

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-102-114

DEVELOPMENT OF COASTAL MARINE TRANSPORT WITH HYBRID POWER PLANTS ON THE EXAMPLE OF THE FAR EASTERN REGION

A. F. Burkov¹, V. V. Mikhanoshin², Nguen Van Ha¹

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime State University named after adm. G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

A variant of solving the transport problem of Vladivostok, namely, its gas pollution by vehicle exhaust gases, high traffic density, traffic congestion, as well as reducing the congestion of coastal highways in the south of Primorye due to the development of coastal and intraport sea traffic is considered. A method and scheme of a power combined electric power plant for the hydrofoil ships, the use of which can significantly improve the environmental performance of existing plants, as well as reduce the consumption of fuel and lubricants, are proposed. The schemes of power plants that are most promising for the coastal and intraport navigation vessels are considered. It is shown that for ships with a traditional diesel installation, it is advisable to use a system of electric drive of the ship's propellers — an electric propulsion installation with several diesel generators. At the same time, the most energy-efficient are combined electric power plants, which can be made of both parallel and serial types. In the latter case, it is advisable to perform the ship's electric power system with DC buses. The performed economic calculation has shown that a ship with such installation has the lowest operating costs. A battery vessel with zero harmful emissions into the atmosphere has the highest construction cost and the highest operating costs when powered from the shore mains supply. Therefore, such vessels can be used either if there are subsidies or wind or solar power plants, whose electricity is used to charge the traction batteries. Despite the fact that the proposed option cannot provide year-round transportation of passengers due to the ice situation in winter, its implementation, however, will allow passengers to significantly reduce the travel time during the navigation period. And the cost of travel, due to the shorter sea route in almost a straight line, compared to the road, will not exceed the cost of driving by car.

Keywords: hybrid systems, electric propulsion installation, propulsion plant, structure diagram, electric motor.

For citation:

Burkov, Alexey F., Victor V. Mikhanoshin, and Nguyen Van Ha. "Development of coastal marine transport with hybrid power plants on the example of the Far Eastern region." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 102–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-102-114.

УДК 621.3.05

РАЗВИТИЕ ПРИБРЕЖНОГО МОРСКОГО ТРАНСПОРТА С ГИБРИДНЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ НА ПРИМЕРЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

А. Ф. Бурков¹, В. В. Миханошин², Нгуен Ван Ха¹

¹ — Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

Рассмотрен вариант решения транспортной проблемы г. Владивостока — его загазованности выхлопными газами автотранспорта, высокой плотности движения, транспортных заторов, а также загруженности прибрежных автотрасс юга Приморья за счет развития прибрежного и внутривертового морского сообщения. Предложены способ и схема силовой комбинированной электроэнергетической установки для судов на подводных крыльях, использование которых позволяет существенно улучшить экологические показатели существующих установок, а также снизить расход горюче-смазочных материалов.

Рассмотрены схемы силовых энергоустановок, наиболее перспективные для судов прибрежного и внутрипортового плавания. Показано, что для судов с традиционными дизельными установками целесообразно использовать систему электрического привода гребных винтов судна — гребную электрическую установку с несколькими дизель-генераторами. Отмечается, что при этом наиболее энергоэффективными являются комбинированные электроэнергетические установки, которые могут быть как параллельного, так и последовательного исполнения. В последнем случае судовую электроэнергетическую систему представляется целесообразным выполнять с шинами на постоянном токе. Выполненный экономический анализ показал, что судно с такой установкой имеет наименьшие эксплуатационные затраты. Аккумуляторное судно с нулевыми вредными выбросами в атмосферу имеет наибольшую строительную стоимость и наибольшие эксплуатационные расходы при питании от береговой сети. Поэтому такие суда могут использоваться либо при наличии субсидий для компенсации необходимых затрат, либо при наличии ветровых или солнечных электростанций, электроэнергией которых обеспечивается заряд тяговых аккумуляторных батарей. Реализация предложенного варианта, который является конкурентноспособной альтернативой, позволит пассажирам в навигационный период существенно сократить проведенное в пути время благодаря более коротким морским путям при стоимости проезда, не превышающей установленную стоимость на автотранспорте практически по линиям, близким к прямым, по сравнению с извилистыми автодорогами.

Ключевые слова: гибридные системы, гребная электрическая установка, пропульсивная установка, структурная схема, электрический двигатель.

Для цитирования:

Бурков А. Ф. Развитие прибрежного морского транспорта с гибридными энергоустановками на примере Дальневосточного региона / А. Ф. Бурков, В. В. Миханюшин, Нгуен Ван Ха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 102–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-102-114.

Введение (Introduction)

Известно, что Владивосток имеет значительную загруженность автомобильных дорог практически во всех его районах. Из-за постоянных заторов на дорогах жители города и пригорода нередко затрачивают три и более часа в сутки, добираясь на работу и обратно на личном или городском транспорте. Эта транспортная проблема города — столицы Дальневосточного федерального округа, усугубляется его географическим положением, значительным пассажиропотоком, а также высокой плотностью застройки, увеличивающейся с каждым годом. Из-за дефицита парковочных мест, водители паркуют автомобили на тротуарах, клумбах и газонах, спортивных и детских площадках. Это приводит к тому, что проезжая часть большинства улиц в центральной части города используется для движения лишь только на 30–50 %, что приводит, в свою очередь, к снижению пропускной способности городских автодорог. По этой же причине расширение или строительство двухуровневых дорог не представляется возможным. Кроме того, из-за значительной плотности движения машин возникает проблема загрязнения атмосферы выхлопными газами, причем плотность содержания вредных веществ в воздухе города нередко превышает допустимые нормы в разы, а также наблюдается рост количества аварий. Очевидно, что продукты сгорания топлива оказывают крайне негативное влияние на здоровье человека и на экологию в целом, что приводит к снижению туристической привлекательности города несмотря на ее высокий потенциал.

Построенные в 2012 г. вантовые мосты (Золотой и Русский) через бухту Золотой Рог и на острове Русский несколько снизили транспортную нагрузку на одну из главных улиц города — Светланскую, однако в целом по городу загруженность автодорог изменилась слабо. Более кардинально решить транспортную проблему может строительство кольцевой четырехполосной автодороги, с помощью которой планируется «закольцевать» движение вокруг центра города. Проект данной дороги предусматривает строительство двух новых мостов на остров Русский через остров Елены. При разрешенной скорости в 80 км/ч ее пропускная способность составит 70–85 тыс. автомобилей в сутки, однако стоимость данного проекта, по предварительной оценке специалистов, составляет около 100 млрд руб. [1].

