

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958

SHIP COMBINED PROPULSION PLANTS: PURPOSE, COMPOSITION, CLASSIFICATION

A. V. Grigoryev^{1,2}, S. M. Malyshev^{2,3}, R. R. Zaynullin³

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

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

³ — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

Combined propulsion plants that are widely used on the modern ships of foreign and domestic construction are considered. A distinctive feature of such plants is that the energy inside them for the ship movement is generated in two (or more) different types of ship engines – heat engines and electric motors, working for a common propulsor. Such plants are complex electromechanical systems designed to provide movement in the various modes of the ship operation and the electric energy production in the mode of economic speed or in the harbor mode. Combined propulsion plants conjoin the advantages of traditional propulsion systems with heat main engines and electric propulsion plants. Modern combined propulsion plants are characterized by a wide variety of schematic solutions, types of equipment and operating modes. Nowadays there is no definition of a combined propulsion plant in Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships of Russian Maritime Register of Shipping and in the other normative documents. Therefore a new task to define the requirements to their composition and to introduce new principles of their classification has appeared. Comparative analysis of terms and definitions, schematic solutions and equipment composition of ship propulsion plants including combined ones is carried out in the paper. New term for combined propulsion plants and their classification by the method of torque transfer to propeller are offered in the paper. It is shown that one of the main features by which the plants should be classified is the method of transmitting torque to the propeller. According to the type of torque transmission to the propeller, combined propulsion plants can be divided into plants with direct transmission of torque to the propeller, plants with a drop reduction gear and plants with azimuth thrusters.

Keywords: combined propulsion plant, heat main engine, electric propulsion motor, electric propulsion plant, reduction gear, shaft line, propeller, propulsor, operating mode.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. “Ship combined propulsion plants: purpose, composition, classification.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.

УДК 621.315:621.3.025

СУДОВЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРОПУЛЬСИВНЫЕ УСТАНОВКИ: НАЗНАЧЕНИЕ, СОСТАВ, КЛАССИФИКАЦИЯ

А. В. Григорьев^{1,2}, С. М. Малышев^{2,3}, Р. Р. Зайнуллин³

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

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

³ — АО «НПП «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены комбинированные пропульсивные установки, которые находят все более широкое применение на современных судах зарубежной и отечественной постройки. Отличительной особенностью таких установок является то, что энергия для движения судна в них вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях — тепловых и электрических, работающих на общий движитель.

Данные установки являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения в различных режимах эксплуатации судна и производства электроэнергии в режиме экономического хода или при стоянке. Комбинированные пропульсивные установки сочетают в себе достоинства традиционных пропульсивных установок с тепловыми главными двигателями и гребных электрических установок. Современные комбинированные пропульсивные установки характеризуются большим многообразием схмотехнических решений, типов оборудования и режимов эксплуатации. В настоящее время в «Правилах классификации и постройки морских судов» Российского морского регистра судоходства и другой нормативной документации определение комбинированных пропульсивных установок отсутствует. В связи с этим появляется задача определения требований к их составу и введения принципов классификации. В статье выполнен сравнительный анализ имеющихся терминов и определений, схмотехнических решений и состава оборудования судовых пропульсивных установок, включая комбинированные. Предложен новый термин для комбинированных пропульсивных установок. Показано, что одним из основных признаков, по которым следует классифицировать данные установки, является способ передачи вращающего момента на винт. По типу передачи вращающего момента на движитель комбинированные пропульсивные установки можно разделить на установки с прямой передачей вращающего момента на гребной винт, установки с понижающим редуктором и установки с винто-рулевыми колонками.

Ключевые слова: комбинированная пропульсивная установка, тепловой главный двигатель, гребной электродвигатель, гребная электрическая установка, редуктор, валопровод, гребной винт, движитель, режим эксплуатации.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки: назначение, состав, классификация / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.

Введение (Introduction)

Комбинированные пропульсивные установки (КПУ) находят все более широкое применение на судах российской и зарубежной постройки различного назначения [1], [2]. Они сочетают в себе достоинства пропульсивных установок на базе тепловых главных двигателей и гребных электрических установок (ГЭУ), что позволяет судну работать с высокими технико-экономическими показателями в различных режимах эксплуатации [3], [4].

