Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 95–103
LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 95–103

УДК 621.314: 629.563 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-95-103

Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований качества электроэнергии в судовой сети при установке фильтрокомпенсирующих устройств

А. В. Григорьев[✉1,3], **М. Ю. Хмель**[2], **С. М. Малышев**[1,2]

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[2] Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова

[3] АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Россия

✉ a.grigorev@eds-marine.ru

Аннотация. Рассматривается проблема обеспечения качества электрической энергии в судовых электроэнергетических системах с мощной полупроводниковой нагрузкой. Представлены результаты компьютерного моделирования и натурных испытаний системы электродвижения ледокола «Капитан Зарубин» после установки фильтров 5-й и 7-й гармоник. Проведен сравнительный анализ формы кривых напряжения и гармонического состава на главном распределительном щите в различных режимах эксплуатации системы электродвижения. Приведены результаты натурных и компьютерных экспериментов. Анализ результатов подтверждает снижение коэффициента гармоник напряжения до уровня, регламентируемого Российским морским регистром судоходства.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, качество электроэнергии, высшие гармоники, тиристорный преобразователь, резонансный фильтр, компьютерное моделирование, натурные испытания, гребная электрическая установка, коэффициент гармоник напряжения

Для цитирования: Григорьев А. В., Хмель М. Ю., Малышев С. М. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований качества электроэнергии в судовой сети при установке фильтрокомпенсирующих устройств // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 95–103. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-95-103.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Simulation and Experimental Verification of the Effectiveness of Filter-Compensating Devices in a Marine Electric Power System with Thyristor Converters

A. V. Grigoriev[✉1,3], **M. Yu. Khmel**[2], **S. M. Malyshev**[1,2]

[1] Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia

[2] Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

[3] Research and Production Center «Electric Ship Propulsion» (JSC), Saint Petersburg, Russia

✉ a.grigorev@eds-marine.ru

Abstract. The article examines the problem of ensuring the quality of electrical energy in ship electrical power systems with a high-power semiconductor load. The results of computer modeling and full-scale tests of the electric propulsion system of the icebreaker «Kapitan Zarubin» after installing filters for the 5th and 7th harmonics are presented. A comparative analysis of the shape of voltage curves and harmonic content at the main

© Григорьев А. В., Хмель М. Ю., Малышев С. М., 2026

switchboard in various operating modes of the electric propulsion system was carried out. The results of full-scale and computer experiments are presented. The analysis of the results confirms a reduction in the voltage harmonic coefficient to the level regulated by the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: marine electric power system, power quality, higher harmonics, thyristor converter, resonant filter, computer modeling, field tests, electric propulsion system, voltage harmonic coefficient

For citation: Grigoriev A. V., Khmel M. Yu., Malyshev S. M. Simulation and Experimental Verification of the Effectiveness of Filter-Compensating Devices in a Marine Electric Power System with Thyristor Converters // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 95–103. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-95-103.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Введение. На судах с электродвижением, в частности на ледоколах, в составе гребного электропривода применяются полупроводниковые преобразователи. Полупроводниковые преобразователи снижают качество электроэнергии в судовой сети, в том числе значительно повышается коэффициент гармоник напряжения.

Использование полупроводниковых преобразователей в гребной электрической установки (ГЭУ) приводит к появлению в судовой сети высших гармоник тока и напряжения. Наибольшие по значению – гармоники 5-го и 7-го порядков, что вызывает дополнительные потери и нагрев электрооборудования, ложные срабатывания элементов автоматики. Требования Регистра судоходства (РС) ограничивают уровень гармонических составляющих напряжения в судовой сети до 8 % [1], [2].

Для питания общесудовых приемников электроэнергии на судах с ГЭУ находят электромашинные преобразователи, которые имеют ряд общеизвестных недостатков. Электромашинные преобразователи целесообразно заменять на силовые трансформаторы напряжения. Для повышения качества электроэнергии в судовой сети в данном случае необходимо применять пассивные фильтры высших гармоник.

На ледоколе «Капитан Зарубин» для питания общесудовых приемников электроэнергии применяются электромашинные преобразователи, срок службы которых исчерпан. В настоящее время выработавший ресурс электромашинный преобразователь заменен на понижающий трансформатор. При замене электромашинного преобразователя на трансформатор в судовой сети значительно снизилось качество электроэнергии, в том числе повысился суммарный коэффициент гармоник напряжения. Повысить качество электроэнергии до требуемого правилами РС уровня возможно, установив фильтры 5-й и 7-й гармоник на ГРЩ.

Объект и методы исследования. Объектом исследования служит судовая электроэнергетическая система (СЭЭС) ледокола «Капитан Зарубин». К главному распределительному устройству (ГРУ) напряжением 660 В подключены три синхронных генератора мощностью по 1800 кВА каждый. К основным нелинейным нагрузкам судовой электростанции относятся три трехфазных мостовых тиристорных 6-пульсных выпрямителя, питающих гребные электродвигатели (ГЭД) постоянного тока [3], [4].

