

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389

IMPROVING THE MANAGEMENT EFFICIENCY OF COMBINED POWER PLANTS OF SHIPS

A. F. Burkov¹, V. V. Mikhanoshin², Nguyen Van Kha¹

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

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

A scheme of a ship's combined power plant of a parallel type with a buffer energy source, which in general includes a battery, a diesel engine, a synchronous shaft generator, and propulsors in the form of adjustable pitch propeller, is proposed. A method for controlling this combined installation based on regulating the angle of rotation of the propeller blades as a function of the power on the propeller shaft and the degree of discharge of the battery, at which the load factor of the diesel engine remains virtually unchanged and equal to the nominal at any speed of the vessel and any static moment of resistance on the propeller shaft. This patented method, when it is used, can significantly reduce the fuel consumption by diesel engines on ships whose operation are characterized by frequent maneuvering and share modes, increase the operational life of diesel engines, and reduce harmful emissions into the atmosphere. A recommendation for choosing the ratios of powers and parameters of the used power sources is given. It has been shown that in general, it is advisable to choose these ratios of sources powers so that the charging power of the battery corresponds, minus losses in intermediate converters, to the rated power of the diesel engine. It has been graphically show that for any linear or stepwise power change on the propeller, due to the fact that the mechanical time constant is more than an order of magnitude higher than the electromagnetic one, the load factor of the diesel engine remains unchanged, and it operates at a constant speed with almost constant torque on the shaft.

Keywords: battery, shaft generator, main engine, propeller, combined power plant, ecology.

For citation:

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 admiral S. O. Makarova* 12.2 (2020): 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.

УДК 629.122

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ СУДОВ

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

Приведена разработанная на основании выполненных исследований схема судовой комбинированной энергетической установки параллельного типа с буферным источником энергии, которая в общем случае включает в себя аккумуляторную батарею, дизельный двигатель, валомашину синхронного типа и движители в виде гребного винта регулируемого шага. Предложен запатентованный способ управления разработанной комбинированной установкой, основанный на регулировании угла поворота лопастей винта регулируемого шага в функции мощности на гребном валу и степени разрядки аккумуляторной батареи, при котором коэффициент загрузки дизельного двигателя остается практически неизменным

и равным номинальному при любой скорости движения судна и любом статическом моменте сопротивления на гребном валу. Использование этого способа позволяет существенно сократить расход топлива дизельными двигателями на судах, эксплуатация которых характеризуется частыми маневренными и долевыми режимами, увеличить эксплуатационный ресурс дизельных двигателей, а также уменьшить вредные выбросы в атмосферу. Даны рекомендации по выбору соотношений мощностей и параметров используемых источников электроэнергии. Показано, что в общем случае эти соотношения мощностей источников целесообразно выбирать таким образом, чтобы зарядная мощность аккумуляторной батареи соответствовала, за вычетом потерь в промежуточных преобразователях, номинальной мощности дизельного двигателя. Графически показано, что при любом: линейном или ступенчатом изменении мощности на гребном винте, ввиду того, что механическая постоянная времени более чем на порядок превышает электромагнитную, коэффициент загрузки дизельного двигателя остается неизменным и он работает с неизменной частотой вращения и практически неизменным моментом на валу. Техническая реализация результатов выполненных исследований представляется целесообразной в первую очередь для судов прибрежного плавания.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, валогенератор, главный двигатель, гребной винт, комбинированная энергетическая установка, экология.

Для цитирования:

Бурков А. Ф. Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А. Ф. Бурков, В. В. Миханович, 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.

Введение (Introduction)

Одним из приоритетных направлений в судостроении, анализ современного состояния и перспективы развития которого представлены в [1], является совершенствование судовых энергетических комплексов. К главным целям этого направления, помимо увеличения надежности, относится улучшение их экологических и экономических показателей, обусловленное в первую очередь ухудшающейся экологической обстановкой, значительный вклад в которую вносит морской и речной транспорт, а также высокой стоимостью горюче-смазочных материалов.

Вступившая в 2005 г. в силу «Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов» (МАРПОЛ) обязывает судовладельцев принимать меры по снижению вредных выбросов (окислов азота и серы, углекислого газа CO_2) в атмосферу главными энергетическими установками их судов. Кроме того, к принятию мер по сокращению и ограничению выбросов парниковых газов транспортом обязывает и Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций (ООН) об изменении климата, принятый 11 декабря 1997 г. Невыполнение этих требований приводит к штрафам судовладельцев или к тому, что многие порты для экологически грязных судов закрываются. Регламентация выбросов парниковых газов рассмотрена в [2].