Известно несколько способов снижения транспортной проблемы в городе [2]–[4]:

- увеличение численности гибридных автомобилей и электромобилей (эта мера позволит только снизить вредное воздействие на атмосферу, но загруженность автодорог не уменьшится);
- введение платного въезда в центр города (эта мера практически неосуществима, так как центральная часть города является одновременно одной из основных транспортных развязок);
- строительство метрополитена (реализация этого способа является, во-первых, достаточно дорогостоящей, а во-вторых, в силу географического расположения города (на п-ве Муравьева-Амурского с его гористой местностью, изрезанной береговой линией и глубокими бухтами) и его плотной застройки, она малореализуема).

До 2012 г., когда еще не были построены вантовые мосты через бухту Золотой Рог и на о. Русский, во Владивостоке пассажирскими паромными и катерами ежегодно перевозилось свыше 8 млн пассажиров. Пассажирскими паромными переправами через бухту Золотой Рог ежегодно пользовались около 5 млн горожан [5]. Постройка двух вантовых мостов позволила в достаточной степени решить транспортную проблему для «магистральных» пассажиров. Однако отмена паромных переправ после открытия этих мостов и отсутствие малотоннажного морского пассажирского транспорта как такового привели к тому, что быстро перебраться с одного берега на противоположный или другой близлежащий по доступной цене стало неразрешимой задачей.

Морские пассажирские перевозки между г. Владивостоком и другими, расположенными на побережье населенными пунктами: г. Находкой, Б. Камнем, с. Береговое и др., не производятся. Отсутствие таких морских сообщений объясняется дороговизной топлива и сравнительно небольшим пассажиропотоком, а отсутствие субсидий делает эти перевозки нерентабельными. Кроме того, эксплуатация прибрежных и внутривантовых судов характеризуется низкими эколого-экономическими показателями, поскольку значительную часть времени главные силовые (дизельные) установки (ГСУ) таких судов работают в маневренных (переходных) и частичных (долевых) режимах работы. В таких режимах работа дизелей характеризуется повышенным удельным расходом топлива и повышенным содержанием вредных веществ в выхлопных газах, что еще более усугубляет экологическую обстановку портов и снижает экономическую привлекательность таких морских перевозок [6]. Поэтому при сравнительно небольших (на карте) расстояниях между данными населенными пунктами пассажиры вынуждены затрачивать на дорогу вокруг Амурского и / или Уссурийского заливов несколько часов. При этом стоимость этих сухопутных перевозок возрастает.

Ввиду ранее указанных транспортных проблем в городе Владивостоке и других расположенных на побережье населенных пунктах, представляется актуальной задача найти такой способ перевозки пассажиров и грузов между ними, использование которого позволило бы сократить время нахождения их в пути, и, соответственно, снизить стоимость этих перевозок. Очевидно, что решение данной задачи неизбежно связано с использованием морского транспорта, имеющего более современные ГСУ. Существует ряд способов, использование которых позволяет снизить вредные выхлопы в атмосферу и улучшить энергоэффективность ГСУ [6]–[10], среди которых перевод дизелей на малосернистое топливо, природный газ или биотопливо, использование более совершенных фильтров очистки выхлопных газов, применение установок отбора мощности — валогенератора или утилизационных установок, снижение сопротивления воды движению корпуса судна за счет воздушной смазки или подводных крыльев, применение судов с многокорпусной конструкцией (катамараны и тримараны), применение нетрадиционных двигателей (турбопарусов) и др.

Для внутривантовых судов и судов прибрежного плавания, эксплуатирующихся с частыми маневренными и долевыми режимами, наиболее эффективным способом повышения их эколого-экономических характеристик является установка на них гибридных (комбинированных) дизель-аккумуляторных энергоустановок параллельного, последовательного или смешанного типа [11]–[14]. При небольших (до нескольких десятков морских миль) расстояниях между причалами силовая энергоустановка может быть выполнена без двигателей внутреннего сгорания на основе химических

источников тока. Такие аккумуляторные суда являются экологически чистыми, без выбросов вредных веществ в окружающую среду. Примерами таких судов служат, например, паромы-электроходы «Ампер», «Elektra», «Tycho Brahe», «Aurora» [15]–[18] и др. Энергоемкость установленных на них тяговых аккумуляторных батарей (АБ) составляет 10^2 – 10^3 кВт·ч. Однако такие паромы, как правило, имеют небольшую скорость хода. Значительно большую скорость хода имеют суда на подводных крыльях (СПК). Периодически сообщение между Владивостоком и поселком городского типа Славянка (расстояние по морю около 50 км) осуществляется с помощью СПК «Комета». Недостатком таких судов является то, что для преодоления «горба» сопротивления и выхода судна на режим движения на крыльях, т. е. режима разгона, им необходимо иметь мощный приводной двигатель (ПД), а после преодоления этого «горба» сопротивления и при продолжительном движении судна на подводных крыльях сопротивление движению судна в разы (обычно 2–3 раза) снижается, вследствие чего ПД работает с малым коэффициентом загрузки и, соответственно, с большим удельным расходом топлива. Кроме того, движение СПК в водоизмещающем режиме, очевидно, является неэкономичным, поэтому на сравнительно коротких маршрутах такие суда не используют. Таким образом, в настоящее время отсутствуют универсальные экономичные суда прибрежного и внутрипортового плавания, которые могли бы при необходимости эксплуатироваться как на коротких, так и на сравнительно длинных маршрутах.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Наиболее целесообразным решением задачи снижения загруженности автомобильных дорог с учетом географического положения Владивостока и изрезанности береговой линии (рис. 1) представляется за счет развития морских пассажирских перевозок и, соответственно, морского транспорта.