Для питания общесудовых потребителей к ГРУ-660 В подключены три электромашинных преобразователя 380 В [1]. Во время проведения модернизации вместо одного электромашинного преобразователя был установлен силовой понижающий трансформатор ТСЗМ-500 ОМ5 мощностью 500 кВА, с напряжением короткого замыкания, равным $u_k = 1.2\,\%$, с соединением обмоток «звезда-треугольник» (Y/D).

Схема судовой электроэнергетической системы ледокола «Капитан Зарубин» с системой электродвижения (СЭД) представлена на рис. 1.

Последовательно с трансформатором TV на стороне 660 В включен реактор с индуктивностью 15 мГн. Для обеспечения требуемого качества напряжения на шинах 380 В установлены резонансный *LC*-фильтр 5-й и 7-й гармоник. Место установки *LC*-фильтра на стороне 380 В выбрано в соответствии с электротехническими расчетами, выполненными на стадии технического проектирования.

В состав СЭЭС и СЭД ледокола «Капитан Зарубин» (рис. 1) входит:

1) главные генераторы;
2) полупроводниковые выпрямители;
3) гребные электродвигатели;
4) ГРУ-660 В;
5) электромашинные преобразователи;
6) силовой трансформатор 660/380 В;

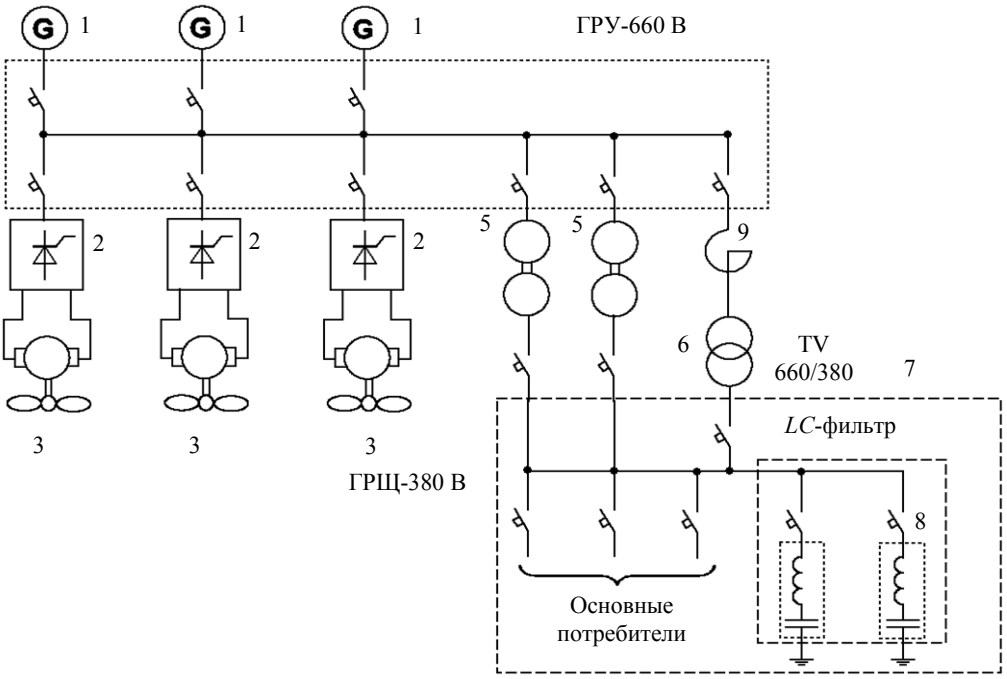


Рис. 1. Схема судовой электроэнергетической системы ледокола «Капитан Зарубин»
Fig. 1. Diagram of the ship's electric power system of the icebreaker «Kapitan Zarubin»

7) главный распределительный щит (ГРЩ) 380 В;

8) *LC*-фильтры;

9) реактор.

Для выбора параметров *LC*-фильтр на стадии технического проектирования проведены электротехнические расчеты и компьютерное моделирование.

Компьютерная модель СЭЭС ледокола «Капитан Зарубин». Компьютерное моделирование СЭЭС проведено в среде Simulink. При моделировании разработана имитационная компьютерная модель, включающая генераторы, трансформаторы и тиристорные преобразователи [2] в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

Компьютерная модель СЭЭС ледокола «Капитан Зарубин» представлена на рис. 2.

В состав компьютерной модели входит:

1) генератор 1800 кВА – блок Simplified Synchronous Machine pu Units;

2) силовой трансформатор TV 660/380 В – блок Three-Phase Transformer (Two Windings);

3) эквивалентная нагрузка трансформатора – блок Series RLC;

4) фильтр 5-й гармоники – блок Series RLC;

5) фильтр 7-й гармоники – блок Series RLC;

6) полупроводниковый выпрямитель – блок Universal Bridge;

7) эквивалентная нагрузка полупроводникового выпрямителя – блок Series RLC.

