

УДК 621.314

DOI: 10.37890/jwt.vi78.420

Система двойного рода тока с обратимым валогенератором в составе судовой энергетической установки

Ю.С. Мальшев

ORCID: 0000-0001-9008-1198

О.А. Бурмакин

С.В. Попов

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье проведен анализ судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) с валогенераторными установками (ВГУ) переменной и постоянной частоты вращения с механическим и электрическим регулированием параметров. Рассмотрена работа ВГУ в генераторном и двигательном режимах. Выявлены основные достоинства и недостатки существующих СЭЭС с ВГУ. Приведена функциональная однолинейная схема СЭЭС со встроенной сетью постоянного тока и рассмотрен возможный состав такой системы. Указана возможность применения возобновляемых источников при использовании встроенной сети постоянного тока. Рассмотрена целесообразность применения возобновляемых источников в зависимости от района плавания судна. Предложены структуры комбинированной СЭЭС с встроенной сетью постоянного тока и обратимым валогенератором. Обоснованы предлагаемые схемные решения интегрирования в СЭЭС обратимого валогенератора и их экономическая целесообразность.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, двойной род тока, судовая электростанция, встроенная сеть постоянного тока, обратимый валогенератор.

Dual current system with a reversible shaft generator as part of a ship's power plant

Yuriy S. Malyshev

ORCID: 0000-0001-9008-1198

Oleg A. Burmakin

Sergey V. Popov

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article analyzes shipboard electric power systems (SEPS) with shaft-generator units (SGU) of variable and constant speed with mechanical and electrical regulation of parameters. The operation of the SGU in the generator and propulsion modes is considered. The main advantages and disadvantages of the existing SEPS with SGU are revealed. A functional single-line diagram of SEPS with a built-in DC network is given and a possible composition of such a system is considered. The possibility of using renewable sources when applying the built-in DC network is indicated. The feasibility of employing renewable sources depending on the area of navigation of the vessel is considered. Structures of a combined SEPS with a built-in DC network and a reversible shaft generator are proposed. The proposed circuit solutions for integrating a reversible shaft generator into the SEPS and their economic feasibility are substantiated.

Keywords: electric power system, dual current, ship power plant, built-in DC network, reversible shaft generator.

Введение

Валогенераторные установки (ВГУ) применяются на судах для снижения себестоимости электроэнергии и экономии топлива. Изначально в ВГУ использовались нерегулируемые генераторы, работающие с допустимыми параметрами вырабатываемой электроэнергии в узком диапазоне изменения частот вращения валопровода (рис. 1, а, б, в) [1]. Поэтому на речных судах, работающих в условиях затрудненного судоходства, отказывались от использования нерегулируемых ВГУ. Регулируемые ВГУ работают в широком диапазоне частот вращения валопровода, при этом стабилизация параметров вырабатываемой электроэнергии происходит либо с помощью различных механических устройств, либо электрических преобразователей (см. рис. 2 – рис. 4). Примером механического регулирования частоты вращения валогенератора являются установки с мультипликатором (см. рис. 1, г, д). Для поддержания частоты вращения вала генератора, в случаях остановки или значительного снижения числа оборотов ГД, устанавливался вспомогательный дизель 5, подключаемый к ВГУ через соединительно-разобщительную муфту 6 (см. рис. 1, г, д). Такие системы имели повышенные массо-габаритные показатели и сложную механическую систему передач.

