

Научная статья
УДК 621.341.572
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-73-79>

Разработка алгоритмов и программного обеспечения для силовых активных фильтров судовых электроэнергетических систем

Алексей Викторович Вынгра

*Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Россия, Elag1995@gmail.com*

Аннотация. Применение на судах электроприемников с нелинейной нагрузкой оказывает значительное влияние на показатели качества электроэнергии. Основными устройствами, снижающими искажения синусоиды тока и напряжения в электрических сетях, выступают активные, пассивные и комбинированные фильтры. Рассмотрены основные типы и принципы работы активных фильтров, приведены актуальные способы выявления искажения и формирования активными фильтрами компенсирующего воздействия. Подробно излагаются способы применения активных фильтров для электроприводов возвратно-поступательных механизмов, имеющих неравномерную, но периодическую прогнозируемую нагрузку на валу. Работа такого рода устройств в судовой электроэнергетической системе приводит к понижению качества электроэнергии в части ухудшения синусоидальности кривой напряжения и появлению гармонических составляющих. Теоретически обоснована эффективность применения активного фильтра, работающего по возмущению от эталонного сигнала для электроприводов поршневых компрессоров. Приведен алгоритм работы по возмущению, заключающийся в определении спектра выделенного интергармонического искажения и представлении его в виде ряда Фурье для создания компенсирующего воздействия. Применение такого алгоритма позволяет увеличить быстродействие системы управления, исключает временные ошибки и упрощает работу системы. Отмечено, что область применения активных фильтров, работающих по данному алгоритму, несколько ограничена ввиду необходимости присутствия периодической нагрузки или фиксированных помех. С применением алгоритмов спроектирована программа управления трехфазным активным фильтром. Проект программы представлен в среде математического моделирования MATLAB/Simulink. Особенностью программы является использование запоминающего блока для организации вычисления закономерности компенсации гармонического искажения и применения алгоритмов формирования компенсирующего сигнала в частотной области. Рассмотрено аппаратное моделирование и произведена прошивка платы. Приведены интерфейс, код и результаты работы программы. Сделано заключение, что программа эффективно управляет силовыми элементами активного фильтра с обратной связью по току.

Ключевые слова: программное обеспечение, активный фильтр, алгоритм, программирование, качество электроэнергии

Благодарности: исследования выполнены при поддержке гранта Государственного совета Республики Крым молодым ученым Республики Крым на тему «Повышение качества электроэнергии на судах при работе электроприводов поршневых компрессоров».

Для цитирования: *Вынгра А. В.* Разработка алгоритмов и программного обеспечения для силовых активных фильтров судовых электроэнергетических систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 73–79. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-73-79>.

Original article

Developing algorithms and software for power active filters of ship electric power systems

Aleksei V. Vyngra

*Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russia, Elag1995@gmail.com*

© Вынгра А. В., 2022

Abstract. The use of electrical receivers with a non-linear load on ships significantly affects the electric power characteristics. The main devices that reduce the distortion of the sinusoid of current and voltage in electrical networks are active, passive and combined filters. There are considered the main types and principles of active filters operation, shown the current methods for detecting a distortion and forming a compensating effect by active filters. Using the active filters for electric drives of reciprocating mechanisms with an uneven, but periodic predictable load on the shaft is demonstrated. The operation of such devices in the ship electrical power system worsens the electric power characteristics (e.g. high iTHD, harmonic components). The effectiveness of using an active filter operating on a perturbation from a reference signal for electric drives of reciprocating compressors has been theoretically grounded. There has been presented an algorithm for operation on a perturbation determining the spectrum of the selected interharmonic distortion and presenting it in the form of a Fourier series to create a compensating effect. Application of the algorithm helps increase the speed of the control system, eliminates temporary errors and simplifies the operation of the system. The range of active filters operation according to this algorithm is found limited due to a necessary periodic load or fixed interference. The control software for a three-phase active filter was designed by using the algorithms. The software project is presented in the MATLAB/Simulink mathematical modeling environment. A specific feature of the software using a memory block to organize the calculation of the compensation pattern for harmonic distortion and using the algorithms for generating a compensating signal in the frequency domain. The hardware modeling is considered and the firmware of the board is made. The interface, code and results of the software work are given. It has been inferred that the software effectively controls the power elements of the active filter with current feedback.

