

УДК 621.314.6:629.5.064
EDN: PWHNJA

Е.С. Гришаков, Д.А. Коляда
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Объект и цель научной работы. Целями исследования являются разработка имитационной модели трехфазного мостового управляемого выпрямителя в судовой электроэнергетической системе (СЭЭС), которая позволяет рассчитать коэффициент несинусоидальности при подключении нелинейной нагрузки, а также сравнение полученных данных с опытными данными лабораторной установки.

Материалы и методы. Для реализации имитационной модели применяется математический пакет Matlab. Для физической реализации схемы используется лабораторная установка, которая позволяет комбинировать число синхронных генераторов и виды нагрузок. Установка включает в себя главный распределительный щит (ГРЩ), два генератора, активную и реактивную нагрузку, управляемый тиристорный выпрямитель.

Основные результаты. Имитационная модель позволяет проводить измерения коэффициента несинусоидальности для одного или двух синхронных генераторов, работающих на линейную и нелинейную нагрузку. Модель позволяет устанавливать угол управления тиристорного выпрямителя и подбирать оптимальный вариант под конкретную нагрузку. Результаты моделирования и фактические данные лабораторного стенда имеют расхождение не более 6 %.

Закключение. В работе проводится исследование искажения синусоидальности напряжения в судовой электроэнергетической системе и возможности применения моделирования для получения предварительных результатов по величине коэффициента несинусоидальности. Осуществляется изучение возникновения и влияния на электрооборудование искажения синусоидальности напряжения, рассматриваются правила Российского морского регистра судоходства (РС) по искажению синусоидальности напряжения, а также приводятся возможные меры по уменьшению искажения синусоидальности напряжения.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, моделирование, Российский морской регистр судоходства, качество электрической энергии, гармоники, коэффициент несинусоидальности.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.314.6:629.5.064
EDN: PWHNJA

Ye.S. Grishakov, D.A. Kolyada
St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

SIMULATION OF CONTROLLED THREE-PHASE BRIDGE RECTIFIER IN MARINE ELECTRIC POWER SYSTEM

Object and purpose of research. The purpose of the study is to develop a simulation model for a controlled three-phase bridge rectifier in marine electric power system, so as to enable calculation of non-sinusoidality ratio for nonlinear load, as well as to compare simulation results with laboratory test data.

Materials and methods. The simulation was performed in Matlab software package. Model tests were performed on a laboratory test rig that can handle various numbers of synchronous generators and load types in their various combinations. Test model consisted of main switchboard (MSB), two generators, active load, reactive load and controlled rectifier (thyristor).

Для цитирования: Гришаков Е.С., Коляда Д.А. Моделирование трехфазного мостового управляемого выпрямителя в судовой электроэнергетической системе. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 99–106.

For citations: Grishakov Ye.S., Kolyada D.A. Simulation of controlled three-phase bridge rectifier in marine electric power system. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 99–106 (in Russian).

Main results. The model suggested by the authors enables measurements of non-sinusoidality ratio with one or two synchronous generators powering linear or nonlinear load. The model features adjustable control angle of rectifier (thyristor) to fit specific load. The discrepancy between simulation results and model test data did not exceed 6 %.

Conclusion. This study investigates voltage sinusoidality distortions in marine electric power systems, exploring the potential of numerical simulation tools in preliminary assessment of non-sinusoidality ratio. The authors examine the causes of voltage sinusoidality distortions, as well as their implications for electric equipment aboard the ship, discuss existing rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RS) with respect to voltage sinusoidality distortion and recommend possible solutions to mitigate voltage nonsinusoidality in marine power systems.

Keywords: marine electric power system, model tests, Russian Maritime Register of Shipping, power quality, harmonics, non-sinusoidality ratio.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В состав современного судна, которое является технически сложным объектом, входит множество систем, обеспечивающих его работоспособность. Одной из таких систем является судовая электроэнергетическая система. В основные задачи СЭЭС входят генерация электроэнергии, распределение электроэнергии между потребителями и преобразование электроэнергии.

