

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-91-100

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ГРЕБНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,  
г. Керчь, Республика Крым, Россия

Savenko-70@mail.ru

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть вопрос наличия искажений формы синусоидального напряжения и тока в автономных судовых электротехнических комплексах с гребными электрическими установками, построенных по принципу единой электроэнергетической системы. Сравнить результаты исследования искажений напряжения для электротехнических комплексов с гребными электрическими установками различной структуры и дать рекомендации по их применению. *МЕТОДЫ.* Для проведения исследований рассмотрены единые электроэнергетические системы с гребными электрическими установками постоянного тока на пароме «Ейск» и переменного тока на асимметричном ледоколе «Балтика». Проанализированы возможности программирования при частотном управлении современными приводами винторулевых колонок с двигателями переменного тока. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получены осциллограммы напряжений и токов генераторов при использовании тиристорных преобразователей и инверторов для управления гребными электрическими установками в различных режимах. Отмечены значительные пульсации и искажения синусоидального напряжения и токов генераторов при применении тиристорных преобразователей для питания гребных электрических двигателей постоянного тока. Также зафиксированы небольшие отклонения от синусоидальной формы напряжения судовой сети при использовании инверторов при управлении гребными двигателями переменного тока в составе винторулевых колонок. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Вопрос обеспечения качества производимой электроэнергии в автономных электротехнических комплексах морских судов имеет большую актуальность и значимость. Для обеспечения наилучших результатов целесообразно применение азимутальных винторулевых колонок с электрическими двигателями переменного тока, управление скоростью вращения которых реализуется инверторными преобразователями частоты со звеном постоянного тока.

**Ключевые слова:** *качество электроэнергии; параллельная работа; судовой электротехнический комплекс; генераторный агрегат; гребная электрическая установка; азимутальная винторулевая колонка.*

**Для цитирования:** Савенко А.Е., Савенко П.С. Особенности работы судовых электротехнических комплексов с гребными электрическими установками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 91-100. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-91-100.

## FEATURES OF OPERATION OF SHIP ELECTRICAL POWER SYSTEMS WITH ELECTRICAL PROPULSION SYSTEMS

AE. Savenko, PS. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia

Savenko-70@mail.ru

**Abstract:** *THE PURPOSE.* Consider the issue of the presence of distortions in the form of

*sinusoidal voltage and current in autonomous electrical power systems with electrical propulsion systems, built on the principle of the unified electric power system. Compare the results of the study of voltage distortion for electrical power systems with electrical propulsion systems of various structures and give recommendations for their application. METHODS. For research, unified electric power systems with DC electrical propulsion systems on the Yeysk ferry and alternating current on the asymmetric icebreaker Baltika are considered. The possibilities of programming with frequency control of modern drives of rudder propellers with AC motors are analyzed. RESULTS. Oscillograms of voltages and currents of generators were obtained using thyristor converters and inverters to control electrical propulsion systems in various modes. Significant ripples and distortions of the sinusoidal voltage and generator currents were noted when thyristor converters are used to power DC propulsion electric motors. Also, small deviations from the sinusoidal form of the ship's network voltage were recorded when inverters were used to control AC propulsion motors as part of rudder propellers. CONCLUSION. The issue of ensuring the quality of electricity produced in autonomous electrical power systems of sea vessels is of great relevance and importance. To ensure the best results, it is advisable to use azimuthing podded drive with AC electric motors, the rotation speed of which is implemented by inverter frequency converters with a DC link.*

**Keywords:** *power quality; parallel operation; ship electric power system; generating set; marine propulsion system; azimuth rudder.*

**For citation:** Savenko AE., Savenko PS. Features of operation of ship electrical power systems with electrical propulsion systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):91-100. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-91-100.

