

АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР ДЛЯ ОДНОФАЗНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ СУДОВОЙ СЕТИ

А. В. Вынгра

*Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Российская Федерация*

Рассматривается вопрос документального контроля уровня гармонических искажений в судовой сети. Предложено применение активных фильтров для повышения качества электроэнергии на судне. Приведена структурная схема активного фильтра. Изучены методики проектирования силовых электронных устройств. Спроектировано устройство преобразования постоянного напряжения в переменное синусоидальное напряжение на платформе отладочной платы STM32F4. Устройство включает в себя систему управления, усилители мощности, защиту от короткого замыкания и силовые ключи. Для преобразования уровней напряжения предусмотрен трансформатор низкой мощности. Разработано программное обеспечение контроллера с применением программного пакета MATLAB/Simulink и произведены отладка и прошивка платы. Проведено сравнение устойчивости работы устройства и качества генерируемого сигнала при различных несущих частотах. Отмечено, что программа для функционирования устройства состоит из двух уровней: нижнего (код в микроконтроллер) и интерфейса, который осуществляет связь и передачу данных в реальном времени на персональный компьютер. Приведены осциллограммы напряжений и тока в ключевых точках электрической схемы преобразователя. Полученные данные работы устройства позволили оценить качество сборки и определить сферы применения разработанного устройства. Устройство способно генерировать сигнал заданной частоты и амплитуды, включая интергармонические составляющие, что позволяет применить его в качестве активного фильтра тока для систем питания, применяемых на судах.

Ключевые слова: гармонические искажения, активный фильтр, инвертор, судовые сети, ШИМ-сигнал.

Для цитирования: *Вынгра А. В.* Автономный инвертор для однофазного активного фильтра гармонических искажений судовой сети // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-82-89.

Введение

С развитием технологий полупроводниковой силовой техники и микропроцессорных систем управления появилась возможность генерировать сигналы произвольной формы в широком диапазоне частот. Применение устройств, использующих широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), а также потребителей с несинусоидальной формой потребляемого тока в судовых сетях, приводит к искажению кривой напряжения, а следовательно, уменьшению качества генерируемой электроэнергии на судне.

Контроль отклонения кривой напряжения от синусоиды в береговых сетях общего назначения осуществляется в Российской Федерации по ГОСТ 30804.4.7-2013 (МЭК 61000-4-7:2009) [1]. Показатели, определенные в соответствии с этим стандартом, нормируются по ГОСТ 32144-2013 (EN50160:2010) [2]. На морских объектах эти показатели и их нормы зафиксированы в Правилах классификации и постройки морских судов (Правилах РС) [3]. Наименование показателей, методики их определения, допустимые значения в береговых и морских стандартах несколько отличаются. Обобщенный показатель отклонения кривой питающего напряжения от синусоиды, согласно [1, 2], называется суммарным коэффициентом гармонических составляющих. В Правилах РС аналогичный показатель называется коэффициентом несинусоидальной кривой. Начиная с мая 2016 г. вступило в силу унифицированное требование МАКО E24 (IACS UR E24 Rev1 CLN) [4], согласно которому необходимо проводить измерение показателей несинусоидальности напряжения при освидетельствованиях судна, а величина суммарного коэффициента гармонических составляющих не должна превышать 8 %.

Постановка задачи

Один из основных способов уменьшения гармонических составляющих электрической сети заключается в применении различных фильтров. Активные фильтры повсеместно используются в электронных устройствах, где требуется качество электроэнергии для широкого уровня мощностей. Они позволяют компенсировать искажения тока нагрузки таким образом, чтобы на нагрузку подавался ток синусоидальной формы с наименьшим уровнем гармонических искажений.

В статье [5] рассматривается влияние гармонических искажений на различные компоненты электрических сетей (линии электропередач, трансформаторы, электрические машины) и основные способы подавления неосновных гармоник. Также произведено сравнение возможностей пассивных и активных фильтров, доказывающее, что активный фильтр обладает следующими преимуществами:

- возможностью анализа гармонического искажения;
- возможностью управления качеством электроэнергии в переходных режимах, обусловленных резкопеременной нагрузкой;
- наличием дополнительных настроек фильтра, таких как выбор гармоник для компенсации.