Известен ряд способов и реализованных технических решений, применение которых позволяет, в той или иной степени, уменьшать расход топлива и сокращать вредные выбросы в атмосферу главными судовыми дизельными установками [3]–[5]. Кроме того, на экономию топливно-энергетических ресурсов оказывают влияние следующие факторы:

- уменьшение сопротивлений движению судов, совершенствование конструкции корпусов судов (у катамаранов, тримаранов, судов на подводных крыльях, глиссирующих судов и др.);
- применение дополнительных движителей, использующих силу ветра (классических парусов, роторных парусов (турбопарусов) Флеттнера) [6], [7];
- применение винтов регулируемого шага (установка таких движителей, как известно, позволяет оптимизировать работу главных двигателей и снижать вредные выхлопы);
- применение альтернативных видов топлива с пониженным содержанием серы и других токсичных веществ (биодизельного топлива, биомазута, газообразного топлива: природного газа, метанола, аммиака, водорода и др.) [8];
- совершенствование конструкций дизельных установок (электронная регулировка системы топливоподачи, применение топливных присадок, очистка выхлопных газов с помощью систем

рециркуляции выхлопных газов, каталитических нейтрализаторов (конвертеров) и их фильтров-поглотителей (адсорберов).

Направления повышения эффективности и конкурентоспособности современных электроходов и перспективы их дальнейшего развития рассмотрены в [9]–[11] и др. Сравнительно новым способом повышения экологических и экономических показателей энергетических установок судов является применение комбинированных энергетических установок (КЭУ) [12], [13] последовательного (рис. 1, а) или параллельного (рис. 1, б) типа. В первом случае (см. рис. 1, а) дизель-генератор (ДГ) работает на полупроводниковый преобразователь (ПП), к которому, в свою очередь, подключена аккумуляторная батарея (АБ) и гребной электродвигатель (ГЭД). Посредством ПП осуществляется регулирование частоты вращения ГЭД, а также отбор тока от АБ и ее зарядка. Во втором случае (см. рис. 1, б) ДГ работает на гребной винт через разобщительную муфту М1 и суммирующий редуктор (СР). На гребной винт через СР и разобщительную муфту М2 также может работать и ГЭД, получающий питание от ПП.

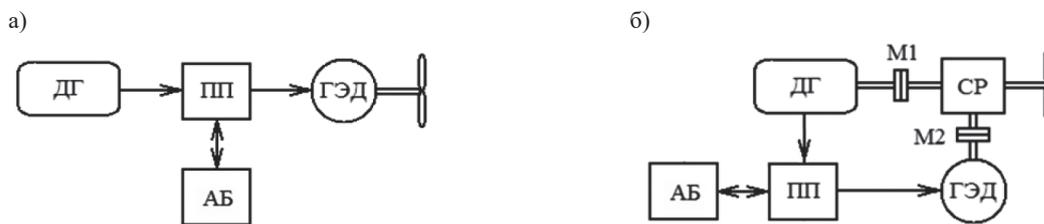


Рис. 1. Структурные схемы КЭУ:
 а — последовательного типа; б — параллельного типа

Основным достоинством КЭУ последовательного типа является отсутствие механической связи между главным источником энергии (ДГ) и гребным винтом, жестко соединенным с ГЭД. Такое решение позволяет посредством управления ПП регулировать частоту вращения гребного винта в широком диапазоне и реверсировать направление его вращения, улучшая маневренные характеристики судов. ДГ при этом вращается практически с неизменной частотой в одном направлении. Недостатком этой схемы является относительно низкое значение коэффициента полезного действия (КПД), так как энергия, вырабатываемая дизелем, подвергается тройному преобразованию:

$$\eta = \eta_{\text{дг}} \cdot \eta_{\text{пп}} \cdot \eta_{\text{гэд}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{дг}}$, $\eta_{\text{пп}}$, $\eta_{\text{гэд}}$ — КПД дизель-генератора, ПП и ГЭД соответственно.