Результаты компьютерного моделирования СЭЭС ледокола «Капитан Зарубин». Компьютерное моделирование проведено для режима работы одного дизель-генератора (ГДГ) и трех ГЭУ с углом управления тиристоров выпрямителя 45°, что соответствует режиму максимальных искажений в судовой сети [5], [6].

Исследовались режимы работы СЭЭС без фильтров и с различными комбинациями включения фильтров гармоник. В результате компьютерного моделирования получены расчетные осциллограммы и спектры напряжения на ГРУ 660 В и ГРЩ 380 В.

На рис. 3 приведены мгновенные значения напряжения для режима работы без фильтров высших гармоник.

На рис. 4 приведены результаты спектрального анализа мгновенного значения напряжения на ГРУ-660 В для режима работы СЭЭС с отключенными *LC*-фильтрами.

Расчетное значение коэффициента гармоник напряжения THD (Total Harmonic Distortion) в заданном режиме значительно превышает допустимый уровень 8 % и составляет 15.35 %.

На рис. 5 приведено мгновенное значение напряжения на ГРЩ 380 В с отключенными *LC*-фильтрами.

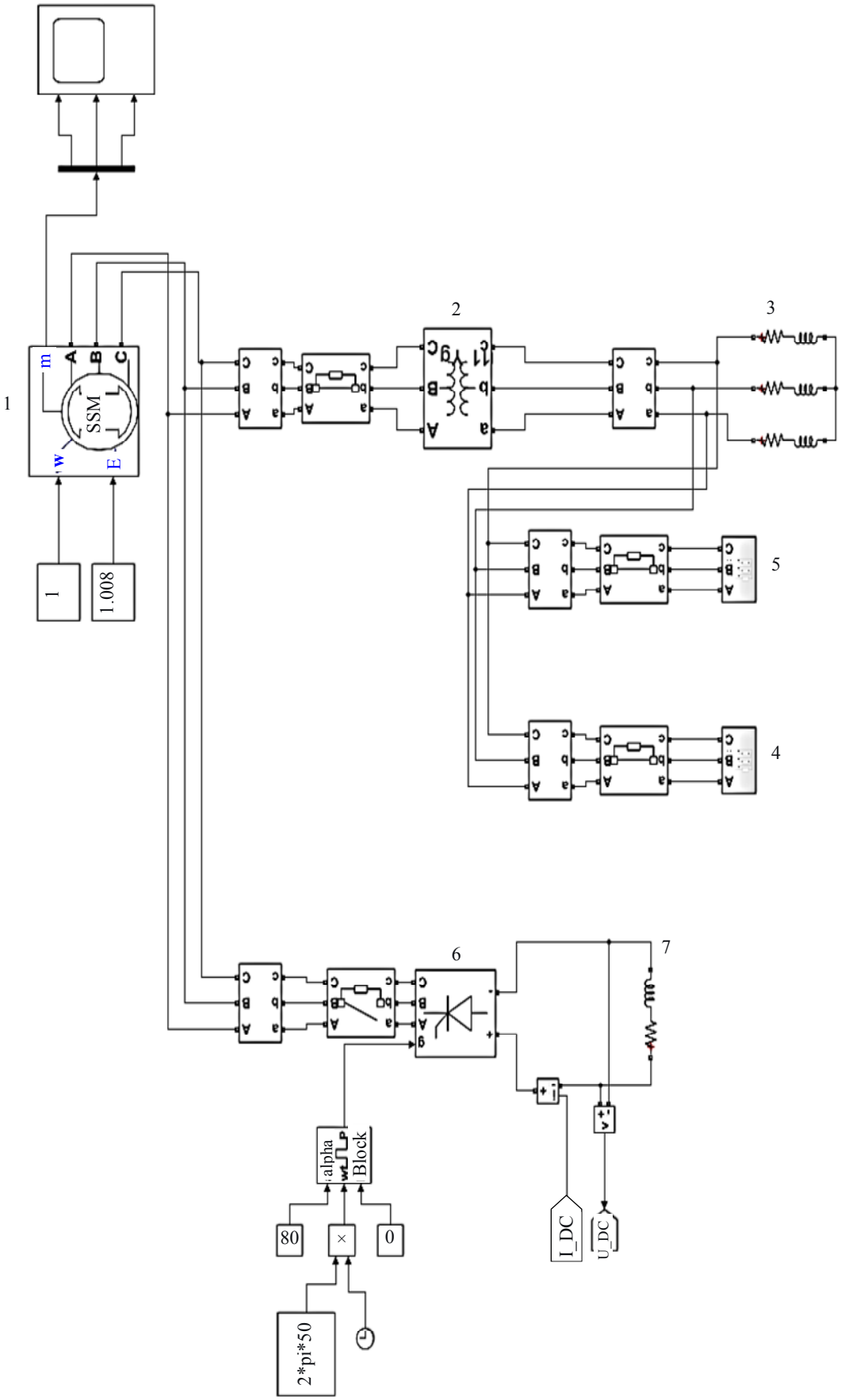


Рис. 2. Компьютерная модель судовой электроэнергетической системы
Fig. 2. Computer model of the ship's electric power system of the icebreaker

