

STRUCTURE OF THE SHIP'S ELECTROMOTIVE COMPLEX WITH DUAL DC BUSES

F. A. Gelver^{1,2}

¹ — Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A perspective structure of the ship's electromotive complex with dual DC buses, which allows you to increase the reliability and survivability of the electric power system, to improve the operational, energy and weight and size characteristics of the electric propulsion system, is presented in the paper. In addition, such a structure makes it possible to reduce pollutants emissions into the environment, as well as to realize fuel savings in the range of 10–15%, depending on the operating modes of the vessel, compared with the existing structures of electric propulsion systems. The proposed structure of the ship's electromotive complex allows braking the propellers without using the additional brake circuits with energy redistribution between the propulsion electric machines and the dissipation of braking energy in the working medium - water. Using the canonical polynomial of the seventh degree, an analytical description of the limiting reverse characteristic of the propeller is given. An algorithm for the braking and reverse of a rowing electric installation is proposed and a diagram with the power flows directions is shown. A mathematical description of the braking and reverse modes of the propulsion electric installation is given, and the control algorithms for the proposed propulsion electric installation with two propellers during braking and reverse are synthesized. Timing diagrams of changes in torque, speed and power on each of the propellers for the proposed algorithm for braking and reverse of the propeller motors are presented. The variants of the structure diagrams of the ship's electromotive complex with dual DC buses using multilevel voltage inverters, as well as with the possibility of power supply from a single power plant, both a propulsion electric installation, and consumers of their own needs, are presented.

Keywords: ship electromotive complex, electric propulsion system, DC bus, voltage inverter, energy efficiency, canonical polynomial, Wander-Mond matrix, braking, reverse, recovery, fuel economy.

For citation:

Gelver, Fedor A. "Structure of the ship's electromotive complex with dual DC buses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.1 (2020): 174–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-174-188.

УДК 629.12:621.33

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОДВИЖИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СУДНА С ДВОЙНЫМИ ШИНАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ф. А. Гельвер^{1,2}

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

² — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлена перспективная структура электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока, позволяющая повысить надежность и живучесть электроэнергетической системы, улучшить эксплуатационные, энергетические и массогабаритные характеристики электродвигательного комплекса. Кроме того, такая структура позволяет сократить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду, а также способствует экономии топлива в пределах 10–15 % в зависимости от режимов работы судна по сравнению с существующими структурами систем электродвижения. Предложенная структура электродвигательного комплекса судна позволяет осуществлять торможение гребных винтов без использования дополнительных тормозных цепей с перераспределением энергии между гребными электрическими машинами и рассеянием энергии торможения в рабочей среде — воде. С использовани-

ем канонического полинома седьмой степени выполнено аналитическое описание предельной реверсивной характеристики гребного винта. Предложен алгоритм осуществления торможения и реверса гребной электрической установки и приведена диаграмма направлений потоков мощности. Приведено математическое описание режимов торможения и реверса гребной электрической установки и выполнен синтез алгоритмов управления предложенной гребной электрической установкой с двумя гребными винтами при торможении и реверсе. Представлены временные диаграммы изменения момента, частоты вращения и мощности на каждом из гребных винтов для данного алгоритма торможения и реверса гребных электродвигателей. Приведены варианты схем структуры электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока с использованием многоуровневых инверторов напряжения, а также с возможностью питания от единой электростанции как гребной электрической установки, так и потребителей собственных нужд.

Ключевые слова: электродвигательный комплекс судна, система электродвижения, шины постоянного тока, инвертор напряжения, энергетическая эффективность, канонический полином, матрица Вандермонда, торможение, реверс, рекуперация, экономия топлива.

Для цитирования:

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

Введение (Introduction)

В настоящее время в современном гражданском и военном судостроении наблюдается устойчивая тенденция строительства большого количества судов с системами как частичного, так и полного электродвижения. Данная тенденция связана с совершенствованием элементов силовой электроники и развитием преобразовательной техники, а также преимуществами систем электродвижения, лучшими эксплуатационными и энергетическими характеристиками по сравнению с классической механической передачей энергии от первичного теплового двигателя к валу винта. Кроме того, система электродвижения остается безальтернативной в двигательных комплексах судов и кораблей, для которых необходимо получить высокие динамические характеристики и наилучшие вибро-шумовые характеристики при работе двигательного комплекса.

Существует множество структур систем полного электродвижения, реализованных как на постоянном, так и переменном токе [1], [2]. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки и применима для конкретного типа и назначения судна. Как правило, такие двигательные комплексы строят с соблюдением последовательной структуры, при которой энергия от первичного теплового двигателя передается через электрический генератор, распределительные устройства, согласующие устройства и электрический преобразователь для питания гребного электродвигателя [3]. Данная структура является классической для большинства современных типов судов и кораблей с системами электродвижения. Существует множество разновидностей такой структуры и схем ее реализации. Большой популярностью за рубежом пользуются комбинированные энергетические установки типа **CODLAG (COmbined Diesel-eLectric And Gas turbine)** либо **CODLOG (COmbined Diesel-eLectric Or Gas turbine)**, преимущественно используемые на фрегатах и других специальных типах судов¹. В состав такой комбинированной энергетической установки обычно входят: электрическая установка, обеспечивающая малый передний и задний ход корабля, и форсажная установка на основе теплового двигателя — для работы на повышенных скоростях переднего хода совместно с электрическими установками (буква **A** используется в обозначении типа установки или независимо, буква **O** — в обозначении типа установки) [4].

Широкое применение находят также валогенераторные установки, причем как для кораблей военно-морского флота, так и для гражданских типов судов. Появляются принципиально новые структуры систем электродвижения для судов и кораблей с использованием анаэробных

¹ Q&A with BAE Systems on Type 26 Frigate Design Update at Euronaval 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.navyrecognition.com/index.php?option=com_content&view=article&id=828 (дата обращения: 26.11.2019).

источников питания на основе аккумуляторных батарей либо электрохимических генераторов. Однако, как правило, такие энергетические установки используются либо в подводном флоте, либо на судах, работающих в портовых водах вблизи от береговой линии. Использование систем электродвижения с анаэробным источником на кораблях военно-морского флота кроме основного преимущества — воздухонезависимости (для подводных лодок) и высоких динамических характеристик системы электродвижения — позволяет также улучшить вибро-шумовые характеристики, особенно необходимые при работе с буксируемой гидроакустической станцией либо при выполнении поисково-спасательных задач. Использование анаэробных источников с электроприводом движительного комплекса на гражданских типах судов, работающих недалеко от береговой линии, кроме ранее изложенного, позволит выполнить природоохранные требования для особых экологических зон. Большую популярность находят единые электроэнергетические установки с системой электродвижения, в которых используется единый источник электроэнергии для питания гребной электрической установки (ГЭУ) и иных судовых потребителей.

