

THE RESULTS OF DESIGN AND TRIALS OF COMBINED PROPULSION PLANT FOR A BUOY BOAT

A. V. Grigoryev^{1,2}, S. M. Malyshev^{2,3}, S. V. Vorobyev³

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

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

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

Combined propulsion plants get wide spread on modern ships of foreign construction, while in the domestic shipbuilding industry there is practically no experience in the design and testing of these vessels. A distinctive feature of the combined propulsion plants is that the energy for the vessel movement is generated in them in two (or more) different types of ship engines — thermal and electric, working on a common propulsion unit — a propeller. Combined propulsion plants are complex electromechanical systems designed to ensure the movement of the vessel and the production of electricity in the various modes of operation. Combined propulsion plants conjoin the advantages of traditional propulsion systems with heat main engines and electric propulsion plants. A unified electric power system with a combined plant of a work boat is discussed in the paper. The work boat is the first vessel built in the Russian Federation with this type of propulsion system. The feature the combined propulsion plant installed on the work boat is the ability to operate the propeller electric motor in both propulsion and generator modes. The ship uses diesel generators, storage batteries and electric propulsion motor in the generator mode as the sources of electricity. The main modes of the vessel operation, the results of dock and sea trials of the unified electric power system and combined propulsion plant are briefly discussed in the paper. During the trials, the autonomous mode of operation of each electric power source on the auxiliary electric propulsion plant and ship consumers has been checked successfully. New method of synchronization of diesel-generator and autonomous inverter has been realized; it has high speed and accuracy that excludes appearance of current shot when power source connects to the main switchboard.

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

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Semen V. Vorobyev. “The results of design and trials of combined propulsion plant for a buoy boat” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 290–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-290-299.

УДК 621.315:621.3.025

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОПУЛЬСИВНОЙ УСТАНОВКИ ЛОЦМЕЙСТЕРСКОГО КАТЕРА

А. В. Григорьев^{1,2}, С. М. Малышев^{2,3}, С. В. Воробьев³

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

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

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

Темой исследования являются комбинированные пропульсивные установки (КПУ), которые находят широкое применение на современных судах зарубежной постройки, при этом в отечественном судостроении практически отсутствует опыт проектирования и испытаний судов с такими установками. Отмечается, что отличительной особенностью КПУ является то, что энергия для движения судна в них вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях: тепловых и электрических, работающих на общий движитель — гребной винт. Подчеркивается, что КПУ являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения судна и производства электроэнергии в различных режимах эксплуатации, они сочетают в себе достоинства традиционных пропульсивных установок

с тепловыми главными двигателями и гребных электрических установок. В статье рассмотрена единая электроэнергетическая системы с комбинированной установкой рабочего катера. Рабочий катер — первое судно, построенное в Российской Федерации с данным типом пропульсивной установки. Отличие КПУ, установленной на рабочем катере, является возможность работы гребного электродвигателя как в двигательном, так и в генераторном режиме. В качестве источников электроэнергии на судне применяются дизель-генераторы, аккумуляторные батареи и гребной электродвигатель, приводимый в движение от главного дизеля. В статье кратко рассмотрены основные режимы эксплуатации судна, представлены результаты швартовных и ходовых испытаний единой электроэнергетической системы и КПУ. Отмечается, что при проведении испытаний был успешно проверен автономный режим работы каждого источника электроэнергии, используемого на вспомогательной гребной электроустановке и общесудовых приемниках. В процессе проведения испытаний реализован новый способ синхронизации ДГ и автономного инвертора, отличающийся высоким быстродействием и точностью, что исключает появление бросков тока при подключении источника электроэнергии к ГРЩ.

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

Для цитирования:

Григорьев А. В. Результаты проектирования и испытаний комбинированной пропульсивной установки лоцмейстерского катера / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, С. В. Воробьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 290–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-290-299.