Судно в своем составе может иметь мощные частотные преобразователи, выпрямители напряжения, преобразователи электроэнергии, которые зачастую искажают синусоидальность напряжения. В большинстве случаев проанализировать ситуацию и принять меры по уменьшению несинусоидальности представляется возможным уже после ввода судна в эксплуатацию [1]. Важнейшим параметром для СЭЭС является качество электрической энергии [2]. При функционировании одних элементов системы происходят электромагнитные процессы, которые влияют на работу других ее элементов.

Электромагнитное воздействие может приводить к серьезным нарушениям функционирования оборудования, на которое распространяется данное воздействие [3]. Значительная часть электрооборудования судна является нелинейной электрической нагрузкой, которая потребляет из сети несинусоидальный ток и искажает форму кривой напряжения. В свою очередь, нелинейные нагрузки генерируют гармонические токи. Протекание данных токов создает падение напряжения на сопротивлении сети (индуктивности генераторов, трансформаторов, кабелей).

Качество электрической энергии может оцениваться коэффициентом несинусоидальности напряжения и коэффициентами гармонических составляющих напряжения. Несинусоидальная периодическая функция при помощи теоремы Фурье рас-

кладывается на сумму основной синусоидальной составляющей и синусоидальной составляющей, частота которой кратна частоте основной составляющей. Данные показатели должны соответствовать требованиям Российского морского регистра судоходства (РС) [4], в котором устанавливаются показатели и нормы качества электроэнергии.

Моделирование работы судовой электроэнергетической системы

Simulation of marine electric power system operation

Согласно Правилам РС [4] значение суммарного коэффициента гармонических составляющих кривой напряжения не должно превышать 8 %. Компьютерное моделирование является эффективным методом анализа режимов работы СЭЭС.

Для моделирования работы СЭЭС удобно использовать программный комплекс Matlab, являющийся высокопроизводительным инструментом для подобных расчетов [5]. В данном пакете содержатся математические функции, которые применяются для решения инженерных и научно-технических задач высокой сложности. В состав Matlab включена подсистема Simulink, являющаяся графической средой имитационного моделирования, симуляции и анализа систем. Simulink позволяет использовать принцип визуального программирования, который позволяет создавать модель на основе стандартных блоков, содержащихся в библиотеке, и осуществлять расчеты [6].

Для создания виртуальной модели трехфазного управляемого выпрямителя в составе СЭЭС применяется библиотека блоков Simscape Electrical. Данная библиотека включает в себя блоки, использующиеся для моделирования работы электрических машин, пассивных электротехнических элементов, линий электропередачи, устройств силовой электроники, измерительных устройств, систем управ-

ления, а также источников электроэнергии. Применение моделирования является современным методом для проведения анализа разработанной модели, проверки функционирования технических средств под нагрузкой, а также позволяет оперативно изменить начальные параметры работы схемы [3].

На судне возможны ситуации, когда необходимо осуществлять электроснабжение потребителей только от одного генератора. Разработанная виртуальная модель трехфазного мостового управляемого выпрямителя в составе СЭС с одним генератором представлена на рис. 1. Модель является аналогом лабораторной установки, которая состоит из двух синхронных генераторов, ГРЩ, нагрузок (активная, реактивная) и управляемого тиристорного выпрямителя. Мощность каждого генератора составляет 5 кВт. При разработке схемы выполнены некоторые допущения: емкости преобразователя не оказывают влияние на процесс коммутации, активные сопротивления элементов СЭС пренебрежимо малы, импульсные искажения напряжения не влияют на работу систем фазного управления тиристорами.

Представленная модель состоит из следующих основных блоков [4]:

1. Three-Phase Source – трехфазный источник напряжения, имитирующий работу синхронного генератора;

2. Universal Bridge – трехфазный мостовой управляемый выпрямитель;
3. Series RLC Load – активная нагрузка;
4. Synchronized 6-pulse Generator – система фазного управления тиристорами;
5. измерительные блоки.