С ростом потребности в судах с системами электродвижения растет также единичная установленная мощность элементов системы электродвижения и электродвижительного комплекса в целом. Данная тенденция связана с потребностью в судах, обладающих качественно новыми эксплуатационными характеристиками, а также ростом объема грузоперевозок по всему миру. В связи с этим появляется множество проблем, связанных прежде всего с реализуемостью систем электродвижения на существующей элементной базе, обеспечением надежности, а также требуемых показателей качества электроэнергии, потребляемых от электрических генераторов так и для питания гребных электродвигателей, возможности размещения системы электродвижения на площадях заданных проектантом и т. д. При увеличении установленной мощности элементов электродвижительного комплекса особенно остро встают вопросы, связанные с электромагнитной совместимостью нагрузок с питающей сетью, а также повышением энергетической эффективности при работе как отдельных элементов, так и системы электродвижения в целом. Повышение эффективности преобразования энергии является одним из основных средств увеличения автономности плавания, производительности, увеличения скорости передвижения и маневренности, повышения экологической чистоты и других показателей, что способствует повышению технико-экономических показателей современных судов и кораблей.

Достоинства и недостатки известных структур наиболее полно раскрыты в статьях [1], [5], [6] и учебниках [2], [7]. В данной статье предложена структура системы электродвижения судов, для которых необходимо обеспечить питание гребных электродвигателей с широким диапазоном регулирования частоты вращения гребного винта, позволяющая улучшить функциональные и повысить энергетические характеристики электродвижительной установки по сравнению с известными схемами электродвижительных комплексов кораблей и судов. Кроме того, рассматриваемая схема отличается простотой, унификацией используемого оборудования, а также высокой степенью надежности. Исследуемая в данной статье схема электродвижительного комплекса является продолжением и совершенствованием структуры, представленной в [8]. Идеей, рассмотренной в данной статье структуры, является возможность работы всех гребных винтов судна хотя бы от одного работающего генераторного агрегата либо любого другого источника электрической энергии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для предметного рассмотрения предложенной идеи рассмотрим наиболее распространенную структурную схему электродвижительного комплекса, состоящую из четырех генераторных агрегатов и двух гребных винтов (рис. 1). Структура электродвижительного комплекса судна (корабля), представленная на рис. 1, содержит генераторные агрегаты, собранные на основе первичного теплового двигателя D и электрического генератора переменного тока G , каждый из которых работает на свой выпрямитель напряжения B . Генераторные агрегаты сгруппированы по бортам, при этом выпрямители напряжения $B1$ и $B2$ ($B3$ и $B4$) одного борта своими выходными клемма-

ми, соединенные согласованно последовательно, организуют общую систему шин постоянного тока одного борта. К общей системе шин постоянного тока каждого из бортов электростанции подключены инверторы напряжения И1–И4, которые питают гребные электродвигатели М1–М4. Гребные электродвигатели М1, М3 и М2, М4 организуют приводы каждый своего гребного винта, причем гребные электродвигатели М1 и М3 (М2 и М4) работают согласованно, совместно создавая либо движительный, либо тормозной момент. При этом следует отметить, что при необходимости в долевых режимах работы судна может работать один из двух двигателей одного гребного винта, ротор второго будет вращаться вместе с валом гребного винта как «болванка». Питание гребных электродвигателей М1–М4 организовано таким образом, что каждый из гребных винтов может приводиться в движение энергией, полученной от электростанции любого борта и даже от любого одного из работающих генераторных агрегатов. Данная структура организует ГЭУ с двойными шинами постоянного тока. При этом электростанции и электрооборудование разных бортов имеют гальваническую развязку.

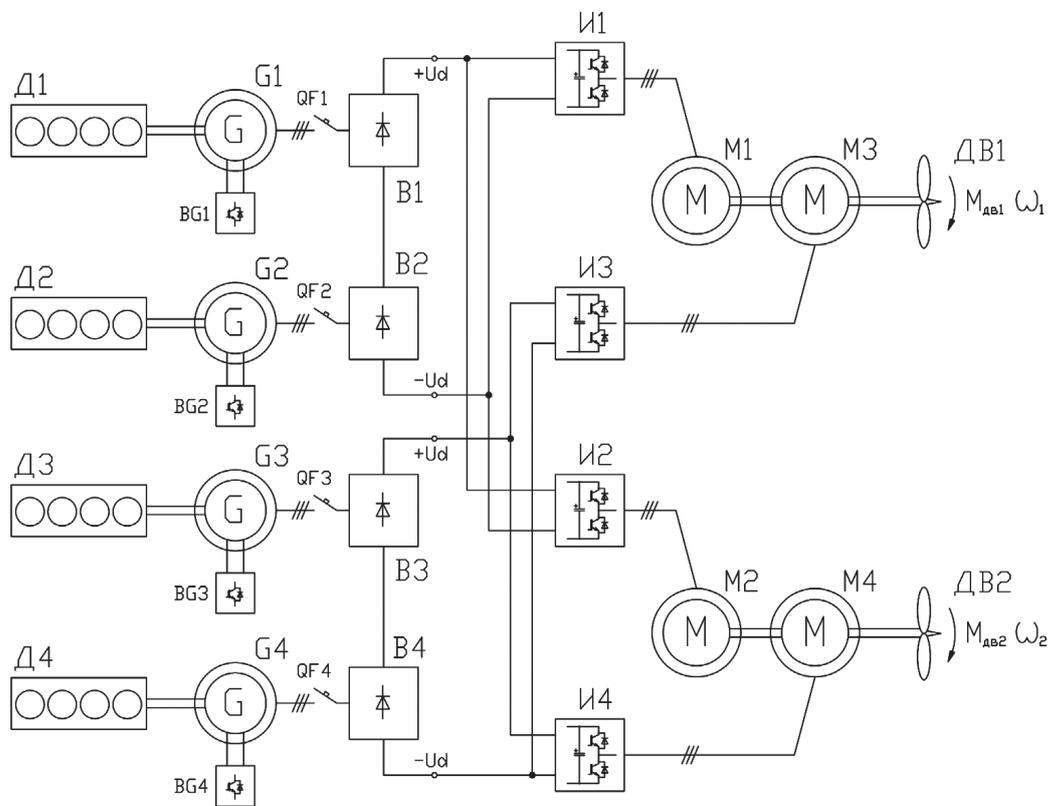


Рис. 1. Структурная схема электродвижительного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока

Выполним более подробное описание предложенной структуры и ее элементов, а также достоинств такой структуры по сравнению с известными структурами электродвижительных комплексов. Электрический генератор G может быть реализован на широко используемых синхронных генераторах с электромагнитной системой возбуждения. Представленный электрический генератор G содержит обмотку возбуждения со своей системой возбуждения BG , что позволяет оперативно регулировать уровень напряжения на его выходе. Такое решение дает возможность изменять уровень напряжения на общей системе шин постоянного тока соответствующего борта в стационарном режиме работы, а также обеспечивать плавный заряд накопительных конденсаторов инверторов $И$ без использования различных устройств мягкого пуска. В качестве первичного теплового двигателя генераторного агрегата в такой структуре могут быть использованы любые дизели, газотурбинные двигатели без ограничения частоты их вращения. При этом первичный

тепловой двигатель может работать на оптимальной для себя частоте вращения, обеспечивая высокую экономичность [9], [10].