Преимуществом КЭУ параллельного (см. рис. 1, б) типа является ее повышенный КПД по сравнению со схемой, представленной на рис. 1, а, так как механическая энергия ДГ может быть передана на гребной винт напрямую, без промежуточных преобразований, за исключением небольших потерь в валопроводе и СР. Ее недостатком является необходимость регулирования топливоподачи в ДГ при каждом изменении частоты вращения гребного винта.

Работа дизельного двигателя в переходных режимах и режимах, отличных от номинального, характеризуется повышенным удельным расходом топлива, большим содержанием вредных веществ в выхлопных газах, ускоренным нагарообразованием и закоксовкой поршневых колец. Кроме того, для реверса гребного винта необходимо использовать или реверс-редуктор, или реверсивные дизели, которые сложнее и дороже обычных нереверсивных дизелей. Остановка судов с такими КЭУ осуществляется, как правило, за счет действия сил сопротивления воды (пассивным торможением). Поэтому путь, проходимый судном при таком пассивном торможении значительно больше, чем при активном торможении, когда остановка судна производится за счет реверса гребного винта. Соответственно в этой схеме больше и время остановки судна, которое характеризуется большей инерционной составляющей, и несколько худшей управляемостью, что сказывается, в свою очередь, на безопасности мореплавания. К очередным задачам дальнейшего развития КЭУ

относится совершенствование их систем управления с целью оптимизации эксплуатационных характеристик, улучшающих экологические и технико-экономические показатели.

Целью и задачами настоящего исследования представляется организация такого управления КЭУ, при котором обеспечивались бы экологические и технико-экономические показатели, соответствующие современным требованиям к пропульсивным установкам судов, функционирующим как в стационарных, так и в переходных режимах работы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На рис. 2 представлена предложенная структурная схема силового канала КЭУ с валомашинной (ВМ) и винтом регулируемого шага (ВРШ).

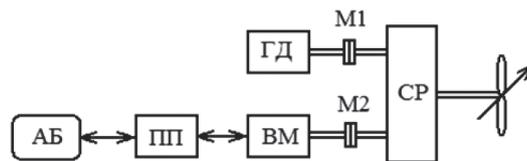


Рис. 2. Структурная схема КЭУ с ВМ и ВРШ:

ГД — главный (первичный) двигатель; М1 и М2 — разобщительные муфты;
АБ — аккумуляторная батарея; ПП — полупроводниковый преобразователь;
ВМ — обратимая валомашина; СР — суммирующий редуктор

В качестве движителя пропульсивной установки (см. рис. 2) используется ВРШ, частота вращения которого обеспечивается через редуктор рабочим ГД посредством муфты М1 или функционирующей системой «АБ–ПП–ВМ» через муфту М2. Необходимо отметить, что ВМ представляет собой синхронную машину, способную работать как в генераторном, так и в двигательном режиме. Способ управления судовой КЭУ, структурная схема которой представлена на рис. 2, защищен патентом на изобретение [14]. При проектировании и технической реализации КЭУ необходимым является решение вопросов, связанных с расчетом и выбором их компонентов. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок представлен в [15]. К предпочтительному использованию в данном случае относятся АБ литий-ионного (Li-ion) или литий-железо-фосфатного (Li-Fe-PO₄ (LFP)) типа такой емкости и напряжения, при которых соответствующая зарядная мощность, определяемая по формуле, соизмерима с номинальной мощностью ГД $P_{ГД,ном}$:

$$P_3 = U_3 \cdot I_3, \quad (2)$$

где P_3 — зарядная мощность АБ, Вт; U_3 — среднее зарядное напряжение, В; I_3 — зарядный ток, А. Зарядный ток I_3 определяется из следующего соотношения:

$$I_3 = k_{АБ} \cdot C_{АБ}, \quad (3)$$

где $k_{АБ}$ — коэффициент, зависящий от типа используемой АБ, 1/ч; $C_{АБ}$ — емкость АБ, А·ч.

При наличии АБ существенно больших необходимых емкостей время их подзарядки от ДГ пропорционально увеличивается, так как мощности ДГ являются ограниченными. Такой вариант выбора АБ целесообразно использовать в случаях, когда основная зарядка АБ производится от береговой сети. Выбор АБ меньшей указанного значения емкости приводит к тому, что скорость их подзарядки от ДГ увеличивается. При этом экономический эффект от применения такой энергоустановки очевидно будет невысоким, так как АБ, ввиду ее небольшой емкости, будет сравнительно быстро разряжаться.