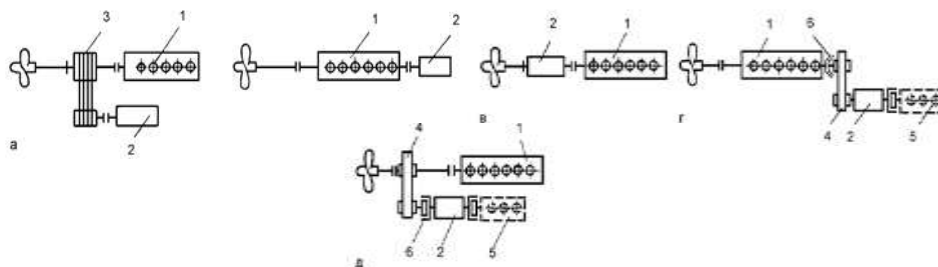


Рис. 1. Схемы привода валогенератора с прямой передачей:

- а - с клиноременной (или цепной) передачей; б - с передачей от свободного конца ГД;
- в - с ВГУ, встроенным в линию вала; г - с мультипликатором от свободного конца ГД;
- д - с мультипликатором от валопровода.

1 - ГД, 2 - ВГУ, 3 - текстурная (клиноременная или цепная) передача, 4 - мультипликатор, 5 - вспомогательный дизель; 6 – соединительно-разобщительная муфта.

Системы ВГУ с электрическим регулированием параметров построены на базе полупроводниковых преобразователей и являются наиболее популярными в настоящее время [2 - 4]. На рис. 2 приведена известная силовая схема ВГУ фирмы Siemens, выполненная на базе тиристорного управляемого выпрямителя UZ2 и инвертора UZ3. Для снижения индуктивной нагрузки на генератор в схеме использован синхронный компенсатор G2. Такая схема отличается сложной системой управления и генерирует высшие гармонические составляющие напряжения в судовую сеть.

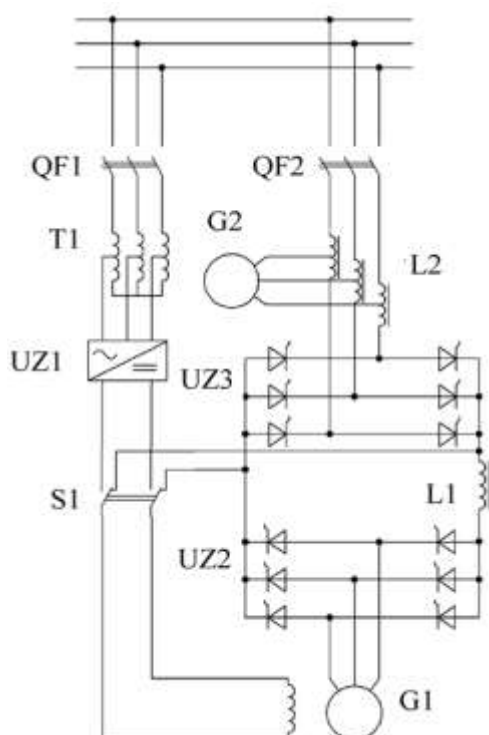


Рис. 2. Силовая схема ВГУ

G1 – синхронный валогенератор; G2 – синхронный компенсатор; UZ1, UZ2 – тиристорный управляемый выпрямитель; UZ3 – инвертор; T1– автотрансформатор; L1 – дроссель; L2 – сглаживающий дроссель; S1 – переключатель; QF1, QF2 - автоматические выключатели

Основным режимом работы ВГУ является автономный генераторный режим, который используется при относительном постоянстве частоты вращения валопровода. При больших отклонениях частоты вращения необходимо перевести электрическую нагрузку на основную электростанцию, путем кратковременного включения на параллельную работу с ней. Длительная параллельная работа ВГУ и основной электростанции, из-за сложности регулирования в динамических режимах, затруднена. Также ВГУ могут использоваться в двигательном режиме работы для обеспечения малого хода судна. Такие ВГУ называются обратимыми. На рис. 3 приведена структурная схема обратимой ВГУ [Патент РФ на полезную модель №130295 опубл. 20.07.2013] авторов Григорьева А. В., Глеклер Е. А., Кулагина Ю. А. и Зайнуллина Р. Р.