КПУ является установкой, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух или более разнотипных судовых двигателях — тепловых и электрических. Данные установки являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения в различных режимах эксплуатации судна и производства электроэнергии в режиме экономического хода или при стоянке. КПУ отличается большим многообразием схмотехнических решений, состава оборудования и режимов работы. В связи с тем, что в настоящее время в «Правилах классификации и постройки морских судов» (далее — Правила Регистра) Российского морского регистра судоходства (РМРС) и другой нормативной документации отсутствует определение КПУ [5]–[8], необходимо дать определение этих установок, определить их состав и ввести классификацию.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пропульсивной установкой (ПУ) называют комплекс механизмов и устройств, предназначенный для обеспечения движения судна. Судовая ПУ состоит из движителя, валопровода, главных судовых передач, главных тепловых или гребных электрических двигателей. На судах находят применение ПУ различных типов. Наибольшее распространение в настоящее время находят пропульсивные установки с главными тепловыми двигателями. Широкое распространение получили судовые системы электродвижения (СЭД). Этим пропульсивным установкам присущи достоинства и недостатки, которые определяют их область применения [9], [10].

Стремление сочетать достоинства пропульсивных установок разных типов стимулировало создание комбинированных (гибридных) пропульсивных установок. В Правилах Регистра дано следующее определение: «Пропульсивная установка — комплекс механизмов и устройств, пред-

назначенный для выработки, преобразования и передачи энергии, обеспечивающей движение судна на всех спецификационных режимах хода, и состоящий из движителей, валопроводов, главных судовых передач и главных двигателей, в том числе гребных электродвигателей» [5, с. 7], откуда видно, что в состав ПУ в качестве главного двигателя (ГД) может входить гребной электродвигатель (ГЭД). В то же время ГЭД входит в состав ГЭУ. Правила Регистра содержат следующее определение ГЭУ: «Гребная электрическая установка (ГЭУ) — комплекс оборудования для распределения и преобразования электрической энергии в механическую с целью воспроизведения заданного упора одним гребным движителем» [6, с. 113].

Структурные схемы судовых ПУ представлены на рис. 1. В состав традиционной ПУ с тепловым двигателем (см. рис. 1, а) входят: тепловой главный двигатель, валопровод, гребной винт. В состав ПУ на базе ГЭД входят: ГЭД, валопровод, гребной винт (см. рис. 1, б). В составе ГЭУ помимо ПУ входит полупроводниковые преобразователи, силовые трансформаторы и другое электротехническое оборудование [11]–[13]. Судовая КПУ, приведенная на рис. 1, в, включает в себя тепловой ГД, ГЭД, редуктор, валопровод и гребной винт. Все ПУ по типу главных двигателей можно разделить на установки с тепловыми главными двигателями, установки с ГЭД и комбинированные пропульсивные установки, где в качестве главных двигателей применяются как тепловые двигатели, так и ГЭД.

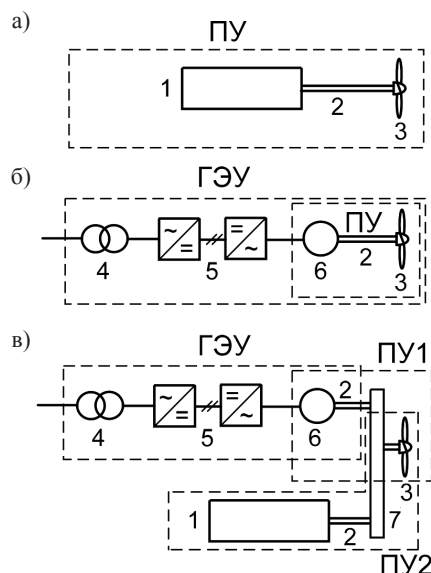


Рис. 1. Структурные схемы ПУ: а — на базе теплового ГД; б — на базе ГЭД; в — КПУ: 1 — тепловой ГД; 2 — валопровод; 3 — гребной винт; 4 — трансформатор; 5 — преобразователь частоты; 6 — ГЭД; 7 — редуктор

Классификация ПУ по типу главного двигателя представлена на рис. 2.