Рассматриваемый способ управления судовой КЭУ реализуется следующим образом. Судно приводится в движение путем подачи напряжения от АБ на ВМ, работающую в двигательном режиме. Разобщительная муфта М1 ГД при этом размыкается, а М2 замыкается. Разгон судна, движение и регулирование частоты вращения ВРШ производят с помощью ПП до тех пор, пока напряжение АБ не уменьшится до некоторого заданного значения, после чего датчик напряжения (ДН)

АБ подает сигнал системе дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) (на рис. 2 не показаны) на запуск ГД с предварительным подключением его к СР, приведя разобшительную муфту М1 ГД в замкнутое состояние. С момента соединения ГД с гребным ВРШ регулирование его упора производится путем изменения шага ВРШ при постоянной частоте вращения вала ГД.

Поддержание момента сопротивления на валу ГД постоянным и равным номинальному в этом случае осуществляется следующим образом. При моменте сопротивления на гребном винте, меньшем номинального момента ГД, ВМ посредством системы ДАУ переводится в режим генератора, от которого при помощи ПП и его системы управления отбирается такое количество электроэнергии, которое необходимо для создания дополнительного тормозного момента, равного разности между номинальным моментом ГД и моментом сопротивления ВРШ. Определение системой ДАУ степени загрузки ГД производится автоматически по показаниям датчиков температуры его выхлопных газов. Вырабатываемый ВМ в генераторном режиме переменный ток

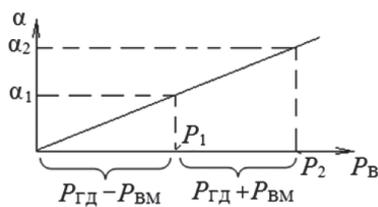


Рис. 3. Принцип управления ВРШ в функции мощности на гребном валу P_B

посредством ПП выпрямляется и поступает в судовую сеть и / или на зарядку АБ. Таким образом, при малых углах разворота лопастей ВРШ, меньших α_1 (рис. 3), ВГ работает в генераторном режиме, а управление энергоустановкой заключается в одновременном согласованном воздействии на шаг гребного винта и на ПП.

Углом α_1 на рис. 3 обозначен угол поворота лопастей ВРШ, соответствующий номинальной нагрузке ГД (P_1), углом α_2 — максимальный угол ВРШ, соответствующий максимальному его упору; P_{VM} — активная мощность валомашины.

Для получения скорости судна большей той, которая соответствует углу α_1 поворота лопастей ВРШ, ВМ, посредством системы ДАУ, переводится в двигательный режим. Разобшительная муфта М2 при этом находится во включенном положении. ПП с системой управления обеспечивает частотное регулирование данного электродвигателя, источником электроэнергии которого служит АБ. Таким образом, увеличивая крутящий момент ВМ и одновременно соответствующим образом шаг гребного винта, обеспечивается увеличение скорости судна.

Результаты (Results)

На рис. 4 представлены графики зависимостей мощности на гребном валу (винте) P_B и мощности валомашины P_{VM} в функции времени t при выполнении условия $P_{GD}(t) = P_{GDном}(t)$, согласно которым мощность на гребном валу (винте) изменяется в зависимости от условий эксплуатации (навигационной обстановки).

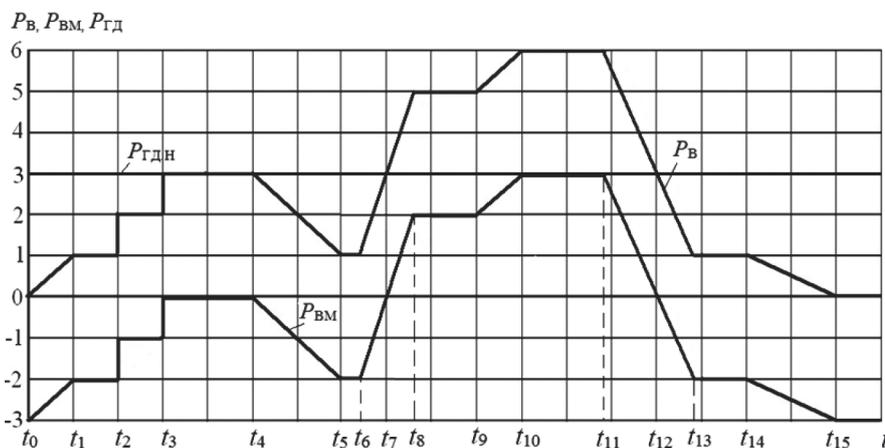


Рис. 4. Графики зависимостей $P_B = f(t)$ и $P_{VM} = f(t)$ при $P_{GD}(t) = P_{GDном}(t) = \text{const}$