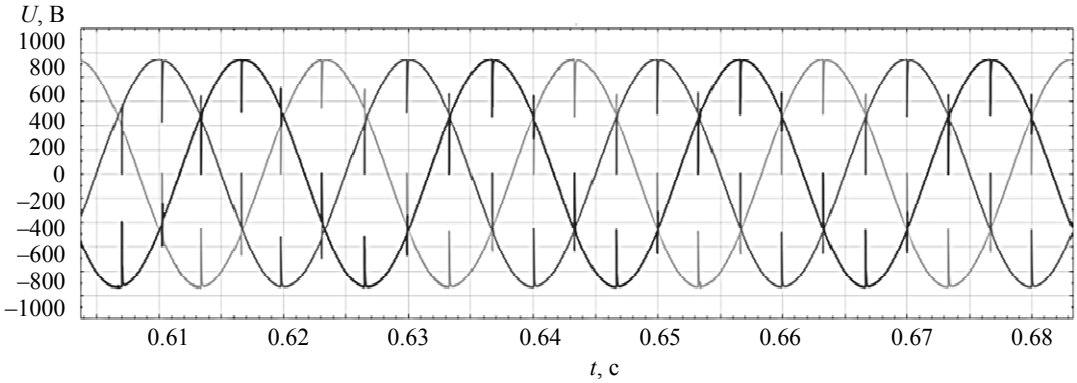


Рис. 3. Мгновенное значение напряжения на ГРУ 660 В с отключенными *LC*-фильтрами
Fig. 3. The instantaneous value of the voltage on the GRU is 660 V with the LC filters switched off

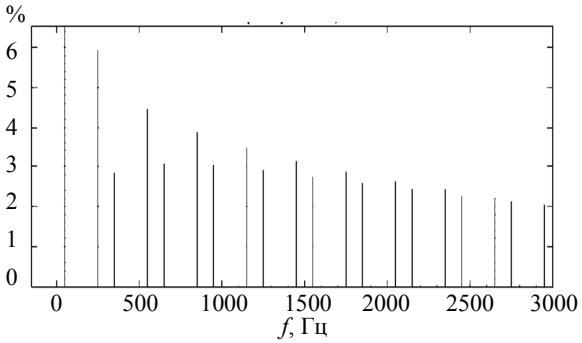


Рис. 4. Гармонический состав напряжения на ГРУ-660 В с отключенными *LC*-фильтрами
Fig. 4. Harmonic composition of voltage at the 660 V main switchboard (GRU) with LC filters disconnected

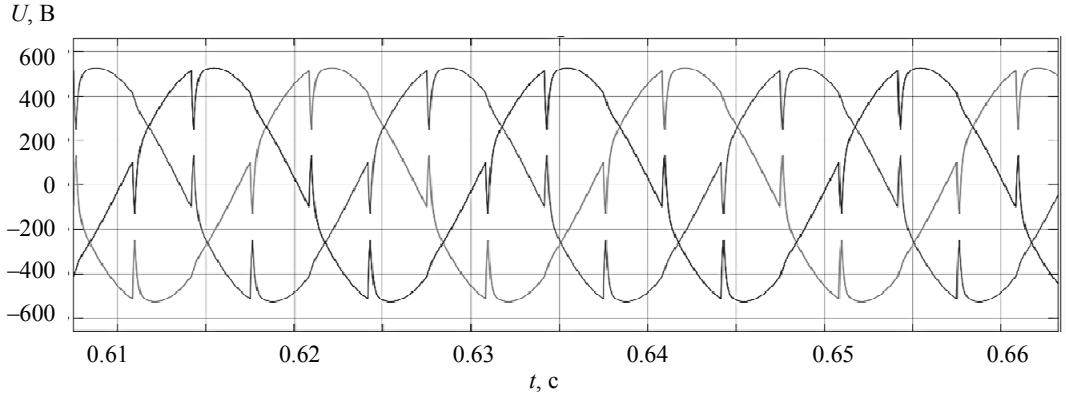


Рис. 5. Мгновенное значение напряжения на шинах 380 В с отключенными *LC*-фильтрами
Fig. 5. Instantaneous voltage value on the 380 V busbars with LC filters disconnected

На рис. 6 приведены результаты спектрального анализа мгновенного значения напряжения на ГРЩ 380 В для режима работы СЭЭС с отключенными *LC*-фильтрами.

Расчетное значение THD в заданном режиме на шинах ГРЩ 380 В значительно превышает допустимый уровень 8 % и составляет 15.95 %.

Включение резонансных фильтров, настроенных на частоты 250 и 350 Гц, позволило снизить коэффициент гармоник напряжения до допустимого.