### **Введение**

Одним из наиболее ответственных и мощных электрических приводов на морском судне может являться гребной электрический двигатель, приводящий во вращение гребной винт [1-3]. Структура такой установки может иметь различную конфигурацию по количеству гребных электрических двигателей, роду тока, взаимосвязи с другими потребителями электрической энергии на судне, типу движителя и т.д. [4-6]. Наиболее удачной считается единая электроэнергетическая система с гребной электрической установкой, когда одни и те же генераторные агрегаты вырабатывают электрическую энергию для всех судовых потребителей, то есть нет специализации или разделения источников электроэнергии по ее потребителям [7-9]. Единая система превосходит другие варианты по надежности, безопасности и экономичности [10, 11]. В настоящее время практически все судовые электростанции по роду тока основываются на переменном токе, используются дизель генераторные агрегаты переменного тока и большинство потребителей также переменного тока. Однако, некоторые электроприводы имеют в своем составе двигатели постоянного тока [12,13]. Изначально в гребных электрических установках преобладали двигатели постоянного тока из-за возможности плавной регулировки их частоты вращения [14]. Двигатели переменного тока также применялись, но значительно реже. Широкое применение гребных электрических установок на основе асинхронных и синхронных двигателей началось после появления цифровых преобразователей частоты. Сильный толчок для применения электродвигателей переменного тока в судовом электродвижении произошел после изобретения и применения новой структуры, основу которой составляют азимутальные винторулевые колонки типа *Azipod (azimuthing podded drive)* [15].

Научная значимость работы заключается в проведении исследований, направленных на сравнение качества электрической энергии в автономных судовых электротехнических комплексах с гребными электрическими установками с различной структурой на основе реальных данных, полученных на морских судах. Особый интерес представляют осциллограммы синусоидальных напряжений и токов судовых генераторов, полученные при работе гребных двигателей на судах. Для исследований намерено выбраны суда, построенные в разное время и имеющие на борту единую электроэнергетическую систему, но с разной конфигурацией, техническими решениями и элементной базой.

Практическая значимость исследования влияния тиристорных преобразователей напряжения и инверторных преобразователей частоты с звеном постоянного тока на форму синусоиды напряжения и тока генераторов заключается в том, что результаты исследования можно использовать при разработке электротехнических комплексов с гребными электрическими установками новых судов. Также результаты данной работы позволяют продолжить эксплуатацию существующих судов с гребными электрическими установками с учетом выявленных искажений синусоидального напряжения и токов генераторов.

#### Материалы и методы

Морской паром «Ейск» построен в декабре 1989 года и имеет на борту единую электроэнергетическую систему (рис. 1) переменного тока с двумя гребными электрическими двигателями постоянного тока типа МП2-М-630-152-8М3, 710 кВт, 440 В, 370...500 об/мин [11]. Для питания каждого их гребных электрических двигателей установлены индивидуальные статические тиристорные выпрямительные агрегаты типа КТЭ 1600/460 ЕВО, номинальный выпрямленный ток 1600 А, с плавным регулированием напряжения 460-0-460 В [11]. Электрическую энергию вырабатывают три главных дизеля 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА, 390В, 50Гц,  $\cos \varphi = 0.8$ , 1184А и один вспомогательный дизель-генератор S350SB 200кВА, 390В, 50Гц,  $\cos \varphi = 0.8$  [11].

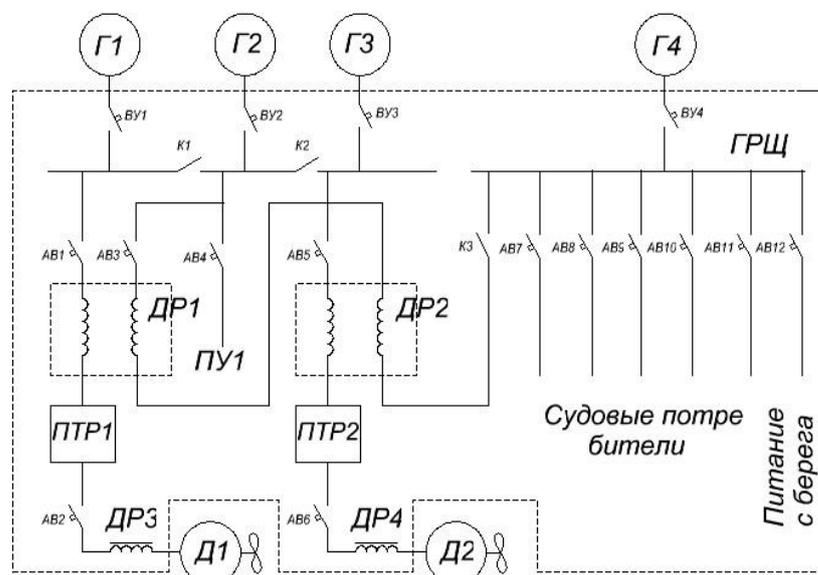


Рис.1. Схема единой электроэнергетической системы парома «Ейск».