Мощность на гребном винте $P_b(t)$ (см. рис. 4) определяется в виде

$$P_b(t) = P_{ГД}(t) + P_{ВМ}(t). \quad (4)$$

При кратковременной стоянке судна у причала (момент времени t_0 — см. рис. 4) потребляемая гребным винтом мощность $P_b = 0$. При этом мощность $P_{ГДном}$, вырабатываемая ГД посредством валомашины, работающей в режиме валогенератора (мощность $P_{ВМ}$ (см. рис. 4) имеет отрицательные значения), за вычетом потерь, идет на заряд силовых АБ. При линейном законе изменения (увеличения) мощности $P_b(t)$ на одну ступень в интервале времени $t_0 - t_1$ по аналогичной линейной зависимости на такую же величину снижается и мощность $P_{ВМ}$, вырабатываемая ВМ. На временном интервале $t_1 - t_2$ потребляемая гребным винтом мощность $P_b(t)$ соответствует одной единице уровня мощности (ступени), а вырабатываемая ВМ мощность $P_{ВМ}(t)$ соответствует двум ступеням. Таким образом, 1/3 мощности $P_{ГДном}$ поступает на гребной винт, а 2/3 мощности $P_{ГДном}$ преобразуется посредством ВМ, работающей в генераторном режиме, в электрическую энергию, которая расходуется на судовые электропотребители и на подзарядку АБ.

Аналогичным образом производится распределение энергии ГД и на других временных интервалах, но всегда таким образом, что коэффициент его загрузки остается неизменным и равным номинальному значению. На временном интервале $t_3 - t_4$ вся вырабатываемая ДГ мощность $P_{ГД}$ расходуется гребным винтом. При этом валомашина ВМ посредством разобщительной муфты М2 (см. рис. 2) находится в отключенном состоянии. На интервале времени $t_{10} - t_{11}$ (рис. 4) гребной винт развивает номинальную мощность ($P_b = P_{в.ном}$). При потребляемой гребным винтом мощности P_b , большей, чем мощность $P_{ГД}$ ГД (интервал $t_7 - t_{12}$ (см. рис. 4)), ВМ переводится в двигательный режим с питанием от АБ через ПП. Таким образом, в зависимости от потребляемой гребным винтом мощности P_b , ВМ переводится в генераторный или в двигательный режим работы. При этом регулирование ее мощности производится таким образом, что коэффициент загрузки ГД остается неизменным и равным номинальному значению.

Вследствие того, что постоянная времени электрической части схемы более чем на порядок меньше постоянной времени ее механической части, зависимость мощности ВМ $P_{ВМ}(t)$ практически повторяет зависимость мощности гребного винта $P_b(t)$ (эквидистантна ей), отличаясь от нее на постоянную величину, равную номинальной мощности ГД $P_{ГД}$. При снижении напряжения АБ и / или ее емкости до минимально допустимого значения ее разрядка в данном режиме прекращается до тех пор, пока ее напряжение посредством подзарядки не увеличится до допустимого значения по мере наличия избыточной мощности ГД. Угол поворота α лопастей ВРШ при этом ограничивается углом α_1 , соответствующим мощности на винте, равной номинальной мощности ГД. Зарядка АБ производится обычно в ночное время суток при стоянке судна у причала с подачей электроэнергии от береговой сети, что позволяет экономить топливный и моторесурс ГД судна.