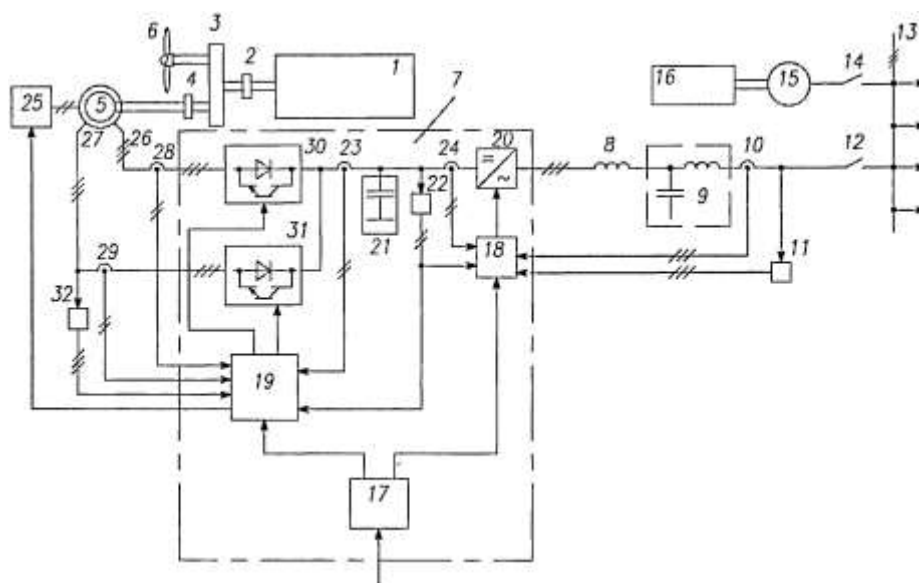


Рис. 3. Функциональная схема обратимой ВГУ:

1 - двигатель приводного вала; 2,4 - разъединительные муфты; 3 – редуктор; 5 - валогенератор; 6 - гребной винт фиксированного шага; 7 - преобразователь частоты; 8 - дроссель; 9 - LC-фильтр; 10, 23, 24, 28, 29 - датчики тока; 11, 22, 32 - датчики напряжения; 12, 14 - автоматические выключатели; 13 - шины судовых электропотребителей; 15 - вспомогательный генератор; 16 - вспомогательный двигатель; 17 - задатчик режимов; 18, 19 - блоки управления; 20 – электрически обратимый инвертор; 21 - конденсаторный накопитель звена постоянного тока; 25 - возбудитель; 26, 27 - выходы первой и второй трехфазных статорных обмоток; 30, 31 - выпрямительные мосты.

В качестве валогенератора данной установки применен вентильно-индукторный обратимый валогенератор 5, к которому подключен возбудитель 25. Напряжение с валогенератора поступает на преобразователь частоты 7, в котором установлены два выпрямительных трехфазных моста 30 и 31. К каждому диоду каждого моста подсоединен управляемый шунтирующий ключ с проводимостью, противоположной проводимости диода. Цепи управления ключей соединены с блоком управления 19. На выходе преобразователя частоты установлен электрически обратимый инвертор 20 со своим блоком управления 18. Для питания потребителей при снижении скорости вращения или остановке вала гребного винта используется вспомогательный генератор 15 со своим вспомогательным двигателем 16 [5].

К недостаткам такой установки является наличие избыточного числа механических (муфты, редуктор) и электрических (управляемые шунтирующие ключи с системой управления, вспомогательный генератор) устройств, усложняющих систему ВГУ и снижающих ее надежность. Кроме того, такая схема содержит три инвертора, обеспечивающие генераторный и двигательный режим ВГУ и сложную систему управления для обеспечения совместного режима работы инверторов [6]. Рассмотренные ВГУ, содержащие преобразовательные устройства, могут обеспечить длительный параллельный режим работы с основной электростанцией судна, однако необходимо решать вопросы, связанные с синхронизацией. Учитывая вышесказанное, основными целями работы являются: Обеспечение длительной параллельной работы валогенератора с сетью, повышение надежности электроснабжения и живучести судна.