Fig.1. Scheme of the unified electric power system of the ferry «Eisk».

Для устранения искажений синусоидального напряжения при коммутации силовых тиристорных блоков потребовалась установка реакторов, предполагалось, что они должны ограничить искажения 10 процентами.

Ледокол «Балтика» с ассиметричным корпусом построен в 2014 году и представляет суда нового поколения. Судно имеет на борту единую электроэнергетическую систему (рис. 2) переменного тока с тремя синхронными генераторами AMG 0630MP06 LSA, 3300 кВа, 690 В, 50 Гц,  $\cos \varphi = 0.9$ , 2761 А. Для питания трех гребных электродвигателей переменного тока AMI 560L6L, 2500 кВт, 630 В, 700... 950 об/мин установлены три инверторных преобразователя частоты ACS800-07LC-3970-7, мощностью 3970 кВа, напряжением 690/630 В переменного тока, номинальный ток 3324 А. Для устранения искажений синусоиды напряжения судовой сети установлены два фильтра 5-й гармоники. Гребные электрические установки имеют структуру азимутальных винторулевых колонок типа *Azipod* с системой управления приводом ACS800, имеющей широкие возможности управления пропульсивной установкой, которые определяются программированием. Управление приводом осуществляется по линии связи *fieldbus* и возможно через программу *DriveWindow* через персональный компьютер.

Предусмотрено программное управление системой в дистанционном и местном режимах. Функция «ручное/авто» пригодна для приложений, требующих возможности

выбора между управлением по последовательной линии связи и управлением входами/выходами. Для изменения пункта управления может быть выбран цифровой вход. С одним приводом можно использовать два интерфейса последовательной связи. Все блоки расширения входов/выходов, присоединяемые к каналу CH1 линии связи DDCS, подключаются по схеме «кольцо». Канал CH1 действует в линии связи как ведущий. Текущим главным устройством линии связи является плата RMIO. Каждый блок ввода/вывода имеет индивидуальный адрес, устанавливаемый с помощью DIP-переключателей на этом блоке. Перед использованием каждый блок ввода/вывода необходимо активизировать.

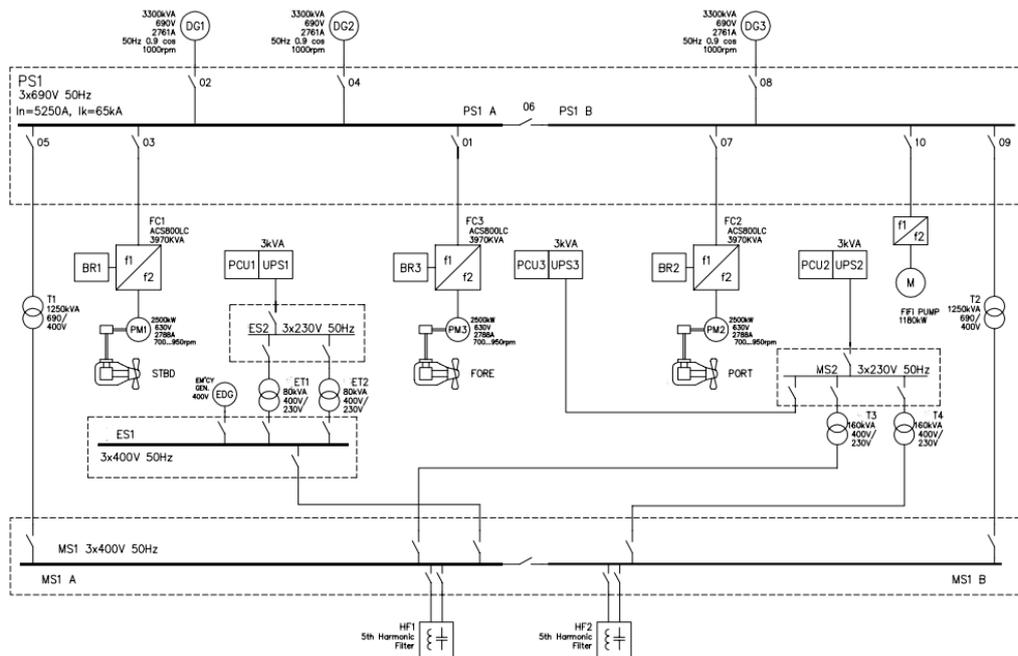


Рис.2. Схема единой электроэнергетической системы ледокола «Балтика».. *Fig.2. Diagram of the unified electric power system of the ice-breaker «Baltica».*

При работе привода в режиме местного управления, управляющие команды подаются с клавиатуры панели управления или от персонального компьютера с установленной на нем программой *DriveWindow*. Если используется панель управления, о работе в режиме местного управления свидетельствует буква *L* на дисплее панели.