Выпрямители напряжения $B1$ и $B2$ ($B3$ и $B4$) генераторов переменного тока $G1$ и $G2$ ($G3$ и $G4$) одного борта соединены согласованно, последовательно образуя общую систему шин постоянного тока одного борта. Такое соединение выпрямителей B позволяет удвоить напряжения шин постоянного тока одного борта при одинаковых напряжениях электрических генераторов G . Кроме того, такое схемное решение позволит использовать при работе электродвигательного комплекса один из двух генераторных агрегатов электростанции одного борта, при этом второй может быть выведен из работы. Гребные электродвигатели $M1, M3$ ($M2, M4$) одного гребного винта получают питание через инверторы напряжения $I1, I3$ ($I2, I4$), подключенные к разным бортовым системам шин постоянного тока (к электростанциям разных бортов).

Следует отметить, что шины постоянного тока двух бортов имеют гальваническую развязку, не имея абсолютно никакой электрической связи между собой, что позволяет обеспечить лучшую электромагнитную совместимость, высокую степень надежности ГЭУ, а, соответственно, и высокую степень живучести корабля. Предложенное схемное решение позволяет сохранить работоспособность ГЭУ хотя бы при одном работающем генераторном агрегате из четырех. Кроме того, данная структура, обладая высокой степенью экономичности, позволит обеспечить высокий ресурс работы первичных тепловых двигателей благодаря тому, что будут гаранти-

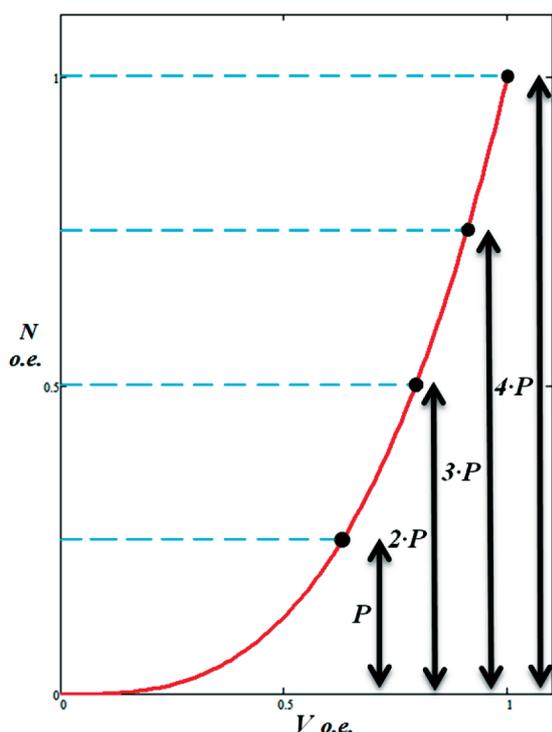


Рис. 2. Зависимость $N = f(V)$ для стационарного режима при движении судна в свободной воде

рованы оптимальный режим их работы и соответствующая скорости движения судна степень их загрузки. Предложенная структура исключает недогрузку генераторных агрегатов по мощности или их работу вхолостую. При этом отсутствует необходимость в точной синхронизации генераторных агрегатов, а также проблем с вводом и выводом их из работы.

С учетом того, что системы электродвижения применяют, как правило, на специальных типах судов, которым присущи ряд характерных режимов, отличных от движения судна на полном ходу, следовательно, электростанция судна должна быть спроектирована так, чтобы наиболее полно удовлетворять данным режимам работы, а также обеспечивать высокую экономичность работы первичных тепловых двигателей. Рассмотрим режимы работы электростанции и возможности структуры, представленной на рис. 1. Для стационарного режима движения судна, согласно вентиляторному характеру механической характеристики гребного винта, может быть построена зависимость $N = f(V)$, которая характеризует мощность (N) гребной электрической установки

в зависимости от скорости движения судна (V). На рис. 2 представлена зависимость $N = f(V)$, приведенная в относительных единицах для стационарного режима при движении судна на свободной воде.

Согласно представленному графику и рассматриваемой структуре рис. 1, может быть получена связь необходимого количества работающих генераторных агрегатов в зависимости от требуемой скорости движения судна. В таблице представлена такая зависимость для ГЭУ, состоящей из четырех однотипных генераторных агрегатов, установленная мощность каждого из которых равна P .

Зависимость требуемого количества работающих генераторных агрегатов от текущей скорости движения судна

Количество работающих генераторных агрегатов	Максимальная мощность электростанции, о.е.	Движение судна со скоростью V , о.е.
1	0,25	0...0,63
2	0,5	0,63...0,79
3	0,75	0,79...0,9
4	1	0,9...1

Из приведенного на рис. 2 графика и табличных данных видно, что для долевых режимов работы ГЭУ могут быть задействованы несколько либо один из общего количества генераторных агрегатов, которые будут обеспечивать требуемую мощность и скорость движения судна. При этом для равномерного использования генераторных агрегатов по времени работы они могут меняться и комбинироваться в любом сочетании.

Кроме того, предложенная структура движительного комплекса отличается универсальностью, позволяющей использовать в качестве электромеханического преобразователя любой тип электрической машины переменного тока. При этом в источнике [11] показано и доказано, что наиболее подходящей электрической машиной в качестве привода гребных винтов по наиболее важным показателям является реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Предложенная структура позволяет осуществлять торможение и реверс гребных электродвигателей без использования тормозных цепей в составе инверторов напряжения. Режим торможения и реверса ГЭУ аналогичен рассмотренному ранее [12], отличие заключается в том, что энергия торможения одного гребного винта передается на другой гребной винт по двум гальванически изолированным электрическим каналам либо по одному из них в зависимости от режима работы ГЭУ. Более подробно рассмотрим режимы торможения и реверса согласно структуре электродвигательного комплекса, приведенной на рис. 1. При необходимости торможения судна и реверса гребных электродвигателей торможение и реверс последних будет осуществляться перераспределением энергии между гребными электродвигателями $M1-M2$ и $M3-M4$. На рис. 3 показаны направления потоков энергии при торможении и реверсе гребного электропривода, представленного на рис. 1.