Обзор и классификация опубликованных работ в этой области свидетельствуют: наблюдается значительный рост интереса к активным фильтрам и сопряженным с ними методам управления, что связано с растущим беспокойством по поводу качества электроэнергии. Чтобы облегчить понимание работы и выбора конкретной конфигурации и методов управления для активного фильтра, производится их классификация по пяти критериям:

1. Конфигурации силовых цепей активных фильтров;
2. Номинальные характеристики компенсированных систем;
3. Принципы управления активным фильтром;
4. Методы управления активным фильтром;
5. Методы эталонной оценки.

Принцип действия разрабатываемого активного фильтра (рис. 1) основан на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки, выделения высших гармоник и их последующей генерации в противофазе.

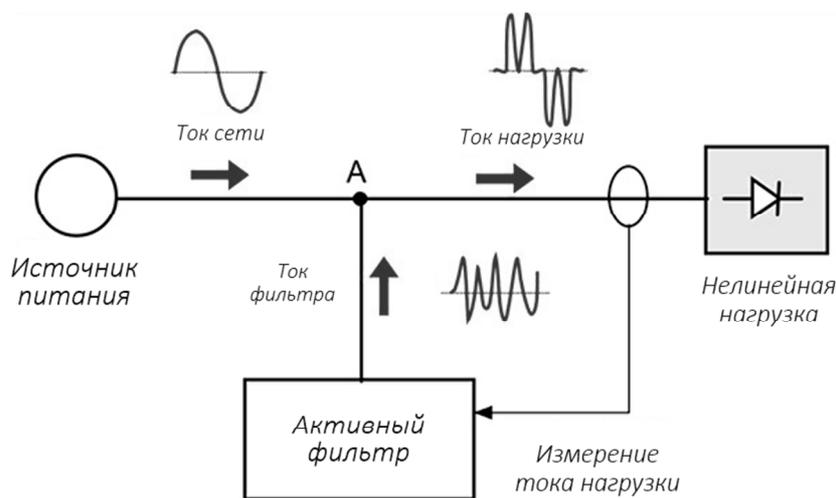


Рис. 1. Структурная схема активного фильтра

В результате высшие гармонические составляющие тока компенсируются в точке подключения активного фильтра. Для генерации компенсирующих гармоник используются различного рода преобразователи.

Целью настоящего исследования является практическая реализация компонента активного фильтра, позволяющего генерировать периодический синусоидальный и несинусоидальный сигналы из постоянного напряжения источника питания.

Реализация платы

Для практической реализации требуемого устройства была составлена электрическая принципиальная схема (рис. 2), а также выбраны следующие компоненты: программируемый контроллер STM32F4 Discovery, силовые полевые транзисторы IRF304n, биполярные усилители сигнала 2SA272, связующие и токоограничивающие резисторы, источник питания +12 В и трансформатор 12/220 В.

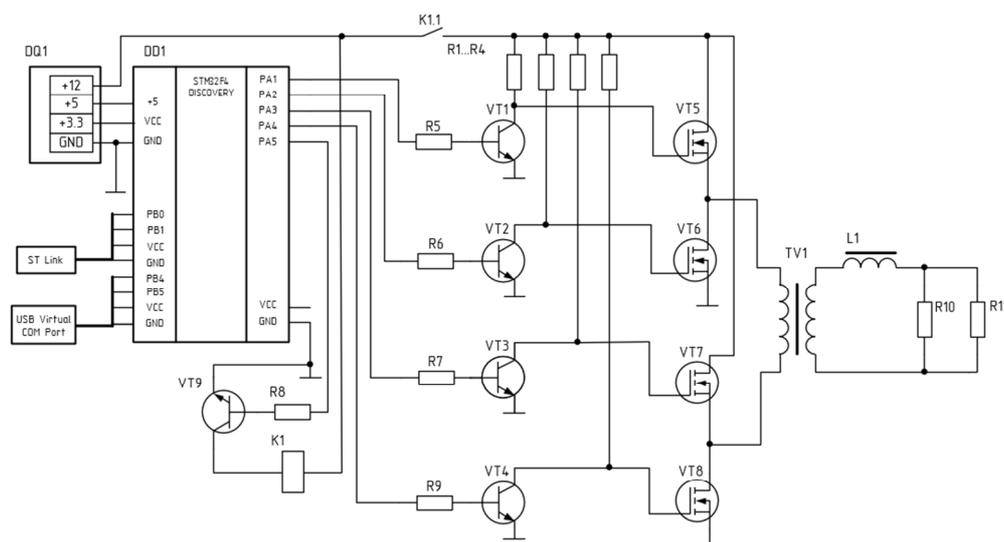


Рис. 2. Схема инвертора для активного фильтра гармоник

В качестве активно-индуктивной нагрузки выступает сопротивление в 10 кОм и индуктивность 5 мГн [6]. Контроллер получает питание через USB-порт. Общий вид собранного устройства представлен на рис. 3.

