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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379

THE UNIFIED ELECTRIC POWER SYSTEM AND ELECTRICAL PROPULSION SYSTEM OF THE ARC7 ICE-CLASS TANKER «SHTURMAN SKURATOV»

V. U. Kolesnichenko

Gazpromneft Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

An overview of the unified electric power system of the ice-class tanker "Shturman Skuratov" with AC-AC current electric propulsion system is provided in the paper. The scheme of the main high-voltage power plant and the table of loads of diesel-generator units in the main operating modes of the vessel is presented. The description of the main modules of frequency converters with intermediate DC link ABB ACS6000, implementing the direct torque control algorithms for synchronous motors with two anchor windings, is given. The basic elements of autonomous voltage inverters built on power semiconductor devices – IGCT thyristors (turn-off thyristors with integrated control unit), complete with reverse diodes of rapidly recovering type are considered. The circuitry solutions applied in the autonomous voltage inverter necessary to protect the turn-off thyristors from excessive values of the current rise rate during switching on and to ensure simultaneity of the thyristors control during locking are considered. The characteristics of the power semiconductors of the phase modules and brake resistors required during braking with the reverse of the propeller motor are given. The main types of protection of a high-voltage power station against overloads caused by the work of the rowing electrical installation, which are described in the ship documentation, are considered. The practical data on the features of the frequency converter at the construction of speed feedback using encoders or the use of data calculated from the adaptive model of the propeller motor at modulation are presented.

Keywords: propulsion electrical system, frequency converter with DC link, autonomous voltage inverter, control system, turn-off thyristor with integrated control unit.

For citation:
Kolesnichenko, Vitalii U. "The unified electric power system and electrical propulsion system of the ARC7 ice-class tanker «Shturman Skuratov»." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.

УДК 621.316.71

ЕДИНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ГРЕБНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ТАНКЕРА ЛЕДОВОГО КЛАССА ARC7 «ШТУРМАН СКУРАТОВ»

В. Ю. Колесниченко

Газпромнефть Шиппинг, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведен анализ единой электроэнергетической системы танкера ледового класса «Штурман Скуратов» с гребной электрической установкой переменно-переменного тока. Представлена схема основной высоковольтной электростанции и таблица нагрузок дизель-генераторных агрегатов в основных эксплуатационных режимах работы судна. Дано описание основных модулей преобразователей частоты со звеном постоянного тока ABB ACS6000, реализующих алгоритмы прямого управления моментом гребных синхронных электродвигателей с двумя якорными обмотками. Рассмотрены основные элементы автономных инверторов напряжения, построенных на силовых полупроводниковых приборах — IGCT-тиристорах (запираемые тиристоры с интегрированным блоком управления), в комплекте с обратными диодами быстро восстанавливающегося типа. Рассмотрены примененные в автономном инверторе напряжения схемотехнические решения, необходимые для защиты запираемых тиристоров от чрезмерных значений скорости нарастания тока при включении и обеспечения одновременности управления тиристорами при запирании. Приведены характеристики силовых полупроводниковых приборов фазных модулей и тормозных резисторов, необходимых при торможении реверсом гребного электродвигателя. Рассмотрены приведенные в судовой документации основные виды защиты высоковольтной электростанции от перегрузок, вызванных работой гребной электрической установки. Представлены

практические данные об особенностях работы преобразователя частоты при построении обратной связи по скорости с применением энкодеров или использовании данных, рассчитанных из адаптивной модели гребного электродвигателя при модуляции.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, преобразователь частоты, звено постоянного тока, автономный инвертор напряжения, система управления, запираемый тиристор, интегрированный блок управления.

Для цитирования:
Колесниченко В. Ю. Единая электроэнергетическая система и гребная электрическая установка танкера ледового класса ARC7 «Штурман Скуратов» / В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.

Введение

Танкеры ледового класса Arc7 предназначены для обеспечения круглогодичной транспортировки нефти Новопортовского месторождения от терминала «Ворота Арктики» — единственного в мире нефтеналивного терминала за Полярным кругом. Суда выполнены по уже зарекомендовавшей себя в условиях севера концепции судна двойного действия «Double Acting Ship, DAS»: в свободной воде судно работает носовой частью вперед, во льдах — кормой. Подобное решение и конструктивная прочность усиленного ледового пояса позволяют судам эффективно работать в зимнее время и преодолевать кормой лед толщиной до 1,8 м. В качестве движителей на танкере используются две поворотные на 360° винторулевые колонки типа Azipod серии VI общей мощностью 22 МВт. В источнике [1] приведены такие преимущества данной серии, как высокая маневренность, максимальный крутящий момент ГЭД при работе на низких частотах и даже его остановке, надежность механической конструкции, благодаря чему корпус погружной гондолы выдерживает высокие ударные нагрузки при работе во льдах, а максимальный крутящий момент ГЭД может применяться полностью без механических ограничений. Для обеспечения высокой маневренности судна при грузовых операциях у выносного терминала «Ворота Арктики» в весенне-осенний период в качестве активного средства управления судном используется носовое подруливающее устройство (ПУ) мощностью 1250 кВт.

Приведенные в статье данные могут быть полезны обслуживающему персоналу судов с аналогичным оборудованием при проведении планового технического обслуживания, ремонта и поиска неисправностей, а также использованы для компьютерного моделирования единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) арктических танкеров и других типов судов. Компьютерная модель позволит проводить исследования переходных режимов, оценивать влияние силовой полупроводниковой техники в пропульсивном комплексе на качество электрической энергии, рассчитывать токи короткого замыкания и провалы напряжения [2]. Экспериментальные данные компьютерной модели, имитирующей работу ЕЭЭС в нормальных и аварийных режимах [3], при тяжелой ледовой обстановке могут быть использованы для прогнозирования отказов элементов ЕЭЭС и, согласно правилам РМРС, разработки анализа влияния видов неисправностей (FMEA — Failure Mode Effective Analyze).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Единая электроэнергетическая система судна (ЕЭЭС) состоит из основной судовой электростанции (СЭС) 6,6 кВ, 60 Гц, главного распределительного щита (ГРЩ) общесудовых приемников электроэнергии 440 В, 60 Гц и аварийного распределительного щита (АРЩ) — рис. 1.