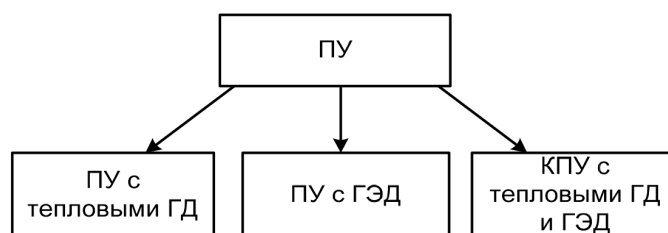


Рис. 2. Классификация пропульсивных установок по типу главного двигателя

В качестве тепловых двигателей в ПУ могут применяться дизель, газодизель, газовая или паровая турбина, в качестве ГЭД — электрические машины переменного или постоянного

тока. В качестве движителя используется гребной винт фиксированного или регулируемого шага (ВФШ, ВРШ), винто-рулевая колонка (ВРК) и другие типы движителей. Для соединения турбин и среднеоборотных дизелей с гребным винтом применяются понижающие редукторы. По количеству главных двигателей, работающих на один движитель, пропульсивные установки можно разделить на одномашинные и многомашинные. В многомашинных пропульсивных установках могут применяться как тепловые главные двигатели, так и ГЭД. Если одновременно в составе одной пропульсивной установки используется тепловой главный двигатель и ГЭД, работающие на общий движитель, то такая установка является КПУ. Структурные схемы одно- и многомашинных пропульсивных установок с тепловыми главными двигателями приведены на рис. 3.

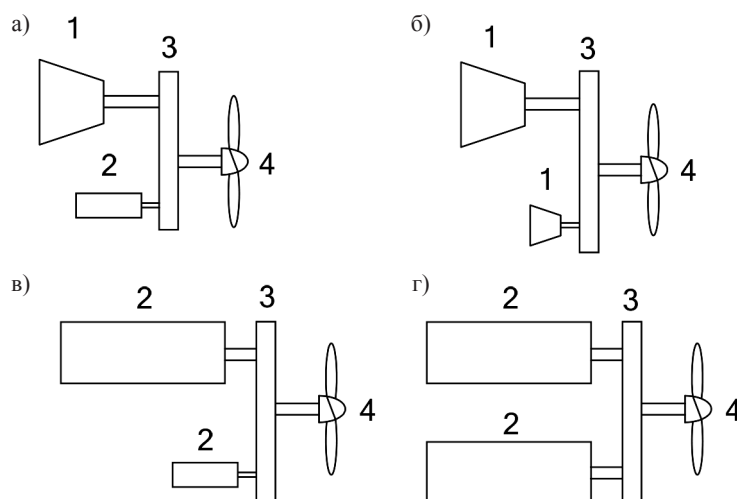


Рис. 3. Структурные схемы одно- и многомашинных пропульсивных установок с главными тепловыми двигателями:
1 — турбина; 2 — дизель; 3 — понижающий редуктор; 4 — гребной винт

В одно- и многомашинных пропульсивных установках на базе тепловых двигателей два или более тепловых двигателя работают на общий гребной винт. Как правило, сочленение тепловых главных двигателей происходит с помощью редуктора. В одно- и многомашинных пропульсивных установках в качестве главных двигателей могут применяться одноступенчатые двигатели одинаковой или разной мощности либо тепловые двигатели в разных сочетаниях: *дизель – газовая турбина, дизель – паровая турбина, паровая и газовая турбина*. В технической литературе пропульсивные установки с разнотипными тепловыми двигателями, работающими на общий движитель, также получили название *комбинированных пропульсивных установок* [11], [14], [15].

Судовые пропульсивные установки можно классифицировать по количеству движителей (гребных валов) на одно- и много-валовые. В состав много-валовых пропульсивных установок могут входить как одноступенчатые, так и разнотипные тепловые двигатели. Много-валовые пропульсивные установки могут быть построены на базе многомашинных агрегатов с несколькими двигателями, работающими на общий движитель. В последние годы на судах получили применение много-валовые пропульсивные установки, в которых для привода гребного винта применяются как тепловые ГД, так и ГЭД, работающие каждый на свой движитель. Как правило, количество гребных валов на таких судах не менее трех. Структурные схемы много-валовых пропульсивных установок с ГД и ГЭД приведены на рис. 4. В связи с тем, что в много-валовых ПУ, представленных на рисунке, отсутствует механическая связь между тепловым ГД и ГЭД, при этом каждый двигатель работает на свой движитель, данный тип пропульсивных установок авторы настоящей работы не относят к КПУ.