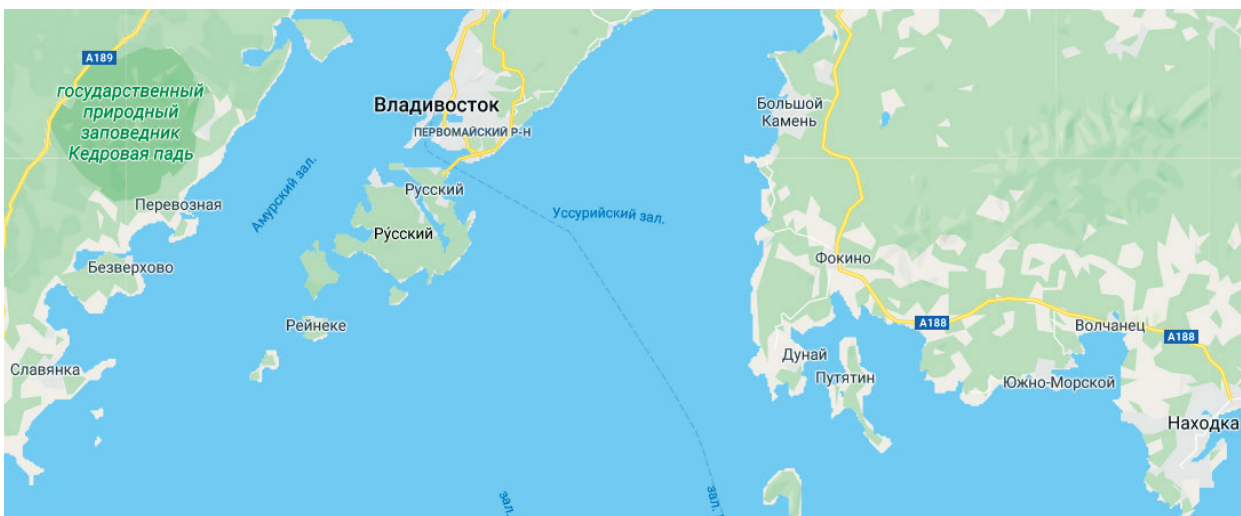


Рис. 1. Географическое расположение города-порта Владивосток

При этом целесообразно использовать удачный опыт разработок аккумуляторных паромов норвежских и финских судостроительных компаний, а также береговых зарядных станций. Большие возможности дальнейшего снижения стоимости перевозок аккумуляторными паромы представляются здесь за счет получения электроэнергии для береговых зарядных станций не от береговых сетей, а от ветровых или солнечных электростанций, ввиду того, что юг Приморья относится к самым солнечным регионам России и на побережье редко бывает безветренная погода.

Принимая ориентировочно мощность силовой установки аккумуляторного парома $P = 300$ – 600 кВт, удельную энергоемкость аккумуляторных батарей (АБ) литий-железо-фосфатного типа (наиболее широко применяемых в качестве тяговых) $\rho = 130$ Вт·ч/кг, время рейса $t_p = 1$ – 2 ч, допустимую глубину разряда 70 %, нетрудно оценить массу АБ:

$$m_{AB} = \frac{1000P}{\rho_{0,7}} \cdot t_p = \frac{1000(300 - 600)}{130 \cdot 0,7} \cdot (1 - 2) = 3297 - 13187 \text{ кг.} \quad (1)$$

Принимая параметры одного LiFePO4 аккумулятора: напряжение $U_1 = 3,2$ В, емкость $C_1 = 400$ А·ч, масса $m_1 = 16$ кг стоимость $St_1 = 380$ долл., можно рассчитать диапазон требуемого числа таких аккумуляторов:

$$n_{AB} = \frac{m_{AB}}{m_1} = \frac{3297 - 13187}{16} \approx 206 - 824, \quad (2)$$

и их суммарную стоимость:

$$St_{\Sigma AB} = St_1 \cdot n_{AB} = 380(206 - 824) = 78,28 - 313,12 \text{ тыс. долл.} \quad (3)$$

Стоимость инвертора [19] типа Control-A310 380В 3Ф 500кВт составляет 1455489 руб. / 75 = 19,4 тыс. долл.

В гибридных дизель-аккумуляторных энергоустановках используют АБ меньшей энергоемкости, чем на аккумуляторных судах, и меньший по мощности главный дизельный двигатель, чем на традиционных дизельных судах. Учитывая кубическую зависимость между относительной скоростью судна v^* и относительной мощностью P^* , потребляемой гребным винтом:

$$v^* = \sqrt[3]{P^*}, \quad (4)$$

целесообразно выбирать такую энергоемкость АБ, при которой длительно развиваемая ею мощность $P_{ГАБ}$ составляет $(0,1 - 0,2) P$. При таком соотношении относительная скорость судна при питании гребного электродвигателя только от АБ составит

$$v^* = \sqrt[3]{0,1 - 0,2} = 0,464 - 0,585.$$

Выбирая мощность АБ с запасом $(0,2P)$ при принятой ранее ориентировочной мощности силовой установки аккумуляторного парама $P = 300 - 600$ кВт, получим соотношение мощностей источников в гибридной установке:

$$\frac{P_{ГАБ}}{P_{Г.диз}} = \frac{60}{240} - \frac{120}{480}.$$

При тех же параметрах выбранного ранее аккумулятора, масса АБ составит

$$m_{ГАБ} = \frac{1000(60 - 120)}{130 \cdot 0,7} (1 - 2) = 659 - 2637 \text{ кг.}$$

Требуемое число таких аккумуляторов

$$n_{ГАБ} = \frac{m_{ГАБ}}{m_1} = \frac{659 - 2637}{16} \approx 41 - 165.$$

Суммарная стоимость

$$St_{\Sigma ГАБ} = St_1 \cdot n_{ГАБ} = 380 \cdot (41 - 165) = 15,58 - 62,70 \text{ тыс. долл.}$$

Стоимость инвертора [20] типа CONTROL-A310 380В 3Ф 75–93кВт 152–176А ИЕК равна 127878 руб. / 75 = 1,7 тыс. долл. Из проведенных расчетов видно, что стоимость компонентов в гибридной установке не менее чем в 5 раз ниже стоимости компонентов аккумуляторной установки. Одним из способов устранения указанного недостатка СПК может быть использование предложенной комбинированной электроэнергетической установки параллельного типа и способа управления ею [21].