Управление частотой вращения вала гребного винта осуществляется посредством управления суммарным электромагнитным моментом гребных электродвигателей, расположенных на одном валу. Эта связь непосредственно следует из основного уравнения движения, представленного в операторной форме и записанного в относительных единицах:

$$T_{\text{мех}} p\omega^* = M_{\text{дв}}^* - M_{\text{с}}^*,$$

где $T_{\text{мех}} = J\omega_0/M_0$ — механическая постоянная времени; $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования; J — момент инерции механизма, ω_0 — базовое значение скорости; M_0 — базовое значение момента; $M_{\text{дв}}^*$ — суммарный момент развиваемый гребными электродвигателями, расположенными на одном валу; $M_{\text{с}}^*$ — момент сопротивления гребного винта.

Выполним математическое описание процесса торможения и реверса гребной электрической установки представленной на рис. 1 по предложенному на рис. 4 алгоритму. Математическое описание и математическое моделирование процессов торможения и реверса будем выполнять в относительных единицах (о. е). Все вычисления и построение графиков выполнено в математическом пакете Maple. Физические процессы, происходящие при торможении и реверсе гребного винта и гребного электродвигателя, более подробно описаны в статье [13]. Как отмечалось ранее в ряде источников ([2], [13], [14]), по мере накопления опытного материала относительно поведения гребного винта в режиме реверсирования выяснилось, что обобщенной реверсивной характеристики не существует. Особенно это относится к участку, характеризующему режим работы гидротурбиной.

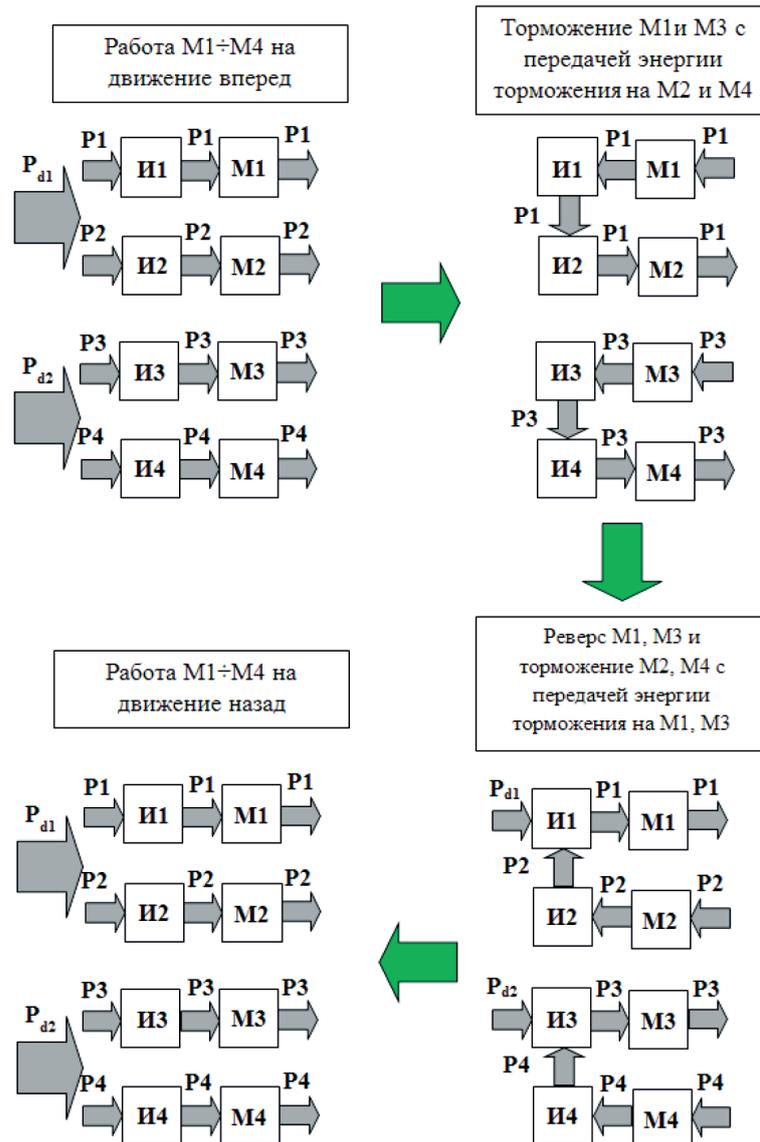


Рис. 3. Направление потоков мощности при торможении гребной электрической установки

Представим математическое описание предельной реверсивной характеристики, построенной в относительных единицах, описанной с помощью одной функции, определенной с помощью канонического полинома седьмой степени по восьми характерным точкам — узлам интерполяционного полинома (см. рис. 4).

Запишем матрицу, определяющую характерные точки — узлы интерполяционного полинома предельной реверсивной характеристики:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0,8 & 0,35 & 0 & -0,2 & -0,3 & -0,4 & -0,5 \\ 1 & 0 & -1 & -0,4 & -0,6 & -0,8 & -1 & -1,3 \end{pmatrix}^T$$

Введем обозначение вектора-столбца входных данных (частоты вращения гребного винта) $rx = R^{(0)}$ и вектора-столбца выходных данных (момента на валу гребного винта) $ry = R^{(1)}$. Определим коэффициенты канонического полинома, записав матрицу Вандермонда [15]–[17] в виде:

$$V_{j,i} = (rx_j)^i, \quad V_{j,0} = 1;$$

где $j = 0 \dots 7, i = 0 \dots 7$.

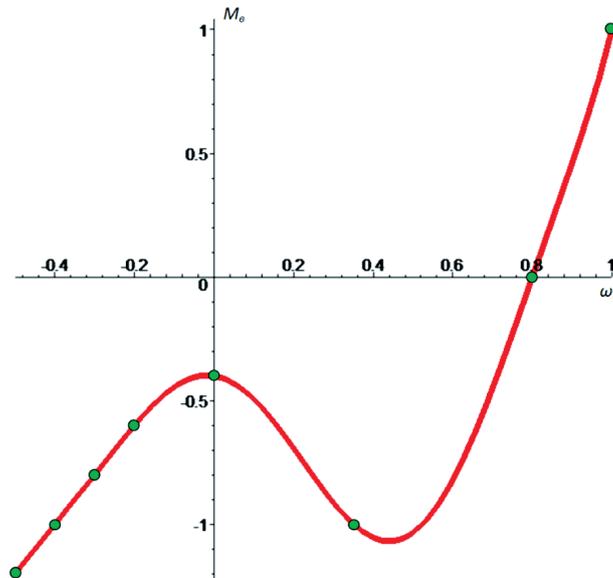


Рис. 4. Предельная реверсивная механическая характеристика гребного винта $M_B = f(\omega_B)$

