

УДК 629.5.064.5+621.314.26
EDN: PAVUTE

И.В. Сорокин¹, И.В. Гагаринов²

¹ Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия

УНИФИКАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Объект и цель научной работы. Системы электродвижения (СЭД) большой мощности с преобразователями частоты. Цель – унификация преобразовательной техники для указанных СЭД, направленная на обеспечение их высоких технико-экономических характеристик.

Материалы и методы. Исходными данными для проведения унификации преобразовательной техники, используемых в СЭД большой мощности, можно принять:

- судостроительные программы;
- технические решения, принятые в составе уже реализованных проектов;
- требования, выдвигаемые КБ-проектантами судов, эксплуатантами судов – судовладельцами, судостроительными заводами;
- доступные силовые полупроводниковые приборы и российскую производственную базу.

Основные результаты. Определены возможные унифицированные полупроводниковые приборы типа IGBT и предложен типовой преобразовательный канал мощностью 5 МВт для питания одной трехфазной статорной обмотки гребного электродвигателя, который соответствует принятому на проекте 22220 универсального атомного ледокола.

Заключение. В условиях наложенных экономических ограничений особое значение имеет обеспечение высоких технико-экономических характеристик СЭД большой мощности. Решение данной задачи может быть осуществлено посредством унификации используемых силовых полупроводниковых приборов, предпочтительно отечественного производства, и построенной на их основе преобразовательной техники. Определены возможные унифицированные полупроводниковые приборы типа IGBT, FRD и предложен типовой преобразовательный канал для питания одной трехфазной статорной обмотки гребного электродвигателя, который соответствует принятому на проекте 22220 универсального атомного ледокола.

Ключевые слова: система электродвижения, преобразователь частоты, унификация, полупроводниковые приборы.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.064.5+621.314.26
EDN: PAVUTE

I.V. Sorokin¹ I.V. Gagarinov²

¹ SET Branch of Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

UNIFICATION OF CONVERSION TECHNOLOGY FOR HIGH-POWER ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

Object and purpose of research. High-power electric propulsion systems with frequency converters.

Materials and methods. The initial data for the unification of the converter technology used in high-power EDMS can be taken as:

- shipbuilding programs;
- technical solutions adopted as part of already implemented projects;
- requirements put forward by design bureaus of ships, ship operators – shipowners, shipyards;
- affordable power semiconductor devices and a Russian production base.

Для цитирования: Сорокин И.В., Гагаринов И.В. Унификация преобразовательной техники для систем электродвижения большой мощности. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 81–86.

For citations: Sorokin I.V., Gagarinov I.V. Unification of conversion technology for high-power electric propulsion systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 81–86 (in Russian).

Main results. Possible unified semiconductor devices of the IGBT type have been identified and a typical 5 MW converter channel has been proposed for powering one three-phase stator winding of a propeller electric motor, which corresponds to the universal nuclear icebreaker adopted on project 22220.

Conclusion. In the conditions of imposed economic restrictions, it is of particular importance to ensure high technical and economic characteristics of high-capacity EDMS. The solution of this problem can be carried out by unifying the power semiconductor devices used, preferably of domestic production, and the converter technology built on their basis. Possible unified semiconductor devices such as IGBT, FRD have been identified and a typical converter channel for powering one three-phase stator winding of a propeller motor has been proposed, which corresponds to the universal nuclear icebreaker adopted on project 22220.

Keywords: electric propulsion system, icebreaker, frequency converter, unification, rowing electric motor, semiconductor devices.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В последнее время были приняты или обновлены государственные планы, связанные с освоением Северного морского пути и арктических месторождений полезных ископаемых. Данные планы содержат крупные судостроительные программы, включающие постройку атомных и дизель-электрических ледоколов, газозовов, танкеров, контейнеровозов и прочих судов ледового класса. Примером такого программного документа является «План развития Северного морского пути на период до 2035 года» [1], в рамках которого предполагается развитие арктического грузового флота, а также судов обеспечения.