Как правило, рабочий режим традиционных пассажирских малотоннажных судов включает разгон судна, движение с установившейся скоростью в течение 7–50 мин, движение по инерции со скоростью менее номинальной, торможение и стоянку, составляющие 7–5 мин. Таким образом, в течение рабочего дня ГД работает в номинальном, долевых (частичных) и холостого хода эксплуатационных режимах, неоднократно переходя из одного на другой.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты выполненных исследований обладают научной новизной, заключающейся в способе управления предложенной судовой КЭУ (см. рис. 2), позволяющем обеспечить номинальные режимы работы ГД в условиях переменных нагрузок на движителе (гребном валу), и вследствие этого достичь значений экологических показателей, соответствующих статическим номинальным режимам работы ГД. КЭУ рекомендуются для внедрения на судах внутривертового и прибрежного плавания, работающих с частыми маневренными режимами. Повышенные, по сравнению с изготовлением обычных дизельных установок, капитальные вложения на постройку предложенных КЭУ представляются оправданными вследствие того, что суда с КЭУ име-

ют более низкие эксплуатационные расходы, обусловленные в первую очередь использованием дизельных ГД меньшей (практически вдвое) установленной мощности, работающих практически в номинальных режимах во всех допустимых диапазонах изменения нагрузок на гребных валах. Способствуют дальнейшему развитию судовых пропульсивных комплексов, включающих гребные электрические установки, в частности КЭУ.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложена судовая КЭУ, которая с описанным способом управления может быть использована как на малотоннажных судах с ориентировочными мощностями на гребных валах до 250 кВт, так и на более крупных судах (например, паромах) с мощностями на гребных валах до 3 МВт, работающих с частыми маневренными режимами.
2. При внедрении предложенной КЭУ достигается повышение эффективности использования ГД, уменьшение потребления горюче-смазочных материалов и сокращение вредных выбросов в атмосферу.
3. Применение предложенной КЭУ с использованием дополнительного источника энергии в виде АБ позволяет уменьшить установленную мощность ГД, обеспечивая при этом стационарную работу последнего с номинальными параметрами, и как следствие, сократить эксплуатационные расходы, повысить качество и комфортность обслуживающего персонала и пассажиров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатьева Н. А.* Современное состояние и перспективы развития судостроения в российской федерации / Н. А. Игнатьева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 4-6. — С. 1159–1162.
2. *Иванченко А. А.* Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
3. *Adamkiewicz A.* Technologies reducing exhaust gas emissions from large marine diesel engines / A. Adamkiewicz, K. Kołwzan // Silniki Spalinowe. — 2007. — Vol. 46. — No. SC3. — Pp. 79–90.
4. *Myśków J.* Marine engine exhaust gas emission after treatment system concept / J. Myśków, T. Borkowski, M. Bludszweit, W. Frohlingsdorf // Journal of KONES Powertrain and Transport. — 2011. — Vol. 18. — No. 4. — Pp. 307–315.
5. *Патров Ф. В.* Снижение концентраций оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей при использовании водотопливных эмульсий / Ф. В. Патров, О. С. Вахромеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 1. — С. 141–146.
6. *Craft T. J.* Back to the future: Flettner-Thom rotors for maritime propulsion / T. J. Craft, H. Iacovides, N. Johnson, B. E. Launder // THMT-12. Proceedings of the Seventh International Symposium On Turbulence Heat and Mass Transfer. — Palermo, Italy: 2012. — Pp. 1104–1113. DOI: 10.1615/ICHMT.2012.ProcSevIntSympTurbHeatTransfPal.1150.
7. *Craft T. J.* Dynamic performance of Flettner rotors with and without Thom discs / T. J. Craft, H. Iacovides, B. E. Launder // Proc. 7th International Symp. on Turbulence & Shear Flow Phenomena. — Ottawa, 2011. — Paper 6C-3.
8. *Ведрученко В. Р.* Альтернативные виды топлива для судовых дизелей / В. Р. Ведрученко, И. И. Маляхов. — Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) ФБОУ ВПО «НГАВТ», 2013. — 173 с.
9. *Bolvashenkov I.* Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems / I. Bolvashenkov, H. G. Herzog, A. Rubinraut, V. Romanovskiy // 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). — IEEE, 2014. — Pp. 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.
10. *Bolvashenkov I.* Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas / I. Bolvashenkov, H. G. Herzog, A. Rubinraut, V. Romanovskiy // 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). — IEEE, 2014. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.

11. Романовский В. В. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

12. De Breucker S. Possible applications of plug-in hybrid electric ships / S. De Breucker, E. Peeters, J. Driesen // 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. — IEEE, 2009. — Pp. 310–317. DOI: 10.1109/ESTS.2009.4906530.

