель, гребной винт.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122

UDC 629.5.035-83

Для цитирования: Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Создание систем электродвижения для судов различного назначения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 107–122.

For citations: Vershinin V., Makhonin S., Parshikov V., Khomyak V. Development of electric propulsion systems for ships of various types. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 107–122 (in Russian).

V. Vershinin, S. Makhonin, V. Parshikov, V. Khomyak
SET Branch, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DEVELOPMENT OF ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS FOR SHIPS OF VARIOUS TYPES

Object and purpose of research. This paper studies electric propulsion systems for various ships developed by SET Branch of Krylov State Research Centre over the years 2001–2018. The purpose of this study is to discuss technical requirements to marine electric propulsion systems, analyse design challenges caused by these requirements, as well as to suggest conceptual and design solutions intended to overcome these challenges.

Materials and methods. The study is based on design documents (Technical Assignments, Explanatory Notes of different projects, principal layouts, outline drawings, etc.) issued under various development projects of marine electric propulsion systems, as well as on scientific & technical information available in theoretical literature about electric propulsion plants. Solutions to electric propulsion system design challenges described in this paper are based on the latest achievements of electrical science and technology (microchip-based control systems, static converters based on active rectifiers, multi-level voltage inverters based on the latest-generation semiconductor switches, as well as on the latest control algorithms for electric propulsion drives.

Main results. This paper briefly analyses current status of Krylov State Research Centre activities in development of various electric propulsion systems for ships. It discusses design challenges arising in this field due to the necessity to satisfy a whole number of tough requirements, often contradictory and sometimes exclusive. It describes conceptual and design solutions intended to overcome these challenges, as well as assesses capabilities and prospects of Krylov State Research Centre SET Branch in development of new-generation marine electric propulsion systems.

Conclusion. Practical results obtained by the authors confirm the role of Krylov State Research Centre as a valuable partner in development of electric propulsion systems for advanced ships, thanks to its qualified staff, many years of experience, as well as necessary manufacturing and test facilities.

Keywords: electric propulsion system, electric propulsion drive, pod propulsion unit, frequency converter, asynchronous motor, vector control, autonomous voltage inverter, active rectifier, propeller.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Последние 15–20 лет развития отечественного судостроения характеризуются интенсивным увеличением объема работ, связанных с электродвижением судов. Это обстоятельство является не случайным и объясняется, с одной стороны, многочисленными достоинствами систем электродвижения (СЭД), в том числе такими, как:

- отсутствие жесткой механической связи гребного винта с первичным двигателем, что позволяет улучшить компоновку оборудования, существенно сократив длину валопровода, а также использовать высокооборотные и нереверсивные первичные двигатели;
- возможность плавного регулирования частоты вращения гребного винта в широком диапазоне, что в сочетании с другими техническими средствами позволяет реализовывать высокие маневренные свойства судна;
- повышенная надежность по сравнению с системами на основе механических передач, объяс-

няемая возможностью резервирования и гибкого переключения элементов;

- возможность обеспечения полной автоматизации и легкость перевода на централизованное управление.

С другой стороны, электродвижение судов обрело популярность ввиду существенного развития силовой полупроводниковой электроники, позволившего освоить производство мощных преобразовательных устройств, которые необходимы для регулирования частоты вращения гребного электродвигателя (ГЭД), и перейти на СЭД переменного тока. Этот перевод дал дополнительное преимущество данным системам, т.к. появилась возможность объединения СЭД с электроэнергетической системой судна в целом и установки на судах так называемых единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС). Особенно перспективна и экономически оправдана установка СЭД на судах, требующих высокой манев-

ренности, в частности на ледоколах, буксирах и других судах вспомогательного и технического флотов.

В этот период филиалом «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» был выполнен ряд работ, направленных на создание судовых СЭД. К их числу следует отнести разработку, изготовление и поставку:

- комплекса СЭД малого гидрографического судна проекта 19910 (2001–2006 гг.);
- единой электроэнергетической системы с СЭД судов пр. 20180, 21300 и 22010 (2005–2009 гг.);
- электродвижительного комплекса глубоководного аппарата «Консул» (2007–2008 гг.);
- электрооборудования СЭД для буксирных судов пр. 22030 (2006–2010 гг.), 745.1 и 745.2 (2010–2013 гг.);
- СЭД ледокола пр. 21180 (2015–2017 гг.);
- СЭД универсальных атомных ледоколов пр. 22220 и «Лидер» (2013–2018 гг.);
- СЭД буксирного судна пр. 23476 (2017–2018 гг.);
- СЭД мелкосидящего ледокола пр. 22740 (2017–2018 гг.).

Одновременно с этим велись интенсивные работы по созданию электрооборудования для электроэнергетических систем и СЭД подводных лодок различных проектов. Суда, СЭД которых были изготовлены и поставлены филиалом «ЦНИИ СЭТ», показаны на рис. 1.

В 2001 г. начались проектные работы по созданию малого гидрографического судна пр. 19910. Оно предназначалось для постановки и снятия навигационных морских буев и вех, обслуживания береговых и плавучих средств навигационного оборудования и контроля их бесперебойной работы, а также для выполнения гидрографических работ. В соответствии с назначением к судну предъявлялись высокие маневренные требования, на основании чего было решено оборудовать его системой электродвижения, которая была разработана филиалом «ЦНИИ СЭТ». Функциональная схема СЭД приведена на рис. 2.

СЭД представляет собой два идентичных частотно-регулируемых гребных электропривода (ЭП) (позиционное обозначение на схеме – ГЭП1 и ГЭП2). В качестве ГЭД в этих ЭП используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором мощностью 550 кВт, напряжением 960 В. Двигатели посредством редукторной передачи (Р) нагружены на гребные винты (ГВ) фиксированно-

го шага. ГЭД, Р и ГВ конструктивно размещены в двух поворотных винторулевых колонках (ВРК). Кроме того, в состав каждого из ЭП входит преобразователь частоты (ПЧ), предназначенный для формирования системы трехфазного переменного напряжения, прикладываемого к обмотке статора ГЭД. Силовая часть каждого ПЧ содержит два неуправляемых выпрямителя (НВ1, НВ2) и автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией напряжения (АИН). Выпрямители и инвертор выполнены по трехфазной двухполупериодной мостовой схеме и собраны на полупроводниковых диодах (выпрямители) и биполярных транзисторных ключах типа IGBT (автономный инвертор напряжения).

