

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1103-1117

**MODERNIZATION EXPERIENCE AND TRIALS RESULTS  
OF THE UNIFIED ELECTRIC POWER SYSTEM  
AND ELECTRIC PROPULSION SYSTEM OF THE “КАПИТАН КОСОЛАПОВ”  
DIESEL-ELECTRIC ICEBREAKER**

**A. V. Grigoryev<sup>1,3</sup>, A. V. Veinmeister<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — Saint Petersburg Electrotechnical University,  
St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

*The experience of deep modernization of the unified electric power system and the electric propulsion system of the “Kapitan Kosolapov” diesel-electric icebreaker is considered in the paper. During the modernization, a technical design is developed, necessary electrical calculations, including using computer models, are performed. Development of the technical design gives an opportunity to determine the list of replaced equipment and its technical characteristics, to justify the scope of modernization. During the modernization, the main diesel-generator, controlled rectifiers of the armature circuit of the electric propulsion motor, reversible controlled rectifiers are replaced. A microprocessor control system for an electrical propulsion plant has been developed. An integrated control system for the technical means of the vessel is introduced. Dock, sea and ice trials of the unified electric power system and electric propulsion system are carried out. When testing the unified electric power system, the quality of electricity in the ship network, the stability of the autonomous and parallel operation of diesel-generators, the distribution of active and reactive loads are checked. When testing the electric propulsion system, the transient processes of acceleration, deceleration and reverse of the propulsion electric motor are oscillographied. The time of transient processes of the electric propulsion plant is measured. Successful tests make it possible to continue the exploitation of the “Kapitan Kosolapov” diesel-electric icebreaker.*

*Keywords: electric power system, electric propulsion system, electric propulsion plant, main diesel-generator, semiconductor rectifier, semiconductor exciter, power quality, transient process, dock trials, sea trials, ice trials.*

**For citation:**

Grigoryev, Andrey V., and Andrey V. Veinmeister. “Modernization experience and trials results of the unified electric power system and electric propulsion system of the “Kapitan Kosolapov” diesel-electric icebreaker.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1103–1117. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1103-1117.

**УДК 629.12:621.31**

**ОПЫТ МОДЕРНИЗАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ  
ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ЛЕДОКОЛА «КАПИТАН КОСОЛАПОВ»**

**А. В. Григорьев<sup>1,3</sup>, А. В. Вейнмейстер<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье рассмотрен опыт глубокой модернизации единой электроэнергетической системы с системой электродвижения дизель-электрического ледокола «Капитан Косолапов». При проведении*

модернизации разработан технический проект, выполнены необходимые электротехнические расчеты, в том числе с применением компьютерных моделей. Разработка технического проекта позволила определить перечень заменяемого оборудования и его технические характеристики, обосновать объем модернизации. В процессе проведения модернизации произведена замена главных дизель-генераторов, управляемых выпрямителей якорной цепи и реверсивных управляемых выпрямителей цепи возбуждения гребного электродвигателя, разработана микропроцессорная система управления гребной электроустановкой, внедрена интегрированная система управления техническим средствами судна, проведены швартовные, ходовые и ледовые испытания единой электроэнергетической системы и системы электродвижения. При испытаниях единой электроэнергетической системы выполнена проверка качества электроэнергии в судовой сети, устойчивости автономной и параллельной работы дизель-генераторов, распределения активной и реактивной нагрузки. При проведении испытаний системы электродвижения осциллографировались переходные процессы разгона, торможения и реверса гребного электродвигателя, а также измерялось время переходных процессов гребной электрической установки. Успешно проведенная модернизация и испытания позволили продолжить эксплуатацию дизель-электрического ледокола «Капитан Косолапов».

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, система электродвижения, гребная электроустановка, главный дизель-генератор, полупроводниковый выпрямитель, полупроводниковый возбудитель, качество электроэнергии, переходный процесс, швартовные испытания, ходовые испытания, ледовые испытания.

**Для цитирования:**

Григорьев А. В. Опыт модернизации и результаты испытаний единой электроэнергетической системы и системы электродвижения дизель-электрического ледокола «Капитан Косолапов» / А. В. Григорьев, А. В. Вейнмейстер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1103–1117. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1103-1117.

### Введение (Introduction)

В замерзающих портах России для обеспечения проводки судов в зимний период времени находят применение портовые дизель-электрические ледоколы, большинство которых были построены в советское время (1970–1980 гг.) за рубежом, в том числе в Финляндии. В течение более сорока лет в XX в. многие ледоколы работали в различных портах нашей страны, поэтому дальнейшая их эксплуатация без замены электроэнергетического оборудования и модернизации была невозможна. Так, портовый ледокол «Капитан Косолапов» был построен на судостроительном заводе в городе Хельсинки в Финляндии в 1976 г. На ледоколах данной серии впервые в нашей стране был реализован принцип единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС). На судне применяется система электродвижения (СЭД) двойного рода тока с двумя гребными электродвигателями и управляемыми выпрямителями. Головным судном данной серии является ледокол «Капитан Измайлов». Электроэнергетическая установка (ЭЭУ) ледокола имеет знак автоматизации AUT1, позволяющий осуществлять безвахтенное обслуживание механизмов и оборудования в машинном отделении судна во всех режимах эксплуатации.

Ледокол «Капитан Косолапов» (рис. 1) является двухвинтовым однопалубным судном с удлиненным баком. Автономность ледокола по расходу топлива составляет 15 сут. Управление энергетической установки судна осуществляется из ЦПУ, расположенного в совмещенной рулевой штурманской рубке. При необходимости управление ЭЭУ может производиться из аппаратной.

Судовладельцем ледокола является ФГУП «Росморпорт». Порт приписки — город Архангельск. Основным назначением ледокола является:

- оказание услуг по обеспечению безопасности мореплавания в акваториях морских портов и на подходах к ним;
- самостоятельная проводка крупнотоннажных судов;
- буксировка судов и других плавучих сооружений в ледовых условиях и на чистой воде;
- сейсморазведочные работы.