Основная СЭС, обеспечивающая питание гребной электрической установки (ГЭУ) переменно-переменного тока, включает: два дизельных двигателя STX 14V32/40 мощностью 7000 кВт, 720 об/мин; два дизельных двигателя STX 18V32/40 мощностью 9000 кВт, 720 об/мин; четыре генератора фирмы ABB: DG1, DG4 мощностью 9333 кВ·А (8400 кВт, $\cos \varphi = 0{,}9$) и два генератора DG2, DG3 мощностью 7000 кВ·А (6300 кВт, $\cos \varphi = 0{,}9$). Класс изоляции генераторов — F. Система возбуждения каждого генератора состоит из электронного регулятора напряжения (РН) ABB

Unitrol 1020, возбудителя, диодного моста и обмотки возбуждения на роторе генератора. Для обеспечения срабатывания защиты от коротких замыканий (КЗ) РН включает в себя бустерную цепь, необходимую для поддержания установившегося значения тока КЗ. Генераторы имеют водяное охлаждение и сигнализацию от протечек.

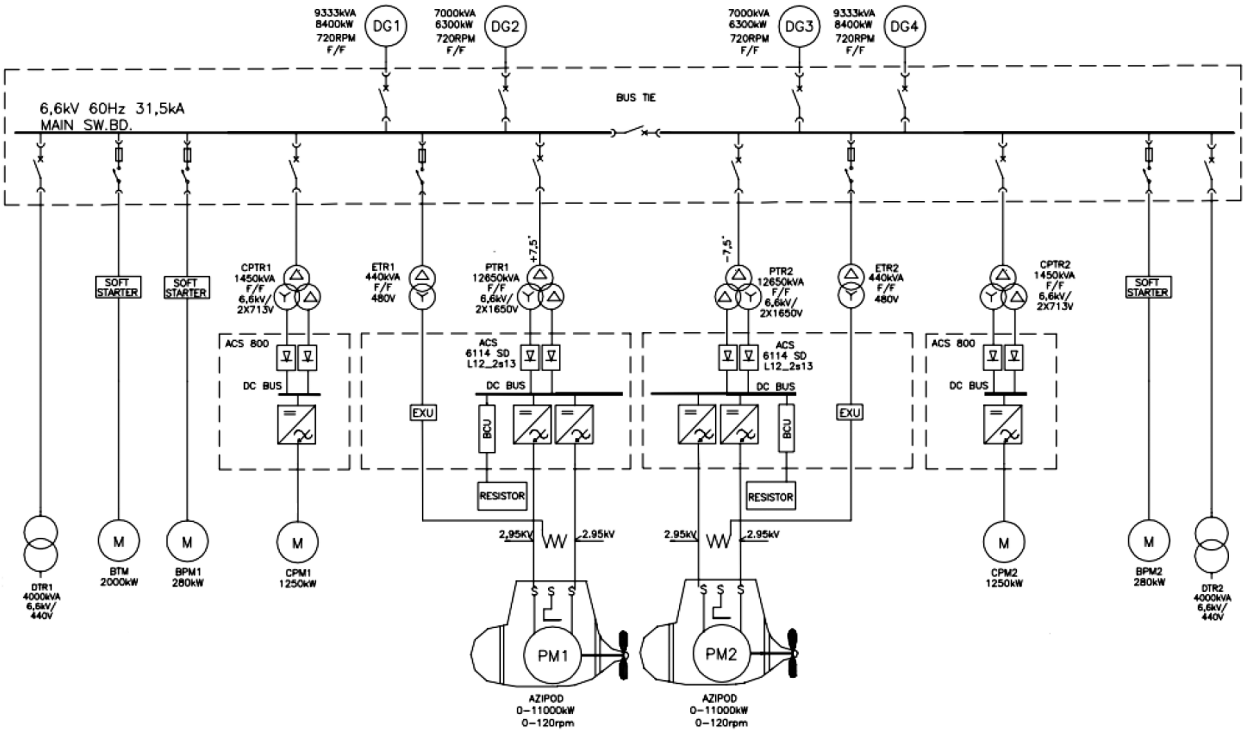

Рис. 1. Схема основной СЭС

ЕЭЭС обладают высокой регулировочной и перегрузочной способностью, высоким КПД на долевых нагрузках, повышают надежность и безопасность эксплуатации всей установки в целом [4], [5]. В табл. 1 приведены нагрузки дизель-генераторных агрегатов (ДГА) в основных режимах работы судна.

Таблица 1

Режимы работы судна «Штурман Скуратов»

Режимы работы судна		Ход в свободной воде	Ход в ледовых условиях	Грузовые операции: выгрузка	Маневренный режим	Стоянка в порту		Аварийный	
						зима	лето	блэкаут	пожар
Азиподы, кВт		12069	23209		2321				
Подруливающее устройство, кВт		–	–	–	1667	–		–	–
Грузовые насосы, кВт		–	–	2261	–	–		–	–
Балластные насосы, кВт		–	–	506	–	–		–	–
Система предотвращения обледенения, кВт		1375	1375	1375	1375	375	–	96	–
Общая нагрузка, кВт		14916	26037	5582	6620	991,5	709,3	408	302
Количество работающих генераторов	2×8400 ДГ	1	2	1	1	–		–	
	2×6300 ДГ	2	2	0	0	–		–	

Окончание табл. 1

Количество работающих генераторов	1×1400 Ст. ДГ	–	–	–	–	1		–	
	1×600 АДГ	–	–	–	–	–		1	
	доступная мощность, кВт	21000	29400	8400	8400	1400		600	
Загрузка ДГ, %		71	88,6	66,4	78,8	70,8	50,7	68	50,3

Отбор мощности для ГРЩ 440 В, 60 Гц осуществляется через один из двух понижающих трансформаторов: DTR1, DTR2. Также комплектация ЕЭЭС включает в себя стояночный дизель STX 7L21/31 мощностью 1540 кВт, 900 об/мин и генератор Hyndai Heavy Industries мощностью 1750 кВ·А (1400 кВт, cos φ = 0,8). Стояночный дизель-генератор предназначен для питания общесудовых приемников электроэнергии судна при стоянке в порту без проведения грузовых операций. Мощность аварийного ДГА составляет 750 кВ·А (600 кВт, cos φ = 0,8).