СЭД получает питание от трехфазной сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц. Источниками судовой электрической энергии являются два дизель-генератора мощностью по 1200 кВт каждый. Вследствие соизмеримости мощностей источников электрической энергии и ГЭД перед проектантами СЭД стояла сложнейшая задача по выполнению требования ее электромагнитной совместимости с судовой электрической сетью.

Эта задача была решена посредством применения в звене постоянного тока ПЧ комбинированной схемы выпрямления [1]. Особенностью схемы является наличие двух неуправляемых выпрямителей, в данном случае НВ1 и НВ2, получающих питание от трехобмоточного трансформатора Т, вторичные обмотки которого соединены одна в «звезду», а вторая – в «треугольник». Выходы неуправляемых выпрямителей соединены последовательно.

Ток, потребляемый трансформатором из сети, в этом случае содержит первую гармоническую составляющую, частота которой равна частоте напряжения сети, и некоторый набор высших гармоник, порядок частот которых определяется выражением

$$n = 12K \pm 1, \quad (1)$$

где $K = 1, 2, 3, \dots$ (ряд натуральных чисел).

В спектре высших гармоник тока, потребляемого из сети, отсутствуют наиболее опасные 5-я и 7-я гармонические составляющие, что благоприятно сказывается на показателях качества напряжения судовой сети. Падения напряжения на сопротивлениях сети от протекания высших гармоник оказываются незначительными, в связи с чем оказывается вполне приемлемой величина коэффициента иска-



Рис. 1. Суда, СЭД которых были изготовлены и поставлены филиалом «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Fig. 1. Reference list of ships with electric propulsion system delivered by SET Branch of KSRC



Рис. 1. Продолжение

Fig. 1. Continuation

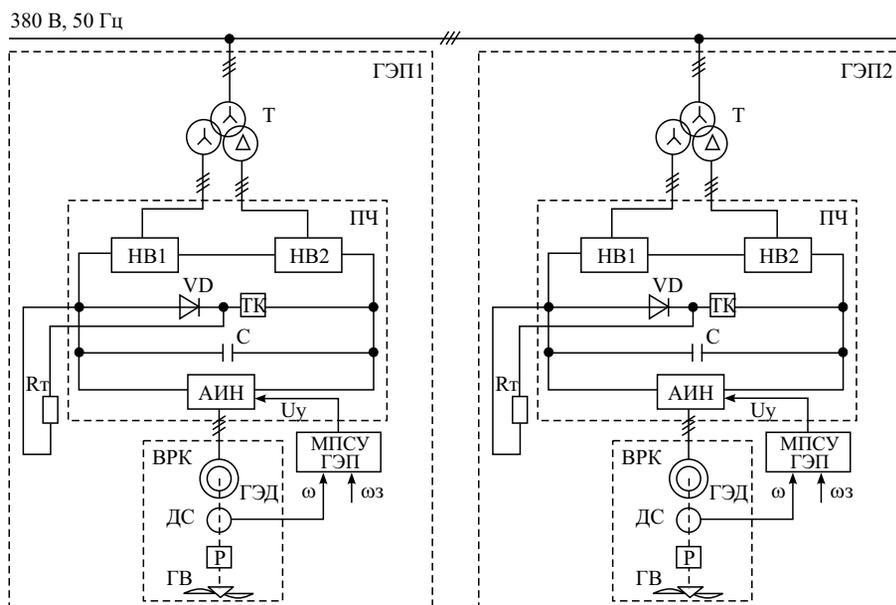


Рис. 2. Функциональная схема СЭД гидрографического судна пр. 19910

Fig. 2. Flow chart of electric propulsion system aboard Project 19910 hydrographic vessel

жения синусоидальности напряжения сети, определяемого выражением

$$K_{\text{И}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} U_{mn}^2}}{U_{\text{м1}}} \times 100\%, \quad (2)$$

где U_{mn} – амплитудное значение падения напряжения на сопротивлении фазы сети от протекания n -й гармоники тока, потребляемого ПЧ; $U_{\text{м1}}$ – амплитудное значение фазного напряжения сети.

Другой не менее важной задачей, стоявшей перед проектантами, являлась техническая реализация тормозных режимов работы ГЭД. Тормозные режимы возникают при уменьшении частоты напряжения на выходе ПЧ в процессе регулирования (в сторону уменьшения) скорости вращения двигателя. В тормозных режимах работы двигателя активная составляющая тока статора изменяет свой знак и через обратные диоды моста инвертора замыкается на конденсаторную батарею С, установленную в звене постоянного тока ПЧ. В результате напряжение на зажимах конденсаторной батареи начинает повышаться. Как только величина этого напряжения достигает верхнего порогового значения, задаваемого уставкой, включается транзисторный ключ ТК и конденсаторная батарея начинает разряжаться на тормозной резистор $R_{\text{т}}$. Когда напряжение разряжающейся конденсаторной батареи достигает нижнего порога, задаваемого уставкой, транзисторный ключ ТК выключается

и напряжение на конденсаторной батарее снова начинает возрастать. Эти процессы продолжают до тех пор, пока будет длиться режим торможения. В результате такого технического решения электрическая энергия, генерируемая двигателем в режиме торможения, рассеивается в виде тепла на резисторе. Рассмотренные технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости и реализации тормозных режимов оказались достаточно эффективными и были приняты за основу при проектировании СЭД судна пр. 19910.

Выбор способа управления являлся одним из основных вопросов проектирования СЭД, т.к. от него во многом зависят маневровые характеристики системы. Начиная с середины 70-х гг. прошлого столетия все способы частотного управления асинхронными электродвигателями стали классифицироваться по двум категориям – модульное или скалярное и векторное [1]. Термин «модульное (или скалярное) управление» связан с тем, что управление базируется на изменении модулей величин, определяющих работу двигателя (частоты и напряжения питания, токов и магнитных потоков). Термин «векторное управление» относится к способам управления на основе управления мгновенными значениями и взаимным расположением этих величин, представленных в векторной форме. Еще в 1925 г. академик М.П. Костенко показал, что для обеспечения работы двигателя на разных частотах с практически постоянными значениями КПД, коэффициента мощности, перегру-

зочной способности и с постоянным абсолютным скольжением при нагрузке на двигателе в пределах номинального насыщения стали должно обеспечиваться в относительных единицах следующее соотношение между частотой, напряжением питания и нагрузкой двигателя:

$$\frac{U}{f} = \sqrt{M}. \quad (3)$$

На основе этого соотношения могут быть построены как разомкнутые, так и замкнутые системы управления. Сущность их заключается в управлении напряжением питания двигателя в функции нагрузки на валу без непосредственного ее измерения. В ЭП с глубоким регулированием по частоте используют, как правило, замкнутые системы управления с обратными связями по току АД, ЭДС, магнитному потоку, частоте вращения и абсолютному скольжению (β).