Рис. 1. Ледокол «Капитан Косолапов»

Технические характеристики ледокола «Капитан Косолапов» приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Технические характеристики ледокола «Капитан Косолапов»**

Тип ледокола	Портовый
Ледопроемкость	до 1 м
Дедвейт	365 т
Водоизмещение	2048 т
Длина	56,3 м
Ширина	16,02 м
Высота борта	6,0 м
Осадка	4,2 м
Максимальная скорость хода	13,2 уз

ЭЭУ ледокола «Капитан Косолапов» является единой [1]–[3]. В ее состав входит ЕЭЭС, назначением которой является производство электроэнергии, и двухвальная СЭД двойного рода тока, обеспечивающая движение судна [4], [5]. Учитывая большой срок эксплуатации ледокола судовладельцем (ФГУП «Росморпорт»), было принято решение о проведении глубокой модернизации ЕЭЭС с СЭД с заменой части оборудования.

Разработка технического проекта модернизации ЕЭЭС с СЭД ледокола «Капитан Косолапов» проведена организацией АО «НПЦ «Электродвижение судов» с привлечением ведущих специалистов электромеханического факультета ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова и факультета электротехники и автоматика СПбГЭТУ (ЛЭТИ).

**Методы и материалы (Methods and Materials)**

Модернизация ЕЭЭС с СЭД ледокола «Капитан Косолапов» является первым опытом проведения данной работы в нашей стране. При разработке технического проекта и модернизации использовалось компьютерное моделирование, новые современные технические решения и оборудование, с учетом многолетнего опыта эксплуатации ледоколов данной серии [6], [7].

В процессе модернизации была произведена замена главных дизель-генераторов, управляемых полупроводниковых выпрямителей в якорной цепи и полупроводниковых возбудителей гребных электродвигателей (ГЭД) постоянного тока [8], [9]. На базе современной микропроцессорной техники разработана система автоматического управления гребными электрическими установками (ГЭУ), аварийно-предупредительной сигнализации (АПС) и создана впервые для судов данной серии интегрированная система управления ЕЭЭС и СЭД (ИСУ ТС) [10], [11]. На стадии технического проекта

были рассмотрены несколько схем модернизации ЕЭЭС с СЭД, в том числе с реверсом в якорной цепи и цепи обмотки возбуждения [12], [13]. Сравнительный технико-экономический анализ показал целесообразность сохранения штатной схемы СЭД и выполнения замены реверсивных выпрямителей якорной цепи ГЭД, выпрямителей обмотки возбуждения и главных дизель-генераторов (ГДГ). Реверс ГЭУ осуществляется за счет реверса тока в обмотке возбуждения ГЭД [14], [15].

СЭД ледокола «Капитан Косолапов» представляет собой систему двойного рода тока (переменно-постоянного) с двумя ГЭУ, предназначенными для преобразования электрической энергии в механическую с целью воспроизведения заданного упора одним гребным двигателем. В качестве двигателя применяется винт фиксированного шага (ВФШ) [16], [17]. Структурная схема ЕЭЭС с СЭД ледокола «Капитан Косолапов» приведена на рис. 2.

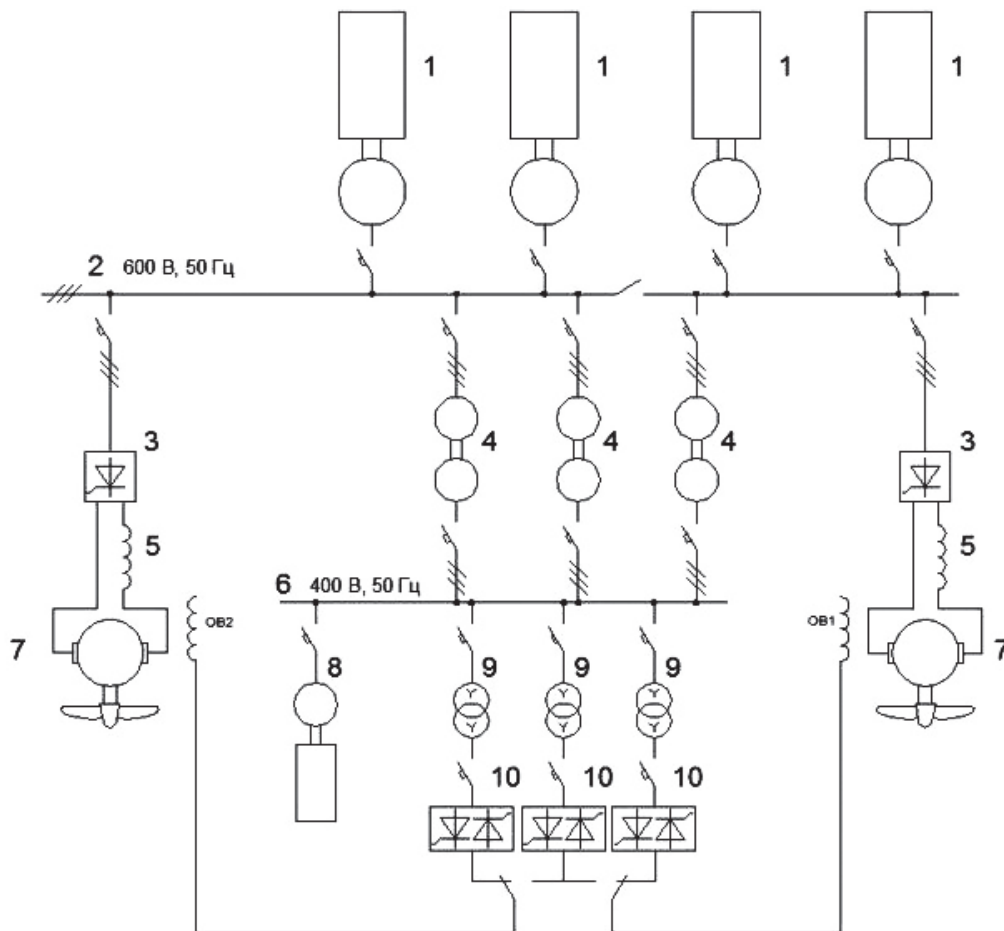


Рис. 2. ЕЭЭС с СЭД ледокола «Капитан Косолапов»:

- 1 — ГДГ; 2 — ЩЭД; 3 — УВ якорной цепи ГЭД; 4 — электромашинный преобразователь;  
5 — дроссель; 6 — ГРЩ; 7 — ГЭД; 8 — СДГ; 9 — силовой трансформатор;  
10 — реверсивный УВ системы возбуждения ГЭД

ЕЭЭС с СЭД состоит из четырех ГДГ, стояночного дизель-генератора (СДГ), главного распределительного щита (ГРЩ) 600 В, щита электродвижения (ЩЭД), ГРЩ 400 В, двух гребных электродвигателей (ГЭД) постоянного тока, двух управляемых выпрямителей (УВ) якорной цепи ГЭД, трех реверсивных управляемых выпрямителей (РУВ) обмотки возбуждения ГЭД, трех электромашинных преобразователей, трех силовых трансформаторов питания РУВ и др.