Пуск электродвигателей балластных насосов и ПУ обеспечивается через устройства плавного пуска. В случае неисправности устройств плавного пуска возможен прямой пуск электродвигателей. Для управления электродвигателями грузовых насосов применяются преобразователи частоты (ПЧ) ABB ACS800. Питание грузовых ПЧ происходит через трехобмоточные трансформаторы CPTR1, CPTR2. Вторичные обмотки трансформаторов соединены по схеме «звезда – треугольник» и сдвинуты на 30°. Линейное номинальное напряжение вторичных обмоток 713 В, 60 Гц. Тип электродвигателя ПУ — асинхронный. Номинальный режим работы S2 — 60 мин.

Гребная электрическая установка. ГЭУ не имеют бесспорных преимуществ для большинства типов судов, но, в связи с отсутствием жесткой механической связи между движителем и валами первичных двигателей, являются наиболее приемлемыми для ледоколов и судов ледового плавания, обладают рядом эксплуатационных достоинств, среди которых можно выделить повышенные маневренные качества, широкую возможность управления и автоматизации, высокую живучесть ЕЭЭС, что обеспечивается возможностью перераспределения нагрузки между первичными двигателями и возможностью их поагрегатного ремонта.

В комплексе винторулевых колонок Azipod в качестве гребных электродвигателей (ГЭД) используются синхронные машины с двумя якорными обмотками. Применение двух якорных обмоток позволяет достичь уменьшения пульсаций электромагнитного момента ГЭД [6] и возникновения шагового режима, когда двигатель вращается с остановками, особенно при работе на малых частотах и небольшом моменте инерции [7]. По сравнению с асинхронным синхронный ГЭД имеет следующие преимущества:

– большая величина воздушного зазора между статором и ротором, что особенно важно для ледоколов и судов ледового плавания, поскольку снижается вероятность повреждения обмоток двигателя при вибрациях;

– меньшее влияние износа подшипников на изменение характеристик двигателя [8];

– более высокий КПД;

– более высокая перегрузочная способность.

Управление ГЭД осуществляется ПЧ ABB ACS6000, выполненным по схеме «неуправляемый 12-пульсный выпрямитель – звено постоянного тока – управляемый инвертор» с реализацией алгоритмов DTC (Direct Torque Current — прямое управление моментом) и замкнутой системой управления (обратной связью с применением *энкодеров* — датчиков углового положения). В работе [9] приводится функциональная схема и алгоритм работы метода DTC, основной задачей которого является быстрая реакция электромагнитного момента на возмущающее и управляющее воздействие. В отличие от векторного частотного управления прямое управление моментом

не требует широтно-импульсной модуляции и координатных преобразований. При этом переключение силовых полупроводниковых приборов происходит согласно алгоритму оптимальных переключений, что способствует снижению коммутационных потерь.

ПЧ оснащен многофункциональной микропроцессорной системой управления (МПСУ) с развитым пользовательским интерфейсом. Модульное исполнение ПЧ ACS6000 (рис. 2) ведет к снижению капитальных затрат и занимаемых площадей.

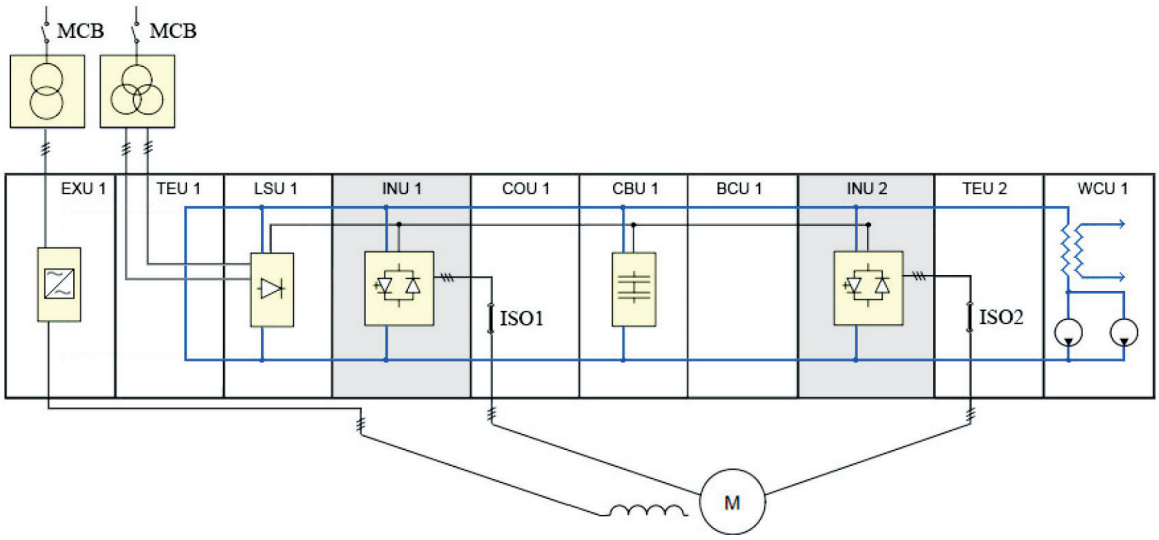

Рис. 2. Конфигурация ПЧ ACS6000 судна «Штурман Скуратов» содержит модули:
EXU 1 — возбуждения ГЭД; *TEU 1, 2* — крепления силовых шин;
INU 1, 2 — трехуровневых инверторов напряжения; *COU 1* — инверторы контроля;
CBU 1 — инверторы конденсаторов; *BCU 1* — крепления внешних тормозных резисторов;
WCU 1 — водяного охлаждения ПЧ, MCB — главные автоматические выключатели;
ISO1, ISO2 — автоматические изоляторы обмоток ГЭД