Блок Three-Phase Source соединяет 3 однофазных источника переменного напряжения. Активное сопротивление и индуктивность источника вводятся в соответствующие поля параметров блока.

Блок Universal Bridge имитирует универсальный трехфазный преобразователь, который включает в себя 6 переключателей (ключей), соединенных в мостовую схему. Тип и конфигурацию преобразователя можно выбрать в специальном выпадающем окне. Данный блок позволяет моделировать как выпрямительные устройства (с естественной коммутацией и управляемые), так и инверторы, использующие IGBT и MOSFET (МОП) транзисторы [5].

Параметры моделирования

Simulation parameters

На рис. 2 представлены параметры блоков Three-Phase Source и Universal Bridge. Блок Series RLC Load имитирует нагрузку, состоящую из последовательно соединенных R , L , C элементов. В данной

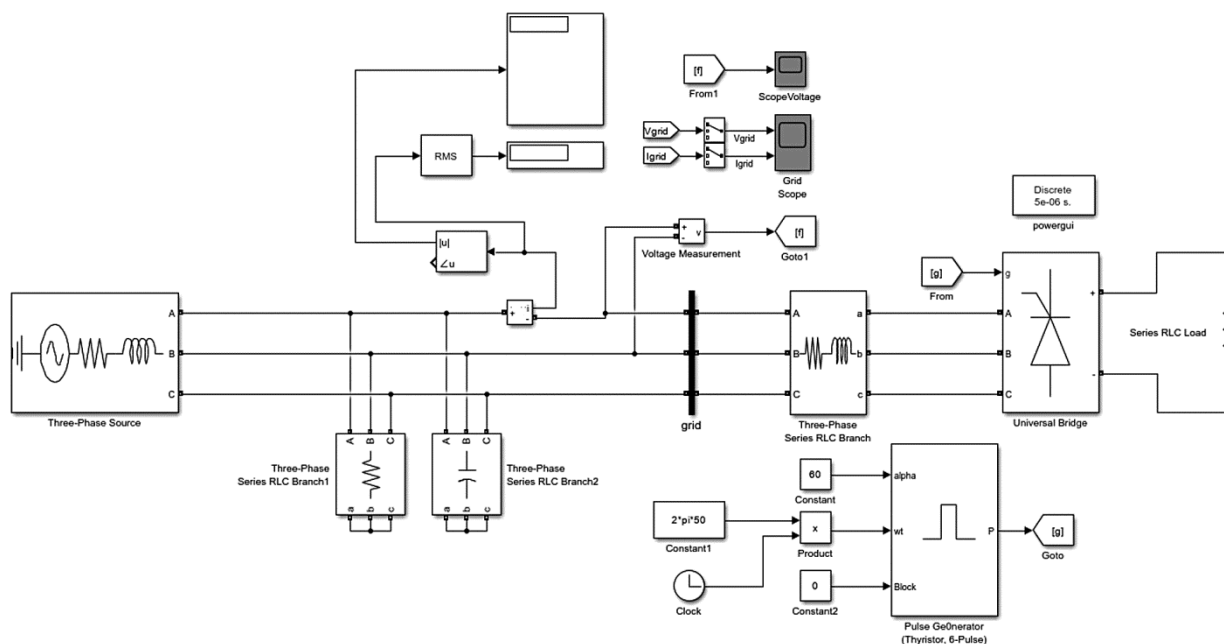


Рис. 1. Виртуальная модель электроэнергетической системы с трехфазным мостовым управляемым выпрямителем

Fig. 1. Virtual model of electric power system with controlled three-phase bridge rectifier