На рис. 7 приведены мгновенные значения напряжения в судовой сети 380 В после включения фильтров высших гармоник.

На рис. 8 представлен гармонический состав напряжения в судовой сети 380 после включения фильтра высших гармоник.

Их рис. 8 видно, что уровни 5-й и 7-й гармоник после подключения фильтров высших гармоник снижаются до 3.3 %, что подтверждает правильность проведенных расчетов и выбора параметров фильтров, проведенных на стадии технического проектирования.

Результаты экспериментальных исследований СЭЭС ледокола «Капитан Зарубин». Измерения и экспериментальные исследования проводились непосредственно на борту ледокола.

Для измерения переходных процессов в СЭЭС ледокола «Капитан Зарубин» использовался анализатор качества электроэнергии Fluke 435 II и осциллограф АКИП-4131/2А.

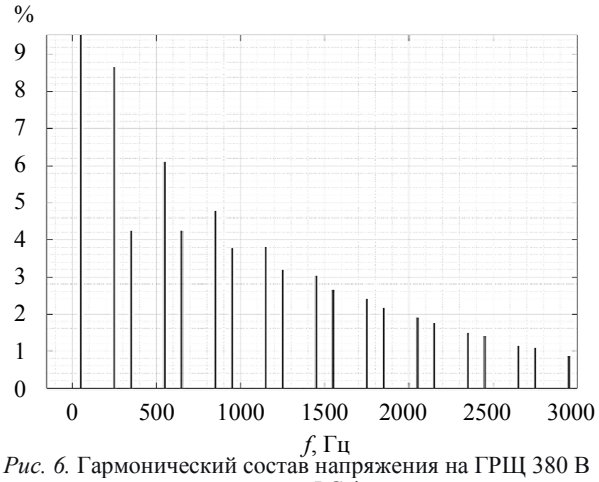


Рис. 6. Гармонический состав напряжения на ГРЩ 380 В с отключенными *LC*-фильтрами
Fig. 6. Harmonic composition of voltage at the 380 V main switchboard (GRSH) with *LC* filters disconnected

При проведении экспериментальных исследований проводилась запись параметров напряжения (*U*) и коэффициента нелинейных искажений (THD) на вторичной стороне трансформатора (ГРЩ 380 В). При проведении экспериментальных исследований производилось осциллографирование напряжения на шинах ГРУ 660 В и ГРЩ 380 В.

На рис. 9 приведены осциллограммы напряжения на шинах ГРУ 660 при отключенных фильтрах высших гармоник.

Из рисунка видно, что форма кривой мгновенного значения напряжения совпадает с формой кривой напряжения, полученной в результате компьютерного моделирования.

На рис. 10 представлена осциллограмма и гармонический состав напряжения на шинах ГРЩ 380 при отключенных фильтрах высших гармоник, полученные при проведении экспериментальных исследований на борту ледокола.

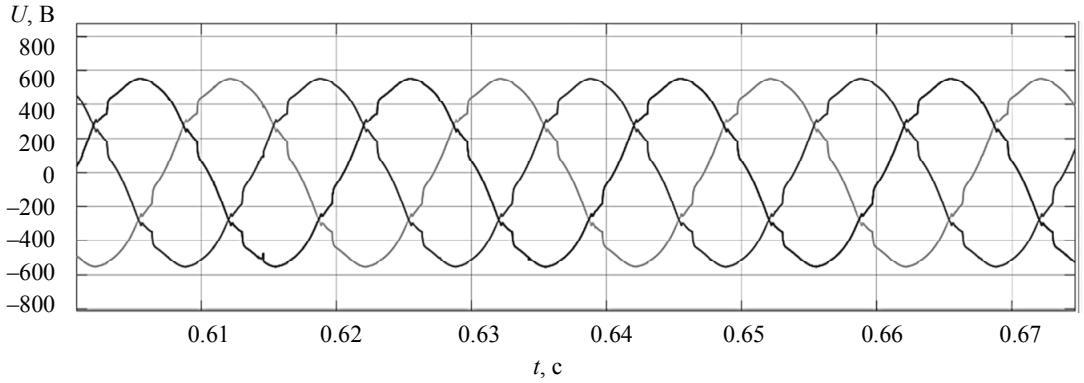


Рис. 7. Гармонический состава напряжения на ГРЩ 380 В с включенным *LC*-фильтром
Fig. 7. Harmonic composition of the voltage across the GRS-380 V with the *LC* filter turned on