Модуль *LSU 1* представляет собой 12-пульсный неуправляемый выпрямитель (НВ) на диодах и используется для двухквадрантной работы с постоянным коэффициентом мощности 0,96 во всем диапазоне частот вращения[1]. Модуль управления *COU 1* содержит элементы управления, контроля и защиты ПЧ. Основной компонент системы управления — контроллер AMC34, построенный на процессоре Motorolla DSP с тактовой частотой 150 МГц. Последние две цифры означают поколение процессора. AMC34 имеет два порта типа PPCS и восемь портов DDCS для передачи данных по оптоволоконной связи. Управление инверторами ПЧ осуществляется контроллером через интерфейсные карты управления и измерений INT-Board. Интерфейсная карта INT-Board используется как система управления и измерений АИН, содержит программируемые элементы с алгоритмом оптимального переключения ключей АИН для поддержания заданной частоты вращения или мощности ГЭД и алгоритмом отключения АИН при аварийных событиях; осуществляет связь между главной картой AMC34 и другим оборудованием АИН. Обмен данными между системой управления и внешними устройствами обеспечивается платами ввода / вывода S800 и шинного модема TB820 серии Advant с помощью протокола DDCS.

Среди программного обеспечения контроллера системы управления основную программу представляет MSM (Main State Machine). Программа вызывается операционной системой контроллера через определенные промежутки времени и управляет пуском, остановкой и отработкой сообщений об ошибках и неисправностях ПЧ. А также определяет оптимальную реакцию на любые события, возникающие при работе. Автономные инверторы напряжения (АИН) *INU1, 2* выполнены по трехфазной мостовой схеме (рис. 3).

[1] Привод Drive ACS 6000 переменного тока среднего напряжения для регулирования скорости и крутящего момента электродвигателей мощностью 3–27 МВт. ABB, 2004. 4 с.

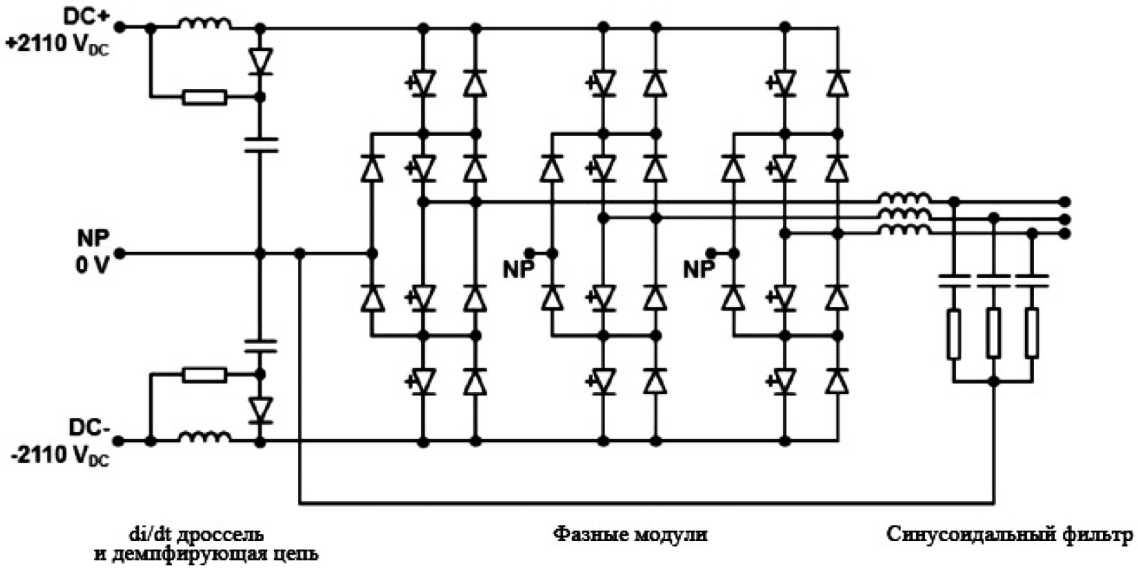

Рис. 3. Трехуровневый АИН на IGCT-тиристорах

Основными элементами АИН (рис. 4) являются:
– три фазных модуля, каждый для отдельной фазы;
– блоки питания драйверов силовых полупроводниковых ключей;
– синусоидальный фильтр;
– интерфейсная карта измерений и управления инвертором INT-Board.

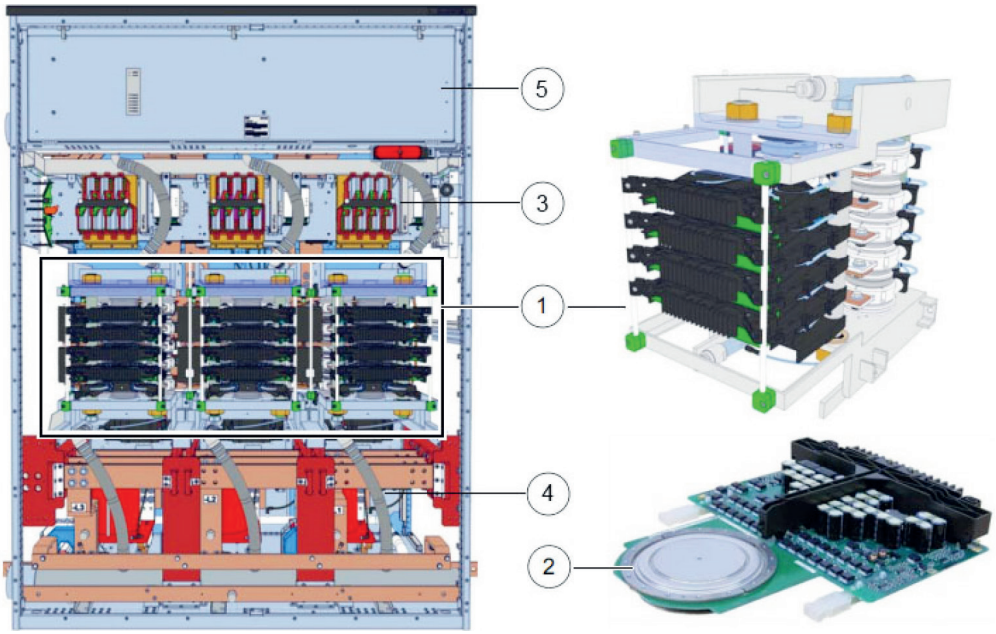

Рис. 4. Модуль АИН ПЧ ACS6000:
1 — фазные модули; *2* — IGCT-тиристор; *3* — GUSP блоки питания драйверов IGCT;
4 — водяное охлаждение; *5* — секция платы управления INT-Board