ГДГ подключаются к ЩЭД, от которого получают питание УВ якорной цепи ГЭД, три электромашинных преобразователя и другое общесудовое электрооборудование. От ГРЩ 400 В через трансформаторы получают питание три реверсивных УВ и общесудовые приемники электроэнергии [18], [19]. ГДГ предназначены для производства электроэнергии в ходовых режимах эксплуа-



тации судна. В процессе модернизации была проведена замена штатных ГДГ производства фирмы «Вяртсиля» на ГДГ японской фирмы *Yanmar*. В качестве источников электроэнергии использованы трехфазные бесщеточные синхронные генераторы [20], [21]. Фотография главных ГДГ, расположенных в машинном отделении судна, представлена на рис. 3.



Рис. 3. Главные дизель-генераторы в машинном отделении судна

ГЭД постоянного тока с независимым возбуждением получают питание от ЩЭД напряжением 650 В через управляемый выпрямитель (УВ). Мощность ГЭД — 1550 кВт, частота вращения — 240/330 об/мин. ГЭД расположен в моторном отделении (рис. 4). В контуре постоянного тока ГЭД установлены дроссели, сглаживающие пульсации выпрямленного тока.



Рис. 4. Главный электродвигатель в моторном отделении судна

Якорная обмотка ГЭД постоянного тока получает питание от УВ (рис. 5), обмотка возбуждения — от реверсивных УВ, с помощью которых выполняется регулирование напряжения, подводимого к якорной обмотке ГЭД. УВ выполнен на базе двух одинаковых модулей фирмы *Siemens*. Силовые секции двух модулей соединены параллельно. УВ расположены в помещении аппаратной по бортам. Охлаждение УВ воздухом осуществляется с помощью штатных судовых вентиляторов. В автоматическом режиме вентиляторы запускаются при наборе схемы ГЭУ. С помощью реверсивных УВ, расположенных в цепи обмотки возбуждения, меняются величина и направление тока в обмотке возбуждения, за счет чего выполняются изменение электромагнитного момента и реверсирование частоты вращения ГЭД.



Рис. 5. Управляемый выпрямитель якорной цепи ГЭД

ЩЭД предназначен для приема электроэнергии от ГДГ, подачи питания через УВ на якорные обмотки ГЭД и питания электромашинных преобразователей электроэнергии. Напряжение на ЩЭД — 600 В, частота электрического тока — 50 Гц. ЩЭД разделен секционным разъединителем, который находится в замкнутом положении и размыкается только при обесточенном состоянии для проведения ремонтных работ. ГРЩ 400 В предназначен для приема электроэнергии от ЩЭД посредством электромашинных преобразователей. К ГРЩ во время стоянки ледокола подключается СДГ.

В ходовых режимах эксплуатации судна ГРЩ через электромашинные преобразователи получает питание от ЩЭД, во время стоянки — от СДГ. Напряжение на ГРЩ — 400В, частота электрического тока — 50 Гц. От ГРЩ получают питание через разделительные трансформаторы реверсивные УВ ГЭД. ЩЭД, ГРЩ (рис. 6), УВ якорной цепи и реверсивный УВ обмотки возбуждения ГЭД расположены в помещении аппаратной (ГЭД находятся в моторном отделении).

Регулирование частоты вращения и момента ГЭД осуществляется с помощью УВ якорной цепи и реверсивного УВ обмотки возбуждения. С помощью УВ меняется напряжение, подводимое к якорной обмотке ГЭД, и регулируется ток якоря.



Рис. 6. ЩЭД (слева) и ГРЦ (права) в помещении аппаратной

С помощью реверсивного УВ изменяются величина и направление тока в обмотке возбуждения, за счет чего производится реверсирование электромагнитного момента и направления вращения ГЭД. Реверсивный УВ расположен в помещении аппаратной рядом с ЩЭД. Структурная схема двухканальной системы подчиненного регулирования ГЭУ приведена на рис. 7.