Несмотря на конкуренцию с векторным управлением, скалярное управление по частоте с замкнутыми системами управления довольно широко распространено вследствие относительной простоты реализации по сравнению с системами векторного управления, которые требуют установки большого количества датчиков и определения управляющих параметров расчетным путем.

В результате проведенного анализа, исходя из реальных технических возможностей и имеющегося опыта, было принято решение разработать и применить скалярную замкнутую систему управления ГЭД с обратной связью по току и частоте вращения с поддержанием постоянного абсолютного скольжения (β). Система хорошо себя зарекомендовала и впоследствии была применена практически во всех заказах, для которых ЦНИИ СЭТ разрабатывал и поставлял системы электродвижения (20180, 21300, 22010, 745, 22030, 22870, 21180, «Консул» и др.).

Разработанная и изготовленная СЭД в 2006 г. была установлена на строящемся судне и успешно прошла швартовые и ходовые испытания.

В период 2007–2008 гг. филиал «ЦНИИ СЭТ» выполнил ОКР по созданию электродвижительного комплекса глубоководного аппарата «Консул». Его особенностью является обеспечение безотказной работы при погружении аппарата на глубину до 6,5 км. Комплекс включает в себя шесть асинхронных электродвигателей гребных винтов с аппаратурой управления, которые обеспечивают маневрирование аппарата в пространстве по всем осям. В ка-

честве бортового источника электрической энергии используется аккумуляторная батарея напряжением 110 В. Двигатели имеют погружное исполнение, что потребовало разработки целого ряда конструктивных решений, обеспечивающих герметизацию как корпуса аппарата, так и корпуса двигателя. Управление двигателями частотное с помощью инверторов напряжения. ГЭД имеет следующие номинальные параметры:

- мощность – 2 кВт;
- частота вращения – 2000 об/мин;
- действующее значение напряжения – 66 В.

Комплект поставочного образца электродвижительного комплекса в 2008 г. прошел приемочные испытания и был передан Заказчику для установки на борту глубоководного аппарата, в составе которого он успешно функционирует до настоящего времени.

В 2005–2009 гг. проводился комплекс работ по разработке, изготовлению и поставке единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) с СЭД для судов пр. 20180 и 21300. Суда первого проекта являются многофункциональными судами ледового класса, предназначаются для проведения поисково-спасательных работ, исследования затонувших объектов, приспособлены для буксировки других судов. Суда располагают вертолетной площадкой.

Суда пр. 21300 – суда океанского класса, предназначенные для спасения экипажей аварийных объектов, подачи на эти объекты воздуха и электроэнергии. Кроме того, суда могут осуществлять поиск и обследование затонувших объектов, в том числе в составе международных спасательных формирований.

Разработанные ЕЭЭС и СЭД для судов обоих проектов имели практически одинаковую структуру. В состав ЕЭЭС входили по две электростанции: носовая и кормовая, два главных распределительных щита, два согласующих трансформатора, два щита электродвижения и два устройства мягкого пуска. Суммарная мощность электростанций судов пр. 20180 составляет 7660 кВт при напряжении 380 В, а суммарная мощность электростанций судов пр. 21390 – 8400 кВт. Величина напряжения также равна 380 В. Упрощенная схема СЭД судов указанных проектов приведена на рис. 3.

Одной из особенностей СЭД судов этих проектов является использование в качестве ГЭД асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, у которых на статоре уложены две трехфазные обмотки. В состав СЭД входят по два ГЭД мощностью 2000 кВт (суда пр. 20180) и по два ГЭД мощ-

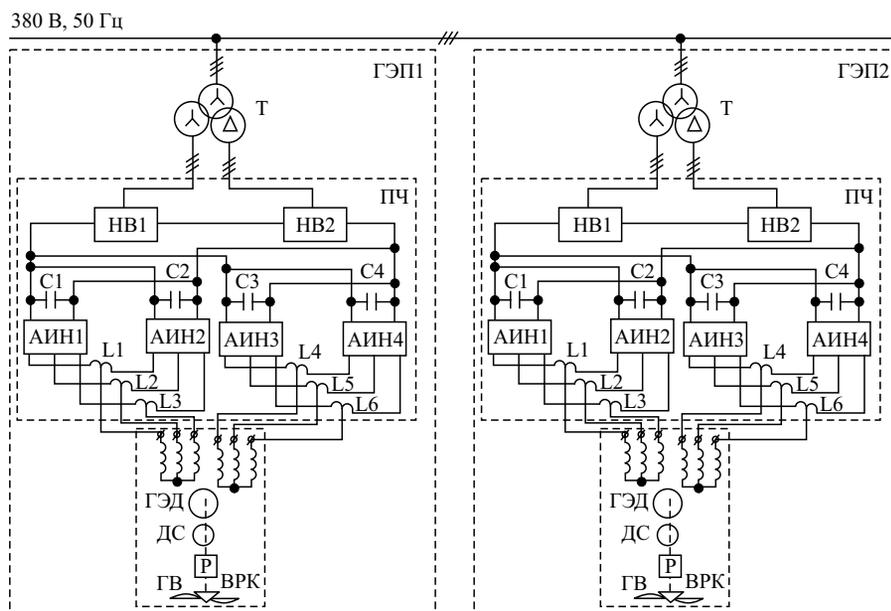


Рис. 3. Упрощенная схема СЭД судов пр. 20180, 21300

Fig. 3. Simplified layout of electric propulsion systems aboard Projects 20180 and 21300 ships

ностью 2400 кВт (суда пр. 21300). Применение двухобмоточных двигателей объясняется необходимостью снижения токовой нагрузки на силовые транзисторные ключи путем увеличения числа преобразовательных каналов в ПЧ.

Функционально СЭД содержит два частотно-регулируемых ЭП гребных винтов (обозначение на схеме – ГЭП1, ГЭП2). Используемые в составе ЭП ПЧ являются двухканальными. Каждый преобразовательный канал имеет в своем составе по два автономных инвертора напряжения (АИН1–АИН4). Инверторы, образующие пару, по входу соединены параллельно, причем каждая пара получает питание от двенадцатипульсного неуправляемого выпрямителя (НВ1, НВ2). Одноименные выходные фазы инверторов, образующих пару, соединены между собой через электромагнитные реакторы (L1–L4), к средним точкам которых подключаются обмотки, уложенные на статоре ГЭД.