Контроль перенапряжения промежуточного звена постоянного тока необходим в случае двухквadrантных преобразователей на стороне сети, когда двигатель работает в генераторном квадранте. Во избежание возрастания напряжения постоянного тока сверх допустимого предела, контроллер перенапряжения автоматически снижает тормозной момент в генераторном режиме, когда этот предел достигается.

Автоматический перезапуск привода применяется после кратковременного отказа питания (не более 5 секунд) с помощью функции «автоперезапуск», если: плата *RMIO* питается от системы бесперебойного питания (*UPS*); цепь цифрового входа *DI2* во время отказа питания остается замкнутой; допускается работа инвертора в течение периода продолжительностью до 5 секунд без вентиляторов инверторов. Максимальную длительность отказа питания для функции автоматического перезапуска можно регулировать. Заводская настройка равняется 5 секундам.

Аппаратные средства *ACS800* и программа управления системой выполняют аварийный останов следующих классов: немедленное отключение питания, управляемый аварийный останов.

Функция безопасного отключения крутящего момента отключает управляющее напряжение от силовых полупроводниковых приборов инвертора, т.е. выключается выходное напряжение привода.

Функция демпфирования колебаний гасит механические колебания или колебания напряжения постоянного тока в промежуточной цепи. В качестве источника колебаний выбирается ошибка скорости или напряжение постоянного тока. Результатом выполнения алгоритма демпфирования колебаний является синусоида. Эта синусоида может

суммироваться с заданием крутящего момента с надлежащим коэффициентом усиления и фазовым углом.

Измеряемая скорость всегда имеет небольшие пульсации, обусловленные механической интерференцией и механическими связями. Небольшие пульсации допустимы до тех пор, пока они не влияют на контур регулирования скорости. Снижение пульсаций с помощью фильтров может затруднить настройку. Большая постоянная времени фильтра и малое время разгона противоречат друг другу. Если измерение скорости обнаруживает быстрые колебания, их можно отфильтровать с помощью фильтра ошибки скорости и путем установки постоянной времени фильтра текущей скорости первого порядка.

Работе привода можно воспрепятствовать с помощью функции блокировки. Если эта функция активна, пуск двигателя предотвращается, а если двигатель уже работает, то он останавливается.

С помощью разветвительного блока *APBU* можно соединить параллельно от 2 до 12 инверторов. Плата *AINT 1* подключается к каналу *CH1* блока *APBU*, плата *AINT 2* - к каналу *CH2* и т.д. Функция пониженного режима работы предусмотрена для случая параллельного соединения 2 – 12 инверторных модулей типоразмера *R8i*. Эта функция позволяет продолжить работу с ограниченным током в случае выхода из строя одного или нескольких инверторных модулей.

### Результаты

Исследования проведены на пароме «Ейск» при параллельной работе двух дизель-генераторов мощностью 800 кВА на судовую сеть и двух работающих гребных двигателях на винты регулируемого шага. При этом зафиксированы значительные искажения формы напряжения судовой сети 400 В и токов генераторов, искажения достигают 80%. Осциллограммы снимались при начале работы гребных двигателей через тиристорные преобразователи (рис. 3), в ходовом режиме (рис. 4) и при швартовке к причалу (рис. 5).