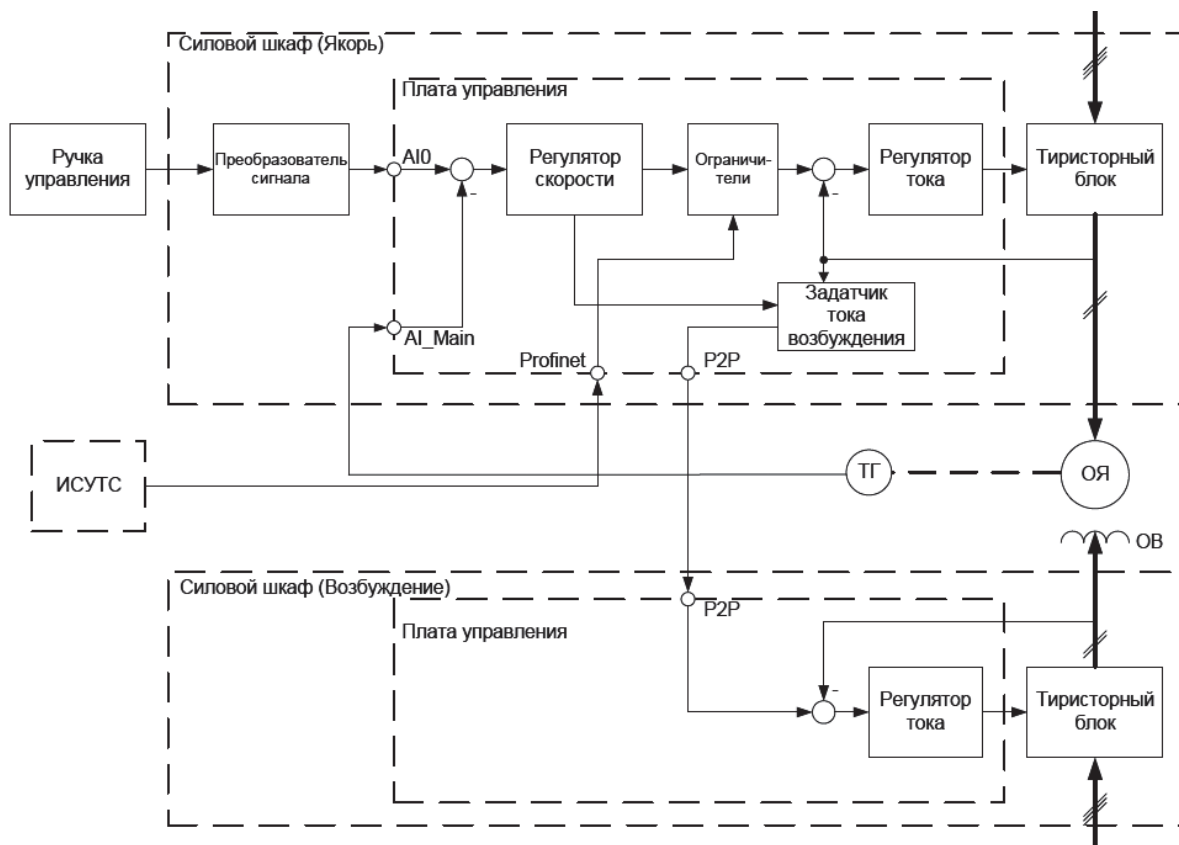


Рис. 7. Структурная схема системы регулирования ГЭУ



Первым является канал управления неререверсивным УВ якорной цепи ГЭД, вторым — канал управления реверсивный УВ обмотки возбуждения ГЭД. Канал управления неререверсивным УВ якорной цепи ГЭД изменяет угол открытия тиристоры мостового выпрямителя и является двухконтурным. Внешним контуром является контур регулирования частоты вращения или мощности ГЭУ. Внутренним подчиненным контуром данного канала является контур регулирования тока якоря ГЭД. Канал регулирования тока возбуждения ГЭД — одноконтурный. Он управляет углом открытия тиристоры реверсивного УВ. Задание на величину и направление тока возбуждения формируется блоком задания тока возбуждения. Регулирование частоты вращения ГЭД осуществляется с помощью УВ якорной цепи ГЭД при изменении магнитного поля (тока возбуждения) в функции тока якоря. Изменение направления вращения и реверс ГЭД осуществляется за счет реверсирования тока возбуждения.

В штатной схеме ГЭУ торможение ГЭД производилось с рекуперацией электроэнергии на ЩЭД. При этом главные генераторы переходили в двигательный режим и подкручивали приводные дизели. В процессе модернизации был реализован режим торможения противовключением ГЭД.

### Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В процессе проведения модернизации ледокола «Капитан Косолапов» были проведены швартовные, ходовые и ледовые испытания ЕЭЭС с СЭД. При проведении испытаний проверялась устойчивость работы ЕЭЭС с СЭД, качество электроэнергии в судовой сети, качество переходных процессов.

Согласно схемотехническому решению ЕЭЭС с ГЭУ, управляемые выпрямители якорной цепи ГЭД подключаются к ЩЭД 600 В без согласующих трансформаторов, что снижает качество электроэнергии на шинах. В связи с этим для питания ГРЩ 400 В и общесудовых электроприемников применяются вращающиеся электромашинные преобразователи.

Реверсивные выпрямители питания обмотки возбуждения ГЭД подключены к ГРЩ 400 В посредством трансформаторов, что осуществляет их гальваническую развязку от общесудовой сети. В связи с малой мощностью выпрямителей питания цепей возбуждения ГЭД их влияние на качество электроэнергии в общесудовой сети 400 В незначительно.

Электрические измерения выполнялись с применением переносных измерительных приборов:

- анализатора качества электропитания трехфазной сети FLUKE 434 II;
- анализатора качества электропитания трехфазной сети FLUKE 435;
- ноутбука Lenovo X230 IS/NR9-XZYAZ;
- мультиметра FLUKE 175 S/N 258304064;

Дополнительно измерения проводились с помощью стрелочных электроизмерительных приборов, установленных на ГРЩ 600 В и 400 В на панели электромеханика в рулевой рубке, а также с помощью средства отображения информации ИСУ ТС ледокола. Видеокадр ИСУ ТС с закладкой ЕЭЭС с СЭД показан на рис. 8. При проведении испытаний и измерений фиксировались следующие электротехнические величины на шинах ГРЩ 600 В и шинах ГРЩ 400 В:

- напряжение и сила тока ГЭД и ГГ;
- активная и реактивная мощности ГГ;
- коэффициент мощности ГГ;
- коэффициент гармонических искажений напряжения ( $THD_U$ , %).

Измерения параметров ЕЭЭС с СЭД были проведены в следующих режимах эксплуатации:

1. Автономная работа одного ГДГ (в работе одна ГЭУ),
2. Автономная работа одного ГДГ (в работе две ГЭУ).
3. Параллельная работа двух ГДГ (в работе две ГЭУ).
4. Параллельная работа трех ГДГ (в работе две ГЭУ).
5. Параллельная работа четырех ГДГ (в работе две ГЭУ).