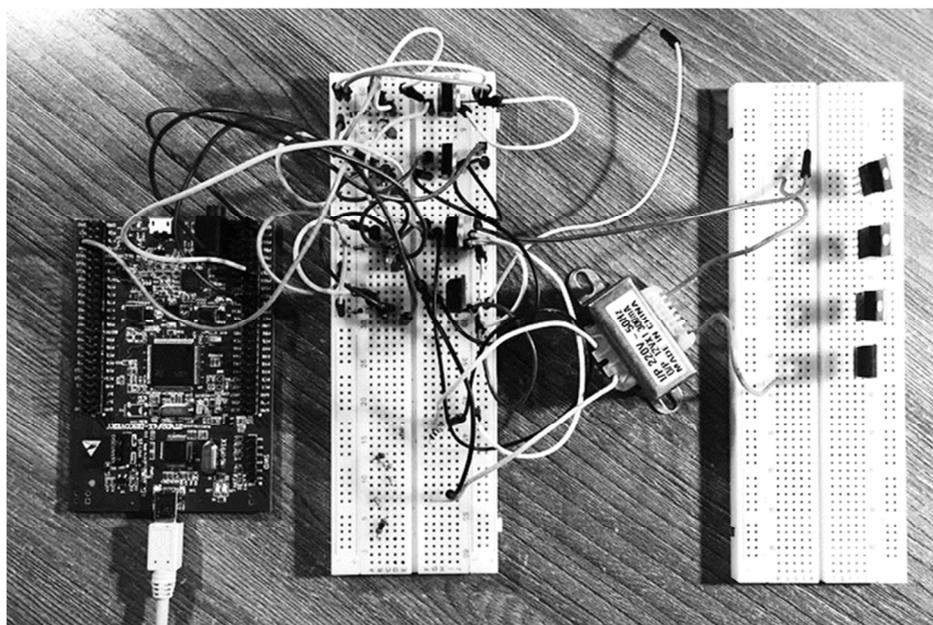


Рис. 3. Прототип блока инвертора для активного фильтра судовой сети

Схема работает следующим образом: по заданной программе порты PA1 – PA4 генерируют ШИМ-сигнал (PWM), который поступает на базу соответствующих транзисторов VT1 – VT4.

Для включения схемы усиления подается управляющий сигнал с порта PA5 на реле K1 (через усилительный транзистор VT9). Далее реле замыкает свой контакт K1.1, через который подается питание на инверторный мост. Каскады с общим эмиттером усиливают амплитуду напряжения и подают его на затворы силовых транзисторов (VT5 – VT8), составленных по однофазной мостовой схеме инвертора. Подается ШИМ-сигнал на порты одного плеча инвертора в противофазе. Процесс генерации ШИМ-сигнала записан в программе микроконтроллера и заключается в преобразовании эталонного периодического сигнала в ряд дискретных импульсов. Несущая частота ШИМ – 10 кГц.

Реализация программного обеспечения

Программирование микроконтроллера производится с помощью программного обеспечения MATLAB. Комплекс Wajung blockset позволяет создавать визуализированное редактируемое программное обеспечение, которое загружается в контроллер через драйвер ST-Link по интерфейсу USB. Микроконтроллер фирмы ST имеет возможность передавать данные о состоянии портов ввода/вывода, сигналы аналого-цифрового преобразователя и встроенных датчиков в реальном времени на персональный компьютер. Для этого используется интерфейс передачи данных Virtual COM Port.

Программа для работы устройства состоит из двух уровней – нижнего уровня (кода, вводимого в микроконтроллер) и интерфейса, обеспечивающего связь и передачу данных в режиме реального времени на персональный компьютер.

Программа нижнего уровня генерирует ШИМ-сигнал на несущей частоте 10 кГц. Эталонным значением ширины импульса выступает синусоида с амплитудой в 100 отн. ед. Блок генерации импульсов преобразует значение синусоиды при тактовом значении встроенного времени в процессоре в ШИМ-сигнал соответствующей заполненности импульса в процентах. Также в программе нижнего уровня предусмотрены другие формы эталонного сигнала, отличные от синусоиды.