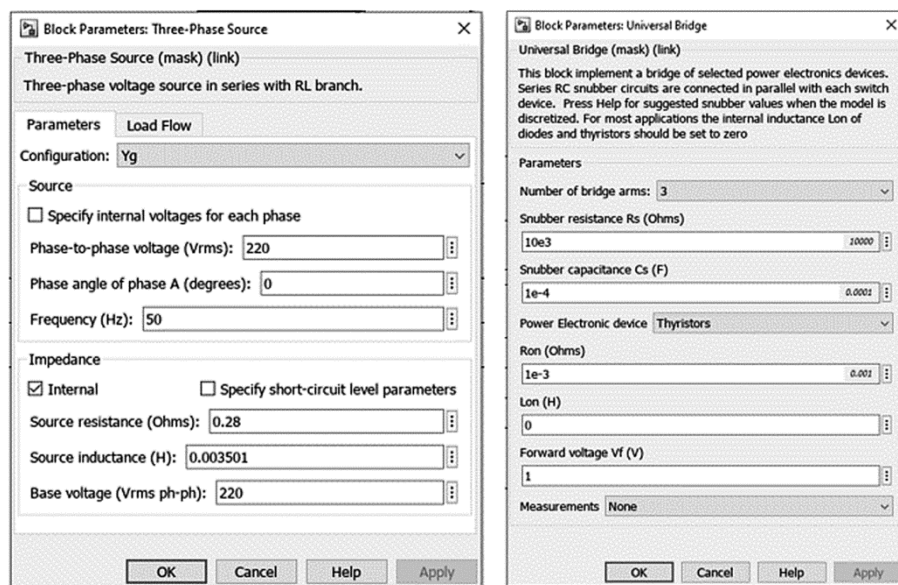


Рис. 2. Параметры блоков Three-Phase Source и Universal Bridge

Fig. 2. Parameters of Three-Phase Source and Universal Bridge blocks

модели в качестве нагрузки используется только активная составляющая, имитирующая ламповый реостат (4000 Вт), использованный при снятии экспериментальных характеристик. Напряжение электропитания переменного тока 220 В, частота 50 Гц.

Блок Synchronized 6-pulse Generator генерирует импульсы для управления тиристорами. На входы *AB*, *BC*, *CA* подаются соответствующие напряжения для осуществления фазного управления. Угол

управления задается в градусах при помощи блока Constant и подается на вход *alpha_deg*. С выхода блока Synchronized 6-pulse Generator подается сигнал на блок Universal Bridge для управления тиристорами. Параметры моделирования схемы представлены на рис. 3.

При моделировании работы трехфазного управляемого мостового выпрямителя в составе судовой электроэнергетической системы получены осцилло-

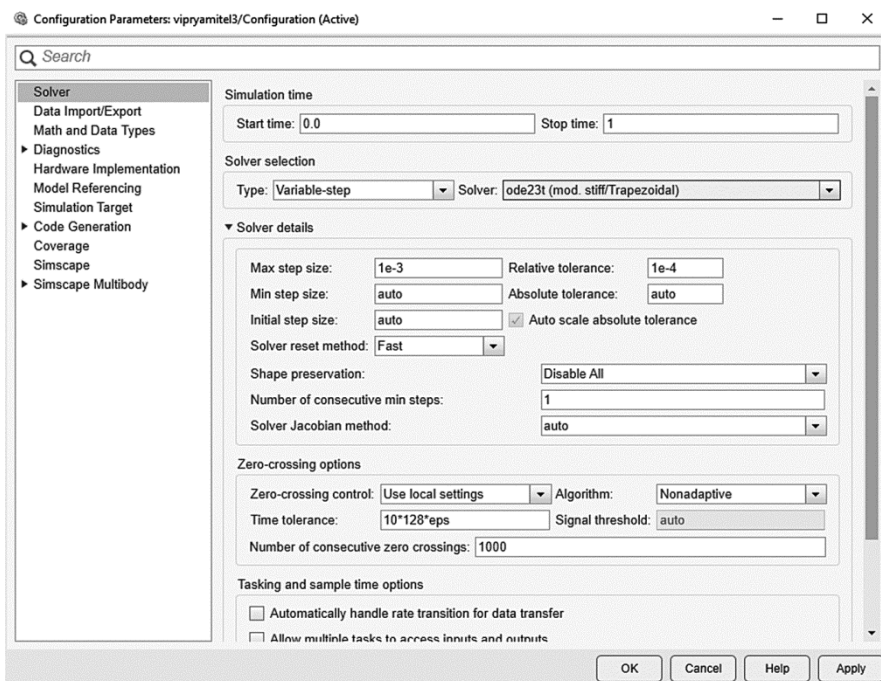
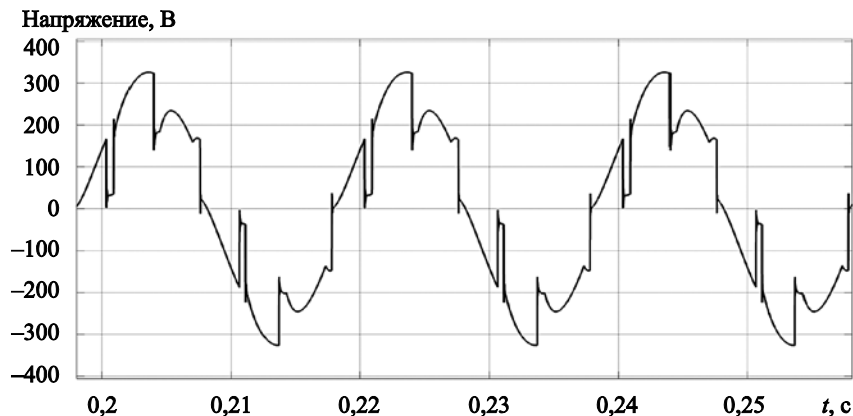