Тогда в числовом выражении матрица Вандермонда имеет вид

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0,8 & 0,64 & 0,512 & 0,41 & 0,328 & 0,262 & 0,21 \\ 1 & 0,35 & 0,122 & 0,043 & 0,015 & 5,252 \cdot 10^{-3} & 1,838 \cdot 10^{-3} & 6,434 \cdot 10^{-4} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -0,2 & 0,04 & -8 \cdot 10^{-3} & 1,6 \cdot 10^{-3} & -3,2 \cdot 10^{-4} & 6,4 \cdot 10^{-5} & -1,28 \cdot 10^{-5} \\ 1 & -0,3 & 0,09 & -0,027 & 8,1 \cdot 10^{-3} & -2,43 \cdot 10^{-3} & 7,29 \cdot 10^{-4} & -2,187 \cdot 10^{-4} \\ 1 & -0,4 & 0,16 & -0,064 & 0,026 & -0,01 & 4,096 \cdot 10^{-3} & -1,638 \cdot 10^{-3} \\ 1 & -0,5 & 0,25 & -0,125 & 0,063 & -0,031 & 0,016 & -7,813 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}.$$

Определим коэффициенты полинома [15], [16], [17]:

$$a = V^{-1}ry.$$

В числовом выражении матрица коэффициентов полинома имеет вид

$$a^T = (-0,4 \quad -0,256 \quad -7,194 \quad 0,544 \quad 27,497 \quad -0,021 \quad -43,968 \quad 24,798).$$

Тогда функция, описывающая предельную реверсивную механическую характеристику гребного винта в относительных единицах, имеет вид

$$M_c(\omega) = -0,4 - 0,256\omega - 7,194\omega^2 + 0,544\omega^3 + 27,497\omega^4 - 0,021\omega^5 - 43,968\omega^6 + 24,798\omega^7. \quad (1)$$

График функции, описывающей предельную реверсивную механическую характеристику гребного винта в относительных единицах, приведен на рис. 4. Данная аппроксимация наиболее точно описывает предельную реверсивную механическую характеристику, полученную эмпирическим путем [13]. С учетом того, что среднестатистическая постоянная времени электродвигателей составляет порядка 0,25 с, примем суммарную постоянную времени системы, состоящей из гребного винта и двух расположенных на одном валу гребных электродвигателей равной 1 с ($T_{мех} = 1$ с). При этом при моделировании все графики временной области будут отражены в секундах.

Выполним аналитическое описание процесса торможения и реверса гребного винта согласно предложенному алгоритму в ГЭУ, представленной на рис. 1.

Примем суммарный движительный момент на валу первого гребного винта равным

$$M_{дв1} = M_{M1} + M_{M2},$$

а суммарный движительный момент на валу второго гребного винта —

$$M_{дв2} = M_{M3} + M_{M4}.$$

Запишем уравнения движения для первого и второго гребного винта:

$$M_{и1} = M_{дв1} - M_{с1} = T_{мех1} \frac{d\omega_1}{dt}; \quad (2)$$

$$M_{и2} = M_{дв2} - M_{с2} = T_{мех2} \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (3)$$

Введем ограничения на максимально возможное значение движительного момента, развиваемого на валах гребных винтов, равное величине $\max|M_{дв1}| = \max|M_{дв2}| = 1,2$.

Используя начальные условия $\omega_1(0) = 1$, $M_{дв1} = -1,2$ и подставляя (1) в (2), получим график функции $\omega_1(t)$ — рис. 5. Мощность на первом гребном винте при этом составляет $P_{дв1}(t) = M_{дв1}\omega_1(t)$. График функции $P_{дв1}(t)$ приведен на рис. 5. При этом отрицательная величина $P_{дв1}(t)$ характеризует генераторный режим работы гребных электродвигателей $M1$ и $M3$ и режим работы гидротурбины гребного винта, а положительная величина $P_{дв1}(t)$ — двигательный режим работы гребных электродвигателей $M1$ и $M3$, при котором гребной винт создает упор при реверсе ГЭД1.

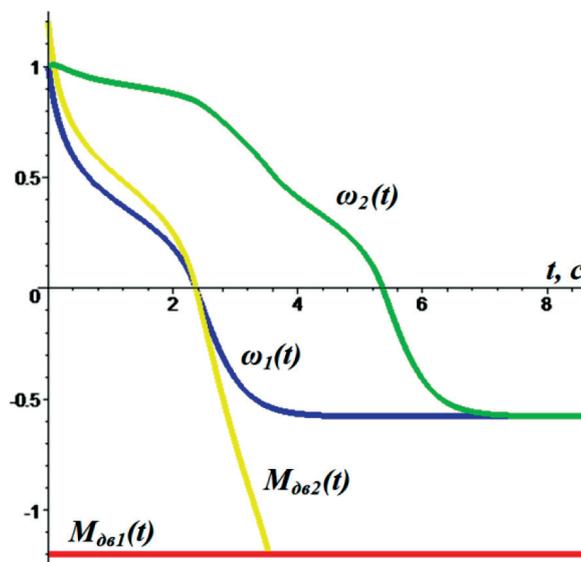


Рис. 5. Зависимости $\omega_1(t)$, $M_{дв1}(t)$, $\omega_2(t)$, $M_{дв2}(t)$ при торможении и реверсе гребного электропривода

Используя условие равенства мощностей $P_{дв1}(t) = P_{дв2}(t)$, величину момента на втором гребном валу можно записать в следующем виде:

$$M_{дв2}(t) = \frac{M_{дв1}\omega_1(t)}{\omega_2(t)}. \quad (4)$$

Данное равенство справедливо в случае, если потери в электромеханических и электрических преобразователях гребной электрической установки отсутствуют. Используя начальные условия $\omega_2(0) = 1$ и решение (3) относительно электромагнитного момента (4), получим зависимость $\omega_2(t)$ график, которой приведен на рис. 5. Подставив результаты решения (3) относительно $\omega_2(t)$ в равенство (4), получим описание того, как должно изменяться значение момента на втором гребном винте, график $M_{дв2}(t)$ функции которой показан на рис. 5.