В состав фазного модуля входят четыре ассиметричных силовых полупроводниковых прибора IGCT (запираемый тиристор с интегрированным блоком управления), четыре обратных диода и два диода, подключенных к средней точке. В табл. 2 даны характеристики модели IGCT-тиристоров — 5SHY 4045L0004GVC736 производства компании *ABB*.

Таблица 2

Характеристики IGCT-тиристора 5SHY 4045L

Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии	V_{DRM}	4500 В
Максимальный анодный ток	I_{TGQM}	4000 А
Ударный неповторяющийся прямой ток	I_{TSM}	$28 \cdot 10^3$ А
Максимальный действующий ток	$I_{T(RMS)}$	2240 А
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии	di/dt_{crit}	200 А/мкс
Пороговое напряжение тиристора	V_{T0}	1,7 В
Динамическое сопротивление	r_T	0,454 $m\Omega$
Выдержка времени включения	$t_{d(\text{on})}$	3,5 мкс (max)
Выдержка времени выключения	$t_{d(\text{off})}$	7 мкс (max)
Энергия включения за один пульс	E_{on}	1,5 Дж (max)

Корпус каждого IGCT-тиристора оснащен тремя светодиодами, индицирующими наличие управляющего сигнала в цепи управления, наличие питание драйвера, неисправность или КЗ полупроводника (мигание третьего светодиода). Команда на включение / выключение тиристора подается на волоконно-оптический разъем-приемник. Разъем-передатчик служит для обратной связи тиристора с интерфейсной картой управления, но в рассматриваемой комплектации не используется. Благодаря тиристорной структуре ток в IGCT приборах нарастает очень быстро. Одна из основных характеристик IGCT-тиристора — критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии di/dt_{crit} (А/мск). В то же время нельзя утверждать, что ток по структуре полупроводника распространяется равномерно. Наличие паразитных индуктивностей, неравномерность охлаждения, а также некоторые неоднородности структуры полупроводника могут приводить к значительным различиям в температуре тиристора, неравномерности тока в проводящем состоянии и особенно в моменты переключений. Эти факторы оказывают серьезное влияние на проектирование схем с применением IGCT-тиристоров в случаях необходимости их параллельного или последовательного включения.

Для защиты тиристоров от локального перегрева [11], [12] и выхода из строя других элементов цепи необходим ряд схемотехнических решений. Во-первых, для ограничения значений di/dt_{crit} каждый фазный модуль АИН включает два *di/dt*-дросселя. Во-вторых, дроссели предназначены для ограничения токов КЗ. Индуктивность дросселя можно подобрать такой, чтобы ограничить скорость нарастания тока КЗ в допустимых пределах [13]. Карта фиксирования токов КЗ — VLSCD, подключенная параллельно к каждому дросселю, в случае возникновения аварии подает сигнал по оптоволоконной связи на интерфейсную карту управления инвертором INT-Board, которая без связи с главным контроллером AMC34 при обнаружении токов КЗ останавливает работу ПЧ, размыкает изоляторы ISO1, ISO2 и главный выключатель MCB.

При последовательном соединении IGCT-тиристоров система управления должна обеспечивать одновременность их запирания. Допустимая неодновременность управления — не более 100 нс [13]. Для обеспечения абсолютно одновременного управления IGCT-тиристорами фазного модуля необходимо скомпенсировать все внутренние и внешние допуски, вызванные временными ошибками / задержками в управлении или локальными факторами, например, температурой структуры тиристора [14]. Наличие демпфирующей цепи, входящей в каждый фазный модуль, позволяет исключить возможность несовпадения моментов запирания тиристоров, и следовательно, исключить возможность перегрузки отдельных приборов. Конденсатор этой цепи поглощает все избыточные заряды [15], вызванные незначительными различиями в моментах запирания, тем самым равномерно распределяя напряжение по всем приборам. Для упрощения схемы демпфирующая цепь (см. рис. 3) показана только для одного фазного модуля.

IGCT-тиристор является прибором с односторонней проводимостью. При работе АИН на активно-индуктивную нагрузку, которой являются якорные обмотки ГЭД, ток, обусловленный индуктивностью обмоток, после выключения тиристора протекает через диод в обратном направлении. Наличие обратного диода улучшает условия выключения тиристора [16], поскольку при протекании тока в диоде к тиристору прикладывается небольшое обратное напряжение. В качестве обратных диодов в комплекте с IGCT-тиристорами эффективно используются диоды быстровосстанавливающегося типа. Характеристики установленных обратных диодов Fast Recovery 5SDF 2045L0001 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики обратных быстровосстанавливающихся диодов 5SDF 2045L

Повторяющееся обратное импульсное напряжение	V_{RRM}	4500 V
Предельный прямой ток	$I_{F(AV)M}$	1970 A
Ударный неповторяющийся прямой ток	I_{FSM}	$45 \cdot 10^3$ A
Падение напряжения на диоде в открытом состоянии	V_F	4,2 V
Пороговое напряжение диода	V_{F0}	1,56 V
Динамическое сопротивление диода	r_F	0,8 $m\Omega$

Выходное напряжение АИН INU1, 2 представляет собой последовательность двуполярных прямоугольных импульсов высокой частоты. Крутизна фронта определяется частотой переключений IGCT-тиристоров. Прохождение импульса с крутым фронтом вызывает волновые процессы в силовом кабеле, приводя к перенапряжениям [7] на зажимах якорных обмоток ГЭД. Во избежание повреждения изоляции ГЭД импульсами напряжения с высокой скоростью нарастания (*du/dt*) АИН снабжаются синусоидальными фильтрами.