Методы

Более простым, по сравнению с вышеописанными СЭЭС, вариантом обеспечения параллельной работы генераторов является их подключение через звено постоянного тока [7-10]. СЭЭС со встроенной сетью постоянного тока позволяет снизить себестоимость судовой электроэнергетики, экономить топливо, включать в состав преобразовательные устройства - возобновляемые источники, работающие от альтернативных источников энергии. Возобновляемые источники экологичны, но их применение ограничено природными условиями и конструктивными особенностями судна.

Согласно карте распределения среднегодовой скорости ветра по территории России (рис.4) наиболее частые и сильные ветра наблюдаются в северных и восточных регионах страны, а так же районы черного и каспийского морей. Наибольшая интенсивность солнечной радиации (рис.5) наблюдается в южных районах России. Поэтому суда, эксплуатируемые в северных районах плавания, целесообразно снабжать ветрогенераторами, а суда, предназначенные для плавания в южных широтах солнечными батареями.



Рис. 4. Карта распределения розы ветров по территории России

Для судов, район плавания которых расположен в акватории черного и каспийского морей, применимы, как солнечные батареи, так и ветрогенераторы, возможность применения которых на судах рассмотрена в [7-12]. Учитывая зависимость рекомендуемого типа возобновляемого источника от района плавания судна, является актуальным вопрос о оперативной смене типа источника при изменении района плавания. Встроенная сеть постоянного тока позволяет выполнить смену типа источника без существенных изменений основной части СЭЭС.

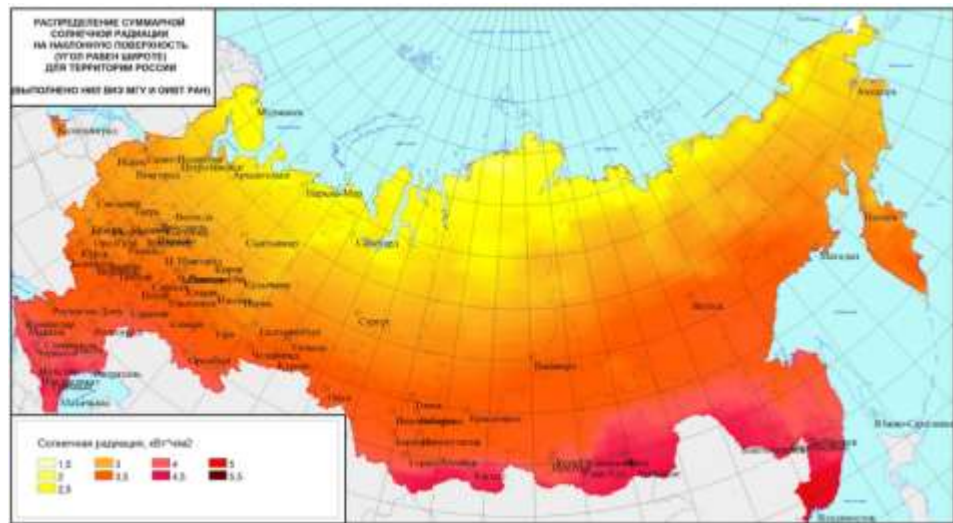


Рис. 5. Распределение суммарной солнечной радиации на территории России

Функциональная однолинейная схема СЭЭС со встроенной сетью постоянного тока показана на рисунке 6.

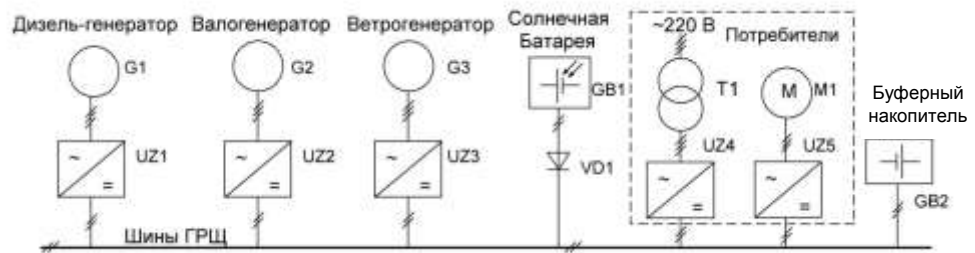


Рис. 6. Функциональная однолинейная схема СЭЭС со встроенной сетью постоянного тока