В [2] приведен перечень судов, находящихся в постройке, на февраль 2022 г. Данные суда имеют высокий ледовый класс и большую требуемую мощность на движителях, вследствие чего конструкторскими бюро – проектантами судов приняты технические решения по установке систем электродвижения большой мощности [3, 4].

Основными элементами современных СЭД являются преобразователи частоты, которые, в свою очередь, построены на основе силовых полупроводниковых элементов. Силовые сборки с данными элементами для использования в СЭД судов до недавнего времени в подавляющем большинстве случаев импортировались. Последствием введенных ограничений явилось ограничение в доступности силовых полупроводниковых элементов: IGBT-транзисторов и FRD-диодов.

Единичная мощность силовых полупроводниковых элементов отечественного производства ниже, чем у аналогичных изделий зарубежной промышленности, и при построении систем электродвижения следует распределять мощность ГЭД между несколькими преобразовательными каналами.

Зоны применения унификации

Zones of unification

Технические решения, принятые в ЕЭЭС атомного ледокола проекта 22220, известны и приведены в [5]. Данная ЕЭЭС включает в свой состав два генератора мощностью по 36 МВт, распределительные устройства, понижающие трансформаторы и три гребных электропривода мощностью по 20 МВт. Гребные электродвигатели мощностью по 10 МВт соединены в тандем и работают напрямую, без редукторов, на гребные винты. Гребные асинхронные электродвигатели имеют две трехфазные статорные обмотки со сдвигом 30°, получающие питание от сдвоенных преобразователей частоты номинальной мощностью по 8+8 МВА напряжением 3000 В.

Двухзвенные преобразователи частоты имеют неуправляемый 12-пульсный диодный выпрямитель и автономный трехуровневый инвертор напряжения на основе IGBT-транзисторов [6]. Для питания выпрямителей установлены согласующие трехфазные трансформаторы со схемой соединений вторичных обмоток «звезда» и «треугольник». Для рассеивания энергии торможения в звене постоянного тока преобразователей предусмотрен транзисторный ключ, работающий на блоки тормозных резисторов.

При разработке ЕЭЭС атомного ледокол-лидера проекта 10510 по техническому заданию проеканта судна ЦКБ «Айсберг» особое внимание уделялось обеспечению унификации электрооборудования с используемым в проекте 22220. Источниками электроэнергии являются четыре турбогенератора мощностью 36 МВт того же типа, что в проекте 22220 [7].

На каждый гребной вал работает по два гребных асинхронных электродвигателя, соединенных в тандем, мощностью по 15 МВт. Каждый имеет по три трехфазные статорные обмотки, которые питаются от преобразователей по 8 МВА напряжением 3000 В. Параметры преобразователей частоты, при-

нятые на этапе технического проекта, соответствует используемым в проекте 22220. Таким образом, технические решения обеспечивают унификацию генераторов, преобразователей и другого оборудования ЕЭЭС [6].

Структура унифицированной системы электродвижения

Structure of unified electric propulsion system

В современных СЭД переменного тока напряжением свыше 1000 В наибольшее распространение получили преобразователи частоты с многопульсными неуправляемыми выпрямителями, звеном постоянного тока и трехуровневым инвертором напряжения с нулевой точкой на основе как IGCT, так и IGBT [3].

В качестве унифицированного модуля для СЭД предлагается блок преобразователя частоты мощностью 5 МВт. Данный модуль успешно масштабируется для СЭД, т.к. как их мощность, как правило, кратна 5. В качестве структуры унифицированного модуля примем структуру типового преобразовательного канала для питания одной трехфазной обмотки гребного электродвигателя проекта 22220, представленную на рис 1.

Трехобмоточный согласующий трансформатор 3 совместно с двумя трехфазными мостовыми выпрямителями 1 образуют 12-пульсную схему выпрямления со средней точкой. Напряжение звена постоянного тока фильтруется конденсаторами 2 и подается на трехуровневый автономный инвертор напряжения 6, регулирующий частоту вращения гребного электродвигателя 5.