Введение (Introduction)

Пропульсивная установка представляет собой комплекс механизмов и устройств, предназначенных для обеспечения движения судна. На судах находят применение пропульсивные установки разного типа и состава. Наибольшее распространение в настоящее время получили традиционные пропульсивные установки с тепловыми главными двигателями (ГД) и гребные электрические установки (ГЭУ) с гребным электродвигателем (ГЭД). Каждому из указанных типов установок присущи свои достоинства и недостатки, которые определяют их область применения [1]–[3].

Необходимость сочетания достоинств пропульсивных установок разных типов послужила стимулом для создания комбинированных (гибридных) пропульсивных установок (КПУ). КПУ сочетают в себе достоинства пропульсивных установок на базе тепловых главных двигателей и ГЭУ, что позволяет судну работать с высокими технико-экономическими показателями в различных режимах эксплуатации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Комбинированная (гибридная) пропульсивная установка является судовой пропульсивной установкой, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух или более разнотипных судовых двигателях: тепловых и электрических, работающих на общий движитель. Данные установки являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения судна в различных режимах эксплуатации и производства электроэнергии при условии экономичного хода. В состав КПУ входит тепловой ГД и ГЭД. Два двигателя с разными физическими процессами, свойствами и техническими характеристиками механически связаны между собой с помощью редуктора или валопровода и работают на общий движитель (гребной винт).

КПУ сочетают свойства как традиционных установок на базе тепловых двигателей, так и систем электродвижения. В зависимости от соотношения мощностей ГД и ГЭД свойства традиционных пропульсивных установок проявляются в разной степени. Как правило, мощность ГД превосходит мощность ГЭД. В качестве движителя в составе КПУ [4] может применяться гребной винт или механическая ВРК [5], [6]. Структурная схема традиционной валогенераторной установки (ВГУ) с винтом регулируемого шага (ВРШ) приведена на рис. 1. В состав ВГУ входит ГД, валогенератор (ВГ) и редуктор. В качестве гребного винта, как правило, применяют ВРШ. ГД работает с постоянной частотой вращения, что позволяет ВГ вырабатывать необходимую для питания общесудовых

приемников электроэнергию с номинальными значениями напряжения и частоты. Скорость судна меняется за счет разворота лопастей ВРШ. В ВГУ данного типа сложно реализовать двигательный режим работы электрической машины, поэтому данный тип пропульсивного комплекса нельзя отнести к КПУ.

Недостатками ВГУ традиционной конструкции является сложность реализации режима параллельной работы ВГ и судового генераторного агрегата [7], а также невозможность эксплуатации ВГ при сильном волнении моря. Возможность работы электрической машины в обоих режимах: генераторном (режим валогенератора) и в двигательном (режим гребного электродвигателя), значительно повышает экономичность пропульсивной установки и ее регулировочные характеристики [8], [9].

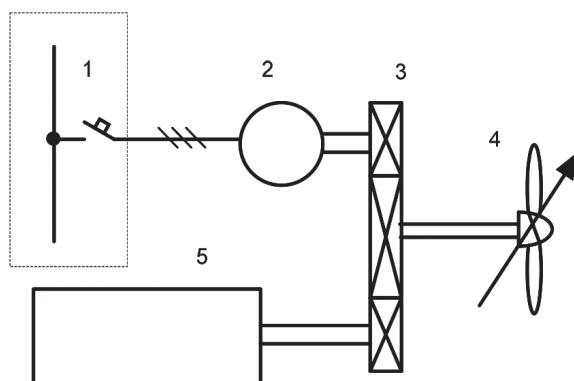


Рис. 1. Структурная схема валогенераторной установки с ВРШ
1 — главный распределительный щит; 2 — валогенератор; 3 — редуктор;
4 — винт регулируемого шага; 5 — главный двигатель

КПУ с винтом фиксированного шага (ВФШ) и полупроводниковым преобразователем (ПП), в котором реализуется двигательный и генераторный режим эксплуатации ГЭД, представлена на рис. 2.