Схема содержит комбинацию источников, которые в различных условиях могут быть установлены на судно в зависимости от природных условий и его типа. Например, для наливных судов целесообразно применение солнечных батарей в связи с наличием значительных площадей, неиспользуемых поверхностей. Валогенераторы не имеют ограничений, связанных с природными условиями, поэтому целесообразны к применению на большинстве типов судов с СЭЭС со встроенной сетью постоянного тока.

Результаты

Встроенная сеть постоянного тока позволяет устанавливать валогенераторы без использования сложных передаточных устройств и использовать при этом любой тип генератора, как переменного, так и постоянного тока [7-9]. Наиболее предпочтительно применение асинхронных генераторов в составе ВГУ. Использование более простого и надежного, относительно синхронного, асинхронного генератора (АГ с КЗ ротором) снижает массогабаритные показатели ВГУ и, вместе с тем, ее стоимость. Возбуждение АГ может обеспечиваться либо активным выпрямителем (см. рисунок 7, а), либо конденсаторными установками (см. рисунок 7, б), что подтверждается имитационным моделированием [12].

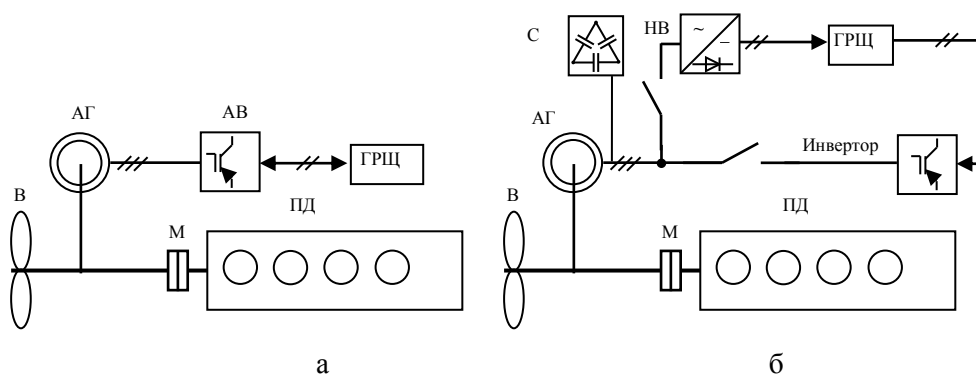


Рис.7. Функциональная схема обратимой ВГУ с инвертором а) и активным выпрямителем б)

Предложенная встроенная сеть постоянного тока позволяет осуществить как генераторный, так и двигательный режим. Применение активного выпрямителя требует наличия в схеме более сложной системы управления с большим числом датчиков для контроля активных и реактивных составляющих тока. Поэтому в судовой электростанции желательно устанавливать преобразователи с более простыми системами управления (см. рисунок 7, б). В генераторном режиме неуправляемый выпрямитель не допускает появления обратной мощности, а в двигательном режиме система управления инвертором значительно проще, чем в случае с активным выпрямителем. Двигательный режим ВГУ осуществляется путем отсоединения ГД от вала гребного винта с помощью соединительно-разобширительной муфты и подачи на нее питания от основных генераторов СЭЭС. Как правило, установленная мощность валогенератора составляет около 10 %, а на некоторых судах специального назначения до 20% от мощности ГД. Этой мощности ВГУ, работающей в двигательном режиме, достаточно для сохранения управляемости судна. Регулирование частоты напряжения на выходе инвертора при этом не требуется, что дополнительно упрощает схему управления инвертором. Однако, целесообразно обеспечить режим плавного пуска гребного электродвигателя для предотвращения провалов напряжения судовой сети. Наличие в сети постоянного тока буферного накопителя в виде аккумуляторной батареи (см. рис. 6) позволяет решить эту задачу, а увеличении ее емкости позволит обеспечить временное движение судна.