Для оценки возможности применения отечественной полупроводниковой техники необходимо определить токовые нагрузки и допустимые напряжения на IGBT-транзисторы и FRD-диоды.

Выполним расчет блока на основании исходных данных электродвигателя ледокола проекта 22220: номинальный ток $I_{ном} = 1100$ А, номинальное линейное напряжение $U_{ном} = 3300$ В, максимальная кратность перегрузки по моменту $M_{max} = 1,8$, амплитуда тока на выходной обмотке трансформатора $I_{тр} = 1250$ А.

Максимальный ток через IGBT-транзистор I_{max}

$$I_{max} = 1,4 I_{ном} M_{max} = 2772 \text{ А.} \quad (1)$$

Максимальное напряжение на транзисторе

$$U_{max} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} U_{ном} = 2739 \text{ В.} \quad (2)$$

Запас по напряжению при проектировании берется не меньше 1,5 максимального значения (при наличии снабберных цепей).

Наиболее мощным из серийной номенклатуры отечественных IGBT-транзисторов для необходимого класса напряжения являются модули МТКИ1200-45НТВ производства ОАО «Электровыпрямитель» с номинальным током 1200 А при напряжении 4500 В. Данные ключи при токовой нагрузке (1) могут быть применены только при подключении нескольких ключей в параллель. При этом следует учитывать, что паспортный ток выбираемого ключа должен быть на 20–30 % выше расчетного максимального тока для обеспечения запаса по току из-за неравномерности распределения тока между ключами. В данном случае необходимо соединение в параллель трех силовых IGBT-транзисторов. Проблемы параллельного соединения ключей и методы их решения освещены в [8, 9].

Обычно при выборе диода считается, что ток через диод проходит одну треть периода, и паспортный ток диода выбирается ближайшим большим к $I_{тр}$. Однако эмпирические данные показывают, что для безопасной работы диода необходимо,

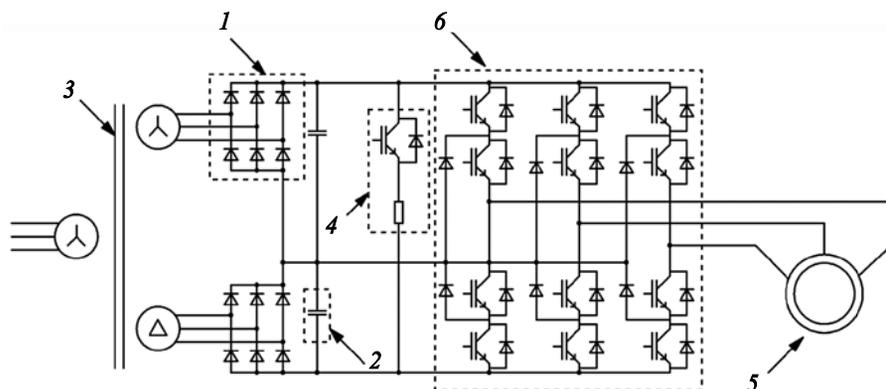


Рис. 1 Структурная схема преобразовательного канала на основе IGBT для питания одной трехфазной статорной обмотки гребного электродвигателя проекта 22220

Fig. 1. Schematic diagram of IGBT-based converter channel for supply of one 3-phase stator coil of propulsion motor, Project 22220