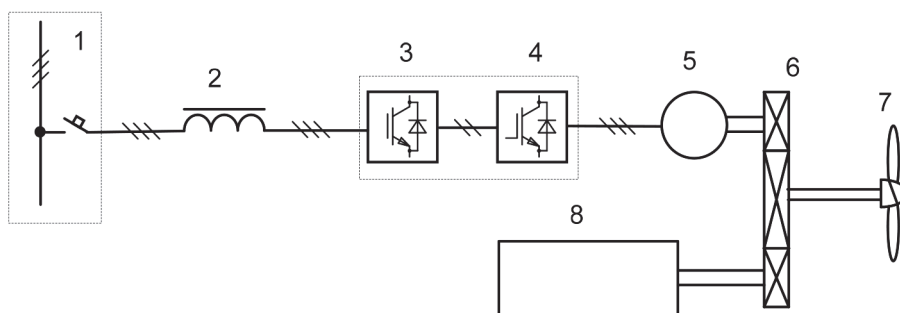


Рис. 2. Структурная схема комбинированной пропульсивной установки с винтом фиксированного шага и полупроводниковым преобразователем:
1 — главный распределительный щит; 2 — дроссель;
3 — полупроводниковый преобразователь; 4 — гребной электродвигатель;
5 — редуктор; 6 — винт фиксированного шага; 7 — главный двигатель

КПУ состоит из ГД и ГЭД, которые через редуктор подключены к ВФШ. ГЭД получает питание от обратимого ПП, выполненного на базе двух полупроводниковых модулей, работающих в режиме активного выпрямителя и автономного инвертора. Скорость судна меняется путем изменения частоты вращения ВФШ [10], [11]. В данной комбинированной пропульсивной установке ГЭД может работать в валогенераторном режиме, в котором ход судна обеспечивает ГД, приводящий в движение ВФШ и ГЭД. Работа ГЭД в режиме валогенератора позволяет отказаться от работы вспомогательного дизель-генератора (ДГ) в ходовом режиме. В КПУ с обратимым ПП могут быть реализованы следующие режимы эксплуатации:

- автономная работа и совместная работа ГД и ГЭД на ВФШ;
- автономный валогенераторный режим работы ГЭД с отбором мощности от ГД (режим экономичного хода);
- параллельная работа ГЭД (режим валогенератора) с судовыми ДГ;
- стартерный запуск ГД от ГЭД.

При скорости судна менее 40–50 % от номинального значения в работе участвует только ГЭД, который получает питание от ДГ или статических источников электроэнергии. Средний ход судна в диапазоне 40–80 % от номинального значения обеспечивает ГД, при этом ГЭД может работать в режиме валогенератора, вырабатывая электроэнергию. Полный (максимальный) ход судна реализуется совместной работой в двигательном режиме ГД и ГЭД [12]–[16]. Зависимость мощности на гребном валу от скорости судна в различных режимах эксплуатации КПУ показана на рис. 3.

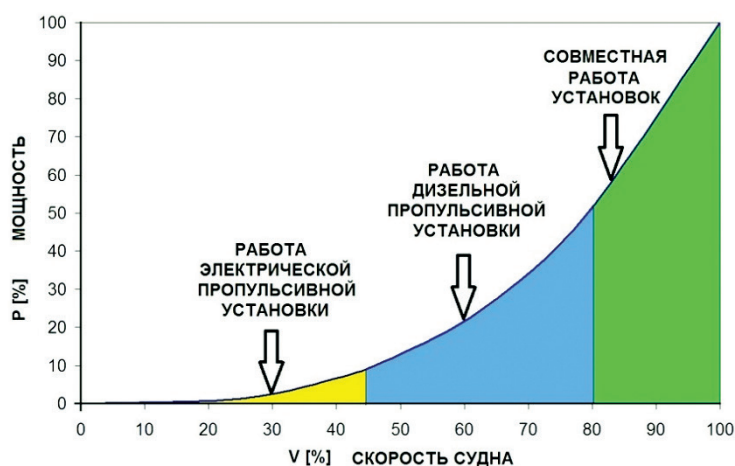


Рис. 3. Зависимость мощности на гребном валу от скорости судна при различных режимах эксплуатации

Результаты (Results)

В 2020 г. завершено строительство и успешно проведены ходовые испытания двух рабочих катеров с КПУ. Рабочие катера были построены на Онежском судостроительном заводе (г. Петрозаводск) по заказу ФГУП «Росморпорт» (рис. 4).