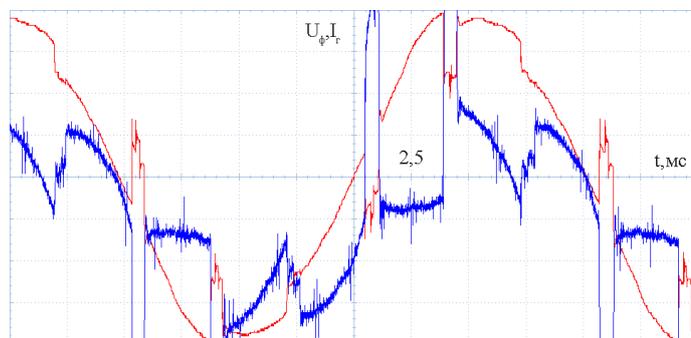


Рис. 3. Начало работы гребных двигателей, напряжение и ток дизель-генератора. *Fig. 3. Start of combustion engines, voltage and current of diesel generator.*

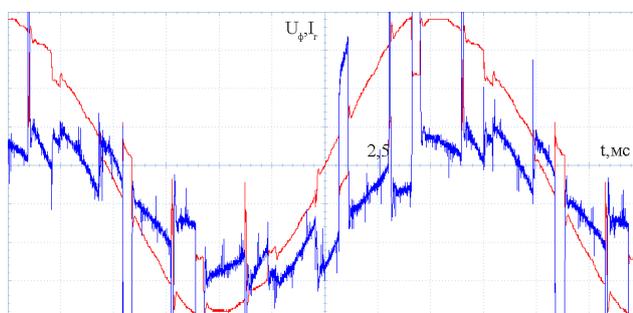


Рис. 4. Ходовой режим работы гребных установок, напряжение и ток дизель-генератора. *Fig. 4. Propulsion mode, voltage and current of diesel generator.*

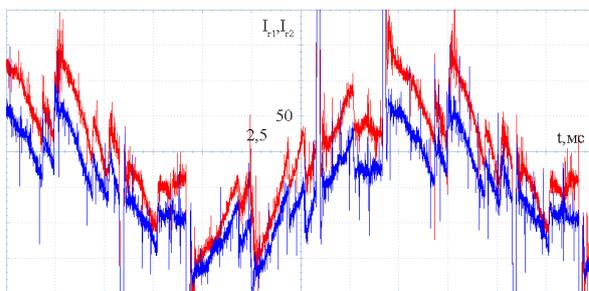


Рис. 5. Швартовка к причалу, токи генераторов при параллельной работе. *Fig. 5. Mooring to the dock, generator currents in parallel operation.*

На ледоколе «Балтика» проведены исследования качества напряжения судовой сети во время работы гребных электрических установок. В рабочем режиме 1, соответствующем полной мощности, подключены три генератора мощностью 3 300 кВА, работают три 6-импульсных пропульсивных привода мощностью 2 500 кВт каждый, один низковольтный трансформатор, питающий нагрузку 700 кВт при коэффициенте мощности 0,80, два фильтра 5-й гармоники подключены к цепи 400 В переменного тока MS1. При этом суммарные гармонические искажения  $THDu = 14,3\%$  в сети 690 В переменного тока PS01 и  $THDu = 6,4\%$  в 400 В переменного тока MS1. Формы сигналов напряжения и спектры напряжения показаны на рисунках 6 и 7.

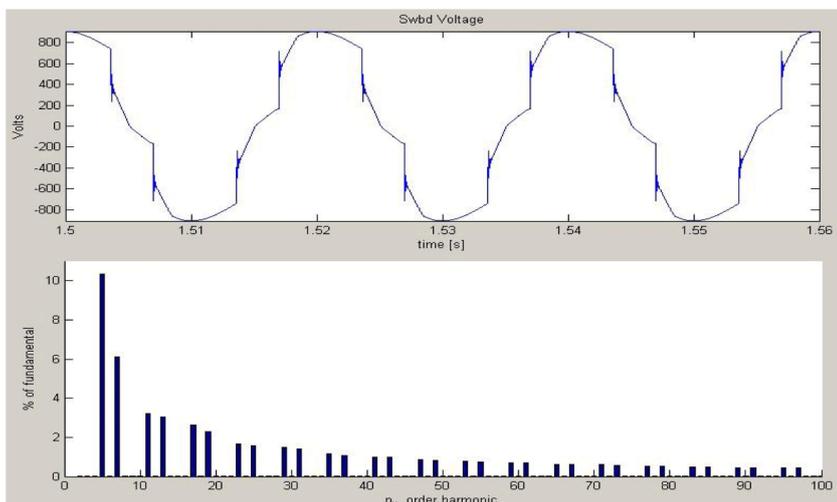


Рис. 6. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 690 В переменного тока PS01 (режим 1). *Fig. 6. Waveform of linear voltage and spectra at 690 V AC PS01 (mode 1).*