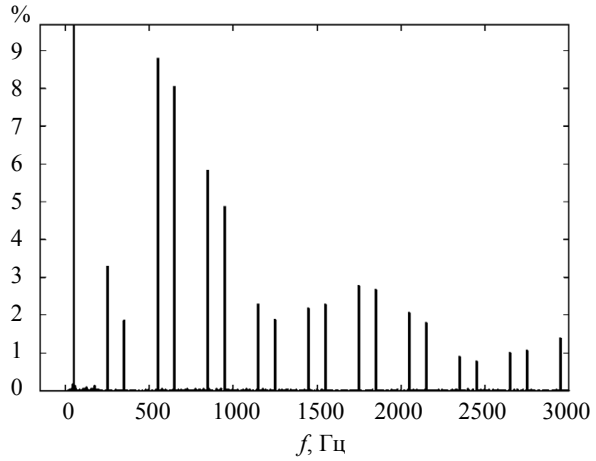


Рис. 8. Гармонический состава напряжения на ГРЩ-380 В с включенным *LC*-фильтром
Fig. 8. Harmonic composition of the voltage across the GRS-380 V with the *LC* filter turned on

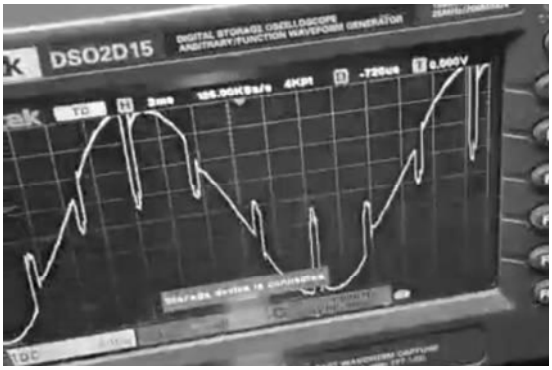
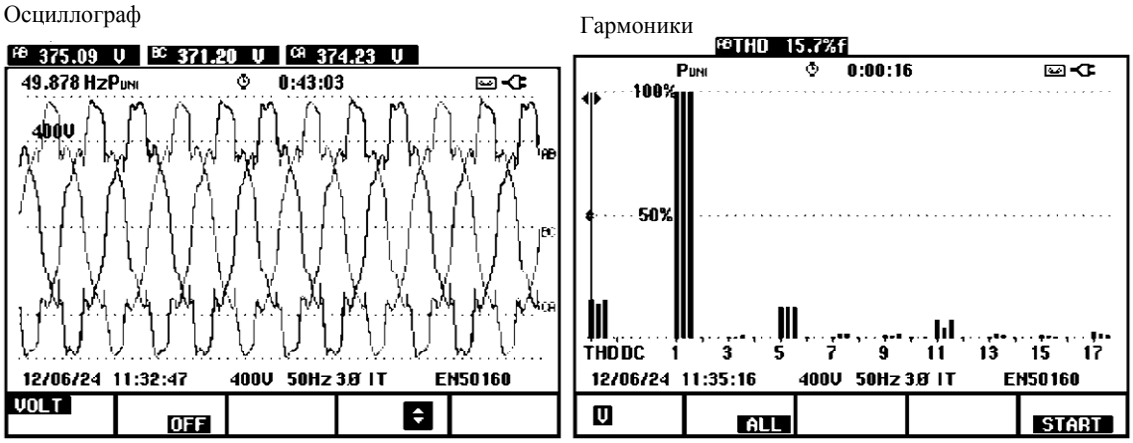
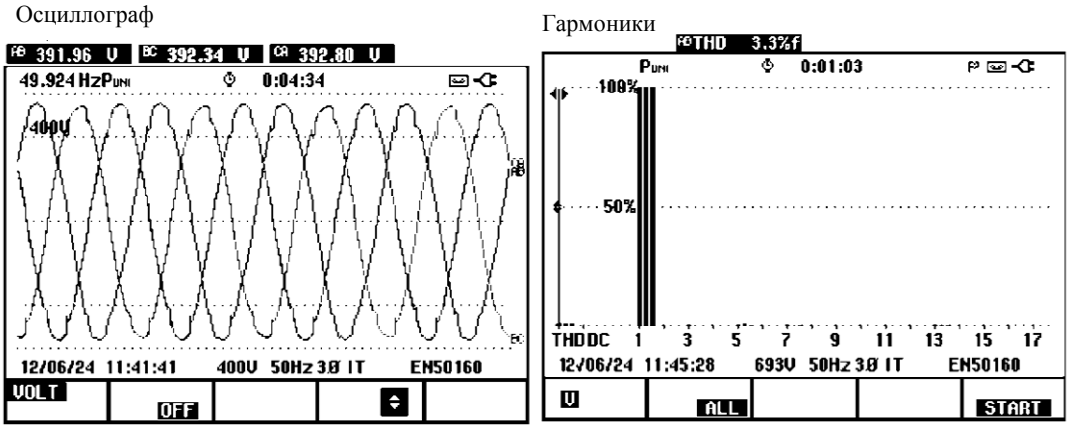


Рис. 9. Осциллограмма напряжения ГРУ-660 на борту ледокола «Капитан Зарубин»
Fig. 9. Voltage oscillogram GRU-660 on board the icebreaker «Captain Zarubin»