Данная схема (рис. 2) содержит главный (первичный) (дизельный) двигатель 1, валопровод 2, разобщительные муфты 3, 5 и 8, суммирующий редуктор 4, гребной винт 6, синхронную машину обратимого типа (СМОТ) 7, обратимый полупроводниковый преобразователь 9, АБ 10.

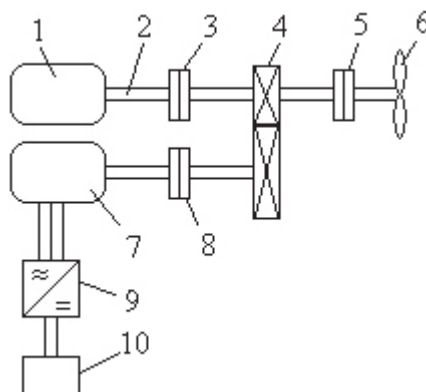


Рис. 2. Комбинированная электроэнергетическая установка

Управление данной электроэнергетической установкой производят следующим образом. При разомкнутой разобщительной муфте 3 и замкнутых аналогичных муфтах 5 и 8 приводят гребной винт 6 во вращение от СМОТ 7, работающей в этот момент в двигательном режиме и получающей питание от АБ 10 через обратимый полупроводниковый преобразователь 9. Последним при этом осуществляют преобразование постоянного тока АБ 10 в переменный ток и плавно увеличивают частоту тока, подаваемого в фазные обмотки (не показано) синхронной машины обратимого типа 7, осуществляя тем самым плавный ее пуск как синхронного двигателя. Вращаясь с некоторой частотой вращения, гребной винт 6 создает упор, под действием которого судно движется с малой скоростью в водоизмещающем режиме.

После выхода судна из порта (гавани), осуществляют пуск главного (дизельного) двигателя 1, соединяют его с помощью разобщительной муфты 3 с суммирующим редуктором 4, увеличивают частоту вращения СМОТ 7, работающей в этот момент в двигательном режим, за счет увеличения частоты тока, подаваемого в ее фазные обмотки (не показано) от обратимого полупроводникового преобразователя 9, а также одновременно увеличивают частоту вращения главного (дизельного) двигателя 1. Благодаря совместной одновременной работе на гребной винт 6 через суммирующий редуктор 4 главного (дизельного) двигателя 1 и СМОТ 7, работающей в этот момент в двигательном режиме, судно достаточно быстро разгоняется, преодолевая «горб» сопротивления.

После вывода судна для работы в режиме на подводных крыльях сопротивление движению судну, как известно, резко снижается и поэтому СМОТ 7, работающую в двигательном режиме, отключают от источника питания (обратимого полупроводникового преобразователя 9) и отсоединяют от суммирующего редуктора 4 с помощью разобщительной муфты 8. СПК движется в режиме на подводных крыльях только за счет главного (дизельного) двигателя 1.

Данная комбинированная электроэнергетическая установка с описанным способом управления может быть использована не только на СПК, но и на любых других типах глиссирующих судов. Ее использование позволяет достичь ряд следующие положительные результаты:

1. Наличие СМОТ позволяет использовать ее не только в двигательном режиме при разгоне судна, но и в генераторном режиме (например, при малом ходу судна с приводом гребного винта от главного двигателя или во время кратковременных его стоянок у причала при высадке / посадке пассажиров с работающим главным двигателем, осуществляя с ее помощью отбор избыточной мощности главного двигателя). При этом отбираемый на подзаряд аккумуляторной батареи от СМОТ, работающей в этот момент в генераторном режиме, ток регулируют посредством обратимого полупроводникового преобразователя. АБ при этом служит буферным источником электроэнергии для СМОТ, являясь либо ее потребителем, либо источником. Таким образом, обеспечивается близкий к номинальному режим работы главного двигателя, благодаря чему он имеет минимальные вредные выбросы в атмосферу, минимальный удельный расход топлива и наибольший эксплуатационный ресурс, что, в свою очередь, приводит к повышению экономичности эксплуатации СПК.

2. Возможность движения судна в порту (гавани) с нулевыми вредными выбросами в атмосферу, т. е. только за счет гребного электродвигателя, питаемого от АБ через обратимый полупроводниковый преобразователь при неработающем главном двигателе. При движении судна на подводных крыльях увеличение мощности на гребном валу в случае необходимости, обеспечивают за счет энергии АБ, т. е. с минимальной динамической нагрузкой на главный двигатель. Благодаря этому обеспечивается меньший удельный расход топлива и меньшие, по сравнению с используемыми в настоящее время энергоустановками, вредные выбросы в атмосферу. Следовательно, обеспечивается соблюдение требований Международной морской организации (International Maritime Organization (ИМО)) и «Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78)» (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships — MARPOL-73/78).

Результаты (Results)

Экономическая целесообразность применения судов с аккумуляторными и гибридными энергоустановками может быть представлена в виде табл. 1, отражающей стоимость расходных материалов в процессе эксплуатации данных типов судов. Расчет стоимости производился в приведенной последовательности.

Полагая период навигации равным $n = 189$ суткам (с 16 мая по 20 ноября), продолжительность рабочего дня $t = 12$ ч, удельный расход топлива $G = 0,3$ кг/кВт·ч, а его плотность $\rho = 0,85$ кг/л, расход топлива (в литрах) за период навигации составил

$$V_d = ntGP/\rho = 189 \cdot 12 \cdot 0,3(300-600) / 0,85 = 240141-480282 \text{ л.} \quad (5)$$

При стоимости одного литра дизельного топлива $St_{дт1} = 52$ руб./л стоимость израсходованного за период навигации топлива

$$St_{дт} = St_{дт1} \cdot V_d = 52(240141-480282) = 12487332-24974664 \text{ руб.} = 166,50-333,00 \text{ тыс. долл.} \quad (6)$$

Если принять расход моторного масла равным 0,01 расхода топлива, то можно записать

$$V_m = 0,01 V_d = 0,01(240141-480282) = 2401-4803 \text{ л.} \quad (7)$$

При стоимости моторного масла типа Shell Argina S340PF $St_{дм1} = 42$ тыс. руб. за бочку 209 л, стоимость израсходованного за период навигации масла

$$St_m = St_{дм1} V_d = 42(12-23) = 504-996 \text{ тыс. руб.} = 6,72-13,28 \text{ тыс. долл.} \quad (8)$$