Второй отличительной особенностью СЭД является отсутствие в их составе тормозных резисторов. Последнее обстоятельство объясняется наличием в составе СЭД винторулевых колонок, а также эксплуатационными свойствами судов этих проектов, допускающих уменьшение частоты вращения гребных винтов и их остановку за счет свободного выбега при выключении ПЧ.

Поставочные образцы электрооборудования ЕЭЭС и СЭД в 2009 г. были изготовлены и установлены на бортах головных судов пр. 20180 и 21300, в составе которых они успешно прошли

швартовые и ходовые испытания. В настоящее время суда этих проектов находятся в эксплуатации.

В 2010–2013 гг. разработано и поставлено оборудование ЕЭЭС с СЭД на ряд буксирных судов. Особо хотелось бы отметить разработку и поставку оборудования на буксиры пр. 745.1 и 745.2. На них установлены низкооборотные ГЭД (200 об/мин) номинальной мощностью 2 МВт. В поисковых целях выполнены двигатели разных типов. В пр. 741.1 применен классический асинхронный двигатель, а в пр. 745.2 впервые в нашей стране, да и, пожалуй, в мире, – индукторный. Работы по выбору оптимальных типов ГЭД переменного тока продолжают.

Важным шагом в ходе работ филиала «ЦНИИ СЭТ» явились разработка, изготовление и поставка СЭД для дизель-электрического ледокола нового поколения «Илья Муромец» (пр. 21180). Судно имеет водоизмещение 8000 т и предназначается для обеспечения деятельности Арктической группировки ВМФ РФ:

- буксировка других судов;
- транспортировка грузов;
- снабжение береговых и островных баз, расположенных в Арктическом районе;
- проведение гидрографических исследований.

Силовая часть СЭД ледокола включает в себя два ГЭД, две винторулевые колонки, в которых размещены редукторы и гребные винты, а также два ПЧ, от которых получают питание ГЭД (схема силовой части СЭД приведена на рис. 4). Отличительной особенностью ПЧ для СЭД ледокола яви-

лось применение в звене их постоянного тока активных выпрямителей. Такое техническое решение, широко применяемое в регулируемых ЭП общепромышленного назначения [2], в ЭП судовых СЭД отечественного производства встречается впервые.

Использование в ПЧ активных выпрямителей решает две основные задачи:

- согласование уровней напряжения судовой сети и ГЭД без применения сетевых трансформаторов;
- обеспечение электромагнитной совместимости ПЧ с судовой сетью.

Принцип действия активного выпрямителя заключается в следующем. В процессе его функционирования силовая часть выпрямителя (мост) работает в режиме инвертора напряжения, ведомого сетью, т.е. преобразовывает постоянное напряжение предварительно заряженной конденсаторной батареи в систему трехфазного напряжения, частота которого равна частоте сети. Эта система напряжений по отношению к напряжению сети ориентирована таким образом, что ток, поступающий из сети в мост выпрямителя, имеет только активную составляющую. Другими словами, ПЧ на основе активной схемы выпрямления, используемой в звене постоянного тока, потребляет из сети только активную мощность.

Разработанный и изготовленный филиалом «ЦНИИ СЭТ» ПЧ для СЭД ледокола (схема силовой части ПЧ приведена на рис. 5) функционально содержит два идентичных преобразовательных канала – ПК1 и ПК2. Трехфазные выходы этих каналов U1, V1, W1 и U2, V2, W2 посредством кабельных линий нагружены на трехфазные обмотки, уложенные на статоре ГЭД.

Каждый преобразовательный канал (например, ПК1), в свою очередь, содержит активный выпрямитель и два инвертора напряжения – АИН1, АИН2. Активный выпрямитель включает в себя два выпрямительных моста (МAB1, МAB2), две конденсаторные батареи (C1, C2) и электромагнитный реактор (L1). Необходимость в каждом преобразовательном канале двух мостов активного выпрямителя и двух мостов инверторов напряжения объясняется предельными значениями величин рабочего тока транзисторных ключей, из которых собраны вышеуказанные мосты.

Вторая, уже конструктивная, особенность ПЧ состоит в размещении транзисторных ключей, образующих одноименные плечи мостов активного выпрямителя и инверторов напряжения в конструктивах общих фазных модулей (схема фазного моду-

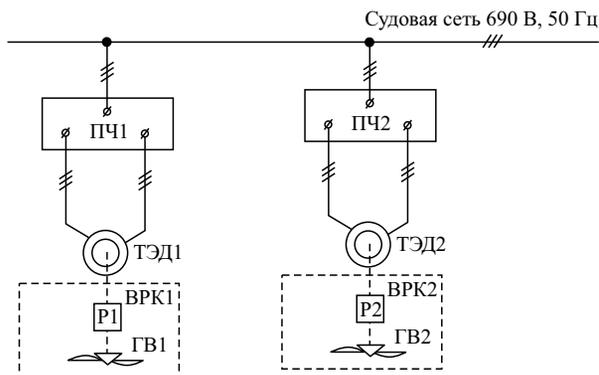


Рис. 4. Схема силовой части СЭД ледокола пр. 21180

Fig. 4. Power part layout for electric propulsion system of Project 21180 icebreaker

ля приведена на рис. 6). В состав преобразовательного канала входят шесть фазных модулей. Компоновка транзисторных ключей в фазных модулях улучшает условия их охлаждения и уменьшает величины перенапряжений, возникновение которых обусловлено наличием индуктивностей соединительных шин.

Изготовленное электрооборудование СЭД после приемо-сдаточных испытаний в 2017 г. было установлено на борту ледокола и после пусконаладочных работ успешно прошло швартовые и ходо-

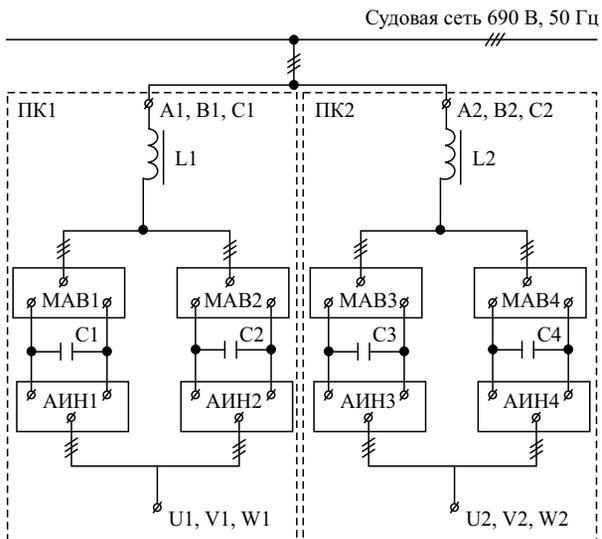


Рис. 5. Схема силовой части преобразователя частоты СЭД ледокола пр. 21180

Fig. 5. Power part layout for frequency converter of electric propulsion system aboard Project 21180 icebreaker