а *б*

Рис. 10. Осциллограмма (*а*) и спектр напряжения (*б*) на ГРЩ-380 В при отключенных *LC*-фильтрах
Fig. 10. Waveform (*а*) and voltage spectrum (*б*) with disabled filters on board



а *б*

Рис. 11. Осциллограмма (*а*) и спектр напряжения (*б*) при включенных фильтрах натурные испытания
Fig. 11. Waveform (*а*) and voltage spectrum (*б*) with filters turned on field tests

Сравнение результатов компьютерного моделирования и натурных испытаний
Comparison of the results of computer modeling and field tests

Параметр	Компьютерное моделирование		Натурные испытания	
	Без фильтра	Включен *LC*-фильтр	Без фильтра	Включен *LC*-фильтр
THD напряжения на ГРУ-660 В, %	15.35	15.23	–	–
THD напряжения на ГРЩ-380 В, %	15.95	3.3	15.7	3.3

При включении фильтра высших гармоник форма кривой мгновенного значения напряжения приближается к синусоидальной форме, что видно из рис. 11.

Проведенный гармонический анализ формы кривой напряжения подтвердил отсутствие 5-й и 7-й гармоник в судовой сети с напряжением 380 В. Значение коэффициента THD для напряжения в данном режиме составило 3.3 %, что допускается правилами РС.

Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования экспериментальных исследований. Сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, проведенных на ледоколе представлены в таблице.

Сравнительный анализ показывает хорошую сходимость результатов компьютерного моделирования и проведенных экспериментальных исследований на борту ледокола «Капитан Зарубин».

Натурные экспериментальные испытания подтвердили выводы, полученные в результате проведения компьютерного эксперимента. Форма кривой напряжения при установке трансформатора вместо электромашинного преобразователя имеет значительные искажения от синусоидаль-

ной формы. Для повышения качества электроэнергии при замене электромашинных преобразователей на трансформаторы необходимо дополнительно устанавливать фильтры высших гармоник [7], [8].

Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной компьютерной модели и правильность принятых технических решений по расчету и применению фильтро-компенсирующего устройства в судовой сети.

Полученные результаты подтвердили возможность замены электромашинных преобразователей в судовой сети с полупроводниковыми преобразователями ГЭУ на трансформаторы напряжения с применением статических фильтров.

Подтверждена целесообразность применения пассивных резонансных фильтров для подавления низкочастотных гармоник в СЭЭС.

Выводы и заключение.

1. При замене электромашинных преобразователей на трансформаторы в единых СЭЭС значительно снижается качество электроэнергии, при этом суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения превышает допустимое РС значение.

2. Повышение качества электроэнергии до допустимого значения возможно посредством применения пассивных фильтров высших гармоник. Для применения в составе СЭЭС ледокола «Капитан Зарубин» трансформаторов выбран пассивный фильтр высших гармоник. Расчеты показали возможность повышения качества электроэнергии при использовании фильтров 5-й и 7-й гармоник.

3. Для подтверждения выбора параметров фильтра целесообразно использовать компьютерное моделирование СЭЭС и проведение вычислительных экспериментов. Компьютерное моделирование переходных процессов СЭЭС ледокола «Капитан Зарубин», которое подтвердило предположение о возможности повышения качества электроэнергии с помощью фильтров высших гармоник.

4. Проведены экспериментальные исследования качества электроэнергии в судовой сети ледокола «Капитан Зарубин», которые подтвердили правильность теоретических положений и расчетов фильтра гармоник. Коэффициент гармоник напряжения в судовой сети при использовании статических фильтров снизился с 15 до 4 %.

5. Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и натурных экспериментальных исследований, проведенных на ледоколе «Капитан Зарубин», подтвердил их хорошую сходимость. Разработанную компьютерную модель целесообразно использовать для проведения расчетов качества электроэнергии в СЭЭС судов различного назначения с СЭД.

Список литературы

1. Григорьев А. В. Судовые системы электродвижения и электроэнергетические системы. Санкт-Петербург: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2022. 288 с.

2. Гришаков Е. С., Коляда Д. А. Моделирование трехфазного мостового управляемого выпрямителя в судовой электроэнергетической системе // Тр. Крыл. ГНЦ. 2024. Т. 2, № 408. С. 99–106.

3. Abdollahi R., Gharehpetian G.B. Inclusive Design and Implementation of Novel 40-Pulse AC–DC Converter for Retrofit Applications and Harmonic Mitigation // IEEE Trans. on Industr. Electron. 2015. Vol. 63, no. 2. P. 667–677. doi: 10.1109/TIE.2015.2481364.

4. Abdollahi R. A novel delta/hexagon-connected transformer-based 72-pulse AC-DC converter for power quality improvement // World Appl. Sci. J. 2013. Vol. 23, no. 3. P. 390–401. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.03.1598.

5. Байко А. В., Скворцов Б. А., Хмель М. Ю. К выбору силового согласующего трансформатора в составе системы электродвижения атомного ледокола проекта 22220 // Тр. Крыловского гос. НЦ. 2024. Т. 1, № 407. С. 65–76.