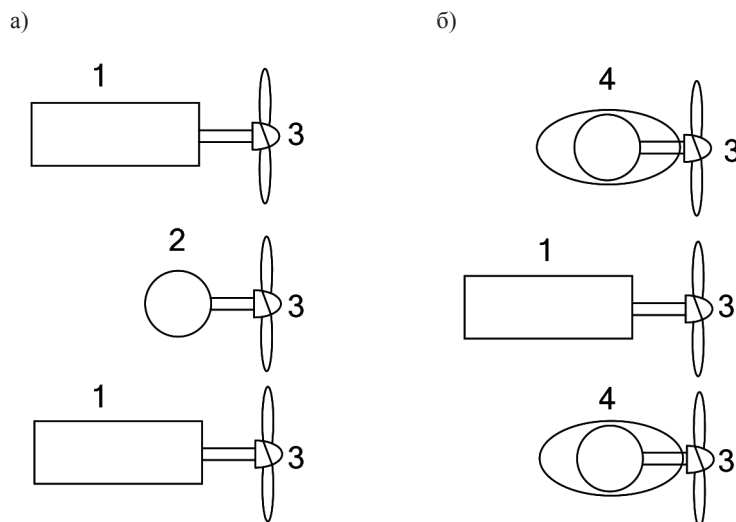


Рис. 4. Структурные схемы многовальных пропульсивных установок с ГД и ГЭД:
1 — тепловой ГД; 2 — ГЭД; 3 — гребной винт; 4 — электрическая ВРК

Структурные схемы КПУ представлены на рис. 5.

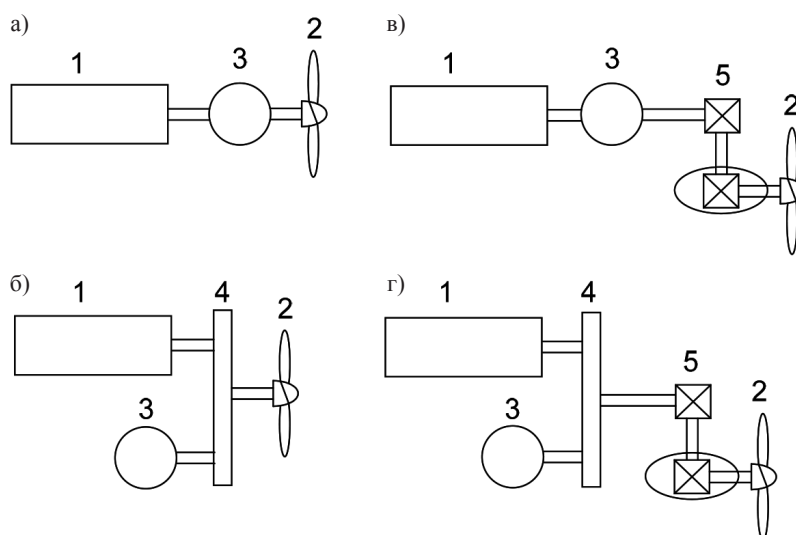


Рис. 5. Структурные схемы КПУ: 1 — тепловой ГД; 2 — гребной винт;
3 — ГЭД; 4 — понижающий редуктор; 5 — механическая ВРК

В состав КПУ установки входят: движитель (гребной винт, винто-рулевая колонка и др.), гребной валопровод, главная судовая передача (редуктор, муфта и др.), главный тепловой двигатель (дизель, турбина, газодизель), гребной электродвигатель.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Проведенный анализ схмотехнических решений и состава КПУ предполагает введение нового термина и его определения: «комбинированная пропульсивная установка — это пропульсивная установка, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях: тепловых и электрических, соединенных механической связью и работающих на общий движитель». Принципиальным для предлагаемого определения КПУ является наличие двух или более главных двигателей с разными физическими принципами действия — тепловых и электрических, работающих на общую нагрузку (движитель).

Классификация КПУ может быть выполнена по ряду признаков, в том числе по типу движителя, главного теплового двигателя или ГЭД, режимам эксплуатации и другим признакам. Выполненный анализ структурных схем современных КПУ показывает, что одним из основных признаков, по которым следует классифицировать данные установки, является способ передачи вращающего момента на винт и тип движителя [14]–[16].

По типу передачи вращающего момента на движитель и типа движителя КПУ можно разделить следующим образом:

- КПУ с прямой передачей вращающего момента на гребной винт;
- КПУ с понижающими редукторами;
- КПУ с ВРК.

Классификация КПУ по типу передачи вращающего момента на движитель представлена на рис. 6.

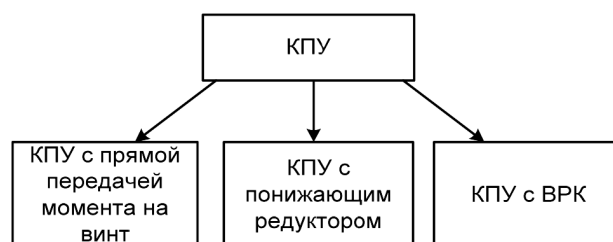


Рис. 6. Классификация КПУ по типу передачи вращающего момента на движитель

Выводы (Summary)

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Комбинированные пропульсивные установки находят все более широкое применение на судах российской и зарубежной постройки различного назначения. КПУ является пропульсивной установкой, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях — тепловых и электрических.