ПЧ ACS 6000 реализует прямое управление моментом и в рассматриваемой конфигурации построен с замкнутой системой управления с применением *энкодеров*, выдающих данные через SSI (Synchronous Serial Interface) интерфейс. Коммутацией IGCT-тиристоров АИН напрямую регулируются основные переменные ГЭД: магнитный поток статорных обмоток и вращающий момент. При этом частота вращения ротора ГЭД рассчитывается как в процессе модуляции МПСУ ПЧ из адаптивной модели ГЭД, для которой входными данными являются значения токов и напряжение звена постоянного тока, так и с помощью энкодеров. МПСУ производит вычисления состояния адаптивной модели ГЭД каждые 25 мкс, т. е. 40000 раз в секунду. Таким образом, обратная связь по скорости у ПЧ ACS6000 может строиться без применения энкодеров. Помимо этого возможны ситуации, при которых рассчитанное с помощью энкодеров значение частоты вращения ротора ГЭД после перевода рукояток задатчиков скорости в нулевое положение и поступления ПЧ команды СТОП (Stop Cmd) не достигнет предустановленного минимального значения скорости (параметр 20,03 Zero Speed Limit), которым программа MSM системы управления определяет завершение действий по снижению скорости, остановку (Zero Speed Detection), переводя ПЧ из одного рабочего состояния (ReadyRef — во время работы) в другое (ReadyRun — после остановки).

Из рис. 5, *а* видно, что при модуляции момент остановки вращения ГЭД определяется командой СТОП и моментом прекращения преобразователем частоты модуляции независимо от текущей частоты вращения. При работе энкодеров (см. рис. 5, *б*) завершение программы по снижению скорости и перевод ПЧ в следующее рабочее состояние должны произойти при значении частоты вращения движителя меньше установленного параметра 20,03. В связи с этим для корректной работы ГЭУ заводскими настройками момент определения остановки ГЭД предусмотрен временем снижения скорости и прекращения модуляции. Время участка снижения скорости в МПСУ ПЧ, определяемое параметром Process Stop Ramp, составляет 20 с. Описанная ситуация возможна, например, если винт ГЭД подкручивается течением. В этом случае после команды СТОП, завершения ПЧ модуляции и снижении скорости параметр, определяющий момент остановки, должен быть ак-

тивирован другим способом, иначе программа по снижению скорости ГЭД не завершится, и последующий пуск ГЭД станет невозможным[1]. Наиболее доступным выглядит увеличение параметра минимального значения скорости (20,03 Zero Speed Limit).

а) б)

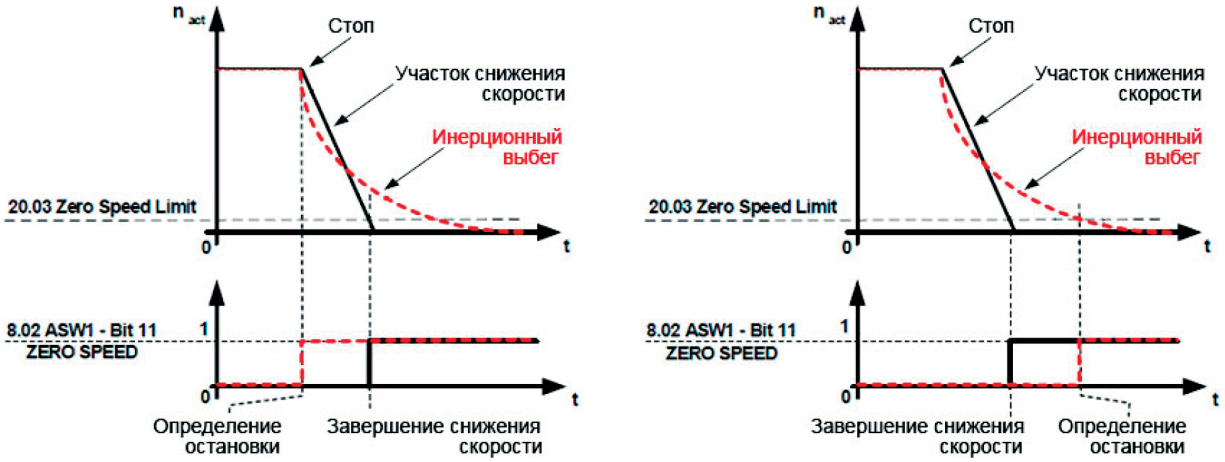

Рис. 5. Определение момента остановки ГЭД при модуляции (*а*) и при работе энкодеров (*б*)

В системах DTC и векторного управления помимо создания обратной связи по скорости, датчики применяются для регулирования момента на валу двигателя на низких частотах. Каждый ГЭД оборудован двумя энкодерами. Для режима работы с поддержанием постоянной частоты вращения МПСУ использует данные, полученные от датчиков, а в качестве резервных — данные, рассчитанные при модуляции. При рассогласовании между показаниями МПСУ выдает сигнал о неисправности энкодера (Encoder Mismatch), переходя на данные, получаемые из адаптивной модели ГЭД.

Модульная конфигурация ПЧ и применение ГЭД с двумя якорными обмотками повышают надежность ГЭУ. При неисправности одного из АИН или обмотки ГЭД предусмотрен переход на режим работы с одной якорной обмоткой при снижении рабочих показателей[2] — табл. 4.

Таблица 4

Ограничение рабочих показателей ГЭД при работе с одной обмоткой

Неисправность ГЭУ после звена постоянного тока ПЧ (АИН, ГЭД)	Мощность, %	Момент, %	Скорость, %
	35,4	50	70

Торможение судна осуществляется двумя способами: разворотом винторулевых колонок на 180° и реверсом гребного электродвигателя. При использовании в конфигурации ПЧ на входе активного выпрямителя возможна рекуперация в судовую сеть электроэнергии, вырабатываемой при реверсировании ГЭД. В рассматриваемой комплектации ПЧ возвращаемая энергия рассеивается в виде тепла на внешних тормозных резисторах (табл. 5), подключаемых тормозными IGCT-тиристорами в модуле BCU1 по значению превышения максимального значения напряжения в звене постоянного тока.