Рис. 4. Рабочий катер с комбинированной пропульсивной установкой (личное фото А. В. Григорьева)

На катерах впервые в отечественном судостроении применяется КПУ с ПП. Структурная схема единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) с КПУ рабочего катера приведена на рис. 5.

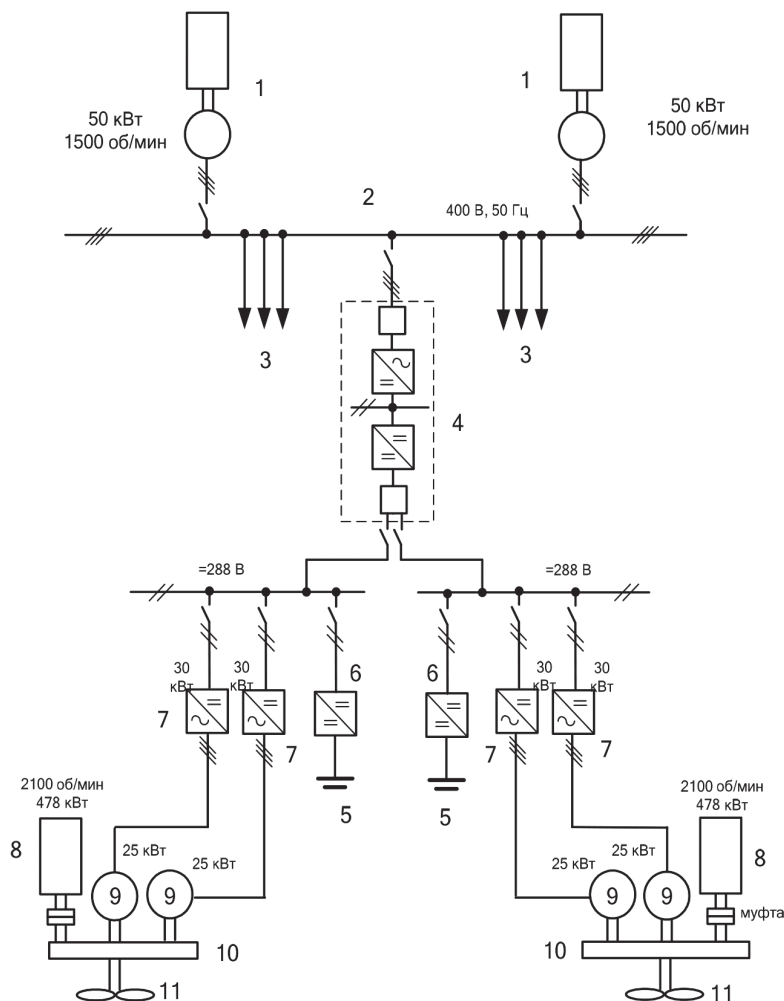


Рис. 5. Структурная схема ЕЭЭС с комбинированной пропульсивной установкой и винтом фиксированного шага: 1 — дизель-генератор; 2 — главный распределительный щит переменного тока; 3 — приемники электроэнергии; 4 — полупроводниковое устройство; 5 — аккумуляторная батарея; 6 — зарядные устройства; 7 — полупроводниковые инверторы; 8 — главный двигатель; 9 — гребной электродвигатель; 10 — редуктор; 11 — винт фиксированного шага

ЕЭЭС катера состоит из двух ДГ 1 мощностью 50 кВт, подключенных к ГРЩ переменного тока 2, от которого получают питание общесудовые приемники электроэнергии 3, и двух блоков аккумуляторных батарей (АБ) 5. В состав пропульсивного комплекса входят две КПУ. Каждая КПУ включает в себя ГД 8 мощностью 478 кВт и два ГЭД 9 мощностью по 25 кВт, подключенных посредством редуктора к валопроводу с ВФШ. ГЭД 9 через полупроводниковые инверторы 7 могут получать питание от двух блоков пропульсивных АБ 7 или от ГРЩ переменного тока 2 через полупроводниковое устройство 4. Основное оборудование ЕЭЭС с КПУ приведено на рис. 6.