Суммарная стоимость израсходованного за навигационный период дизельным судном топлива и моторного масла составляет

$$St_{\Sigma ДС} = St_{дт} + St_m = (166,50-333,00) + (6,72-13,28) = 173,22-346,22 \text{ тыс. долл.}$$

Судно с гибридной энергоустановкой имеет меньшие расходы ГСМ благодаря тому, что в нем меньший по мощности главный дизельный двигатель работает практически в стационарном режиме с номинальной нагрузкой на валу. Полагая расход топлива и масла прямо пропорциональными мощности главного двигателя, суммарную стоимость израсходованного за навигационный период гибридным судном ГСМ можно определить следующим образом:

$$St_{\Sigma ГС} = 173,22 \frac{240}{300} - 346,22 \frac{480}{600} = 138,58-276,98 \text{ тыс. долл.}$$

Стоимость электроэнергии, израсходованной за навигационный период аккумуляторным судном, составляет

$$St_{\Sigma АС} = ntPSt_{1кВт\cdot ч} = 189 \cdot 12(300-600)10^3 \cdot 1,37 = 932148-1864296 \text{ тыс. руб.} = \\ = 12428,64-24857,28 \text{ тыс. долл.,}$$

где $St_{1кВт\cdot ч} = 1,37$ руб./кВт·ч — стоимость электроэнергии по ночному тарифу ПАО «ДЭК».

Сравнение силовых энергоустановок судов

Основные показатели	Тип силовой энергоустановки судна		
	дизельная	гибридная	аккумуляторная
Тип расходного материала	Дизельное топливо, моторное масло	Дизельное топливо, моторное масло	Электроэнергия
Стоимость энергоустановки	Малая	Средняя	Большая
Экологичность	Низкая	Средняя	Высокая
Годовая (навигационная) стоимость расходного материала, тыс. долл. / о. е	173,22–346,22 / 1,00	138,58–276,98 / 0,80	12428,64–24857,28 / 71,75

Сравнительные данные судовых энергетических установок судов, приведенные в таблице, позволяют сделать вывод о том, что наибольшую годовую стоимость эксплуатации имеет судно с аккумуляторной силовой установкой.

Обсуждение (Discussion)

Очевидно, что данные расчеты являются приближенными и не учитывают изменение удельного расхода топлива при разгоне судна, движении его с установившейся скоростью, при торможении, а также работе главного двигателя вхолостую при стоянке судна у причала во время посадки / высадки пассажиров. При расчете стоимости электроэнергии, израсходованной аккумуляторным судном за навигационный период, не учитывался тот факт, что во время кратковременных стоянок судна у причалов при посадке / высадке пассажиров расход электроэнергии аккумуляторов более чем на порядок меньше, чем при движении судна, а также не учитывалось изменение мощности гребных винтов при швартовке, маневрировании и движении судна с установившейся скоростью. Учет этих факторов возможен только в том случае, если известно расстояние между причалами и продолжительность кратковременных стоянок судна у данных причалов. Необходимо также учесть изменения погодных условий (встречный ветер, волнение моря, скорость морского течения). В процессе эксплуатации судна также неизбежно обрастание подводной части его корпуса различными микроорганизмами и минеральными частицами, что приводит к ухудшению скоростных характеристик, и, соответственно, увеличению эксплуатационных расходов. Из приведенных расчетов и данных, указанных в таблице видно, что несмотря на высокую экологичность аккумуляторные суда являются наиболее дорогостоящими как при постройке, так и при эксплуатации, поэтому их внедрение без субсидий с экономической стороны нецелесообразно.

Присущие силовой энергоустановке с наименьшей строительной стоимостью (дизельного типа) недостатки могут быть частично устранены в том случае, если использовать систему электрического привода гребных винтов судна — гребную электрическую установку (ГЭУ). Первичные двигатели в ГЭУ работают практически в номинальных режимах, благодаря чему обеспечивается наиболее полное сгорание топлива в рабочих цилиндрах ПД, снижается скорость закоксовки поршневых колец цилиндропоршневых групп, что приводит, в свою очередь, к увеличению эксплуатационного ресурса этих двигателей.

Выхлопные газы содержат минимальную долю вредных веществ. При этом наиболее экономичными и экологичными судовыми энергетическими установками (из дизельных) в настоящее время являются дизель-электрические гребные установки на переменном токе с использованием среднеоборотных дизелей (например, типа Wärtsilä-31). На рис. 3 приведена типовая схема современной единой судовой электроэнергетической системы (ЭЭС). В этой схеме три высоковольтных дизель-генератора *DGI-DG3* работают на общие шины переменного тока HVAC (High Voltage Alternating Current), от которых получают электроэнергию гребные синхронные электродвигатели *M1* и *M2* и общесудовые потребители.

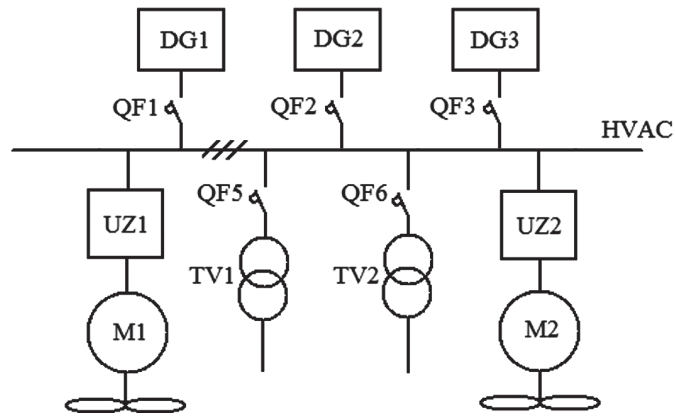


Рис. 3. Типовая схема единой судовой ЭЭС

Синхронные электродвигатели $M1$ и $M2$ с установленными на их валах гребными винтами являются основными составными частями пропульсивных главных винторулевых колонок (ВРК) Azipod и др. и размещены в гондолах. Регулирование угловой скорости валов двигателей $M1$ и $M2$ (частоты вращения гребных винтов) осуществляется посредством полупроводниковых преобразователей частоты $UZ1$ и $UZ2$, а регулирование мощности ЭЭС — путем подключения (отключения) DG к шинам $HVAC$. Питание общесудовых потребителей электроэнергии производится от шин $HVAC$ через понижающие трансформаторы напряжения $TV1$ и $TV2$.