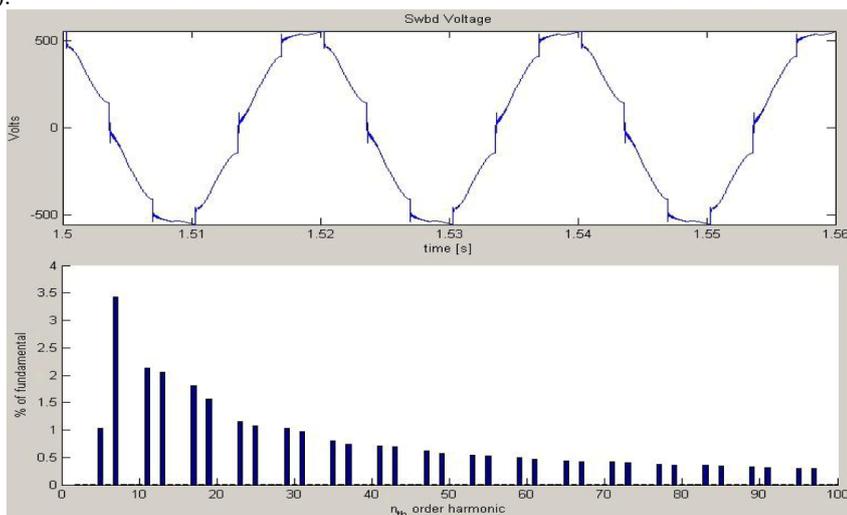


Рис. 7. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 400 В переменного тока MS1 (режим 1). *Fig. 7. Waveform of linear voltage and spectra at 400 V AC MS1 (mode 1).*

В рабочем режиме 2, соответствующем работе с двумя генераторами, подключены два генератора по 3 300 кВА, работают два 6-импульсных пропульсивных привода мощностью 2 500 кВт каждый, один низковольтный трансформатор, питающий нагрузку 400 кВт при коэффициенте мощности 0,80, два фильтра 5-й гармоники подключены к цепи 400 В переменного тока MS1. При этом суммарные гармонические искажения THDu = 13,4 % в сети 690 В переменного тока PS01 и THDu = 6,1 % в 400 В переменного тока MS1. Формы сигналов напряжения и спектры напряжения показаны на рисунках 8 и 9.

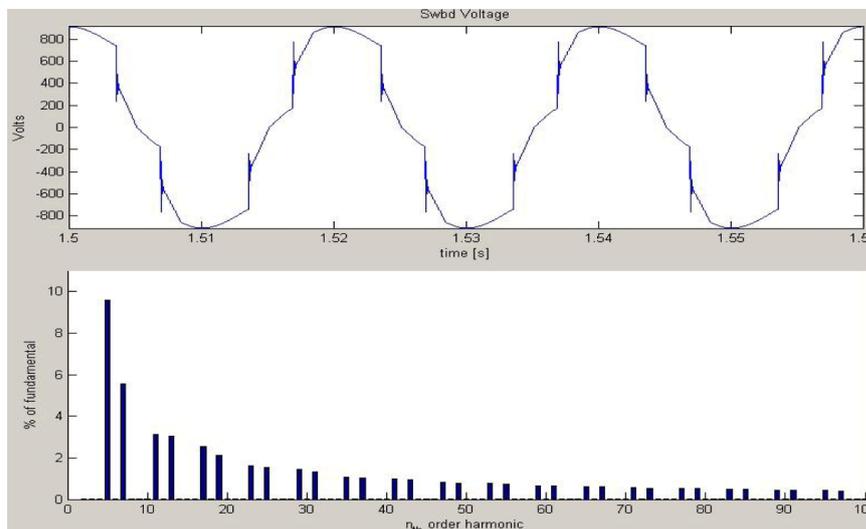


Рис. 8. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 690 В переменного тока PS01 (режим 2). *Fig. 8. Waveform of linear voltage and spectra at 690 V AC PS01 (mode 2).*