Рис. 3. Параметры моделирования схемы

Fig. 3. Circuit simulation parameters

Рис. 4. Осциллограмма линейного напряжения при работе тиристорного выпрямителя от одного генератора при угле управления 45° , полученная в результате моделирования
Fig. 4. Linear voltage oscillogram: thyristor rectifier powered by one generator, control angle 45° – simulation results



граммы линейных напряжений, спектры гармонического состава линейного напряжения и коэффициенты несинусоидальности ($K_{НС}$), полученные при помощи быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform Analysis) для различных углов управления (30° , 45° , 60° , 90°). Осциллограмма и спектр линейного напряжения для угла управления 45° представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Осциллограмма для угла управления 45° является наиболее искаженной и максимально отображает реальную ситуацию при работе тиристорного выпрямителя [7]. На осциллограмме отображены искажения и несинусоидальность напряжения. Такие искажения могут приводить к сбоям в работе и выходу из строя наиболее чувствительного оборудования, подключенного к судовой системе.

Наиболее штатным вариантом работы СЭЭС является получение электропитания потреби-

телями от двух генераторов. Для моделирования работы трехфазного управляемого мостового выпрямителя в составе судовой электроэнергетической системы при работе двух генераторов в модель добавлен дополнительный источник трехфазного напряжения, подключенный параллельно основному.

Результаты моделирования

Simulation results

Трехфазный мостовой выпрямитель может искажать синусоидальность напряжения до 25%. По своему принципу действия создает гармонические составляющие напряжения, которые негативно влияют на судовое электрооборудование. Значения коэффициентов несинусоидальности напряжения, измеренных на лабораторной установке