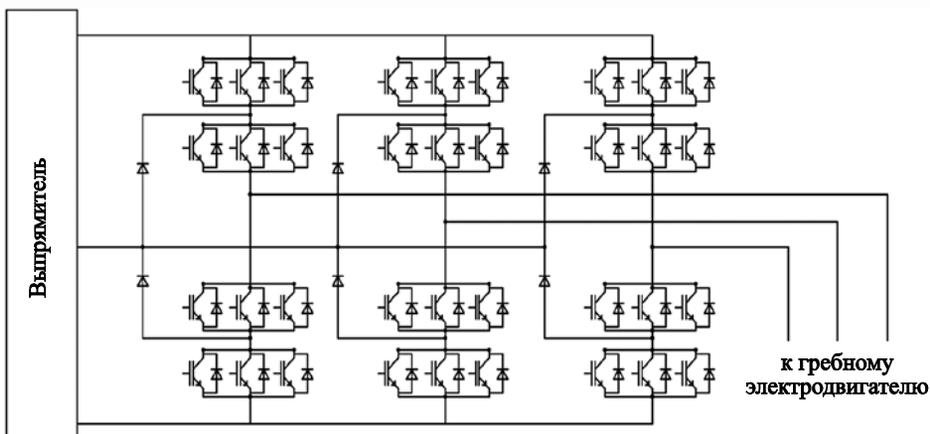


Рис. 2. Структурная схема инвертора унифицированного блока мощностью 5 МВт

Fig. 2. Schematic diagram of inverter for a standard 5MW-module

чтобы паспортный ток выбранного диода был больше расчетного I_{TP} не менее чем на 60 %. Тогда паспортный ток выбираемого диода должен удовлетворять неравенству

$$I_{VD} \geq 1,6 I_{TP} \approx 2000 \text{ A.} \quad (3)$$

Расчетное напряжение совпадает с аналогичным для транзистора. Для диода выпрямителя важным параметром является ударный ток короткого замыкания – $I_{уд.кз}$. Ударный ток вторичной цепи трансформатора проекта 22220 составляет около 36 кА, следовательно, выбираемый диод должен иметь большее значение ударного тока короткого замыкания. Из серийной номенклатуры изделий отечественной продукции требованиям параметров удовлетворяет одиночный диод Д173-2500-44 с номинальным током 2500 А и напряжением 4400 В. Ударный ток предлагаемого диода – 56 кА.

С учетом выбранной элементной базы, структура инвертора напряжения унифицированного модуля примет вид, представленный на рис. 2.

Для предлагаемых IGBT-транзисторов построим график загрузки ключа в различных режимах работы электропривода. Загрузка ключа выражается как отношение максимального (амплитудного) амплитудного значения тока в режиме к паспортному току полупроводникового элемента. В швартовном режиме максимальное значение момента соответствует номинальному моменту гребного электродвигателя. В режимах фрезеровки льда и стоянки под током значения электромагнитного момента на валу больше номинального значения в 1,6 и в 1,8 раза соответственно.

В предыдущих расчетах полагалось, что перегрузка по току соответствует перегрузке по моменту. Это справедливо для большинства современных систем векторного управления, однако при учете насыщения гребного электродвигателя и подборе оптимального тока намагничивания i_d^* перегрузка по току может быть меньше перегрузки по моменту. Кривая намагничивания показывает зависимость суммарного потокоцепления Ψ_{dq}

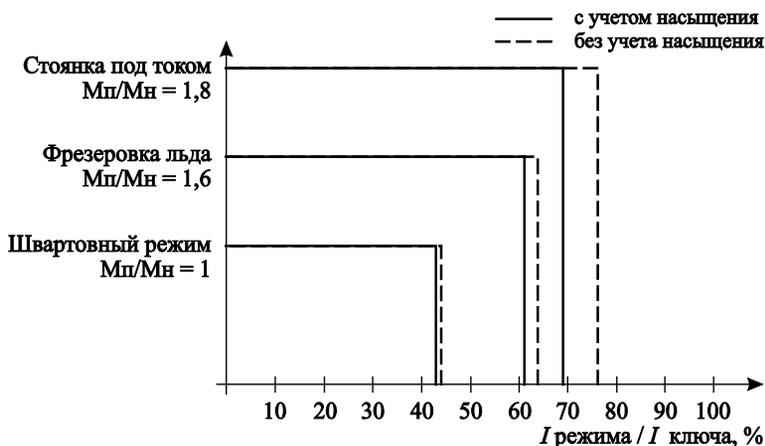


Рис. 3. Токвые нагрузки на IGBT-транзистор унифицированного модуля в различных режимах работы