Гибридизация судовых ЭЭС является относительно новым и перспективным направлением в судостроении [22]–[24]. Актуальность развития гибридизации судовых ЭЭС обусловлена способностью их работы в широком диапазоне нагрузок со значительно меньшими вредными выбросами и более низким расходом топлива по сравнению с обычными дизельными ЭЭС, и, следовательно, относительно низкой стоимостью эксплуатации судна. Добиться улучшения энергетической эффективности и экологических характеристик судов-электроходов позволяет использование ГЭУ с нетрадиционными источниками электрической энергии (аккумуляторными батареями (АБ) различного типа, электрохимическими генераторами, солнечными элементами и т. п.). Идея применения нескольких источников энергии с целью оптимизации работы двигателя внутреннего сгорания (дизеля) не нова, однако ее техническая реализация стала возможной лишь недавно в связи развитием полупроводниковой техники и химических источников тока. Гибридные системы нашли применение на судах, главные энергетические установки которых довольно часто работают в маневренных и долевых (частичных) режимах.

Существует два основных варианта гибридных судовых ЭЭС. В первом варианте схема аналогична типовой схеме единой ЭЭС, представленной на рис. 3, и отличается от нее тем, что к $HVAC$ дополнительно подключается высоковольтная тяговая АБ, как правило, литий-ионного типа, через статический обратимый преобразователь постоянно-переменного напряжения. Во втором варианте высоковольтные шины выполняются на постоянном токе — рис. 4 [25]. Такое техническое решение значительно упрощает процессы синхронизации дизель-генераторов и их параллельную работу, а также позволяет уменьшить потери в линиях, которые на постоянном токе носят только омических характер.

В схеме на рис. 4 высоковольтные дизель-генераторы $DG1$ и $DG2$ через неуправляемые выпрямители $VD1$ и $VD2$ переменного тока подключены к общим шинам постоянного тока $HVDC$ (High Voltage Direct Current). К этим же шинам через двунаправленный повышающе-понижающий DC/DC-преобразователь постоянного тока подключена в качестве источника электроэнергии тяговая высоковольтная АБ GB . Дополнительно в систему могут быть интегрированы и другие экологически чистые источники тока (например, солнечные батареи или топливные элементы [26], [27]). Подключение таких источников ЭЭ к шинам постоянного тока производится через однонаправленные повышающе-понижающие преобразователи постоянного тока DC/DC. Гребные ЭД $M1$ и $M2$ полу-

чают питание от шин *HVDC* посредством преобразователей *UZ1* и *UZ2*. Питание общесудовых потребителей электроэнергии от высоковольтных шин *HVDC* осуществляется через инвертор *UZ3* и понижающий трансформатор напряжения *TV*.

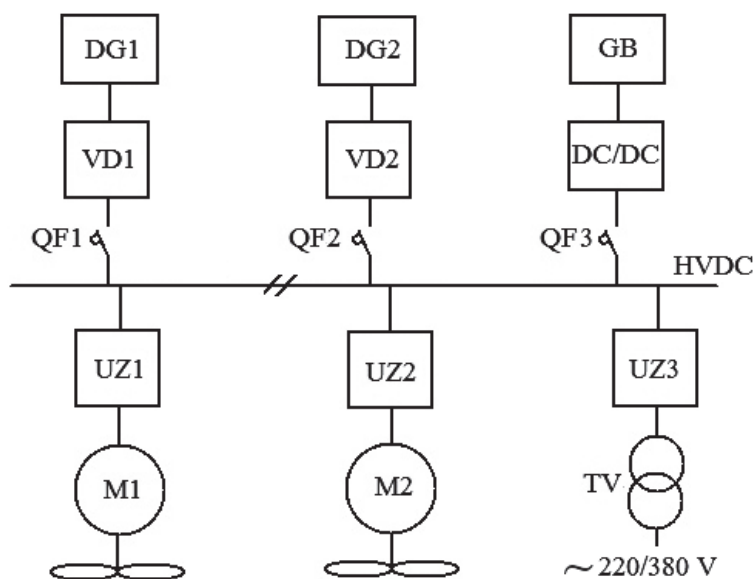


Рис. 4. Схема гибридной судовой ЭЭС

Увеличение энергоемкости АБ *GB* позволяет реже включать дизель-генераторы *DG1* и *DG2* или использовать дизель-генераторы пониженной мощности, что в обоих случаях приводит к сокращению вредных выбросов с судна в окружающую среду.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрен способ снижения загруженности автомобильных дорог во Владивостоке за счет развития морского прибрежного транспорта с пониженным расходом ГСМ.
2. Предложена комбинированная электроэнергетическая установка для СПК, использование которой позволяет снизить потребление ГСМ данными судами.
3. Выполнен экономический расчет, показывающий, что наименьшие эксплуатационные расходы имеют суда с комбинированными электроэнергетическими установками. Суда прибрежного и внутривортового плавания с данной установкой параллельного типа могут быть использованы как на коротких, так и на сравнительно длинных маршрутах, и характеризуются при этом высокими экологическими показателями и низкими эксплуатационными расходами.
4. Эксплуатация аккумуляторных судов с их питанием от береговой сети является наиболее затратной. Экономическая привлекательность таких судов может быть повышена в том случае, если для их зарядки обустроить помимо береговой зарядной станции собственную солнечную и / или ветровую электростанцию.
5. Развитие экологически чистых морских пассажирских перевозок позволит снизить загазованность города, уменьшить загруженность автодорог города и автотрасс: Владивосток — Находка и Владивосток — Посьет, а также повысить туристическую привлекательность столицы Дальневосточного федерального округа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамчук О. Власти обсуждают очередной мегапроект // Ведомости [Электронный ресурс] / О. Адамчук. — Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2019/08/12/808646-vlasti-obsuzhdayut-megaproekt> (дата обращения: 14.01.2021).