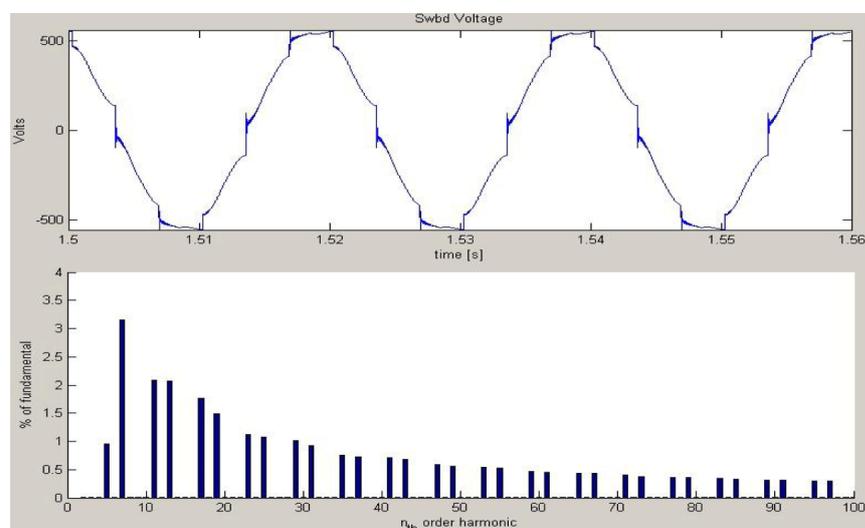


Рис. 9. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 400 В переменного тока MS1 (режим 2). *Fig. 9. Waveform of linear voltage and spectra at 400 V AC MS1 (mode 2).*

### Обсуждение

В результате проведенных исследований доказано существование значительных искажений синусоидальной формы напряжений судовой сети на пароме «Ейск» во время работы тиристорных преобразователей напряжения для питания гребных электрических двигателей постоянного тока. Принятые заводом изготовителем меры в виде установки сглаживающих реакторов не позволяют обеспечить ограничение искажений в заявленные 10 %. Результаты исследования работы судового электротехнического комплекса ледокола «Балтика» во время работы гребных электрических двигателей переменного тока так же продемонстрировали отклонение формы напряжения судовой сети от синусоидальной, однако в гораздо меньших пределах. Очевидно, лучшее качество электрической энергии на ледоколе «Балтика» обеспечивается совершенно иной структурой электротехнического комплекса судна в сравнении с паромом «Ейск». На

обоих судах установлены синхронные бесщеточные генераторы переменного тока. Однако, применение в составе винторулевых колонок ледокола «Балтика» двигателей переменного тока, частота вращения которых управляется частотой питающего напряжения при помощи инверторных блоков показало лучшие результаты, чем управление тиристорными преобразователями двигателями постоянного тока на пароме «Ейск». Также, большой вклад в обеспечение качества электрической энергии судовой сети ледокола «Балтика» вносят более современные системы автоматического управления электротехническим комплексом, а именно возможности программирования привода ACS800 и цифровая система управления возбуждением генераторов от компании *Basler DECS-100*. Функциональные свойства *DECS-100* включают четыре режима функционирования, четыре защитные функции, средства обеспечения запуска, компенсацию реактивного падения, компенсацию пониженной частоты и дополнительное согласование напряжения. В режиме автоматического регулятора напряжения (*AVR*) *DECS-100* регулирует среднеквадратическое выходное напряжение генератора. Он выполняет это, считывая выходное напряжение генератора и подстраивая выходной постоянный ток возбуждения для поддержания напряжения на заданном значении регулирования.

#### **Заключение**

Вопрос обеспечения качества производимой электроэнергии в автономных электротехнических комплексах морских судов имеет большую актуальность и значимость. Особую сложность и влияние на работу электротехнического комплекса имеет синусоидальная форма напряжения для судов с гребными электрическими установками. Гребные электрические установки являются наиболее мощными судовыми потребителями электроэнергии и требуют управления скоростью вращения, что оказывает наибольшее воздействие на синусоидальность кривой напряжения судовой сети.

Известные из литературы исследования работы автономных электротехнических комплексов с гребными электрическими установками посвящены в основном развитию их конструкции и элементной базы с целью улучшения ходовых характеристик судна и установлению преимуществ по отношению к судам, на которых для вращения гребных винтов служат дизельные двигатели. В отличие от рассмотренных в литературном обзоре результатов данное исследование заключается в получении реальных экспериментальных данных электротехнических комплексов разной структуры на морских судах с гребными электрическими установками и в их сравнении и анализе с точки зрения искажения формы синусоидального напряжения и токов генераторов. Для обеспечения наилучших результатов в указанном вопросе целесообразно применение азимутальных винторулевых колонок с электрическими двигателями переменного тока, управление скоростью вращения которых реализуется инверторными преобразователями частоты со звеном постоянного тока.