Таблица 5

Характеристики тормозных резисторов

Конструкция	Две секции резисторов, соединенных последовательно
Материал резисторов	NiCrMo 25–20–5
Температурный коэффициент сопротивления α (20 °C – 550 °C)	0,000453 / *k*

[1] User's Manual. Signal and Parameter table. ABB, 2015. 128 с.

[2] ACS6000 — Drive Backup Control. ABB, 2016. 5 с.

Окончание табл. 5

Изменение сопротивления от 20 °С до 550°С	+ 24 %
Сопротивление при 20 °С	2×3,6 Ω
Сопротивление при 550 °С	2×4,464 Ω
Заводская погрешность	+/– 10 %
Максимально допустимый ток	880 А
Рабочий режим	60 МДж/20 с каждые 30 мин
Номинальное рабочее напряжение	2,7 кВ (max 3,2 кВ)
Индуктивность	Менее 240μ Гн на одну секцию резисторов
Тип охлаждения	Водяное

Если реверсирование ГЭД происходит при высокой скорости судна, то для предотвращения повреждения тормозных резисторов система управления ГЭУ выдает команду ПЧ на остановку модуляции и воздействия на ГЭД, обеспечивая снижение скорости за счет свободного вращения винта до безопасного уровня, после чего происходит реверсирование[1]. Питание ПЧ ГЭУ происходит через трехобмоточные трансформаторы, вторичные обмотки которых включены по схеме *звезда – треугольник*, сдвинутые в пространстве на 30 эл. град. Номинальное напряжение вторичных обмоток трансформатора 1660 В, 60 Гц.

Применение трансформатора со сдвигом фаз обеспечивает гальваническую развязку между высоковольтной сетью и ПЧ, позволяет реализовать двенадцатипульсный режим выпрямления и существенно снизить гармонические искажения, тем самым улучшая качество напряжения на шинах высоковольтной СЭС. Трансформаторы выполнены по технологии RESIBLOC с воздушным и водяным охлаждением, установлена сигнализация от протечек. Секция возбуждения каждого ПЧ имеет свой собственный понижающий трансформатор ETR1, ETR2 (см. рис. 1).

Защитные функции системы управления ГЭУ. При работе в тяжелых ледовых условиях предусмотрена возможность работы ПЧ и ГЭД с моментом 180 % от $M_{ном}$ в течение 60 с, после чего происходит снижение момента до 100 % на 600 с для охлаждения цепей ПЧ. По истечении периода охлаждения снова доступен 60-секундный режим перегрузки.

Для обеспечения безаварийной работы и предотвращения перегрузок судовой электростанции, согласно ч. XI, разд. 17.14.1 Правил РМРС[2], система управления (СУ) ГЭУ имеет ряд следующих защитных функций:

– отправка сигнала «достаточности мощности» к автоматизированной системе управления электростанцией (PMS — Power Management System);

– мониторинг состояния автоматических выключателей дизель-генераторов:

– для внутреннего расчета доступной мощности судовой электростанции средствами ПЧ ACS6000;

– для обнаружения аварийной остановки генераторов;

– для расчета значения максимально разрешенного увеличения нагрузки на СЭС;

– мониторинг нагрузки генераторов;

– мониторинг частоты сети судовой электростанции.

Расчет доступной мощности для каждого ГЭД выполняется средствами судовой PMS и собственной МПСУ ПЧ ACS6000. Собственная система расчета мощности предусмотрена в качестве резервной, она повышает надежность ГЭУ, обеспечивая ее работу в случае неисправности судовой системы управления электростанцией.

При аварийном отключении работающего в сети генератора для предотвращения перегрузки оставшихся в работе генераторов СУ ступенчато снижает мощность ГЭУ.

[1] ACS6000 — User's Manual. PCS Functional Description. ABB, 2017. 14 с.

[2] Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI: Электрическое оборудование. 2016. 96 с.

Любые события в ЕЭЭС, способные повлиять на работоспособность ГЭУ, делятся МПСУ ПЧ на две категории со своим приоритетом и алгоритмом срабатывания защит ПЧ:

1-й приоритет — события, возникающие между основной СЭС и ПЧ. При возникновении аварийных ситуаций размыкается главный выключатель МСВ, якорные обмотки ГЭД отключаются изоляторами ISO1 и ISO2 от АИН, разряжается звено постоянного тока;

2-й приоритет — события, возникающие между ПЧ и ГЭД. Отключаются только обмотки ГЭД. ЗВП не разряжается для возможности быстрого введения в работу после устранения неисправности.

Связь между ПЧ и СЭС осуществляется с помощью протокола GOOSE (общее объектно-ориентированное событие на подстанции), описанного в Стандарте МЭК-61850. В случае неисправности в сети передачи данных для предотвращения перегрузки СЭС работой ГЭУ предусмотрена резервная передача информации о частоте сети.

Выводы (Symmary)

1. Комплектация ЕЭЭС ДГА различной мощности позволяет поддерживать оптимальную загрузку первичных двигателей в наиболее продолжительных режимах работы судна, что положительно сказывается на расходе горюче-смазочных материалов и моторесурсе двигателей.

2. Работа судна во льдах вне подготовленного канала при 90 %-й загрузке всех ДГА сопровождается чрезвычайно сильными вибрациями, оказывающими негативное влияние как на элементы корпуса судна в целом, так и на отдельные механизмы машинного отделения.

3. СУ ГЭУ имеет комплекс защит, направленных на предотвращение перегрузки СЭС и компонентов ПЧ. Тем не менее при работе в тяжелых ледовых условиях наблюдаются аварийные остановки ГЭУ и выход из строя полупроводниковых приборов ПЧ.