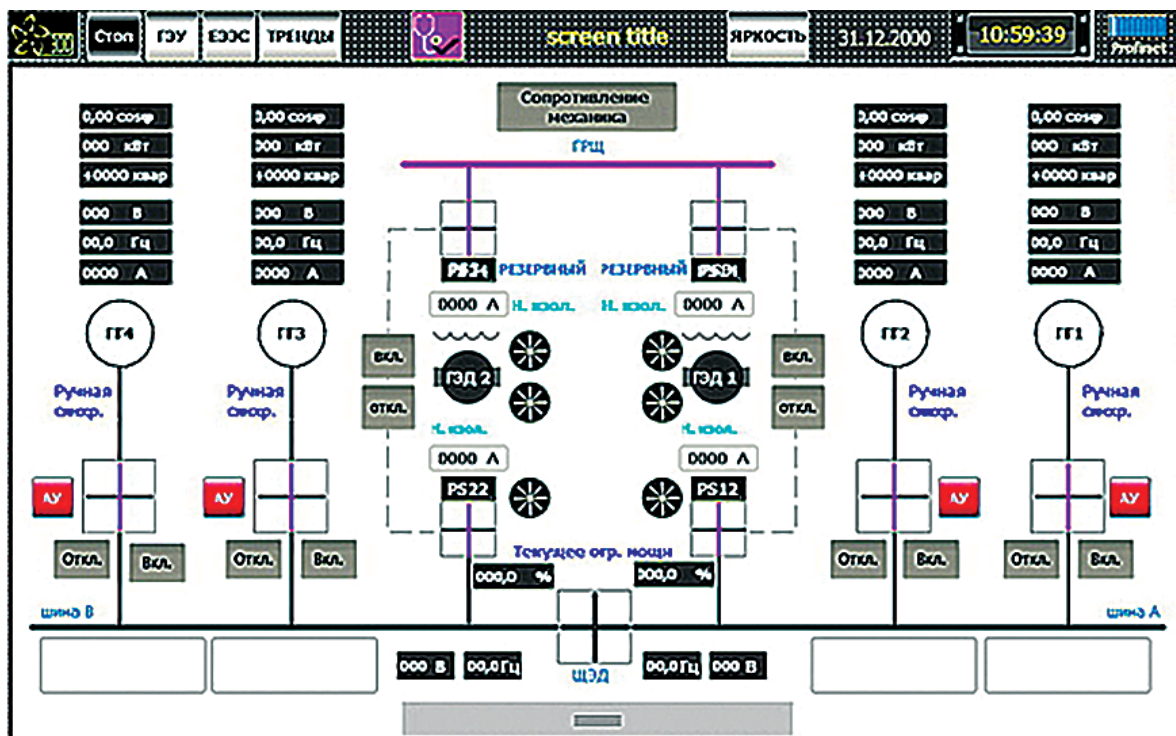


Рис. 8. Видеокادر ИСУ ТС с закладкой ЕЭЭС с ГЭУ

Во всех режимах эксплуатации на шинах ГРЩ 400 В коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения не превышал значений 2–3 %. Замеры в сети 600 В были проведены при автономной работе каждого ГДГ на одну и две ГЭУ. Качания реактивной и активной мощности при нагрузке, соответствующей заданному режиму эксплуатации, не наблюдались. Мгновенное значение тока и напряжения на шинах ГРЩ 600 В при работе одного ГДГ на две ГЭУ приведены на рис. 9. Максимальное значение, равное 17,5 %, коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения  $K_u$  достигал при работе двух ГДГ на две ГЭУ. В данном режиме при проведении испытаний мощность ГДГ достигала величины около 80 % от номинальной, величина тока одного ГДГ доходила до 1600 А, ГЭУ были нагружены на мощность 692 кВт и 675 кВт, что соответствовало суммарной нагрузке ГЭУ 44 %.

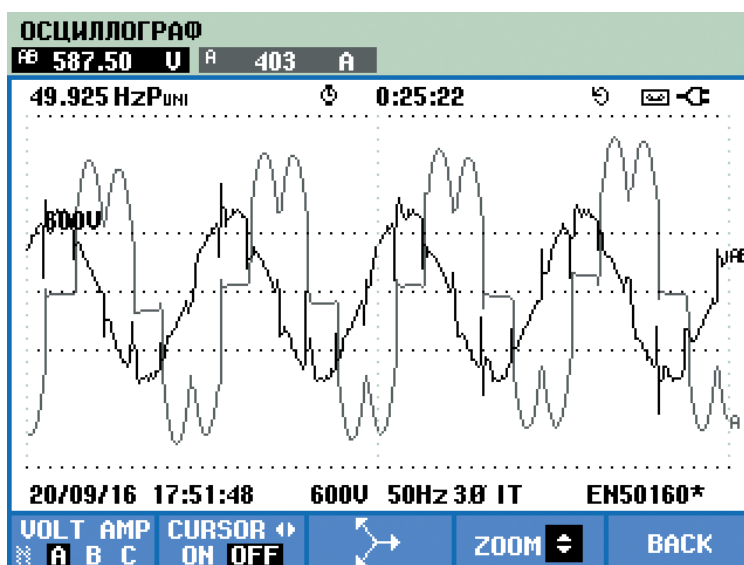


Рис. 9. Мгновенное значение тока и напряжения на шинах ГРЩ 600 В при автономной работе одного ГДГ на две ГЭУ

Колебания реактивной мощности при проведении испытаний не наблюдались. Во всем диапазоне изменений нагрузки напряжение поддерживалось постоянным в допустимых Российским морским регистром судоходства пределах. Разница распределения реактивной и активной нагрузки между параллельно работающими ГДГ не превышала допустимой РС величины.

При параллельной работе трех ГДГ на две ГЭУ мощность одного генератора достигала величины около 60 %, величина тока доходила до 1150 А и более, ГЭУ были нагружены на мощность 745 кВт и 875 кВт соответственно, что превышает 52 % суммарной нагрузки ГЭУ. Дальнейшее увеличение мощности ГЭУ было невозможно в условиях проведения швартовых испытаний в связи с достижением ГЭД частоты вращения более 230 об/мин. Переходные процессы при работе двух ГДГ на две ГЭУ представлены на рис. 10.