Fig. 3. Current loads on IGBT-transistor of a standard module in various operating conditions

от тока намагничивания i_d^* и может быть описана формулой [10]

$$\Psi_{dq}^*(i_d^*) = a \cdot \arctan(i_d^*/b), \quad (4)$$

где a и b – постоянные коэффициенты аппроксимации.

Электромагнитный момент электродвигателя с учетом насыщения определяется формулой

$$M_a = \Psi_{dq}^*(i_d^*) \cdot \sqrt{I_a^{*2} - i_d^{*2}}, \quad (5)$$

где I_a^* – амплитуда фазного тока статора гребного электродвигателя.

Оптимальный ток намагничивания может быть определен из условия максимума электромагнитного момента (в относительных единицах)

$$\frac{d \left(a \cdot \arctan(i_{d(O)}^*/b) \cdot \sqrt{I_a^{*2} - i_{d(O)}^{*2}} \right)}{di_{d(O)}^*} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, перегрузки по току, соответствующие различным режимам работы гребной электрической установки ледокола, могут быть снижены относительно перегрузки по моменту при задании тока намагничивания i_d^* с учетом условия (6). Графики токовых нагрузок на IGBT-транзистор в различных режимах для алгоритма с максимизацией момента и классического векторного управления приведены на рис. 3.

Заключение

Conclusion

Текущие российские судостроительные программы включают в себя значительное количество судов с СЭД большой мощности, величины которых, как правило, кратны 5 МВт. Унификация преобразовательной техники для СЭД большой мощности может быть произведена на основе трехфазного преобразовательного канала мощностью 8 МВА.

Один преобразовательный канал принимается для обеспечения 5 МВт требуемой механической мощности на движителях. Произведен выбор полупроводниковых элементов силового канала из номенклатуры отечественных производителей на основании исходных данных ледокола проекта 22220. Токовые нагрузки для выбранных IGBT-транзисторов в наиболее тяжелом режиме работы (стоянка под током) не превышают 80 %.

Предлагаемый унифицированный преобразовательный канал подразумевает подключение

в инверторной части трех ключей в параллель. При этом возникает задача обеспечения равного распределения тока, которая успешно решена в мировой практике. Для снижения токовой нагрузки кроме параллельного соединения IGBT-транзисторов могут быть использованы алгоритмические методы. В частности, предлагается алгоритм максимизации электромагнитного момента за счет учета насыщения магнитной системы электродвигателя. При этом требуется управление током намагничивания с учетом условия максимального момента при фиксированной амплитуде статорного тока. Данный подход позволяет снизить токовую нагрузку примерно на 6, 3 и 1 % для режимов стоянки под током, фрезеровки льда и швартовного режима соответственно в сравнении с перегрузкой по моменту.

Представленная схема преобразовательного канала может быть применена в системах электродвижения судов ледового класса различного назначения, степени автоматизации и районов плавания.

Список использованной литературы

1. План развития Северного морского пути на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2022 г. № 2115-р // Правительство России : [сайт]. Москва, 2022. URL: <http://government.ru/docs/46171/> (дата обращения: 17.09.2022).
2. Савченко О.В., Половинкин В.Н. Размышления о состоянии и перспективах развития отечественного гражданского судостроения. Ч. 1 // Морской вестник. 2022. № 2(82). С. 19–23.
3. Гагаринов И.В. Структуры систем электродвижения большой мощности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Вып. 1(395). С. 119–131. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-119-131.
4. Создание систем электродвижения для судов различного назначения / В.И. Вершинин, С.В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 1(387). С. 107–122. DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122.
5. Алгоритм управления гребным электроприводом универсального атомного ледокола проекта 22220 / В.И. Вершинин, С.В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 95–102. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-95-102.
6. Воронцов А.Г., Пронин М.В. Модели систем электродвижения ледоколов с асинхронными двигателями и трехуровневыми преобразователями // Известия

- СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2022. № 9. С. 80–90. DOI: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-80-90.
7. Калинин И.М. Компьютерная модель асинхронного гребного электропривода с тремя обмотками на статоре // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Вып. 1(395). С. 132–140. DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-132-140.
 8. Shammam N.Y.A., Withanage R., Chamund D. Review of series and parallel connection of IGBTs // IEE Proceedings: Circuits, Devices and Systems. 2006. Vol. 153, No. 1. P. 34–39. DOI: 10.1049/ip-cds:20050053.
 9. Investigation of parallel connection of IGBTs / Hua Yang, Wen Xuhui, Gu Lingyun [et al.]. // Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing: IEEE, 2005. P. 833–835. DOI: 10.1109/ICEMS.2005.202654.
 10. Самосейко В.Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11, № 1. С. 156–168. DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

References

1. Development plan for Northern Sea Route until 2035: approved by Decree of the Russian Federation of 1 August 2022. № 2115-p // Russian Government: [site]. Moscow, 2022. URL: <http://government.ru/docs/46171/> (Accessed: 17.09.2022) (in Russian).
2. Savchenko O.V., Polovinkin V.N. Reflections on the current state and prospects of domestic commercial shipbuilding. P.1 // Morskoi vestnik. 2022. No. 2(82). P. 19–23 (in Russian).
3. Gagarinov I.V. Structures of high-power electric propulsion systems // Transactions of Krylov State Research Centre. 2021. Vol. 1(395). P. 119–131. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-119-131 (in Russian).
4. Development of electric propulsion systems for ships of various missions / V.I. Vershinin, S.V. Makhonin, V.A. Parshikov, V.A. Khomyak // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 1(387). P. 107–122. DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122 (in Russian).
5. Control algorithm for electric propulsion actuator of multi-purpose icebreaker of Project 22220 / V.I. Vershinin, S.V. Makhonin, V.A. Parshikov, V.A. Khomyak // Transactions of Krylov State Research Centre. 2017.

- Vol. 4(382). P. 95–102. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-95-102 (in Russian).
6. Vorontsov A.G., Pronin M.V. Models of electric propulsion systems with induction motors and three-level converter // News Bulletin of ETU “LETI”. 2022. No. 9. P. 80–90. DOI: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-80-90 (in Russian).
 7. Kalinin I.M. Computer model of induction propulsion motor with three stator coils // Transactions of Krylov State Research Centre. 2021. Vol. 1(395). P. 132–140. DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-132-140 (in Russian).
 8. Shammam N.Y.A., Withanage R., Chamund D. Review of series and parallel connection of IGBTs // IEE Proceedings: Circuits, Devices and Systems. 2006. Vol. 153, No. 1. P. 34–39. DOI: 10.1049/ip-cds:20050053.
 9. Investigation of parallel connection of IGBTs / Hua Yang, Wen Xuhui, Gu Lingyun [et al.]. // Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing: IEEE, 2005. P. 833–835. DOI: 10.1109/ICEMS.2005.202654.
 10. Samoseiko V.F. Adaptive algorithm of vector control for electric actuators with induction motors // Herald of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2019. Vol. 11, No. 1. P. 156–168. DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168 (in Russian).

Сведения об авторах

Сорокин Илья Владимирович, начальник сектора филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: idefo@list.ru.

Гагаринов Иван Владимирович, аспирант ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». Адрес: 198035, Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., д. 5/7. E-mail: ogkp@mail.ru.

About the authors

Iliya V. Sorokin, Head of Sector, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: idefo@list.ru.

Ivan V. Gagarinov, PhD student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. Address: 5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 198035. E-mail: ogkp@mail.ru.