Мощности на валах двигателей — первом и втором гребных винтах — определяются в виде:

$$P_{\text{дв1}}(t) = M_{\text{дв1}}(t)\omega_1(t);$$

$$P_{\text{дв2}}(t) = M_{\text{дв2}}(t)\omega_2(t).$$

На рис. 6 приведены графики временных зависимостей мощностей на валах первого и второго гребных винтов, откуда видно, что до определенного момента времени (до момента вхождения $M_{\text{дв2}} = -1,2$ в режим ограничения, при котором $M_{\text{дв1}} = -1,2$) сумма мощностей на валах первого и второго гребных винтов равна нулю. Следовательно, при этом нет необходимости сброса энергии торможения на тормозной модуль. После достижения $M_{\text{дв2}} = -1,2$ происходит отбор мощности от генераторных агрегатов для работы первого и второго гребных винтов с гребными электродвигателями *M1–M4* на реверс. Рассмотренные процессы описывают исключительно процессы, происходящие в гребном винте, но не отражая при этом процессы остановки и реверса судна, несмотря на их влияние.

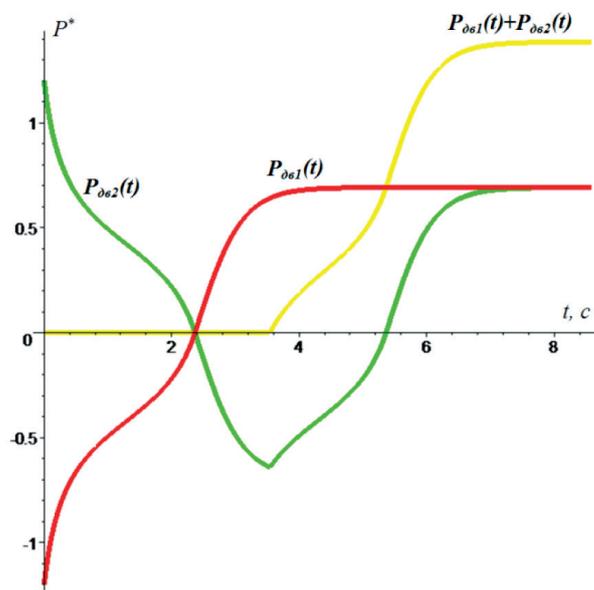


Рис. 6. Зависимость $P_{\text{дв1}}(t)$, $P_{\text{дв2}}(t)$, $P_{\text{дв1}}(t)+P_{\text{дв2}}(t)$ при торможении и реверсе гребного винта

Если к системе шин постоянного тока одного борта подключить накопитель с согласующим электрическим преобразователем, то появится возможность накапливать энергию при торможении гребных электродвигателей с последующим расходом этой энергии на разгон гребных электродвигателей, при этом существенно повысится энергетическая эффективность и экономичность энергетической установки судна. Кроме того, данное схемное решение позволит максимально приблизить суммарную установленную мощность гребных электродвигателей и электрических генераторов, а также первичных тепловых двигателей. Динамика в такой системе будет покрываться исключительно накопителем электрической энергии.

В предложенной структуре для повышения качества синтезируемого напряжения и уменьшения величины дисперсии токов, потребляемых гребными электродвигателями, а, следовательно, снижения пульсации электромагнитного момента могут быть использованы трехуровневые инверторы напряжения, построенные на основе схемы с нулевой точкой (рис. 7, а) либо на основе *T*-образной схемы инвертора напряжения (рис. 7, б). При использовании трехуровневых инверторов напряжения их нулевая точка должна быть соединена с общей точкой выпрямителей, образующих систему шин постоянного тока одного борта (см. рис. 7). При использовании трехуровневых инверторов напряжения сохраняется возможность работы гребных электродвигателей всего лишь

от одного генераторного агрегата. При этом трехуровневый инвертор напряжения будет работать в режиме двухуровневого.

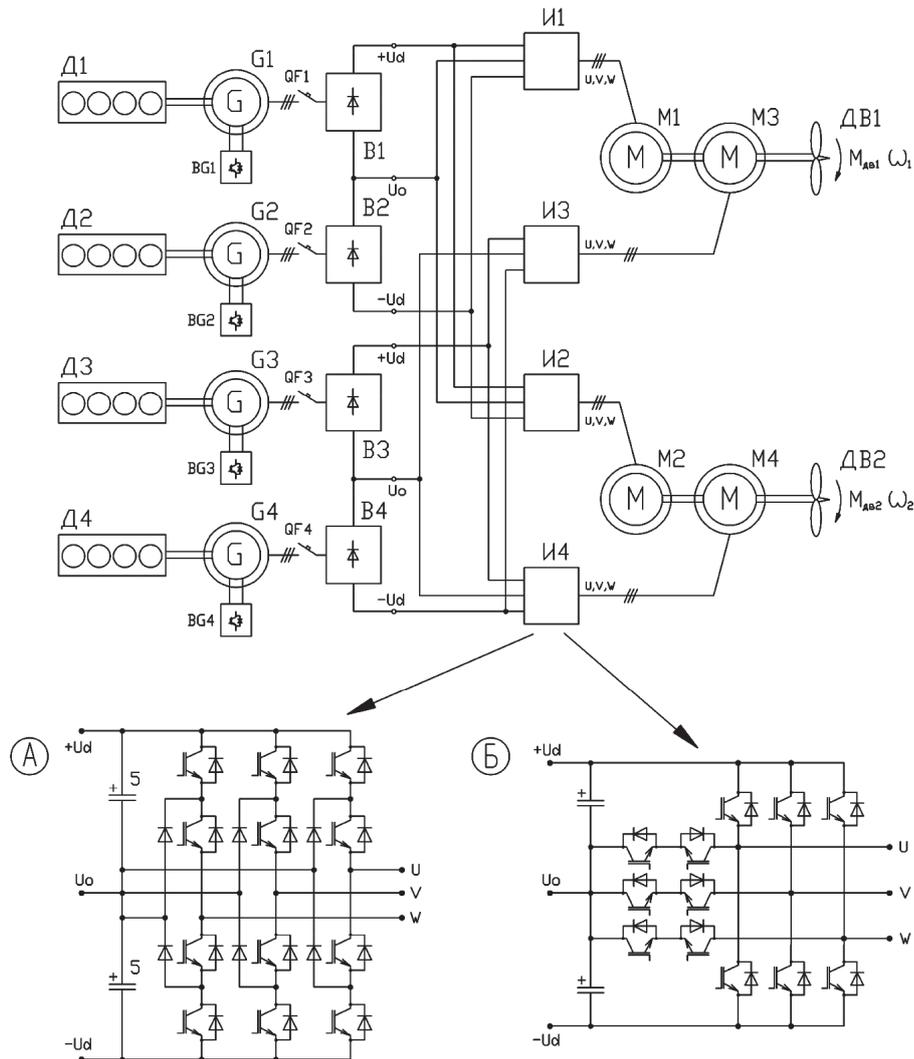


Рис. 7. Структурная схема электродвижительного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока на основе трехуровневых инверторов: а — с нулевой точкой; б — на T-образной схеме

Использование двух гальванически изолированных электростанций и электрооборудования в такой ГЭУ с двойными шинами постоянного тока позволяет исключить возникновение аварийной ситуации, при которой выход любого из элементов приведет к выходу всего электродвижительного комплекса, обеспечивая при этом высокую степень надежности и электромагнитной совместимости при работе электростанции разных бортов.