В штатном режиме работы электростанции электроэнергия поступает от основных генераторов на шины ГРЦ, обеспечивая заряд АКБ, выполняющей роль буферного накопителя и аварийного источника. При отключении основных источников питания, происходит автоматическое переключение питания ВГУ на аккумуляторную батарею.

Заключение

Таким образом, использование предложенной схемы реализации обратимой ВГУ, при наличии встроенной сети постоянного тока, позволит: обеспечить надежную работу ВГУ, как в генераторном, так и в двигательном режимах, повысить живучесть судна, обеспечить движение судна с малой скоростью без использования ГД в аварийных и специальных режимах.

Список литературы

1. Григорьев А.В.; Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография.- СПб.: Изд-во ГМА им. Адм. С.О. Макарова, 2009. - 176с.
2. Basirov R.C., Ismayilov S.S. Avar vintinin addimi tenzim o lunan gamilarin val generatoru qurgularinin is rejimlarinin arasdirilmesi. ADDA, Elmi asarlari. - № 1. - Baki. - 2015. - sah. 78- 83.
3. Патент WO 02/100716, Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor / Iden Stefan, Vaupel Gustav, приоритет 11.06.2001, патентообладатель Siemens AG.
4. Мехтиев Г.А., Исмаилов С. С. Двигательный режим работы асинхронизированных синхронных валогенераторов на судах с ВРШ.: Вестник государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова.- 2017.- №2 (19).- С.27-32.
5. «Судовая гибридная пропульсивная установка» Патент РФ на полезную модель №130295 опубли. 20.07.2013.
6. Соловьёв, А. В., & Поселенов, Е. Н. (2021). Обзор современных систем управления двигателями внутреннего сгорания. Научные проблемы водного транспорта, (67), 42-52. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.192>
7. Бурмакин О.А., Попов С.В., Гуляев В.В., Малышев Ю.С. Исследование режимов работы судовой электроэнергетической системы двойного рода тока // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. №. 1. С. 97-104. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-1-97-104> (дата обращения: 25.05.2023)
8. Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Попов С.В., Гуляев В.В. Исследование параллельной работы генераторов в системе двойного рода тока (тезисы) Труды 20-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2018». Труды конгресса. - Н.Новгород: ФБОУ ВПО "ВГАВТ", 2018.- Т.2.
9. Малышев Ю.С., Бурмакин О.А., Попов С.В., Гуляев В.В., Луконичев Н.И. Разработка экспериментальной установки для исследования систем двойного рода тока (тезисы) Труды 21-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2019». Труды конгресса. - Н.Новгород: ФБОУ ВПО "ВГАВТ", 2018.- Т.2.
10. Попов, С. В., Бурмакин, О. А., & Малышев, Ю. С. (2022). Особенности параллельной работы дизель-генераторных агрегатов судовой электростанции. Научные проблемы водного транспорта, (73), 67-78. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.313>
11. Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Варечкин Ю.В. Современные тенденции использования энергии ветра на судах // Труды 15-го Межд. науч.-пром. форума "Великие реки - 2013". Н. Новгород, Россия. 2013. Т. 2. С. 388-392.
12. Моделирование судовой электростанции со встроенной сетью постоянного тока в среде MatLab / О. А. Бурмакин, В. В. Гуляев, Ю. С. Малышев, С. В. Попов // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 3(15). – С. 75-84. – DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_75. – EDN ZMEUSS.