Программа верхнего уровня (интерфейс) обеспечивает индикацию среднего и мгновенного значения напряжения и управление параметрами генерируемого ШИМ-сигнала с персонального компьютера. Напряжение считывается с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Результаты работы устройства

Для отображения работы устройства приведены осциллограммы напряжений и тока в ключевых точках электрической схемы преобразователя. На затворы полевых транзисторов подается ШИМ-сигнал (рис. 4).

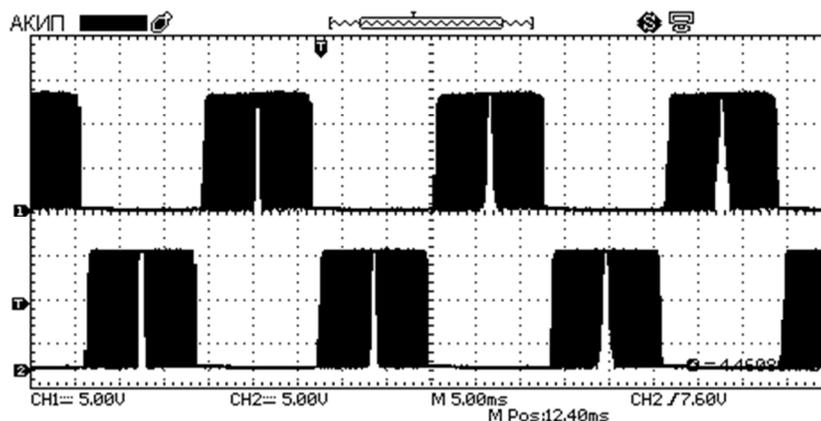


Рис. 4. ШИМ-сигнал на полевых ключах

Согласно рис. 4 сигнал на противоположные плечи моста подается со смещением на 180 град.

На выходе транзисторов получается ШИМ-сигнал (рис. 5), который подается на первичную обмотку повышающего трансформатора. Трансформатор повышает напряжение и обеспечивает гальваническую развязку выходного сигнала.

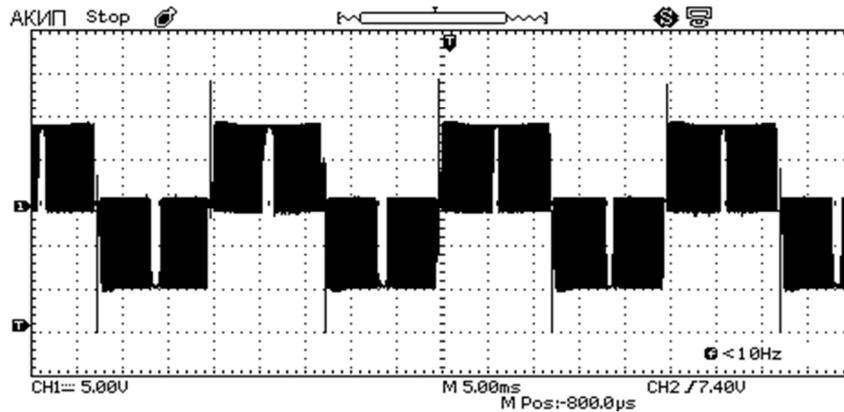


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на выходе инвертора

На рис. 6 приведена осциллограмма напряжения на выходе трансформатора при работе преобразователя на холостом ходу.

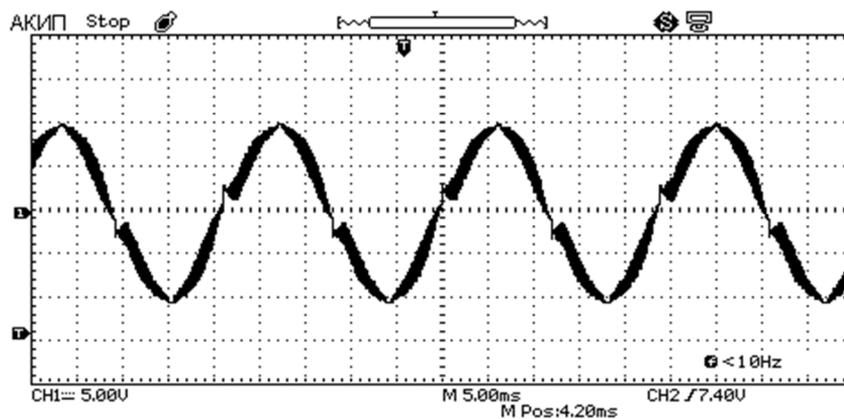


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на выходе трансформатора

При подключении нагрузки на вторичную обмотку трансформатора протекает ток, который принимает форму запрограммированного эталонного напряжения. Устройство способно также генерировать периодический сигнал произвольной формы. На рис. 7 приведен результат генерирования периодического сигнала $F(t)$, включающего следующие гармонические составляющие:

$$F(t) = 75 \sin(250 \cdot 2\pi t + \pi) + 30 \sin(500 \cdot 2\pi t + \pi) + 10 \sin(2000 \cdot 2\pi t + \pi),$$

где t – время; амплитуды гармоник представлены в процентах от заполняемости импульсов ШИМ.

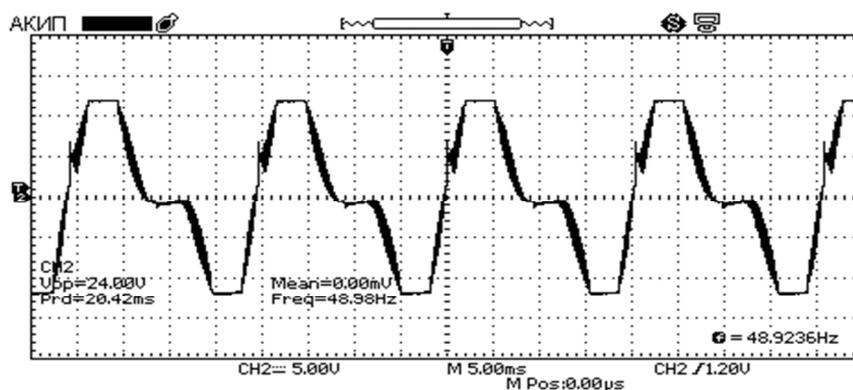


Рис. 7. Ток нагрузки на выходе преобразователя

Так как питание моста инвертора составляет +12 В, напряжение на ШИМ с значением больше 100 % не превышает напряжения питания.

Таким образом, разработанное устройство способно преобразовать функцию цифрового сигнала в фактический аналоговый сигнал с погрешностью менее 5 %, которая обусловливается инерционностью тока во время переключений направлений плеч моста преобразователя. В дальнейшем планируется организация схемного решения компенсации погрешности переключения [7].

Заключение

Результатом исследований является практическая реализация устройства, способного генерировать периодический синусоидальный и несинусоидальный сигналы из постоянного напряжения источника питания. Разработанное и собранное устройство обладает возможностью генерировать сигнал заданной формы различной частоты, в том числе сигнал, состоящий из суммы различных гармоник. Следовательно, подобный преобразователь можно применять в качестве основы активного фильтра гармонических искажений судовой сети. С добавлением трансформаторов большой мощности и автономных выпрямителей такого рода активный фильтр способен компенсировать как гармонические, так и интергармонические искажения, появляющиеся в судовых сетях при неравномерной нагрузке [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. М.: Стандартинформ, 2013. 34 с.
2. *ГОСТ 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ)*. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
3. *Правила классификации и постройки морских судов*. Ч. XI. Электрическое оборудование. СПб.: Изд-во РМРС, 2016. 130 с.
4. *IACS UR E24*. Harmonic distortion for ship electrical distribution system including harmonic filters. URL: <https://www.iacs.org.uk/publications/unified-requirements/ur-e/ur-e24-rev1-cln/> (дата обращения: 06.02.2021).
5. *Руди Д. Ю., Горелов С. В., Руппель А. А.* Анализ использования активных фильтров гармоник в электроэнергетических системах // Молодой ученый. 2020. № 15 (305). С. 124–128.
6. *Вынгра А. В., Авдеев Б. А.* Моделирование пуска электропривода компрессора судовой холодильной установки // Тр. Крылов. гос. науч. центра. 2019. Вып. 2. С. 143–151.
7. *Викулин В. Б., Устинов А. А.* Некоторые вопросы оценки несинусоидальности напряжения судовой электростанции // Науч.-техн. сб. Рос. регистр судоходства. 2018. № 50/51. С. 63–69.
8. *Авдеев Б. А.* Расчет потерь двунаправленного преобразователя постоянного напряжения судовой электростанции постоянного тока // Энергобезопасность и энергосбережение. 2018. № 6. С. 24–26. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-6-24-26.