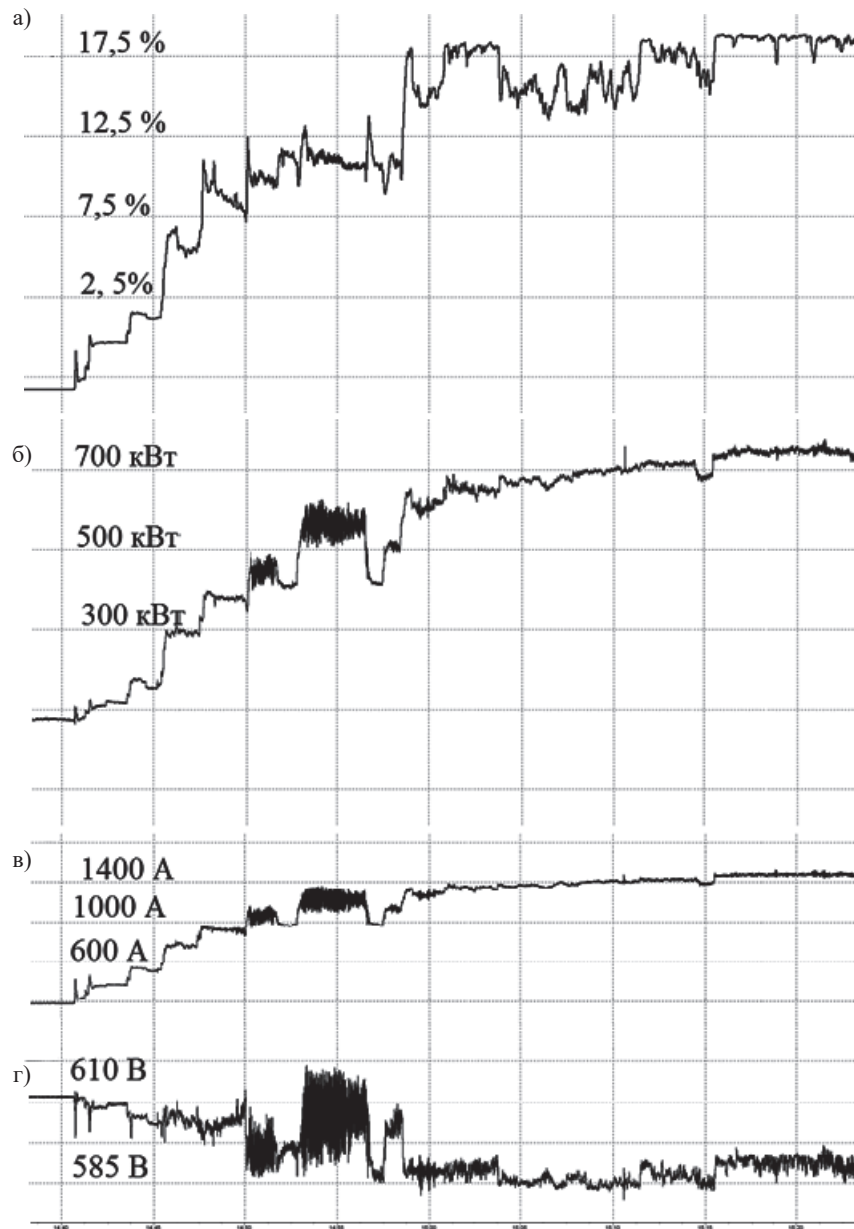


Рис. 10. Переходные процессы при параллельной работе двух ГДГ на две ГЭУ:  
а — коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения;  
б — мощность одного ГДГ; в — ток одного ГДГ; г — напряжение на ЩЭД 600 В

При проведении испытаний и увеличении нагрузки на каждом ГДГ до 650 кВт возрастал коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения до 17–18 %, при этом не возникало

колебаний реактивной мощности между генераторами. Следует отметить, что максимальная расчетная величина коэффициента искажений, полученная в результате компьютерного моделирования, ЕЭЭС с СЭД составила 22 %.

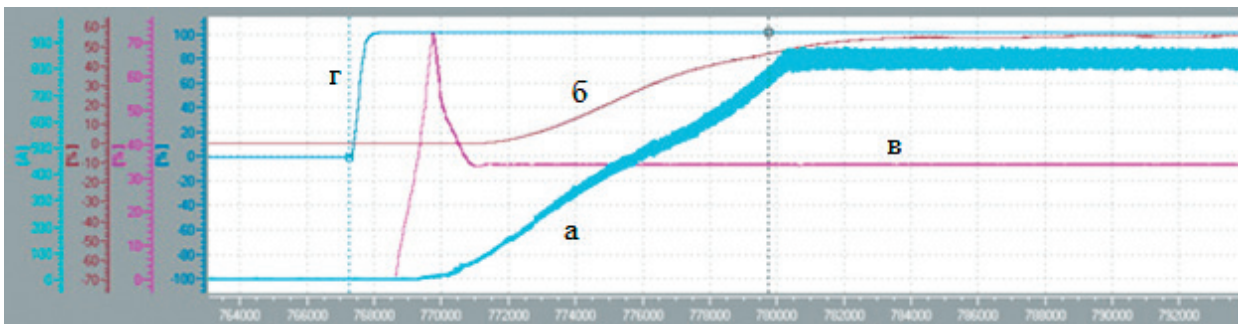
На основе результатов проведения швартовных испытаний ЕЭЭС с СЭД сделаны следующие выводы:

- качество электроэнергии на шинах ГРЩ 400 В, от которых получают питание общесудовые приемники электроэнергии, соответствует требованиям Правил РМРС. Коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения не превышает 3 %;

- на шинах ГРЩ 600 В, предназначенного для питания управляемых выпрямителей, коэффициент несинусоидальности кривой напряжения в заданных режимах эксплуатации ЕЭЭС с СЭД лежит в пределах 3–18 %.

При проведении ходовых испытаний ЕЭЭС с СЭД проверялась точность регулирования мощности и частоты вращения ГЭД и качество переходных процессов. Переходные процессы пуска и реверса ГЭУ приведены на рис. 11.

а)



б)

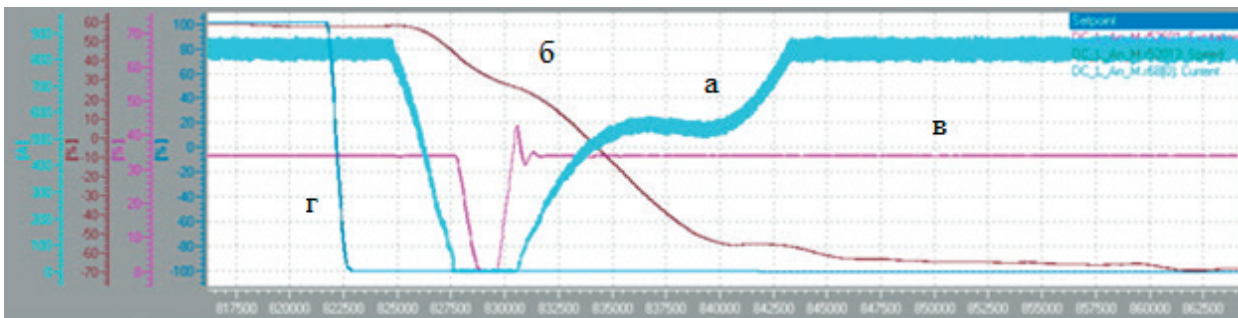


Рис. 10. Переходные процессы разгона (а) и реверса (б) ГЭУ:  
 а — частота вращения ГЭД; б — мощность ГЭД; в — ток якоря ГЭД;  
 г — ток возбуждения ГЭД

При проведении ходовых испытаний измерялось время разгона, торможения и реверса одного и двух ГЭД при работе от одного, двух, трех и четырех ГДГ. Время запуска одного ГЭД при работе от четырех ГДГ составило около 8 с. В течение пуска принимался разгон ГЭД от нулевой частоты вращения до частоты вращения 0,9 от максимальной частоты вращения ГЭД на швартовных при нулевой скорости ледокола, равной 240 об/мин.