References

1. Grigor'ev A.V.; Petukhov V.A. Sovremennye i perspektivnye sudovye valogeneratornye ustanovki [Modern and promising ship shaft generator installations]: monografiya. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, Publ, 2009. - 176p (In Russ).
2. Basirov R.C., Ismayilov S.S. Avar vintinin addimi tenzim olunan gamilarin val generatoru qurgularinin is rejimlarinin arasdirilmesi. ADDA, Elmi asarlari. - № 1. - Baki. - 2015. - sah. 78- 83.
3. Patent WO 02/100716, Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor / Iden Stefan, Vaupel Gustav, prioritet 11.06.2001, patentoobladatel' Siemens AG.
4. Mekhtiev G.A., Ismailov S. S. Dvigatel'nyi rezhim raboty asinkhronizirovannykh sinkhronnykh valogeneratorov na sudakh s VRSH [Motor rejime operation of assjuchrone through synchrone for shoft generators on ships with propeller step regulating valve].: Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. adm. F.F. Ushakova. - 2017.- №2 (19).- P.27-32.
5. «Sudovaya gibridnaya propul'sivnaya ustanovka» [Ship hybrid blading installation] Patent RU na poleznuyu model' №130295 opubl. 20.07.2013.

6. Solov'ev, A. V., & Poselenov, E. N. (2021). Obzor sovremennykh sistem upravleniya dvigatelyami vnutrennego sgoraniya [Overview of modern control systems for internal combustion engines]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport], (67), P. 42-52. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.192>
7. Burmakin O.A., Malyshev YU.S., Popov S.V., Gulyaev V.V. Issledovanie rezhimov raboty sudovoi ehlektroenergeticheskoi sistemy dvoynogo roda toka [Study of the operation modes of the court electric power system of double current type]. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. Nauchnyi zhurnal 1 fevralya 2019. – Izd-vo AGTU, Astrakhan', 2019 – P. 97-104.
8. Burmakin O.A., Malyshev YU.S., Popov S.V., Gulyaev V.V. Issledovanie parallel'noi raboty generatorov v sisteme dvoynogo roda toka [Study of parallel operation of generators in a double current kind system] (tezisy) Trudy 20-go Mezhdunarod-nogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki - 2018». Trudy kongressa. - N.Novgorod: FBOU VPO "VGAVT", 2018.- T.2.
9. Malyshev YU.S., Burmakin O.A., Popov S.V., Gulyaev V.V., Lukonichev N.I. Razrabotka ehksperimental'noi ustanovki dlya issledovaniya sistem dvoynogo roda toka [Development of an experimental installation for studying double current kind system] (tezisy) Trudy 21-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki - 2019». Trudy kongressa. - N.Novgorod: FBOU VPO "VGAVT", 2018.- T.2.
10. Popov, S. V., Burmakin, O. A., & Malyshev, YU. S. (2022). Osobennosti parallel'noi raboty dizel'-generatornykh agregatov sudovoi ehlektrostantsii [Peculiarities of parallel operation of diesel-generator units of a ship power plant]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport], (73), P. 67-78. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.313>
11. Burmakin O.A., Maly'shev Yu.S., Varechkin Yu.V. Sovremennyye tendentsii ispol'zovaniya energii vetra na sudakh [Current trends in using wind energy on ships] // Trudy 15-go Mezhd. nauch.-prom. foruma "Velikie reki - 2013". N. Novgorod, Rossiya. 2013. T. 2. S. 388-392.
12. Modelirovanie sudovoj e'lektrostantsii so vstroennoj set'yu postoyannogo toka v srede MatLab [Simulation of ship power plant with built-in dc network in MatLab] / O. A. Burmakin, V. V. Gulyaev, Yu. S. Maly'shev, S. V. Popov // Intel'ktual'naya e'lektrotexnika [Smart Electrical Engineering]. – 2021. – № 3(15). – S. 75-84. – DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_75. – EDN ZMEUSS

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мальшев Юрий Сергеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: elektrikasp@mail.ru

Бурмакин Олег Анатольевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: boa_71@mail.ru

Попов Сергей Васильевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Popovsev3@ya.ru

Yuriy S. Malyshev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Oleg A. Burmakin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Sergey V. Popov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: Popovsev3@ya.ru