4. Применение у ПЧ алгоритмов прямого управления моментом ГЭД позволяет при отклонении с высокой точностью и быстродействием поддерживать заданную частоту и мощность.

Автор выражает благодарность суперинтенданту блока главного инженера ООО «Газпромнефть Шиппинг» В. Ю. Загорулько за ценные рекомендации при написании статьи и предоставленную техническую документацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Романовский В. В.* Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

2. *Григорьев А. В.* Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.

3. *Егоров Л. Е.* Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа Azipod в нормальных и аварийных режимах работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Л. Е. Егоров. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 183 с.

4. *Григорьев А. В.* Эксплуатация судовых систем электроснабжения / А. В. Григорьев, А. В. Пруссаков, Л. А. Лемин. — СПб.: Изд-во ГМА. им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 8 с.

5. *Григорьев А. В.* Анализ возможности применения высоковольтных электростанций для судов с системами электродвижения / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, С. М. Малышев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 159–165. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-159-165.

6. *Дарьенков А. Б.* Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков, В. Г. Титов, Г. М. Мирясов. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 151 с.

7. *Иванов В. С.* Электрооборудование морских комплексов / В. В. Романовский, В. Н. Куракин, В. С. Иванов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 185 с.

8. *Титов М. П.* Частотно-регулируемый синхронный электродвигатель / М. П. Титов. — Братск, Изд-во БрИИ, 1998. — 112 с.

9. *Малышев В. А.* Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса / В. А. Малышев, В. С. Иванов, В. С. Соловей // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.

10. *Wei T.* Experimental Evaluation of IGCT Converters with reduced di/dt limiting inductance / T. Wei, Q. Song, J. Li, B. Zhao, Z. Chen, R. Zeng // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). — IEEE, 2018. — Pp. 1710–1716. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341248.

11. *Nagel A.* Characterization of IGCTs for series connected operation / A. Nagel, S. Bernet, T. Bruckner, P. K. Steimer, O. Apeldoorn // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. — IEEE, 2000. — Vol. 3. — Pp. 1923–1929**.** DOI: 10.1109/IAS.2000.882141.

12. *Линдер С.* Силовые полупроводниковые приборы. Ч. I. Основные сведения и область применения / С. Линдер. — ABB Review 4, 2006. — Pp. 38–39.

13. *Nagel A.* A 24 MVA inverter using IGCT series connection for medium voltage applications // A. Nagel, S. Bernet, P. K. Steimer, O. Apeldoorn // Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference. — 2001. — Vol. 2. — Pp. 867–870.

14. *Линдер С.* Силовые полупроводниковые приборы. В центре тихой революции / С. Линдер. — ABB Review 4, 2003. — 29 с.

15. *Розанов Ю. К.* Силовая электроника / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. — М.: Изд- во МЭИ, 2009. — 76 с.

REFERENCES

1. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. “Prospects for the development of electromotive systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

2. Grigoryev, A. V., and E. A. Glekler. “Computer simulation and research of the integrated electric power system in Simulink.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.

3. Egorov, L. E. Komp’yuternoe modelirovanie edinoi vysokovol’tnoi sudovoi elektro-energeticheskoi sistemy s propul’sivnymi kompleksami tipa Azipod v normal’nykh i avariinykh rezhimakh raboty. PhD diss. SPb.: FGBOU VO «GUMRF im. admirala S.O. Makarova», 2014.

4. Grigoryev, A. V., A. V. Prussakov, and L. A. Lemin. *Ekspluatacija sudovyh sistem jelektrosnabzhenija*. SPb.: Izd-vo GUMRF. im. adm. S. O. Makarova, 2009.

5. Grigoryev, A. V., A. Ju. Vasil’ev, and S. M. Malyshev. “Analysis of capability of using of high-voltage electric power plants for ships with electric propulsion systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 159–165. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-159-165.

6. Dar’enkov, A. B., G. M. Miryasov, V. G. Titov, M. N. Okhotnikov, and D. V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki.* Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014.

7. Ivanov, V. S., V. V. Romanovskij, and V. N. Kurakin. *Elektrooborudovanie morskih kompleksov.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.

8. Titov, M. P. *Chastotno-reguliruemyj sinhronnyj jelektrodvigatel.* Bratsk, BrII, 1998.

9. Malyshev, Vladimir Alekseevich, Vladimir Sergeevich Ivanov, and Valery Sergeevich Solovey. “Calculation and selection of brake resistors, electric propeller the installation of the tanker.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.

10. Wei, Tianyu, Qiang Song, Jianguo Li, Biao Zhao, Zhengyu Chen, and Rong Zeng. “Experimental evaluation of IGCT converters with reduced di/dt limiting inductance.” *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).* IEEE, 2018. 1710–1716. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341248.

11. Nagel, A., S. Bernet, T. Bruckner, P. K. Steimer, and O. Apeldoorn. "Characterization of IGCTs for series connected operation." *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy.* Vol. 3. IEEE, 2000. 1923–1929**.** DOI: 10.1109/IAS.2000.882141.

12. Linder, S. *Silovye poluprovodnikovye pribory. Chast pervaja: osnovnye svedenija i oblast primenenija*. ABB Review 4, 2006.

13. Nagel, A., S. Bernet, P. K. Steimer, and O. Apeldoorn. "A 24 MVA inverter using IGCT series connection for medium voltage applications." *Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference.* Vol. 2. 2001. 867–870.

14. Linder, S. *Silovye poluprovodnikovye pribory. V centre tixoy revolucii.* ABB Review 4, 2003.

15. Rozanov, U. K., M. V. Rjabchickij, and A. A. Kvasnuk. *Silovaja elektronika*. M.: MEI, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Колесниченко Виталий Юрьевич —
электромеханик н/т «Штурман Скуратов»
Газпромнефть Шиппинг
199178, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, 3-я линия В.О., д. 62, лит. А
e-mail: *ni-hm@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kolesnichenko, Vitalii U. —
Electrical Engineer
Gazpromneft Shipping
62/A V.I. 3rd line, St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: *ni-hm@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 29 января 2019 г.
Received: January 29, 2019.