При одновременном пуске двух ГЭД от четырех ГДГ наблюдался провал по частоты тока электрической сети до 45 Гц, в результате чего срабатывало ограничение по набору мощности ГЭУ. Во избежание снижения частоты тока и срабатывания защиты время запуска ГЭД было увеличено до 11–12 с. Время переходных процессов ГЭД при работе от трех ГДГ представлено в табл. 2.

**Время переходных процессов ГЭУ при работе от трех ГДГ**

Положение рукоятки управления	Частота вращения ГЭД, об/мин	Время, с
Стоп (0) — самый полный вперед (25)	Время разгона ГЭД № 1 до 260–280 об/мин	15 с
Стоп (0) — самый полный назад (25)	Время разгона ГЭД № 1 до 260 об/мин	16 с
Самый полный вперед (25) – самый полный назад (25)	Время реверса ГЭД № 1 280 об/мин — 0 ... 260 об/мин	19 с
Самый полный назад (25) – самый полный вперед (25)	Время реверса ГЭД № 1 260 об/мин — 0 ... 260 об/мин	18 с

После проведения ходовых испытаний в 2017 г. прошли ледовые испытания ЕЭЭС с СЭД. Целью проведения ледовых испытаний являлась проверка установившихся и переходных режимов эксплуатации ЕЭЭС с СЭД. По результатам проведения ходовых и ледовых испытаний ЕЭЭС с СЭД в установившихся и переходных режимах эксплуатации было установлено следующее:

1. Качаний мощности и тока в сети ГЭУ – ГДГ не наблюдается, регулирование мощности и частоты вращения ГЭУ происходит плавно.

2. Максимальная потребляемая мощность одного ГЭД при работе на четырех ГДГ составляет 1550 кВт, максимальная частота вращения ГЭД при ходе в свободной воде при работе на четырех ГДГ составляет 345–355 об/мин, максимальная скорость ледокола при работе двух ГЭД и ходе в свободной воде — 12,8–13,5 уз.

3. Частота вращения ГЭД при ходе в сплошном льду р. Северная Двина толщиной около 40 см лежит в пределах 280–300 об/мин, провалов по частоте вращения не наблюдается, скорость ледокола при ходе в сплошном льду толщиной около 40 см составляет 6,8–7,5 уз, при работе ледокол на упор с нулевой скоростью частота вращения ГЭД находится в пределах 260–280 об/мин;

4. При токе ГЭД менее 1000 А регулирование происходит с поддержанием постоянства частоты вращения, при токе более 2200 А в режиме поддержания мощности ток возбуждения регулируется в функции изменения частоты вращения и тока ГЭД в диапазоне 17–40 А, обеспечивая форсировку тока возбуждения при пуске и работе в ледовых условиях при снижении частоты вращения ГЭД.

При проведении испытаний ГЭУ в переходных режимах эксплуатации выполнена проверка следующих процессов:

– одиночного разгона, останова и реверса каждого ГЭД в швартовном режиме (при отсутствии хода ледокола) и при движении ледокола с различной скоростью, вплоть до максимально возможной;

– одновременного разгона, останова и реверса двух ГЭД в швартовном режиме (при отсутствии хода ледокола и при движении ледокола с различной скоростью, вплоть до максимально возможной);

– одновременного реверса двух ГЭД при работе на четырех ГДГ, который производился при скорости движения судна 12–13 уз, а также при нулевой скорости судна.

В результате проведенных ходовых и ледовых испытаний сделаны следующие выводы:

– ЕЭЭС с СЭД обеспечивает эксплуатационные режимы работы ледокола при работе с номинальной мощностью на одном ГЭД до 1550 кВт и частоте вращения гребного винта до 350 об/мин в свободной воде и частоте вращения 260–280 об/мин при работе ледокола по швартовной характеристике на упор;

– одновременный и попарный разгон, торможение и реверс ГЭД происходит плавно, разноса и перерегулирования частоты вращения ГЭД не происходит, колебательный режим не наблюдается, защита и блокировка ГЭУ и ГДГ не срабатывает, главная цепь тока не разбирается.



### Выводы (Summary)

На основе проведенных испытаний сделаны следующие выводы:

1. Впервые в Российской Федерации успешно завершена глубокая модернизация ЕЭЭС с СЭД дизель-электрического ледокола. В процессе модернизации произведена замена главных дизель-генераторов, управляемых выпрямителей якорной цепи и обмотки возбуждения ГЭД, разработаны микропроцессорная система управления ГЭУ и интегрированная система управления ИСУ судовыми техническими средствами.

2. Успешно проведены швартовные, ходовые и ледовые испытания ЕЭЭС с СЭД. Результаты проведенных испытаний подтвердили соответствие полученных характеристик требованиям Российского морского регистра судоходства и заказчика.

3. Получен значительный научно-технический опыт проведения модернизации с заменой оборудования системы электродвижения. В процессе проведения модернизации ЕЭЭС с СЭД использованы методы компьютерного и натурального эксперимента. Полученные результаты вычислительных и натуральных экспериментальных исследований показали их хорошую сходимость.

4. Положительный опыт модернизации ЕЭЭС с СЭД дизель-электрического ледокола «Капитан Косолапов» может быть использован для увеличения сроков эксплуатации других судов ледового класса. Существенно снизить напряженность судоходства в замерзающих портах, связанную с нехваткой ледокольного флота в отдельных регионах страны, можно не только путем строительства новых, но и проведением модернизации и ремонта находящихся в эксплуатации ледоколов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дарьенков А. Б. Гребные электрические установки: учеб. пособие / А. Б. Дарьенков [и др.]. — Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 219 с.

2. Вершинин В. И. Создание систем электродвижения для судов различного назначения / В. И. Вершинин [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 1 (387). — С. 107–122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122.

3. Гельвер Ф. А. Гребная электроэнергетическая установка с общими шинами постоянного тока / Ф. А. Гельвер // Судостроение. — 2018. — № 2 (839). — С. 22–27.

4. Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10 — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

5. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 337–340.

6. Росин Е. И. Автоматизированные гребные электрические установки. Движение судна и его главная установка: текст лекции ЛЭТИ / Е. И. Росин. — Л., 1986. — 48 с.