Напряжение гармонических составляющих, %

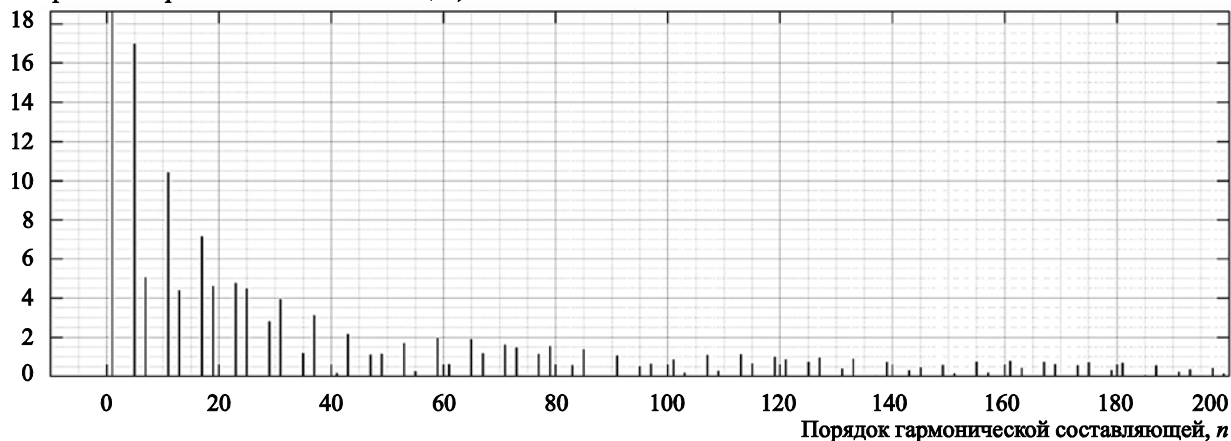


Рис. 5. Спектр гармонического состава линейного напряжения при работе тиристорного выпрямителя от одного генератора при угле управления 45° , полученный по результатам моделирования

Fig. 5. Harmonic spectrum of linear voltage: thyristor rectifier powered by one generator, control angle 45° – simulation results

и полученных при помощи моделирования в программе Matlab Simulink, отличаются с погрешностью не более чем 5,03 %.

При работе двух генераторов коэффициенты несинусоидальности значительно меньше, чем при работе одного генератора. Кривая напряжения содержит генерируемые нелинейной нагрузкой высшие гармоники, а не только основную гармоническую составляющую (50 Гц). Полученные данные при моделировании и измерениях на лабораторной установке объединены в таблице.

Выводы

Conclusions

Разработанная имитационная модель является удобным техническим решением при моделировании работы трехфазного мостового управляемого выпрямителя в судовой электроэнергетической системе. Коэффициент несинусоидальности при угле управления тиристором 90° является наиболее приемлемым в соответствии с Правилами РС. Угол управления 45° создает наиболее значительные искажения кривой напряжения.

Для повышения качества электроэнергии в судовой сети применяют разделение электрических сетей с помощью трансформаторов, электромашинных преобразователей и дополнительной установки фильтр-компенсирующих устройств, а также пассивные фильтры высших гармоник [8, 9], которые

устанавливаются параллельно источнику гармонических составляющих и компенсируют их воздействие на электроэнергетическую систему.

Для электропитания общесудовых приемников электроэнергии применяют дополнительную установку вспомогательной электростанции. На современных судах коэффициент несинусоидальности регулируют с помощью активных выпрямителей. Применяют СЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе и в качестве источников электроэнергии используют вентильные генераторные агрегаты и вентильные статические источники электроэнергии [10].

Список использованной литературы

1. Гришаков Е.С. Испытания преобразователей частоты большой мощности на соответствие требованиям Российского морского регистра судоходства по уровню кондуктивных помех // Актуальные проблемы морской энергетики : материалы XI Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГМТУ, 2022. С. 249–252. DOI: 10.52899/9785883036322_249_252.
2. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Москва : Стандартинформ, 2020. V, 52 с.
3. Обеспечение электромагнитной совместимости судового электрооборудования // А.М. Агафонов, А.А. Вор-

Таблица. Значения коэффициентов несинусоидальности, полученные при работе одного и двух генераторов

Table. Non-sinusoidality ratios for one and two generators at work

Значения коэффициентов несинусоидальности, полученные при работе одного генератора		
Угол управления α , °	Измеренный $K_{НС\ изм}$, %	Смоделированный $K_{НС\ мод}$, %
30	18,8	23,83
45	25,2	25,45
60	20,9	23,78
90	12,2	12,56
Значения коэффициентов несинусоидальности, полученные при работе двух генераторов		
30	16,7	16,15
45	18,5	17,30
60	11,0	15,50
90	4,9	8,47