Для реализации принципа единой электроэнергетической системы АО «НПЦ «Электродвижение судов» при участии сотрудников факультета судовой энергетики ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова и кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), был разработан и изготовлен комплект электротехнического оборудования, включающего полупроводниковое устройство (ППУ), которое является обратимым, позволяя преобразовывать электроэнергию переменного тока 400 В, 50 Гц в электроэнергию постоянного тока напряжением 288 В.

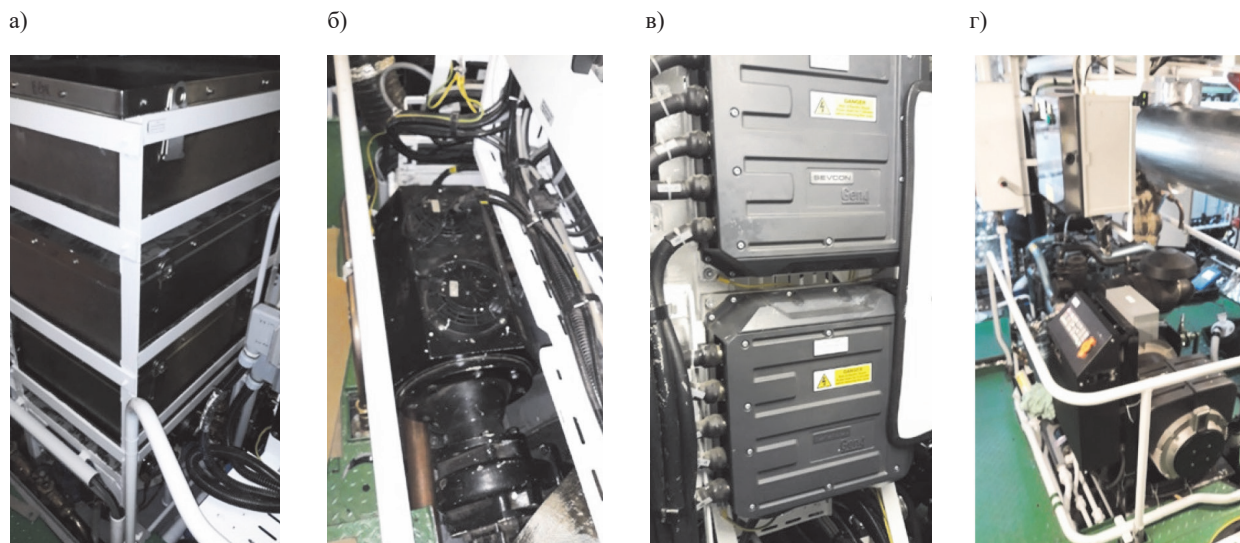


Рис. 6. Оборудование ЕЭЭС с комбинированной пропульсивной установкой:
а — блок аккумуляторных батарей; б — гребной электродвигатель;
в — полупроводниковые модули; г — дизель-генератор
(личное фото А. В. Григорьева)

ППУ состоит из дросселя (установлен на стороне постоянного тока), полупроводникового преобразователя постоянного напряжения ($DC-DC$ преобразователь), автономного инвертора, синусного фильтра и микропроцессорной системы управления, расположенной в отдельном шкафу. Преобразователь постоянного напряжения и автономный инвертор выполнены на базе полупроводниковых модулей фирмы Danfoss. Фотографии оборудования ППУ приведены на рис. 7.