13. Bennabi N. Hybrid propulsion systems for small ships: Context and challenges / N. Bennabi, J. F. Charpentier, H. Menana, J. Y. Billard, P. Genet // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). — IEEE, 2016. — Pp. 2948–2954. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732943.

14. Пат. 2483972 Российская Федерация, МПК В60W 20/00. Способ управления судовой комбинированной энергетической установкой / В.В. Миханюшин; заяв. и патентообладатель Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского. — № 2011140644/11; заявл. 06.10.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

15. Романовский В. В. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок / В. В. Романовский, М. А. Сюбаев, И. М. Болвашенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.

REFERENCES

1. Ignatyeva, N. A. “Current status and prospects of shipbuilding development in the Russian Federation.” *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* 4-6 (2016): 1159–1162.

2. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

3. Adamkiewicz, Andrzej, and K. Kołwzan. “Technologies reducing exhaust gas emissions from large marine diesel engines.” *Silniki Spalinowe* 46.SC3 (2007): 79–90.

4. Myśków, Jarosław, T. Borkowski, M. Bludszuweit, and W. Frohlingsdorf. “Marine engine exhaust gas emission after treatment system concept.” *Journal of KONES* 18 (2011): 307–315.

5. Patrov, Fedor Vladimirovich, and Oleg Sergeyevech Vakhromeev. “The reduction of nitrogen oxide concentration in exhaust gases of ship diesel engines applying oil-to-water emulsions.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2010): 141–146.

6. Craft, T. J., H. Iacovides, N. Johnson, and B. E. Launder. “Back to the future: Flettner-Thom rotors for maritime propulsion.” *THMT-12. Proceedings of the Seventh International Symposium On Turbulence Heat and Mass Transfer*. Palermo, Italy: 2012. 1104–1113. DOI: 10.1615/ICHMT.2012.ProcSevIntSympTurbHeatTransfPal.1150.

7. Craft, Timothy J., Hector Iacovides, and Brian E. Launder. “Dynamic performance of Flettner rotors with and without Thom discs.” *Proc. 7th International Symp. on Turbulence & Shear Flow Phenomena*. Ottawa, 2011. Paper 6C-3.

8. Vedruchenko, V. R., and I. I. Malakhov. *Al'ternativnye vidy topliva dlya sudovykh dizelei*. Omsk: Omskii institut vodnogo transporta (filial) FBOU VPO «NGAVT», 2013.

9. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor Romanovskiy. “Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems.” *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2014. 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.

10. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor Romanovskiy. “Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas.” *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE, 2014. 1–4. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.

11. Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. “Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

12. De Breucker, Sven, Eefje Peeters, and Johan Driesen. “Possible applications of plug-in hybrid electric ships.” *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. IEEE, 2009. 310–317. DOI: 10.1109/ESTS.2009.4906530.

13. Bennabi, N., J. F. Charpentier, H. Menana, J. Y. Billard, and P. Genet. “Hybrid propulsion systems for small ships: Context and challenges.” *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE, 2016. 2948–2954. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732943.

14. Mikhanoshin, V. V. Sposob upravleniya sudovoi kombinirovannoi energeticheskoi ustanovkoi. RU 2 483 972, IPC B 60W 20/00. Russian Federation assignee. Publ. 10 June 2013.

15. Romanovskii, V. V., M. A. Syubaev, and I. M. Bolvashenkov. "Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(34) (2015): 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурков Алексей Федорович —
доктор технических наук, профессор
Дальневосточный федеральный университет
125993, Российская Федерация, Москва,
ул. Тверская, 11
e-mail: burkov.22@mail.ru

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

Нгуен Ван Ха —
аспирант
Научный руководитель:
Бурков Алексей Федорович
Дальневосточный федеральный университет
125993, Российская Федерация, Москва, ул.
Тверская, 11
e-mail: burkov.22@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burkov, Alexey F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Far Eastern Federal University
11 Tverskaya Str., Moscow, 125993,
Russian Federation
e-mail: burkov.22@mail.ru

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

Nguyen Van Kha —
Postgraduate
Supervisor:
Burkov, Alexey F.
Far Eastern Federal University
11 Tverskaya Str., Moscow, 125993,
Russian Federation
e-mail: burkov.22@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 марта 2020 г.

Received: March 9, 2020.