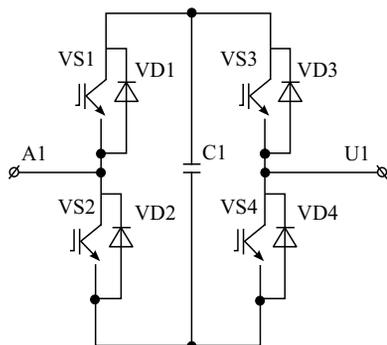


Рис. 6. Схема фазного модуля преобразователя частоты

Fig. 6. Layout of frequency converter phase module

вые испытания в составе действующей СЭД. После проведения ледовых испытаний ледокол «Илья Муромец» в 2018 г. вошел в состав флота РФ.

В начале 2000 г., в связи с интенсивным промышленным освоением нефтегазовых ресурсов и полезных ископаемых Крайнего Севера РФ, возникла необходимость создания транспортных путей для их доставки на энергетические рынки Западной Европы и Азиатского региона. Это невозможно без создания мощного ледокольного флота для круглогодичной проводки транспортных судов по Северному морскому пути. Решению данной задачи в отечественной судостроительной отрасли придаётся первостепенное значение. В настоящее время в ООО «Балтийский завод – Судостроение» выполняется строительство трех универсальных атомных ледоколов пр. 22220 («Арктика», «Сибирь» и «Урал»). Ледоколы предназначены для проводки крупнотоннажных транспортных судов во льдах толщиной до 4 м. Эксплуатация ледоколов предполагается в Западном и Восточном районах Арктики. Водоизмещение ледоколов составляет 33 530/22 540 т. СЭД ледоколов содержит три ЭП гребных винтов с распределением мощности 1:1:1.

Суммарная пропульсивная мощность на валах СЭД составляет 60 МВт. Разработчиком и поставщиком СЭД для строящихся ледоколов является филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Жесткие технические требования, предъявляемые к разрабатываемой СЭД, потребовали от проектантов решения целого ряда наукоемких задач, в процессе которого использовался накопленный опыт предыдущих разработок. Упрощенная схема ВЭД приведена на рис. 7.

Функционально СЭД ледокола пр. 22220 представляет собой три идентичных частотно-регулируемых ЭП гребных винтов. В соответствии со схемой в состав каждого ЭП (например, первого) входят: ГЭД, два преобразователя частоты (ПЧ1, ПЧ2) и четыре сетевых трансформатора (Т1–Т4). Требуемая величина пропульсивной мощности на гребном валу 20 МВт предопределила использование в качестве ГЭД электромашинных агрегатов (ЭМА). Конструкция агрегата выполнена в виде двух асинхронных машин (АЭМ), роторы которых имеют общий вал и нагружены на гребной винт (ГВ). На статорах асинхронных машин уложены по две трехфазных обмотки, магнитные оси которых сдвинуты на 30°. Каждая пара трехфазных обмоток получает питание от своего ПЧ, которые, в свою очередь, получают питание от судовой трехфазной сети напряжением 10 кВ через два трехобмоточных трансформатора. Подробное описание СЭД, ее технические характеристики и режимы работы даны в [3–5]. Здесь же рассматриваются особенности схемных и конструкторских решений ПЧ, являющихся наиболее сложными элементами СЭД. Схема силовой части ПЧ, разработанная в ходе технического проектирования СЭД, приведена на рис. 8.

Силовая часть ПЧ содержит два идентичных преобразовательных канала (на схеме – ПК1, ПК2). Каналы выполняют функцию преобразования трехфазного напряжения сетевого трансформатора, снимаемого с его вторичных обмоток и поступаю-

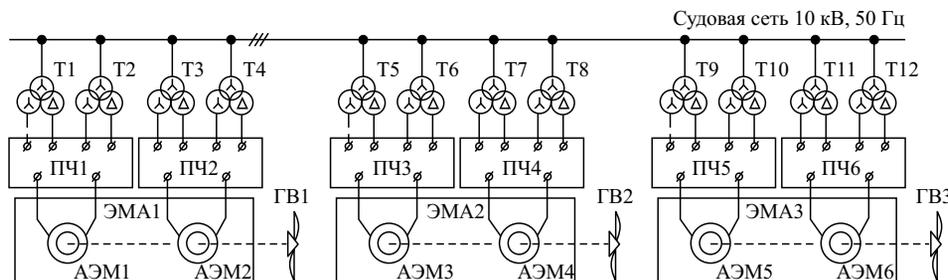


Рис. 7. Упрощенная схема СЭД ледокола пр. 22220

Fig. 7. Simplified layout of electric propulsion system aboard Project 22220 icebreaker