6. Gamit K., Chaudhari K. Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and its THD comparison for power quality issues // Intern. Research J. of Engin. and Technol. (IRJET). 2016. Vol. 03, no. 01. P. 1025–1033.

7. Singh B., Gairola, S. Pulse multiplication in autotransformer based ACDC converters using a zigzag connection // J. of Power Electron. 2007. Vol. 7, no. 3. P. 191–202.

8. Thirty-six pulse rectifier scheme based on zigzag auto-connected transformer / C. Xiao-Qiang, Ch.-L. Hao, H. Qiu, M. Li // Arch. of Electr. Engin. Vol. 65, no. 1. P. 117–132.

Информация об авторах

Григорьев Андрей Владимирович – канд. техн. наук, ген. директор АО «НПЦ «Электродвижение судов», Фермское ш., 12, лит. Е, пом. 178, Санкт-Петербург, 197341, Россия; профессор кафедры Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Двинская ул., 5/7, Санкт-Петербург, 198035, Россия; доцент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: a.grigorev@eds-marine.ru

Малышев Сергей Михайлович – начальник отдела АО «НПЦ «Электродвижение судов»; старший преподаватель Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; старший преподаватель кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: malyshev@eds-marine.ru

Хмель Михаил Юрьевич – инженер по наладке и испытаниям АО «НПЦ «Электродвижение судов»; соискатель Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Двинская ул., 5/7, Санкт-Петербург, 198035, Россия.
E-mail: t89095838912@yandex.ru

References

1. Grigor'ev A. V. Sudovye sistemy jelektrodvizhenija i jelektrojenergeticheskie sistemy: monografija. Sankt-Peterburg: Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2022. 288 s. (In Russ.).

2. Grishakov E. S., Koljada D. A. Modelirovanie trehfaznogo mostovogo upravljaemogo vyprjamitelja v sudovoj jelektrojenergeticheskoj sisteme // Tr. Kryl. GNC. 2024. T. 2, № 408. S. 99–106. (In Russ.).

3. Abdollahi R., Gharehpetian G. B. Inclusive design and implementation of novel 40-Pulse AC–DC converter for retrofit applications and harmonic mitigation // IEEE Trans. on Industr. Electron. 2015. Vol. 63, no. 2. P. 667–677. doi: 10.1109/TIE.2015.2481364.

4. Abdollahi R. A novel delta/hexagon-connected transformer-based 72-pulse AC-DC converter for power quality improvement // World Appl. Sci. J. 2013. Vol. 23, no. 3. P. 390–401. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.03.1598.

5. Bajko A. V., Skvorcov B. A., Hmel' M. Ju. K vyboru silovogo soglasujushhego transformatora v sostave sistemy jelektrodvizhenija atomnogo ledokola proekta 22220 // Tr. Krylovskogo gos. NC. 2024. T. 1, № 407. S. 65–76. (In Russ.).

6. Gamit K., Chaudhari K. Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and its THD comparison for power quality issues // Intern. Research J. of Engin. and Technol. (IRJET). 2016. Vol. 03, no. 01. P. 1025–1033.

7. Singh B., Gairola, S. Pulse multiplication in autotransformer based ACDC converters using a zigzag connection // J. of Power Electron. 2007. Vol. 7, no. 3. P. 191–202.

8. Thirty-six pulse rectifier scheme based on zigzag auto-connected transformer / C. Xiao-Qiang, Ch.-L. Hao, H. Qiu, M. Li // Arch. of Electr. Engin. Vol. 65, no. 1. P. 117–132.

Information about the authors

Andrey V. Grigoriev – Cand. Sci. (Eng.), General Director of JSC Research and Production Center Electric Propulsion of Ships, Fermskoe Sh., 12, lit. E, off. 178, St. Petersburg, 197341, Russia; Professor of the Department of Ship Electrical Equipment and Electric Power Systems, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dwinskaja St., 5/7, Saint Petersburg, 198035, Russia; Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: a.grigoriev@eds-marine.ru

Sergey M. Malyshev – Chief Engineer of JSC Research and Production Center Electric Propulsion of Ships, Fermskoe Sh., 12, lit. E, off. 178, St. Petersburg, 197341, Russia; Senior lecturer of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dwinskaja Str., 5/7, Saint Petersburg, 198035, Russia; Senior lecturer the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: malyshev@eds-marine.ru

Mikhail Yu. Khmel – Commissioning and Testing Engineer of JSC Research and Production Center Electric Propulsion of Ships; Fermskoe Sh., 12, lit. E, off. 178, St. Petersburg, 197341, Russia; Applicant of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dwinskaja Str., 5/7, Saint Petersburg, 198035, Russia.
E-mail: t89095838912@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 08.05.2026; принята к публикации после рецензирования 19.08.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 08.05.2026; accepted 19.08.2026; published online 27.11.2026.