С учетом того, что в судостроении наблюдается рост мощности гребного электропривода, а при этом мощность собственных нужд, которая тратится на освещение, навигацию и прочие потребители жизнеобеспечения судна, постоянно снижается, с внедрением новых энергосберегающих технологий смысл в единой электроэнергетической системе как таковой отпадает. При значительных различиях в мощностях ГЭУ и потребителей собственных нужд проблематично обеспечивать требуемое качество электроэнергии, а также электромагнитную совместимость мощных нагрузок с питающей сетью. В настоящее время при значительных различиях (более чем на порядок) мощностей ГЭУ и установленной мощности потребителей собственных нужд применение схемы единых электроэнергетических систем является некой данью моде и не более того.

При существенном различии мощностей ГЭУ и потребителей собственных нужд рациональнее разделить электростанции для питания соответствующих групп потребителей. Однако при необходимости питания вспомогательных потребителей, а также потребителей собственных нужд от общей электростанции ГЭУ, схема которой представлена на рис. 8, такая структура может содержать дополнительный инвертор напряжения, двухобмоточный согласующий трансформатор, коммутационные аппараты, распределительный щит и вспомогательный дизель-генератор. Такая структура системы электродвижения позволит реализовать единую электроэнергетическую установку судна с возможностью как одновременного, так и раздельного питания ГЭУ, вспомогательных потребителей и потребителей собственных нужд.

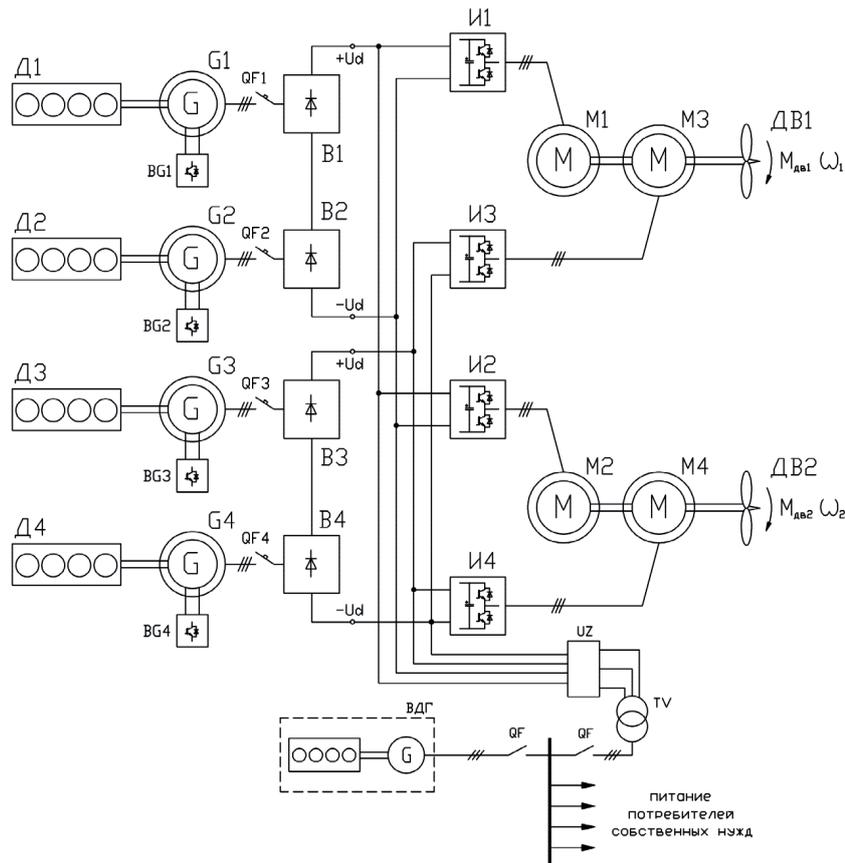


Рис. 8. Структурная схема единой электроэнергетической системы с системой электродвижения судна с двойными шинами постоянного тока

Согласно номенклатуре, наиболее распространенных силовых полупроводниковых элементов, выпускаемых в настоящее время при номинальном напряжении гребных электродвигателей до 1000 В, возможна реализация структуры, представленной на рис. 1, установленной мощностью до 10 МВт. При необходимости увеличения значения установленной мощности предложенной структуры она может быть реализована с использованием многоуровневых инверторов напряжения [18], а также при большем количестве гребных винтов. Предложенная структура универсальна и может быть реализована с использованием источников постоянного тока либо электрохимических генераторов. При реализации ГЭУ значительно большей мощности может быть рекомендована ГЭУ с каскадным преобразователем частоты [19].

Выводы (Summary)

1. Предложенная структура единой электроэнергетической системы отличается простотой и позволяет повысить надежность и живучесть электродвижительного комплекса судна,

реализовать различные алгоритмы управления, которые дают возможность повысить энергетическую эффективность, исключив из состава оборудования электроэнергетической системы тормозные цепи, а также значительно упростить структуру движительного комплекса, построенного с помощью использования простых и надежных элементов.

2. Рассмотренная структура может быть реализована с различным числом генераторных агрегатов и гребных электродвигателей исходя из требуемых характеристик и мощности электродвигательного комплекса.

3. Предлагаемая структура единой электроэнергетической системы позволяет сократить число преобразований электрической энергии, а также упростить узлы и элементы распределения энергии на судне, повысить показатель энергетической эффективности и осуществить распределение энергии между электродвигателями при необходимости торможения судна. К ее достоинствам следует отнести возможность обеспечения питанием потребителей собственных нужд.

4. Электрическая установка судна может быть построена с использованием высокооборотных безредукторных главных генераторных установок с выходным напряжением повышенной частоты, а инверторы напряжения гребных электродвигателей построены на основе трехуровневых инверторов напряжения, которые позволяют получать высокое качество синтезируемого напряжения для питания гребных электродвигателей.