2. *Логинова В. А.* Транспортные проблемы в городе / В. А. Логинова // Молодой ученый. — 2018. — № 21 (207). — С. 60–62.
3. *Бирюков В. К.* Проблемы транспортных проблем городов и возможные пути их решения / В. К. Бирюков, А. В. Власов, К. Н. Демченко // Международный научно-исследовательский журнал № 2–1 (33) (2015): 27–29.
4. *Лобанов Е. М.* Транспортные проблемы современных больших городов / Е. М. Лобанов // Транспорт Российской Федерации. — 2005. — № 1 (1). — С. 29–31.
5. *Веревкин В. Ф.* Электроходы на Дальнем Востоке / В. Ф. Веревкин. — Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2006. — 134 с.
6. *Бурков А. Ф.* Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А. Ф. Бурков, В. В. Миханюшин, Нгуен Ван Ха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
7. *Ерофеев В. Л.* Основы энергосбережения. Энергетическая эффективность водного транспорта: монография / В. Л. Ерофеев, В. В. Маркин. — СПб.: Судостроение, 2006 (СПб.: ИПЦ ФГОУ ВПО СПГУВК). — 219 с.
8. *Костин А. В.* Особенности ценообразования на морском транспорте и способы повышения его экономичности / А. В. Костин // Молодежь и наука: шаг к успеху. — Курск, 2019. — С. 246–249.
9. *Jayasinge S.* Electro-technologies for energy efficiency improvement and low carbon emission in maritime transport / S. Jayasinge, G. Lokuketagoda, H. Enshaei, V. Shagar, D. Ranmuthugala // 16th Annual General Assembly of the International Association of Maritime Universities. — 2015. — Pp. 119–123.
10. *Sciberras E. A.* Reducing shipboard emissions—Assessment of the role of electrical technologies / E. A. Sciberras, B. Zahawi, D. J. Atkinson // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2017. — Vol. 51. — Pp. 227–239. DOI: 10.1016/j.trd.2016.10.026.
11. *Миханюшин В. В.* Комбинированная судовая энергетическая установка / В. В. Миханюшин // Интеллектуальный потенциал вузов - на развитие Дальневосточного региона России: материалы X международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2008. — Кн. 2. — С. 51–53.
12. *Миханюшин В. В.* Комбинированная энергетическая установка для судов прибрежного плавания / В. В. Миханюшин // Вологодские чтения: сб. материалов науч. конф. — Владивосток: ДВГТУ, 2009. — С. 134–137.
13. *Веревкин В. Ф.* Возможности использования комбинированных энергоустановок на малотоннажных судах / В. Ф. Веревкин, В. В. Миханюшин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. — № 1. — С. 259–262.
14. *Миханюшин В. В.* Комбинированная энергетическая установка судна — электрохода / В. В. Миханюшин // Материалы XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Томск: ТПУ, 2010. — Т. 1. — С. 83–84.
15. Autonomous ship project, key facts about YARA Birkeland [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.kongsberg.com/ru/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/> (дата обращения: 14.01.2021).
16. ForSea — Zero Emission operation [Электронный ресурс] / ABB official website. — Режим доступа: <https://new.abb.com/marine/marine-references/forsea> (дата обращения 14.01.2021).
17. *Al-Falahi Monaaf D. A.* Power Management Optimization of Hybrid Power Systems for Electric Ferries: Doctor of Philosophy Thesis / Monaaf D. A. Al-Falahi. University of Tasmania: Australian Maritime College College of Sciences and Engineering, 2019. — 132 p.
18. Batteries on board ocean-going vessels. — Denmark: MAN Energy Solutions, 2019. — 36 p.
19. Преобразователь частоты CONTROL-A310 380В 3Ф 500кВт 930А общепромышленный G-режим ИЕК [Электронный ресурс] / ИЕК official website. — Режим доступа: <https://iek-rus.ru/preobrazovatel-chastoty-control-a310-380v-3f-500kvt-930a-obs/> (дата обращения: 02.01.2021).
20. Преобразователь частоты CONTROL-A310 380В 3Ф 75–93кВт 152–176А ИЕК [Электронный ресурс] / ИЕК official website. — Режим доступа: <https://iek-rus.ru/preobrazovatel-chastoty-control-a310-380v-3f-75-93kvt-152-17/> (дата обращения 02.01.2021).
21. Пат. 2716514 Российская Федерация, МПК В63Н, В60W 20/00. Способ разгона глиссирующего судна / В. В. Миханюшин, И. М. Наумов; заяв. и патентообл. МГУ им. адм. Г. И. Невельского. — № 2019112769; заявл. 25.04.2019; опубл. 12.03.2020, Бюл. № 8.

22. Knight S. Digital Age / S. Knight // *Electric & Hybrid Marine Technology International*. — 2018. — October. — Pp. 30–34.
23. Thornton J. Simply the best! / J. Thornton // *Electric & Hybrid Marine Technology International*. — 2018. — October. — Pp. 42–46.
24. Gagatsi E. Exploring the potentials of electrical waterborne transport in Europe: the E-ferry concept / E. Gagatsi, T. Estrup, A. Halatsis // *Transportation Research Procedia*. — 2016. — Vol. 14. — Pp. 1571–1580. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.122.
25. Jin Z. Hierarchical control design for a shipboard power system with DC distribution and energy storage aboard future more-electric ships / Z. Jin, L. Meng, J. M. Guerrero, R. Han // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2017. — Vol. 14. — Is. 2. — Pp. 703–714. DOI: 10.1109/TII.2017.2772343.
26. Bassam A. M. An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel / A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock, P. A. Wilson // *International journal of hydrogen energy*. — 2016. — Vol. 41. — Is. 47. — Pp. 22453–22464. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.049.
27. Othman M. Scheduling of power generation in hybrid shipboard microgrids with energy storage systems / M. Othman, A. Anvari-Moghaddam, N. Ahamad, S. Chun-Lien, J. M. Guerrero // *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. — IEEE, 2018. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8494363.