2. В связи с тем, что в настоящее время в «Правилах классификации и постройки морских судов» РМРС и другой нормативной документации отсутствует определение КПУ, предлагается ввести новый термин «комбинированная пропульсивная установка» и дать его определение.

3. Классификация КПУ может быть выполнена по ряду признаков, в том числе по типу движителя, типу главного теплового двигателя или ГЭД, режимам эксплуатации и другим признакам. Одним из основных признаков, по которым следует классифицировать данные установки, является способ передачи вращающего момента на винт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные комплексы нового поколения / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 49–50.
2. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 337–340.
3. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2013. — № 2. — С. 50–52.
4. Хватов О. С. Математическая модель судовой гибридной пропульсивной установки / О. С. Хватов, О. А. Бурмакин, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2009. — № 27. — С. 150–154.
5. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. VII. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019. — 81 с.
6. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. XI. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019. — 231 с.

7. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. — Ч. IV. — 357 с.
8. Руководство по техническому наблюдению за постройкой судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019.
9. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. — 175 с.
10. Григорьев А. В. Судовые валогенераторные установки нового поколения на базе обратимых полупроводниковых преобразователей / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 36–38.
11. Будашко В. В. Разработка трехуровневой многокритериальной стратегии управления гибридной судовой энергетической установкой комбинированного пропульсивного комплекса / В. В. Будашко // Электротехника і Електромеханіка. — 2017. — № 2. — С. 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
12. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
13. Ancona M. A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M. A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, J. Rosati // Energy Conversion and Management. — 2018. — Vol. 164. — Pp. 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
14. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsized Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // Energy Procedia. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
15. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman // Applied Energy. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
16. Ling-Chin J. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective – A life cycle assessment case study / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 117. — Pp. 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.

REFERENCES

1. Grigoryev, A. V., and E. A. Glekler. “Sudovye kombinirovannye propul'sivnye komplekсы novogo pokoleniya.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 49–50.
2. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Vestnik volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 35 (2013): 337–340.
3. Grigoryev, A. V. “Sudovye kombinirovannye propul'sivnye ustanovki.” *Morskoy flot* 2 (2013): 50–52.
4. Khvatov, O. S., O. A. Burmakin, and I. A. Tarpanov. “Mathematical model of ship hybrid propulsive installations.” *Vestnik volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 27 (2009): 150–154.
5. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Ch. VII. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2019.
6. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Ch. XI. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2019.
7. *Pravila tekhnicheskogo nablyudeniya za postroikoi sudov i izgotovleniem materialov i izdelii dlya sudov*. Chast' IV. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018.
8. *Guidelines on Technical Supervision of Ships under Construction*. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2019.
9. Grigoryev, A. V., and V. A. Petukhov. *Sovremennye i perspektivnye sudovye valogeneratornye ustanovki*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.
10. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. “Sudovye valogeneratornye ustanovki novogo pokoleniya na baze obratimyykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 36–38.
11. Budashko, V. V. “Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.” *Elektrotehnika i Elektromehanika* 2 (2017): 62–72.
12. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabriellii and Karin Andersson. “Optimal load allocation of complex ship power plants.” *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
13. Ancona, Maria Alessandra, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, and J. Rosati. “Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization.” *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.

14. Capasso, Clemente, Emilio Notti, and Ottorino Veneri. "Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsized Boats." *Energy Procedia* 158 (2019): 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
15. Geertsma, R. D., R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman. "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments." *Applied Energy* 194 (2017): 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
16. Ling-Chin, J., and A. P. Roskilly. "Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective—A life cycle assessment case study." *Energy Conversion and Management* 117 (2016): 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Малышев Сергей Михайлович —

ассистент, начальник отдела
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: malyshevsergey@list.ru

Зайнуллин Руслан Ринатович —

начальник отдела
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev, Andrey V. —

PhD, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Malyshev, Sergei M. —

Assistant, Head of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
JSC "RPC "Ship electric propulsion"
12 Fermское shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: malyshevsergey@list.ru

Zaynullin, Ruslan R. —

Head of Department
JSC "RPC "Ship electric propulsion"
12 Fermское shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Статья поступила в редакцию 1 октября 2019 г.
Received: October 1, 2019.