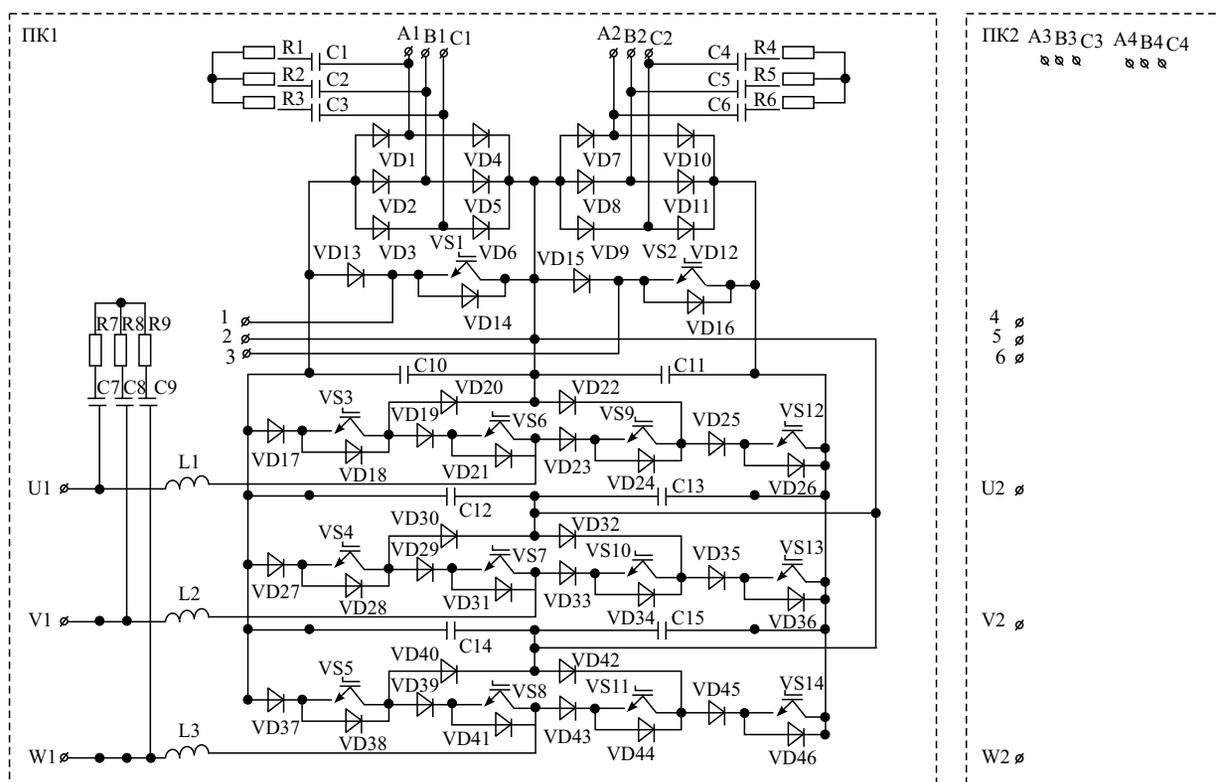


Рис. 8. Схема силовой части ПЧ для СЭД ледокола пр. 22220

Fig. 8. Power part layout for frequency converter of electric propulsion system aboard Pfoject 22220 icebreaker

шего на входные клеммы канала (A1, B1, C1 и A2, B2, C2 в ПК1), в систему трехфазного напряжения, параметры которого (действующее значение напряжения и частота) могут плавно регулироваться. Это трехфазное напряжение с выходных клемм (U1, V1, W1 в ПК1) по кабельной линии поступает на одну из пары обмоток, уложенных на статоре одной из двух асинхронных машин ГЭД.

В целях обеспечения электромагнитной совместимости СЭД с судовой сетью в процессе проектирования было принято отработанное ранее решение о применении в звене постоянного тока преобразовательных каналов двенадцатипульсных выпрямителей, собранных на полупроводниковых диодах (VD1–VD12, преобразовательный канал ПК1). Кроме того, с этой же целью к входным клеммам преобразовательных каналов подключались электрические фильтры (C1–C3, R1–R3 и C4–C6, R4–R6, преобразовательный канал ПК1).

С целью уменьшения величины коэффициента искажения синусоидальности напряжения на выходе преобразовательных каналов и увеличения КПД

ГЭД было принято решение выполнять автономный инвертор напряжения на основе трехуровневой схемы, собранной на полупроводниковых диодах и транзисторных ключах (VD17–VD46 и VS3–VS14, преобразовательный канал ПК1). Использование трехуровневых инверторов в преобразовательных каналах значительно улучшает гармонический состав выходного напряжения благодаря ослаблению комбинационных гармоник. Форма линейного напряжения на выходе трехуровневого инвертора показана на рис. 9.

В качестве транзисторных ключей в инверторах напряжения были применены ключи типа T2400GB4SE (фирма-производитель – WESTCODE, Великобритания). Транзисторные ключи рассчитаны на рабочий ток 2400 А и рабочее напряжение 4500 В. Частота широтно-импульсной модуляции выходного напряжения инверторов составляла 400 Гц.

Для реализации режимов генераторного торможения ГЭД в процессе проектирования ПЧ также было принято отработанное решение, основанное

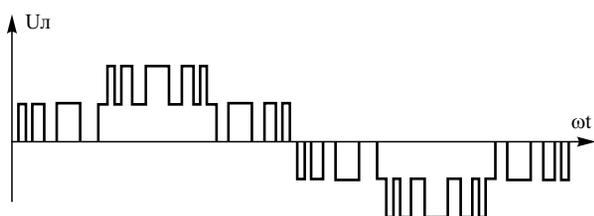


Рис. 9. Форма напряжения на выходе трехуровневого инвертора

Fig. 9. Voltage shape at the output of three-level inverter

на использовании блока тормозных резисторов, подключаемого к выходным клеммам преобразовательных каналов (1, 2, 3, преобразовательный канал ПК1). Для осуществления тормозных режимов непосредственно в преобразовательных каналах применялись чопперные модули, собранные на транзисторных ключах, полупроводниковых диодах и конденсаторах (VS1, VS2, VD13–VD16 и C10–C15, преобразовательный канал ПК1). Алгоритм

функционирования подобных модулей был рассмотрено выше.

В целях рассеивания тепловыделений и создания требуемых температурных режимов в ПЧ использовалась система принудительного жидкостного охлаждения, содержащая два контура: внешний (общесудовой) и внутренний. В качестве охлаждающего реагента во внешнем контуре использовалась морская вода, а во внутреннем – деионизированная вода, являющаяся практически не электропроводной.

Конструктивно ПЧ был выполнен в виде шести шкафов, установленных на общем основании, с габаритными размерами 8005×2523×1796 мм. В четырех шкафах размещалось силовое оборудование преобразовательных каналов; в двух других – оборудование системы водяного охлаждения и оборудование микропроцессорной системы управления.

Основные технические характеристики ПЧ, изготовляемых и поставляемых филиалом «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» для строящейся серии атомных универсальных ледоколов, приведены в таблице.