5. Предложенная структура движительного комплекса отличается универсальностью, позволяя использовать в качестве электромеханического преобразователя любой тип электрической машины переменного тока. Также немаловажным фактором является высокая энергетическая эффективность предложенной структуры, и как следствие, большая экологичность и меньшее количество загрязняющих выбросов в окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазаревский Н. А. Структурные схемы гребных установок, анализ и перспективы развития / Н. А. Лазаревский, В. А. Хомяк, Ф. А. Гельвер, В. Ф. Самосейко // Судостроение. — 2012. — № 3 (802). — С. 44–47.
2. Дарьенков А. Б. Гребные электрические установки: учеб. пособие / А. Б. Дарьенков [и др.]. — Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Р.Е. Алексеева, 2014. — 219 с.
3. Токарев Л. Н. Мультилинейная структура электроэнергетической системы судов с электродвижением / Л. Н. Токарев, Д. А. Хайров // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 77 (361). — С. 43–51.
4. Шинкоренко Д. Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран / Д. Шинкоренко // Зарубежное военное обозрение. — 2007. — № 1. — С. 54–61.
5. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.
6. Вершинин В. И. Создание систем электродвижения для судов различного назначения / В. И. Вершинин [и др.] // Труды Крыловского госуниверситета науч. центра. — 2019. — № 1 (387). — С. 107–122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122.
7. Михайлов В. А. Электродвижение судов и электропривод судовых механизмов / В. А. Михайлов, С. Б. Рукавишников, И. Р. Фрейдзон. — Л.: Судостроение, 1965. — 608 с.
8. Гельвер Ф. А. Гребная электроэнергетическая установка с общими шинами постоянного тока / Ф. А. Гельвер // Судостроение. — 2018. — № 2. — С. 22–27.
9. Алешков О. А. Повышение топливной экономичности первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима: дис. ... канд. техн. наук; специальность 05.04.02 «Тепловые двигатели (Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение)» / О. А. Алешков. — Челябинск, 2009. — 170 с.
10. Матиевский Г. Д. Снижение расхода топлива и вредных выбросов дизеля на режимах постоянной мощности: дис. ... канд. техн. наук; специальность 05.04.02 / Г. Д. Матиевский. — Барнаул, 2013. — 180 с.

11. Самосейко В. Ф. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления. / В. Ф. Самосейко [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. — 174 с.
12. Гельвер Ф. А. Способ торможения и реверса многодвигательной гребной электрической установки с тремя гребными винтами / Ф. А. Гельвер // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 2. — С. 20–27.
13. Росин Е. И. Автоматизированные гребные электрические установки. Движение судна и его главная установка: текст лекции ЛЭТИ / Е. И. Росин. — Л., 1986. — 48 с.
14. Быков А. С. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. В. Башаев. — СПб.: Элмор 2004. — 319 с.
15. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. — 6-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 636 с.
16. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, Н. П. Жидков. — М.: Физматлит, 1962. — 620 с.
17. Форсайт Дж. Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Мальком, К. Моулер. — М.: Изд-во «Мир», 1980. — 280 с.
18. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективные решения / В. Филатов // Силовая электроника. — 2012. — Т. 4. — № 37. — С. 38–41.
19. Пронин М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов. — СПб.: Электросила, 2003. — 172 с.
20. Gelver F.A. Electro-Mobile Installation of the Vessel with Cascade Electric Converter/ F. A. Gelver, I. V. Li, A. V. Saushev, D. S. Semenov // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 459–465. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_44.

REFERENCES

1. Lazarevsky, N. A., V. A. Khomyak, F.A. Gelver, and V.F. Samoseyko. “Block diagrams of propulsion plants, analysis and prospects.” *Sudostroenie* 3(802) (2012): 44–47.
2. Dar’entov, A. B., G. M. Miryasov, V. G. Titov, M. N. Okhotnikov, and D. V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki. Uchebnoe posobie*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014.
3. Tokarev, L. N., and J. A. Khairov. “Multi-linear power systems of electric ships.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 77(361) (2013): 43–51.
4. Shinkorenko, D. “Perspektivy razvitiya energeticheskikh ustanovok nadvodnykh korabli VMS zarubezhnykh stran.” *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* 1 (2007): 54–61.
5. Grigor’ev, A.V., and R. R. Zajnullin. “Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.
6. Vershinin, Viktor I., Sergey V. Makhonin, Vladimir A. Parshikov, and Valentin A. Khomyak. “Development of electric propulsion systems for ships of various types.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(387) (2019): 107–122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122
7. Mihajlov, V. A., S. B. Rukavishnikov, and I. R. Frejdzon. *Elektrodvizhenie sudov i elektroprivod sudovykh mekhanizmov*. L.: Sudostroenie, 1965.
8. Gelver, F. A. “Shipboard electric propulsion plants with common DC buses.” *Sudostroenie* 2 (2018): 22–27.
9. Aleshkov, O. A. Povyshenie toplivnoy ekonomichnosti pervichnogo dizelya v sostave mnogofunktional’nogo ener-gotekhnologicheskogo kompleksa optimizatsiej skorostnogo rezhima. PhD diss. Chelyabinsk, 2009.
10. Matievsky, G. D. Snizhenie raskhoda topliva i vrednykh vybrosov dizelya na rezhimakh postoyannoy moshhnosti. PhD diss. Barnaul, 2013.
11. Samoseyko, V. F., F. A. Gel’ver, V. A. Homyak, and D. A. Hajrov. *Sinhronnye mashiny s anizotropnoj magnitnoj provodimost’yu rotora. Metodika proektirovaniya. Algoritmy upravleniya*. SPb.: FGUP “Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr”, 2016.
12. Gelver, Fedor. “Method of braking and reverse of the multi-engine rowing electrical unit with three rowing screws.” *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* 2 (2017): 20–27.
13. Rosin, E. I. *Avtomatizirovannye grebnye elektricheskie ustanovki. Dvizhenie sudna i ego glavnaya ustanovka*. L., 1986.

14. Bykov, A. S., and V. V. Bashaev. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnyh ledokolov*. SPb.: «Elmor», 2004.
15. Bahvalov, N. S., N. P. Zhidkov, and G. M. Kobel'kov. *CHislennye metody*. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008.
16. Berezin, I. S., and N. P. Zhidkov. *Metody vychislenij*. M.: Izd. FizMatLit, 1962.
17. Forsajt, Dzh., M. Mal'kom, and K. Moulér. *Mashinnye metody matematicheskikh vychislenij*. M.: Izd-vo «Mir», 1980.
18. Filatov, V. “Dvuh- i trekhurovnevye inventory na IGBT. Perspektivnye resheniya.” *Silovaya elektronika* 4.37 (2012): 38–41.
19. Pronin, M.V., and A. G. Voroncov. *Silovye polnost'yu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli*. SPb.: Elektrosila, 2003.
20. Gelver, F. A., I. V. Li, A. V. Saushev, and D.S. Semenov. “Electro-Mobile Installation of the Vessel with Cascade Electric Converter.” *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Springer, Cham, 2018. 459–465. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гельвер Фёдор Андреевич —
кандидат технических наук
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gelver@bk.ru, kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gelver, Fedor A. —
PhD
Krylov State Research Center
44 Moscow highway,
St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gelver@bk.ru, kaf_electroprivod@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.
Received: November 27, 2019.*