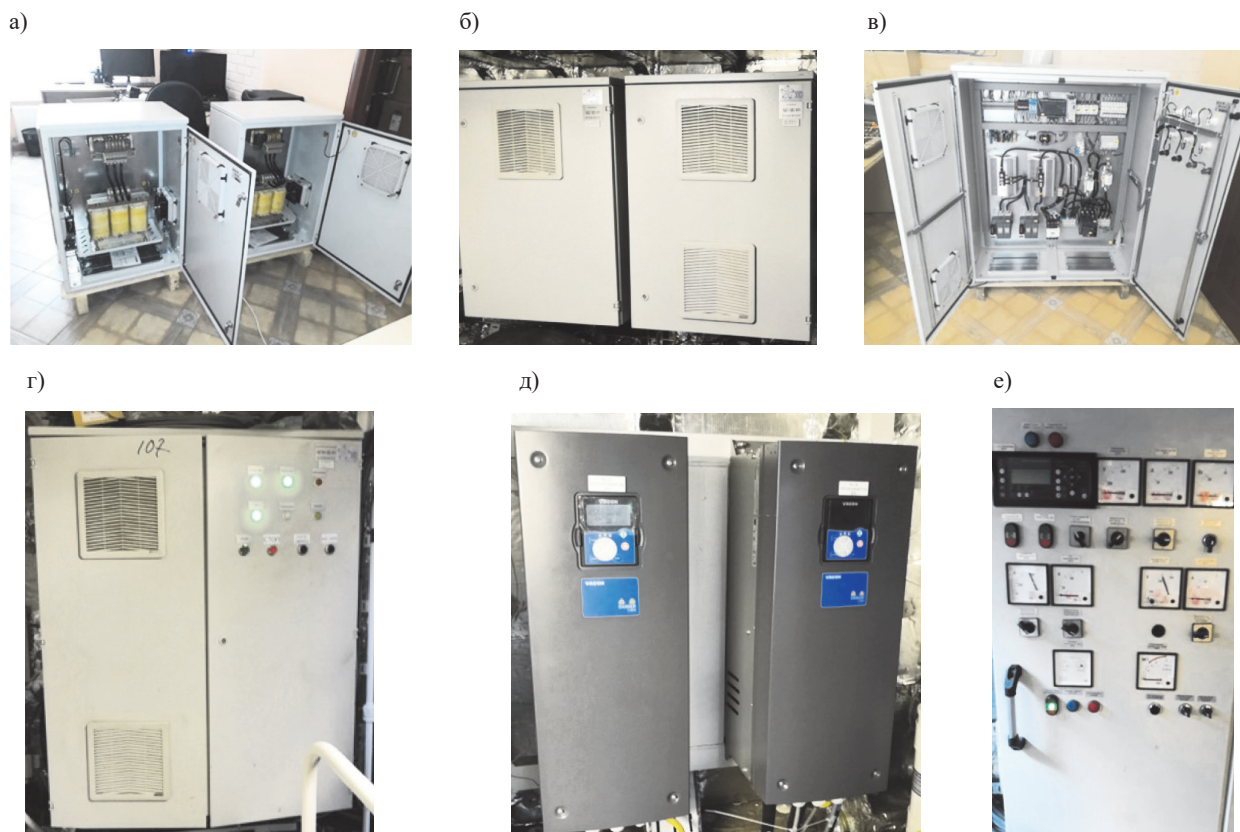


Рис. 7. Оборудование полупроводникового устройства: а — дроссель и синусный фильтр;
б — шкаф управления; в — полупроводниковые модули; г — генераторная секция ГРЩ
(личное фото А. В. Григорьева)

На рабочем катере были реализованы следующие режимы эксплуатации:

- автономная работа ГД на винт — электроэнергию вырабатывают ДГ;
- автономная работа ГД на винт — электроэнергию вырабатывают ГЭД, работающий в режиме валогенератора;
- автономная работа ГЭД на винт при питании от АБ;
- автономная работа ГЭД на винт при питании от ДГ;
- совместная работа ГД и ГЭД на винт;
- стоянка судна с питанием приемников электроэнергии переменного тока от АБ;
- режим синхронизации и параллельной работы ДГ и ГЭД, работающего в режиме валогенератора.