Таблица. Основные технические характеристики ПЧ

Table. Main technical parameters of frequency converter

Наименование параметра	Значение
Номинальная полная мощность, МВА	11
Максимальная мощность в кратковременном режиме работы в течение 1 мин., МВА	16
Количество преобразовательных каналов	2
Количество фаз на выходе преобразовательного канала	3
Номинальное действующее значение линейного напряжения на выходе преобразовательного канала, В	3000
Номинальное значение частоты напряжения на выходе преобразовательного канала, Гц	16
Номинальное действующее значение фазного тока на выходе преобразовательного канала, А	1060
Номинальное действующее значение линейного напряжения на входе преобразовательного канала, В	2×1950
Номинальное значение частоты напряжения на входе преобразовательного канала, Гц	50
Диапазон изменения частоты напряжения на выходе преобразовательного канала, Гц	0–17,5
Диапазон изменения величины действующего значения линейного напряжения на выходе преобразовательного канала, В	0–3000
Перегрузка по току на выходе сверх номинального значения в течение 10 с не менее 15 раз в час, %	180
Коэффициент полезного действия в номинальном режиме работы, %, не менее	98,5
Коэффициент мощности на входе в номинальном режиме работы, не ниже	0,96
Коэффициент нелинейных искажений напряжения, вносимых ПЧ в сеть, в номинальном режиме работы, %, не более	10

Совокупность жестких технических требований, предъявляемых к динамическим свойствам СЭД ледокола пр. 22220, предопределила использование в системах управления гребными ЭП алгоритма векторного управления. Суть этого алгоритма заключается в том, что система управления ЭП оперирует не с реальными знакопеременными трехфазными токами и напряжениями ГЭД, а с их виртуальными аналогами. Последние исчисляются в двухфазной системе координат, вращающейся с синхронной скоростью и соориентированной по вектору потокосцепления ротора двигателя. Введение двухфазной вращающейся системы координат приводит к тому, что виртуальные фазные токи и напряжения двигателя, вычисленные в этой системе координат, являются постоянными по знаку. При этом проекция обобщенного вектора тока статора двигателя на одну из осей (постоянная по знаку) является потокообразующей, а проекция данного вектора на вторую ось (тоже постоянная по знаку) – моментобразующей. Последнее обстоятельство позволяет производить синтез систем управления частотно-регулируемыми ЭП методами, применяемыми при синтезировании многоконтурных систем управления ЭП постоянного тока. Иначе говоря, используя алгоритм векторного управления, можно создавать частотно-регулируемые ЭП переменного тока, по своим динамическим свойствам не уступающие лучшим ЭП постоянного тока. Это качество обретает особую ценность при проектировании СЭД современных атомных ледоколов нового поколения. Подробно алгоритм векторного управления, используемый в гребных электроприводах СЭД ледокола пр. 22220, описан в [3].

В 2017 г. филиал «ЦНИИ СЭТ» отгрузил ООО «Балтийский завод – Судостроение» электрооборудование, входящее в состав двух ЭП гребных винтов для СЭД головного ледокола строящейся серии. Отгруженное электрооборудование прошло приемочные испытания, проводимые на предприятиях-изготовителях, а также испытания на электротехническом стенде ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Пусконаладочные работы СЭД как сложной системы, содержащей перечисленные выше виды электрооборудования, а также швартовые и ходовые испытания будут производиться в процессе постройки ледокола.

В целях сокращения сроков и стоимости проведения этих работ, а также в связи с необходимостью уточнения и корректировки технических решений, принятых в процессе разработки СЭД, было

решено произвести комплексные испытания третьего комплекта ЭП гребного винта в стендовых условиях. Возможность и необходимость корректировки технических решений объясняется тем, что некоторые из них принимались на основании экспериментальных исследований, проводимых на макетных образцах малой мощности с дальнейшим использованием методов подобию.

Было необходимо соблюсти тождественность условий выполнения береговых стендовых испытаний судовым условиям, также следовало учесть уникальность технических требований, предъявляемых к СЭД:

- действующее значение напряжения судовой сети – 10 кВ;
- пропульсивная мощность на гребном винте – 20 МВт;
- регулирование частоты вращения гребного винта в диапазоне 7,5–50 об/мин с точностью поддержания заданного значения 2 %;
- регулирование мощности на гребном валу в диапазоне 2–20 МВт с точностью поддержания заданного значения 2 %;
- ограничение электромагнитного момента ГЭД в режимах «фрезерования льда» на уровне 1,6 от номинального значения;
- ограничение электромагнитного момента ГЭД в режимах «заклинивания гребного винта» при «стоянке под током» на уровне 1,8 от номинального значения;
- реализация режима «прокрутка гребного вала» с частотой вращения 5 об/мин.

Все это потребовало наличия специализированного стенда, располагающего как соответствующим оборудованием, так и нужными средствами электрических и механических измерений. Поскольку в настоящее время ни одно предприятие РФ не располагает таким экспериментальным стендом, то он был разработан и создан в 2018 г. на территории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Стенд позволяет производить комплексные исследования СЭД как ледоколов пр. 22220, так и других ледоколов перспективных проектов. Во втором квартале 2018 г. на этом стенде прошли полномасштабные исследования третьего комплекта ЭП гребного винта, входящего в состав СЭД головного ледокола пр. 22220. Проведенные испытания подтвердили правильность выбранных основных схемных и конструкторских решений, принятых в процессе технического проектирования СЭД.

Программа дальнейшего развития атомного ледокольного флота РФ предусматривает создание

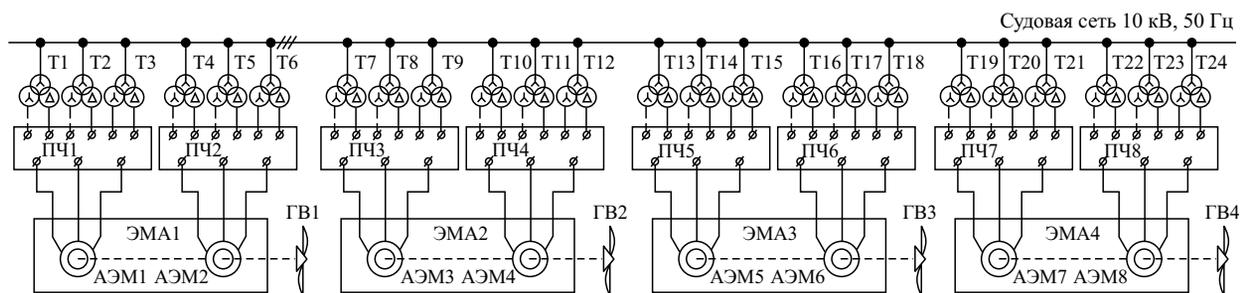


Рис. 10. Упрощенная схема силовой части СЭД ледокола «Лидер»

Fig. 10. Simplified power part layout of *Lider* icebreaker electric propulsion system

ледокола с суммарной мощностью на гребных валах 120 МВт (распределение мощности на гребных валах 1:1:1:1). Во исполнение этой программы филиал «ЦНИИ СЭТ» в 2017 г. принимал участие в разработке технического проекта ледокола (условное обозначение проекта – «Лидер») в части проектирования СЭД. В соответствии с разработанным техническим проектом упрощенная схема силовой части СЭД ледокола «Лидер» имеет вид, приведенный на рис. 10.