REFERENCES

1. Adamchuk, Olga. “Vlasti obsuzhdayut ocherednoi megaproekt.” *Vedomosti*. Web. 14 Jan. 2021 <<https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2019/08/12/808646-vlasti-obsuzhdayut-megaproekt>>.
2. Loginova, V. A. “Transportnye problemy v gorode.” *Molodoi uchenyi* 21(207) (2018): 60–62.
3. Biriukov, V. K., A. V. Vlasov, and K. N. Demchenko. “Problems of urban transport systems and possible solutions.” *International Research Journal* 2–1(33) (2015): 27–29.
4. Lobanov, E. M. “Transportnye problemy sovremennykh bol’shikh gorodov.” *Transport of the Russian Federation* 1(1) (2005): 29–31.
5. Verevkin, V. F. *Elektrokhody na Dal’nem Vostoke*. Vladivostok: Mor. Gos. Un-t im. adm. G. I. Nevel’skogo, 2006.
6. Burkov, Alexey F., Victor V. Mikhanoshin, and Nguyen Khan Ha. “Improving the management efficiency of combined power plants of ships.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
7. Erofeev, V. L., and V. V. Markin. *Osnovy energosberezheniya. Energeticheskaya effektivnost’ vodnogo transporta: monografiya*. SPb.: Sudostroenie, 2006.
8. Kostin, A. V. “Osobennosti tsenoobrazovaniya na morskoy transporte i sposoby povysheniya ego ekonomichnosti.” *Molodezh’ i nauka: shag k uspekhu*. Kursk, 2019. 246–249.
9. Jayasinge, S., G. Lokuketagoda, H. Enshaei, V. Shagar, and D. Ranmuthugala. “Electro-technologies for energy efficiency improvement and low carbon emission in maritime transport.” *16th Annual General Assembly of the International Association of Maritime Universities*. 2015. 119–123.
10. Sciberras, Edward A., Bashar Zahawi, and David J. Atkinson. “Reducing shipboard emissions—Assessment of the role of electrical technologies.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 51 (2017): 227–239. DOI: 10.1016/j.trd.2016.10.026.
11. Mikhanoshin, V. V. “Kombinirovannaya sudovaya energeticheskaya ustanovka.” *Materialy X mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Intellektual’nyi potentsial VUZov — na razvitie Dal’nevostochnogo regiona Rossii»*. Vol. 2. Vladivostok: Izd-vo VGUES, 2008. 51–53.
12. Mikhanoshin, V.V. “Kombinirovannaya energeticheskaya ustanovka dlya sudov pribrezhnogo plavaniya.” *Sbornik materialov nauch. konf. «Vologdinskije chteniya»*. Vladivostok: DVGUTU, 2009. 134–137.
13. Verevkin, V. F., and V. V. Mikhanoshin. “The possibility of the application of hybrid power plant of small ships.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal’nego Vostoka* 1 (2009): 259–262.
14. Mikhanoshin, V.V. “Kombinirovannaya energeticheskaya ustanovka sudna — elektrokhoda.” *Materialy XVI mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. Vol. 1. Tomsk: TPU, 2010. 83–84.
15. Autonomous ship project, key facts about YARA Birkeland. Web. 14 Jan. 2021 <<https://www.kongsberg.com/ru/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/>>.
16. ForSea — Zero Emission operation // ABB official website. Web. 14 Jan. 2021 <<https://new.abb.com/marine/marine-references/forsea>>.

17. Al-Falahi, Monaaf Dheaa Abdulradha. Power Management Optimization of Hybrid Power Systems for Electric Ferries. Doctor of Philosophy Thesis. University of Tasmania: Australian Maritime College College of Sciences and Engineering, 2019.
18. *Batteries on board ocean-going vessels*. Denmark: MAN Energy Solutions, 2019.
19. Preobrazovatel' chastoty CONTROL-A310 380V 3F 500kVt 930A obshchepromyshlennyi G-rezhim IEK //IEK official website. Web. 2 Jan. 2021 <<https://iek-rus.ru/preobrazovatel-chastoty-control-a310-380v-3f-500kvt-930a-obs/>>.
20. Preobrazovatel' chastoty CONTROL-A310 380V 3F 75–93kVt 152–176A IEK // IEK official website. Web. 2 Jan. 2021 <<https://iek-rus.ru/preobrazovatel-chastoty-control-a310-380v-3f-75-93kvt-152-17/>>.
21. Mikhanoshin, V. V., and I. M. Naumov. RU 2716 514 C1, IPC B 63 H, B 60 W 20/00. Spособ razgona glis-siruyushchego sudna. Russian Federation assignee. Publ. 12 March 2020.
22. Knight, S. “Digital Age.” *Electric & Hybrid Marine Technology International* October (2018). 30–34.
23. Thornton, J. “Simply the best!” *Electric & Hybrid Marine Technology International* October (2018): 42–46.
24. Gagatsi, Eliza, Thomas Estrup, and Aristos Halatsis. “Exploring the potentials of electrical waterborne transport in Europe: the E-ferry concept.” *Transportation Research Procedia* 14 (2016): 1571–1580. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.122.
25. Jin, Zheming, Lexuan Meng, Josep M. Guerrero, and Renke Han. “Hierarchical control design for a ship-board power system with DC distribution and energy storage aboard future more-electric ships.” *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14.2 (2017): 703–714. DOI: 10.1109/TII.2017.2772343.
26. Bassam, Ameen M., Alexander B. Phillips, Stephen R. Turnock, and Philip A. Wilson. “An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel.” *International journal of hydrogen energy* 41.47 (2016): 22453–22464. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.049.
27. Othman, Muzaidi, Amjad Anvari-Moghaddam, Norbaizura Ahamad, Su Chun-Lien, and Josep M. Guerrero. “Scheduling of power generation in hybrid shipboard microgrids with energy storage systems.” *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2018. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8494363.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурков Алексей Федорович —
доктор технических наук, профессор
Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток,
о. Русский, п. Аякс, 10
e-mail: burkov.22@mail.ru

Миханосин Виктор Викторович —
доцент
Морской государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: tetrodoksin@mail.ru

Нгуен Ван Ха — аспирант
Научный руководитель:
Бурков Алексей Федорович
Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток,
о. Русский, п. Аякс, 10
e-mail: khanguyenx6@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burkov, Alexey F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Far Eastern Federal University
10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: burkov.22@mail.ru

Mikhanoshin, Victor V. —
Associate professor
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: tetrodoksin@mail.ru

Nguyen Van Ha — Postgraduate
Supervisor:
Burkov, Alexey F.
Far Eastern Federal University
10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: khanguyenx6@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2020 г.
Received: December 16, 2020.