При проведении швартовных и ходовых испытаний были проверены все основные режимы эксплуатации ЕЭЭС с КПУ рабочего катера проекта. В соответствии с разработанной программой и методикой испытаний проводились измерения качества электроэнергии в судовой сети. Коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения во всех режимах эксплуатации ЕЭЭС не превышал 5 %. Процесс измерения качества электроэнергии в судовой сети показан на рис. 8.



Рис. 8. Электротехнические измерения при проведении испытаний ЕЭЭС с комбинированной пропульсивной установкой:

- а* — подключение электроизмерительного прибора;
б — проведение измерений
(личное фото А. В. Григорьева)

При проведении испытаний были также выполнены измерения основных переходных процессов в пропульсивной установке и вспомогательной системе электродвижения. Определялось качество переходных процессов при автономной и совместной работе ГЭД и ГД во время пуска, останова и реверса. Выполнена проверка работы ГЭД в двигательном режиме при питании от АБ и от ГД, а также при параллельной работе источников электроэнергии. Выполнена проверка возможности работы ГЭД в режиме валогенератора, синхронизации и параллельной работы ДГ, ГЭД и АБ.

Впервые реализован процесс синхронизации ДГ с АБ через автономный инвертор путем подгона частоты тока на выходе ППУ как при подключении инвертора, так и при подключении ДГ к ГРЩ. При использовании данного способа синхронизации наблюдается значительное сокращение времени синхронизации и увеличение скорости. Включение на параллельную работу происходит практически при нулевом сдвиге фаз напряжений ДГ и автономного инвертора, при этом броски тока при подключении одного из источников электроэнергии к ГРЩ полностью отсутствуют. Осциллограммы мгновенного значения напряжения ДГ и автономного инвертора в момент начала синхронизации и при подключении одного из источников электроэнергии к ГРЩ приведены на рис. 9. Успешно проведенные швартовные и ходовые испытания подтвердили правильность научно-технических решений, принятых при проектировании ЕЭЭС с КПУ, и высокие технические характеристики первой установки данного типа, внедренной на российском судне.

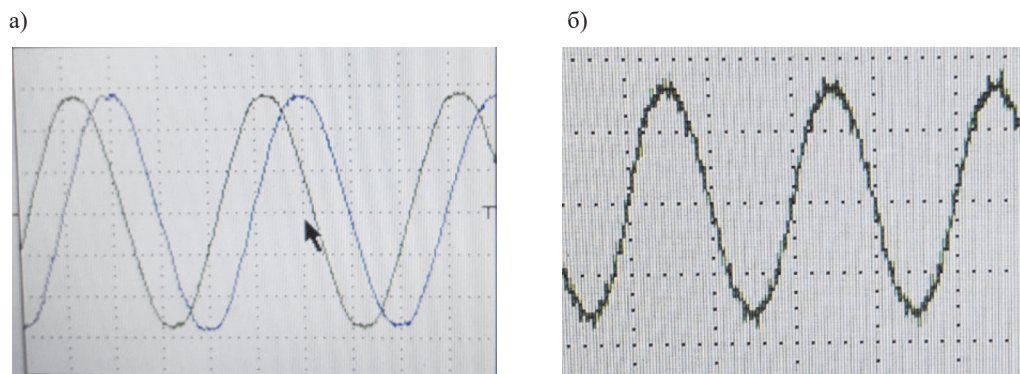


Рис. 9. Мгновенное значение напряжения ДГ и автономного инвертора при синхронизации
а — начало синхронизации; б — окончание синхронизации

Выводы (Summary)

На основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Впервые в эксплуатацию введено судно с комбинированной пропульсивной установкой, спроектированное отечественными организациями и построенное на российском судостроительном заводе.
2. В качестве источников электроэнергии на судне применяются автономные дизель-генераторы, аккумуляторные батареи и ГЭД, работающий в режиме валогенератора на ходу судна. В процессе проведения швартовных и ходовых испытаний успешно проверены автономный режим работы каждого источника электроэнергии на вспомогательную гребную электроустановку и общесудовые приемники, а также параллельная работа источников электроэнергии в различных сочетаниях.
3. Успешно проведены ходовые испытания комбинированной пропульсивной установки при раздельной и совместной работе ГД и ГЭД на гребной винт при питании от ДГ и АБ, что является подтверждением правильности научно-технических решений, заложенных при проектировании судна.
4. В процессе проведения испытаний реализован новый способ синхронизации ДГ и автономного инвертора, который отличает высокое быстродействие и точность, что исключает появление бросков тока при подключении источника электроэнергии к ГРЩ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные комплексы нового поколения / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 49–50.
2. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта — 2013. — № 35. — С. 337–340.
3. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2013. — № 2. — С. 50–52.
4. Хватов О. С. Математическая модель судовой гибридной пропульсивной установки / О. С. Хватов, О. А. Бурмакин, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2009. — № 27. — С. 150–154.
5. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: моногр. / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 175 с.
6. Григорьев А. В. Судовые валогенераторные установки нового поколения на базе обратимых полупроводниковых преобразователей / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 36–38.
7. Будашко В. В. Разработка трехуровневой многокритериальной стратегии управления гибридной судовой энергетической установкой комбинированного пропульсивного комплекса / В. В. Будашко // Электротехніка і Електромеханіка. — 2017. — № 2. — С. 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.

8. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
9. Ancona M. A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M. A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, J. Rosati // *Energy Conversion and Management*. — 2018. — Vol. 164. — Pp. 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
10. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // *Energy Procedia*. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
11. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
12. Ling-Chin J. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective — A life cycle assessment case study / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 117. — Pp. 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.
13. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56–57. — С. 106–114.
14. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки: назначение, состав, классификация / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.
15. Григорьев А. В. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.
16. Григорьев А. В. Схемотехнические решения судовых единых электроэнергетических систем на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.

REFERENCES

1. Grigoryev, A. V., and E. A. Glekler. “Sudovye kombinirovannye propul’sivnye komplekсы novogo pokoleniya.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 49–50.
2. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Bulletin of VSAWT* 35 (2013): 337–340.
3. Grigoryev, A. V. “Sudovye kombinirovannye propul’sivnye ustanovki.” *Morskoy flot* 2 (2013): 50–52.
4. Khvatov, O. S., O. A. Burmakina, and I. A. Tarpanov. “Mathematical model of ship hybrid propulsive installations.” *Bulletin of VSAWT* 27 (2009): 150–154.
5. Grigoryev, A. V., and V. A. Petukhov. “Sovremennyye i perspektivnyye sudovye valogeneratornyye ustanovki.” SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.
6. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. “Sudovye valogeneratornyye ustanovki novogo pokoleniya na baze obratimyykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 36–38.
7. Budashko, V. V. “Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.” *Электротехника и Электромеханика* 2 (2017): 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
8. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabriellii and Karin Andersson. “Optimal load allocation of complex ship power plants.” *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
9. Ancona, Maria Alessandra, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, and J. Rosati. “Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization.” *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
10. Capasso, Clemente, Emilio Notti, and Ottorino Veneri. “Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats.” *Energy Procedia* 158 (2019): 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.

11. Geertsma, R.D., R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman. "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments." *Applied Energy* 194 (2017): 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
12. Ling-Chin, J., and A. P. Roskill. "Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective — A life cycle assessment case study." *Energy Conversion and Management* 117 (2016): 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.
13. Grigoryev, A.V., A. A. Popov, S. M. Malyshev, and R. R. Zaynullin. "Ship combined propulsion plants." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 56–57 (2019): 106–114.
14. Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. "Ship combined propulsion plants: purpose, composition, classification." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.
15. Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. "Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.
16. Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. "Schematic solutions for ship unified electric power systems based on valve generators and static electric power sources." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

Воробьев Семен Валентинович —
ведущий инженер
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: kit85mail@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Vorobyev, Semen V. —
Lead engineer
JSC "RPC "Ship electric propulsion"
12 Fermskoe shosse Str., let. E, office
178, St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 г.

Received: March 10, 2021.