7. Быков А. С. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. В. Башаев. — СПб.: Элмор 2004. — 319 с.

8. 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.

9. Doerry N. History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy / N. Doerry, J. Amy, C. Krolick // Proceedings of the IEEE. — 2015. — Vol. 103. — Is. 12. — Pp. 2243–2251. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494159.

10. Chan C. C. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling / C. C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen // IEEE transactions on vehicular technology. — 2009. — Vol. 59. — Is. 2. — Pp. 589–598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.

11. Chen J. S. Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles / J. S. Chen // Energies. — 2015. — Vol. 8. — Is. 6. — Pp. 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697.

12. Малышев В. А. Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса / В. А. Малышев, В. С. Иванов, В. С. Соловей // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.

13. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.

14. 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.

15. Григорьев А. В. Целесообразность применения СЭД на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, В. И. Штрамбранд, Р. Р. Зайнуллин // Морской флот. — 2014. — № 4. — С. 38–40.

16. Григорьев А. В. Судовая система электродвижения нового поколения / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2012. — № 2. — С. 38–40.

17. Григорьев А. В. Анализ тормозных режимов гребных электрических установках / А. В. Григорьев, А. С. Быков // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3 (61). — С. 62–66.

18. Григорьев А. В. Опыт проектирования и результаты испытаний единой электроэнергетической установки судна «Вайгач» / А. В. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2008. — № 4. — С. 28–31.

19. Григорьев А. В. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 76–78.

20. Григорьев А. В. Перспективная судовая единая электроэнергетическая установка / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Эксплуатация морского транспорта выпуск. — 2008. — № 3 (53). — С. 68–70.

21. Григорьев А. В. Опыт эксплуатации электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач» / А. В. Григорьев [и др.] // Судостроение. — 2010. — № 6 (793). — С. 29–30.

## REFERENCES

1. Dar'enkov, A. B., G. M. Miryasov, V. G. Titov, M. N. Okhotnikov, and D. V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki. Uchebnoe posobie*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R. E. Alekseeva, 2014.

2. Vershinin, Viktor I., Sergey V. Makhonin, Vladimir A. Parshikov, and Valentin A. Khomyak. “Development of electric propulsion systems for ships of various types.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(387) (2019): 107–122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122.

3. Gelver, F. A. “Shipboard electric propulsion plants with common DC buses.” *Sudostroenie* 2(839) (2018): 22–27.

4. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov and Arsenii M. Makarov. “Prospects for the development of electromotive systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

5. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Bulletin of VSAWT* 35 (2013): 337–340.

6. Rosin, E. I. *Avtomatizirovannye grebnye elektricheskie ustanovki. Dvizhenie sudna i ego glavnaya ustanovka*. L., 1986.

7. Bykov, A. S., and V. V. Bashaev. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnyh ledokolov*. SPb.: «Elmor», 2004.

8. 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.

9. Doerry, Norbert, John Amy, and Cy Krolick. “History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy.” *Proceedings of the IEEE* 103.12 (2015): 2243–2251. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494159.

10. Chan, Ching Chuen, Alain Bouscayrol, and Keyu Chen. “Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling.” *IEEE transactions on vehicular technology* 59.2 (2009): 589–598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.

11. Chen, Jia-Shiun. “Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles.” *Energies* 8.6 (2015): 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697.
12. Malyshev, Vladimir Alekseevich, Vladimir Sergeevich Ivanov, and Valery Sergeevich Solovey. “Calculation and selection of brake resistors, electric propeller the installation of the tanker.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(39) (2016): 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-1844.
13. Grigor’ev, A. V., and R. R. Zajnullin. “Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.
14. 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 admiral S. O. Makarova* 12.1 (2020): 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.
15. Grigor’ev, A. V., V. I. Shtrambrand, and R. R. Zainullin. “Tselesoobraznost’ primeneniya SED na sudakh vspomogatel’nogo flota.” *Morskoi flot* 4 (2014): 38–40.
16. Grigor’ev, A. V. “Sudovaya sistema elektrodvizheniya novogo pokoleniya.” *Morskoi flot* 2 (2012): 38–40.
17. Grigoryev, A. V., and A. S. Bikov. “Analysis of braking modes of electric propulsion plants.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(61) (2010): 62–66.
18. Grigor’ev, A. V. “Opyt proektirovaniya i rezul’taty ispytaniy edinoi elektroenergeticheskoi ustanovki sudna «Vaigach».” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 4 (2008): 28–31.
19. Grigorev, A. V., V. V. Romanov’skiy, and R. R. Zaynullin. “Circuit solutions of long range low-voltage ship electrical propulsion plants.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(62) (2010): 76–78.
20. Grigoriev, A. V., and E. A. Gleckler. “Next-generation integrated electrical power system.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(53) (2008): 68–70.
21. Grigoryev, A. V., E. A. Glekler, A. I. Livshyts, and D. I. Ulitovsky. “Surveying ship “Vaygach” power-plant operational experience.” *Shipbuilding* 6(793) (2010): 29–30.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Григорьев Андрей Владимирович** —  
 кандидат технических наук, доцент,  
 генеральный директор  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 АО «НПЦ «Электродвижение судов»  
 197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178  
 e-mail: [a.grigorev@eds-marine.ru](mailto:a.grigorev@eds-marine.ru),  
[kaf\\_saees@gumrf.ru](mailto:kaf_saees@gumrf.ru)  
**Вейнмейстер Андрей Викторович** —  
 кандидат технических наук, доцент  
 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
 197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Профессора Попова, 5  
 e-mail: [avveinmeister@etu.ru](mailto:avveinmeister@etu.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Grigoryev, Andrey V.** —  
 PhD,  
 associate professor, CEO  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 JSC “RPC “Ship electric propulsion”  
 12 Fermское shosse Str., let. E, office  
 178, St. Petersburg, 197341, Russian Federation  
 e-mail: [a.grigorev@eds-marine.ru](mailto:a.grigorev@eds-marine.ru),  
[kaf\\_saees@gumrf.ru](mailto:kaf_saees@gumrf.ru)  
**Veinmeister, Andrey V.** —  
 PhD, associate professor  
 Saint Petersburg Electrotechnical University  
 5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197376,  
 Russian Federation  
 e-mail: [avveinmeister@etu.ru](mailto:avveinmeister@etu.ru)

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2020 г.  
 Received: December 14, 2020.