#### **Литература**

1. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
2. Geertsma, R. D.; Visser, K.; Negenborn, R. R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy, 2018, Том: 228, Стр.: 2490-2509 DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080
3. Mondejar, M. E.; Andreasen, J. G.; Pierobon, L.; Larsen, U; Thern, M.; Haglind, F. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, Том: 91, Стр.: 126-151 DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
4. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), стр. 253–258.
5. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С., Кузнецов В. И., Сеньков А. П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), стр. 103–109.
6. Zhu, Sipeng; Ma, Zetai ; Zhang, Kun ; Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy, 2020, Том: 210, Номер статьи: 118558 DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.
7. Савенко А.Е., Савенко П.С. Колебания мощности в единых судовых электроэнергетических системах с гребными электрическими установками. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021;23(5):172-183.
8. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon

2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. С. 400–405.

9. Батрак Д.В., Калинин И.М., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Оценка качества напряжения питания в судовой электроэнергетической системе методом компьютерного моделирования // Электротехника. 2017. № 12. С. 18–23.

10. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews, 2020, Том: 120, Номер статьи: 109611 DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.

11. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново, 2016. – 172 с.

12. Грачева Е.И., Ильясов И.И., Алимova А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. Т.20 № 3-4. С. 62–71.

13. Ившин И.В., Низамиев М.Ф., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109–114.

14. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2021, № 3. С. 93–100.

15. Савенко А.Е., Савенко П.С. Обеспечение работы электротехнического комплекса современных судов специального назначения с динамическим позиционированием. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021;23(6):99–108.

#### Авторы публикации

**Савенко Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. 298309, РФ, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе 82. Savenko-70@mail.ru

**Савенко Павел Станиславович** – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

#### References

1. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.

2. Geertsma, R. D.; Visser, K.; Negenborn, R. R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy, 2018, Book: 228, pp. 2490–2509, DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080

3. Mondejar, M. E.; Andreasen, J. G.; Pierobon, L.; Larsen, U; Thern, M.; Haglind, F. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, Book: 91, pp.: 126–151, DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.074.

4. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), pp. 253–258.

5. Gubanov Y. A., Kalinin I. M., Kornev A. S., Kuznetsov V. I., Sen'kov A. P. Directions of improvement for ship unified power systems. Marine Intelligent Technology, 2019, №1-1(43), pp. 103–109.

6. Zhu, Sipeng; Ma, Zetai ; Zhang, Kun ; Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy, 2020, Book: 210, 118558, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.

7. Savenko A.E., Savenko P.S. Research of current distribution by phases in asynchronous electric motor with a combined winding. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(5):172–183.

8. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing.

Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering, pp. 400–405.

9. Batrak D.V., Kalinin I.M., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P. Assessment of supply-voltage quality in a ship's electric-power system by means of computer simulation. Russian Electrical Engineering. 2017. T. 88. № 12. С. 788-794.

10. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews, 2020, Book: 120,109611, DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.

11. Savenko A.E, Golubev A.N. Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.

12. Gracheva EI, Il'jasov I, Alimova AN. The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2018;20(3-4):62-71.

13. Ivshin I.V, Nizamiev M.F, Vladimirov O.V. Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of power plants. Power engineering: research, equipment, technology. 2014;3-4:109-114. 3

14. Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kuznecov P. V., Ship power plant with reversible shaft generator unit operating by dual-power machine scheme and variable speed diesel generator. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta , 2021, № 3. С. 93–100.

15. Savenko A.E., Savenko P.S. Supporting the operation of the electrical power system of modern special purpose vessels with dynamic positioning. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(6):99-108.

#### **Authors of the publication**

*Alexandr E. Savenko* - Kerch State Maritime Technological University. Savenko-70@mail.ru.

*Pavel S. Savenko* - marine faculty cadet, Kerch State Maritime Technological University.

***Поступило*** ***30.05.2022г.***

***Отредактировано*** ***02.06.2022г.***

***Принято*** ***02.06.2022г.***