- шевский, П.А. Воршевский, Е.С. Гришаков // Морской вестник. 2019. № 2(70). С. 55–57.*
4. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование : НД № 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2023. 428 с.
 5. *Герман-Галкин С.Г., Гришаков Е.С., Сеньков А.П.* Судовые единые электроэнергетические системы : учебное пособие. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГМТУ, 2023. 134 с.
 6. *Герман-Галкин С.Г.* Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2013. 442 с.
 7. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Москва : Стандартинформ, 2020. V, 33 с.
 8. Determining far-field EMI from near-field coupling of a power converter / *H. Chen, T. Wang, L. Feng, G. Chen // IEEE Transactions on power electronics. 2014. Vol. 29, № 10. P. 5257–5264. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2291442.*
 9. *Jiang D., Shen Z., Wang F.* Common-mode voltage reduction for paralleled inverters // *IEEE Transactions on power electronics. 2018. Vol. 33, № 5. P. 3961–3974. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2712369.*
 10. *Григорьев А.В.* Решение проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13, № 5. С. 753–763. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763.*
 4. *shevsky, Ye.S. Grishakov // Morskoj Vestnik. 2019. No. 2(70). P. 55–57 (in Russian).*
 4. RS Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships (2023 edition). Part XI. Electrical equipment (Regulatory Document No. 2-020101-174-E). St. Petersburg, 2023. 428 p.
 5. *German-Galkin S.G., Grishakov Ye.S., Senkov A.P.* Integrated electric power systems for ships. Student's Guide. St. Petersburg : Publishing House of St. Petersburg State Marine Technical University, 2023. 134 p. (in Russian).
 6. *German-Galkin S.G.* Virtual laboratories of semi-conductor system in Matlab-Simulink environment. St. Petersburg [et al.] : Lan', 2013. 442 p. (in Russian).
 7. GOST 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Electromagnetic compatibility. General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Moscow : Standartinform, 2020. V, 33 p. (in Russian).
 8. Determining far-field EMI from near-field coupling of a power converter / *H. Chen, T. Wang, L. Feng, G. Chen // IEEE Transactions on power electronics. 2014. Vol. 29, No. 10. P. 5257–5264. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2291442.*
 9. *Jiang D., Shen Z., Wang F.* Common-mode voltage reduction for paralleled inverters // *IEEE Transactions on power electronics. 2018. Vol. 33, No. 5. P. 3961–3974. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2712369.*
 10. *Grigoryev A.V.* Electromagnetic compatibility in power systems with semi-conductor converters // *Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2021. Vol. 13, No. 5. P. 753–763. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763 (in Russian).*

References

1. *Grishakov Ye.S.* Tests of heavy-duty frequency converters for compliance with RS requirements in terms of conductivity interference // *Current challenges in marine power engineering : Materials of the XIth International Scientific & Technical Conference. St. Petersburg : Publishing House of St. Petersburg Marine Technical University, 2022. P. 249–252. DOI: 10.52899/9785883036322_249_252 (in Russian).*
2. GOST 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008). Electric power. Electromagnetic compatibility. Measurement methods for power quality. Moscow : Standartinform, 2020. V, 52 p. (in Russian).
3. Electromagnetic compatibility of marine electric equipment / *A.M. Agafonov, A.A. Vorshevsky, P.A. Vor-*

Сведения об авторах

Гришаков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры электротехники и электрооборудования судов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: grishakove@mail.ru.

Коляда Дмитрий Александрович, студент 2-го курса магистратуры, кафедра электротехники и электрооборудования судов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: kolyada-dmitrii@mail.ru.

About the authors

Yevgeny S. Grishakov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Electric Engineering and Marine Electrics, St. Pe-

tersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: grishakove@mail.ru.

Dmitry A. Kolyada, 2nd Year Master Student, Department of Electric Engineering and Marine Electrics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: kolyada-dmitrii@mail.ru.

Поступила / Received: 17.04.24
Принята в печать / Accepted: 22.05.24
© Гришаков Е.С., Коляда Д.А., 2024