Статья поступила в редакцию 16.02.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Алексей Викторович Вынгра – аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; Россия, 298309, Керчь; Elag1995@gmail.com.



AUTONOMOUS INVERTER FOR SINGLE-PHASE ACTIVE FILTER OF HARMONIC DISTORTIONS IN SHIP POWER NETWORK

A. V. Vyngra

*Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russian Federation*

Abstract. The article focuses on the problem of documentary control of the level of harmonic distortions in the ship power network. It has been proposed to use active filters to improve the quality of electric flow on board a ship. There is given a block diagram of the active filter. The methods of designing power electronic devices have been studied. A device for converting DC voltage into sinusoidal AC was designed on the platform of the STM32F4 debug board. The device includes a control system, power amplifiers, short circuit protection and power switches. A low power transformer is provided to convert voltage levels. The controller software was developed using the MATLAB / Simulink software package, and the board was debugged and flashed. Comparison of the device stability and the generated signal quality at different carrier frequencies has been made. It has been stated that the software for the device operation consists of two levels: the lower (code to the microcontroller) and the interface (which communicates and transfers data in real time to a personal computer). Oscillograms of voltages and currents at key points of the converter's electrical circuit are shown. The data obtained from the operation of the device made it possible to evaluate the assembly quality and to determine the scope of application of the developed device. The device is capable of generating a signal of a given frequency and amplitude including interharmonic components, which makes it possible to use it as an active current filter for power systems on ships.

Key words: harmonic distortions, active filter, inverter, ship power networks, pulse-width modulation signal.

For citation: Vyngra A. V. Autonomous inverter for single-phase active filter of harmonic distortions in ship power network. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;2:82-89. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-82-89.

REFERENCES

1. GOST 30804.4.7-2013 (IES 61000-4-7:2009). *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Obshchee rukovodstvo po sredstvam izmerenii i izmereniiam garmonik i intergarmonik dlia sistem elektrosnabzheniia i podkliuchaemykh k nim tekhnicheskikh sredstv* [GOST 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7: 2009). Electromagnetic compatibility of technical means. General guidance on measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and connected technical equipment]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 34 p.
2. GOST 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ). *Elektricheskaia energii. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia* [GOST 32144-2013 (EN 50160: 2010, NEQ). Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Electricity quality standards in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.
3. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Part XI. Elektricheskoe oborudovanie* [Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XI. Electrical equipment]. Saint-Petersburg, Izd-vo RMRS, 2016. 130 p.
4. IACS UR E24. *Harmonic distortion for ship electrical distribution system including harmonic filters*. Available at: <https://www.iacs.org.uk/publications/unified-requirements/ur-e/ur-e24-rev1-cln/> (accessed: 06.02.2021).
5. Rudi D. Iu., Gorelov S. V., Ruppel' A. A. Analiz ispol'zovaniia aktivnykh fil'trov garmonik v elektroenergeticheskikh sistemakh [Analysis of using active harmonic filters in electric power systems]. *Molodoi uchenyi*, 2020, no. 15 (305), pp. 124-128.
6. Vyngra A. V., Avdeev B. A. Modelirovanie puska elektroprivoda kompressora sudovoi kholodil'noi ustanovki [Modeling start of compressor electric drive in ship refrigeration plant]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2019, iss. 2, pp. 143-151.
7. Vikulin V. B., Ustinov A. A. Nekotorye voprosy otsenki nesinusoidal'nosti napriazheniia sudovoi elektrostantsii [Aspects of estimation of non-sinusoidal voltage of ship power plant]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*, 2018, no. 50/51, pp. 63-69.

8. Avdeev B. A. Raschet poter' dvunapravlenogo preobrazovatelia postoiannogo napriazheniia sudovoi elektrostantsii postoiannogo toka [Calculating losses of bidirectional converter of constant voltage of DC ship power plant]. *Energobezопасnost' i energosberezhenie*, 2018, no. 6, pp. 24-26. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-6-24-26.

The article submitted to the editors 16.02.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksei V. Vyngra – Postgraduate Student of the Department of Ship Electrical Equipment and Industrial Automation; Kerch State Maritime Technological University; Russia, 298309, Kerch; Elag1995@gmail.com.