Функционально СЭД ледокола представляет собой совокупность четырех идентичных ЭП гребных винтов, при разработке которых в максимальной степени использовались технические решения, принятые в ходе создания СЭД для ледоколов пр. 22220. Однако двойное увеличение мощности СЭД обусловило их значительную корректировку. В частности, асинхронные электрические машины АЭМ1–АЭМ8, входящие в состав электромашинных агрегатов ГЭД, имеют по три трехфазных обмотки, уложенных на статоре. Увеличение числа обмоток обусловило и увеличение числа преобразовательных каналов в силовых частях ПЧ, от которых получают питание ГЭД (схемы самих преобразовательных каналов остались практически неизменными). В целях обеспечения электромагнитной совместимости СЭД с судовой сетью было принято решение об использовании трехобмоточных сетевых трансформаторов (Т1–Т24) с различными соединениями фазных обмоток. Вторичные обмотки трансформаторов соединены одна в «звезду», а другая в «треугольник». Первичные обмотки также соединены по-разному (у одного трансформатора первичная обмотка соединена в «звезду», а у двух других – в «зигзаг»). Такое техническое решение позволяет исключить в спектре тока, потребляемого ЭП СЭД, гармоники низкого порядка (вплоть до 35-й),

что снижает величину коэффициента искажения синусоидальности напряжения судовой сети до требуемого значения. Функционально ЭП гребных винтов для СЭД ледокола проекта «Лидер» синтезированы как частотно-регулируемые с алгоритмом векторного управления [3].

Технический проект СЭД ледокола проекта «Лидер» разработан и утвержден в 2017 г., решение о сроках и порядке выполнения дальнейших этапов разработки конструкторской документации будет принято правительством РФ в 2019 г.

Общей особенностью СЭД, рассмотренных в настоящей статье, является использование в их составе частотно-регулируемых ЭП на основе асинхронных двигателей переменного тока. В то же время анализ современного состояния дел в области автоматизированного регулируемого ЭП показывает, что ветвь ЭП на основе синхронных двигателей наиболее перспективна и сулит существенный технологический скачок. При этом одной из наиболее рациональных областей применения синхронных ЭП является судостроение. Именно здесь они могут найти широкое применение при создании СЭД мощных ледоколов нового поколения, технические требования к которым отличаются особой жесткостью в части надежности, экономичности и удельных массогабаритных показателей.

По этой причине филиал «ЦНИИ СЭТ», проводя в 2018 г. ОКР по созданию СЭД для мелкосидящего ледокола пр. 2740, принял за основу ЭП гребных винтов на базе синхронного двигателя с анизотропным ротором. В настоящее время работа находится в стадии технического проектирования. Однако предварительные результаты уже сейчас позволяют сделать вывод о корректности и целесообразности использования в СЭД проектируемого ледокола синхронных ЭП гребных винтов.

Заключение

Conclusion

В течение последних 20 лет в филиале «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» проводились интенсивные НИОКР, направленные на исследования, разработку изготовления и поставку как СЭД в целом, так и отдельных видов электрооборудования, предназначенного для использования в составе СЭД и ЕЭЭС строящихся судов различного назначения. В настоящее время большая часть этих СЭД успешно эксплуатируется на судах морского флота РФ. Существуют определенные различия в функциональном назначении судов, задачах, решаемых ими, их характеристиках и параметрах, а также в технических требованиях, предъявляемых к их СЭД в части:

- мощности на гребных валах;
- уровня напряжения судовой сети;
- динамических свойств;
- массогабаритных характеристик и экономических показателей.

Это предопределило многообразие проектных решений, принятых разработчиками в процессе создания СЭД. При принятии этих решений всегда использовались и широко применялись последние достижения науки и техники (микропроцессорные системы управления, современные полупроводниковые приборы, изготовленные лучшими зарубежными фирмами, преобразователи частоты на основе активных выпрямителей и многоуровневых инверторов напряжения, перспективные алгоритмы управления частотно-регулируемыми электроприводами и пр.). В ходе этих НИР и ОКР сложился коллектив специалистов, обладающих ценным опытом, создан уникальный испытательный стенд, а также установились надежные связи с предприятиями и фирмами, поставляющими комплектующие изделия и оборудование. Все это позволяет ЦНИИ СЭТ осуществлять качественную разработку и проводить полномасштабные экспериментальные исследования СЭД для перспективных судов нового поколения. На основании изложенного выше, можно считать, что филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» является ведущим предприятием РФ по разработке, изготовлению, испытаниям и комплектной поставке электрооборудования ЕЭЭС и СЭД для судов различного назначения.

Библиографический список

1. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. СПб.: Энергоатомиздат, 2000.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Издательский центр «Академия», 2007.
3. Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Алгоритм управления гребным электроприводом универсального атомного ледокола проекта 22220 // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 95–102.
4. Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Компьютерная модель гребного электропривода универсального атомного ледокола проекта 22220 // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 1(383). С. 89–100.
5. Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Особенности построения системы управления гребными электроприводами универсальных атомных ледоколов нового поколения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2(384). С. 61–69.

References

1. Kovchin S., Sabinin Yu. Theory of electric drive. St. Petersburg, Energoatomizdat, 2000 (in Russian).
2. Sokolovsky G. Frequency controlled AC drives. Moscow, Akademiya Publishing Centre, 2007 (in Russian).
3. Vershinin V., Makhonin S., Parshikov V., Khomyak V. Control algorithm for electric propulsion drive of Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Issue 4(382). P. 95–102 (in Russian).
4. Vershinin V., Makhonin S., Parshikov V., Khomyak V. Computer-based model of electric propulsion drive for Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 1(383). P. 89–100 (in Russian).
5. Vershinin V., Makhonin S., Parshikov V., Khomyak V. Design specifics of control system for electric propulsion drive aboard multi-purpose nuclear icebreakers of the new generation // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 2(384). P. 61–69 (in Russian).

Сведения об авторах

Вершинин Виктор Иванович, инженер 1 категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государствен-

ный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Махонин Сергей Васильевич, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Паршиков Владимир Алексеевич, начальник отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Хомяк Валентин Алексеевич, начальник отдела – главный конструктор ЕЭЭС и ГЭУ филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-30. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Viktor I. Vershinin, 1st Category Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-38. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Sergey V. Makhonin, Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Vladimir A. Parshikov, Head of Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-43. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Valentin A. Khomyak, Head of Department – Chief Designer of IEPS and Electric Propulsion Plants, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-30. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 22.10.18
Принята в печать / Accepted: 01.02.19
© Коллектив авторов, 2019