Keywords: software, active filter, algorithm, programming, electric power characteristics

Acknowledgements: The research was carried out under the support of a grant from the State Council of the Republic of Crimea to the young scientists of the Republic of Crimea on the issue "Improving Electric Power Performance on Ship due to Reciprocating Compressor Electric Drive Operation".

For citation: Vyngra A. V. Developing algorithms and software for power active filters of ship electric power systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2022;2:73-79. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-73-79>.

Введение

В настоящее время на судах промышленного и торгового флота широко распространяются устройства с нелинейной нагрузкой, такие как частотно-регулируемые электроприводы или электроприводы возвратно-поступательных механизмов, имеющих неравномерную нагрузку на валу. Работа такого рода устройств в судовой электроэнергетической системе (СЭЭС) приводит к понижению качества электроэнергии (КЭ) в части ухудшения синусоидальности кривой напряжения и появлению гармонических составляющих. В свою очередь, ухудшение КЭ приводит к дополнительным потерям в электрических машинах, уменьшению срока службы изоляции и снижению эффективности работы релейной защиты. В работе [1] определено, что электроприводы судовых поршневых компрессоров вносят значительные искажения в судовую сеть ввиду наличия на валу неравномерной периодической нагрузки. При этом суммарные мощности таких компрессоров могут составлять более половины мощности всей судовой электрической сети. В связи с развитием частотного управления электроприводами и широким применением на рыбопромысловых и транспортных судах мощных рефрижераторных установок с поршневыми компрессорами возникает вопрос повышения КЭ СЭЭС. Известны различные способы повышения КЭ, включая использование активных и пассивных фильтров.

Целью исследования является реализация алгоритмов и программного обеспечения активного фильтра (АФ), работающего по возмущению.

Постановка задачи

В работе [2] произведено проектирование схемного решения инвертора для однофазного судового АФ. Практически реализовано устройство на платформе отладочной платы STM32F4. Разработанное и собранное устройство обладает возможностью генерировать сигнал заданной формы различной частоты, в том числе сигнал, состоящий из суммы различных гармоник. Однако применение такого схемного решения в судовых сетях электроснабжения требует решения задачи реализации алгоритмов работы и программного обеспечения микроконтроллера.

Материалы исследования

Активный фильтр – это преобразователь переменного или постоянного тока, который генерирует методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ) ток или напряжение заданной величины и гармонического состава в соответствии с определенным методом управления.

Активные фильтры могут корректировать как ток сети i_c , так и напряжение в сети U_c . Параллельный АФ компенсирует гармонический ток i_h , обусловленный нелинейными нагрузками, путем подачи равного, но противоположного по величине тока, называемого компенсационным током $i_{АФ}$

в точке общего соединения, и этот принцип называется активной компенсацией [2, 3]. Последовательный АФ является источником напряжения $U_{АФ}$

и компенсирует искажения напряжения на нагрузке. На рис. 1 приведены упрощенные схемы АФ в виде источника напряжения U и тока i .

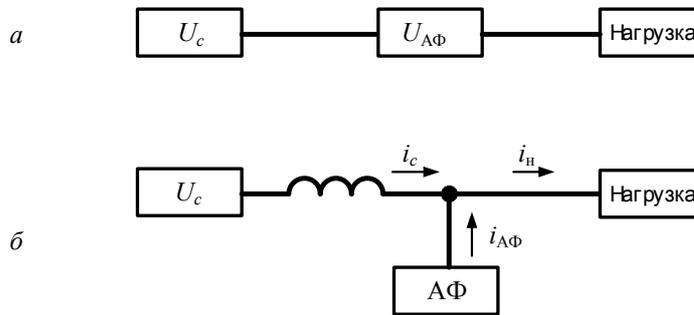


Рис. 1. Схема включения АФ: *a* – последовательная схема для АФ в виде источника напряжения $U_{АФ}$; *б* – параллельная схема в виде источника тока $i_{АФ}$

Fig. 1. Scheme of switching an active filter (AF): *a* - in series for an active filter as a voltage source $U_{АФ}$; *б* - parallel as a current source $i_{АФ}$

Параллельные АФ используют топологию мгновенного управления активной и реактивной мощностью для избавления от токов, потребляемых нелинейной нагрузкой, чтобы в конечном итоге сделать сетевой ток синусоидальным [4]. Суть АФ состоит в том, чтобы создать и подать надлежущий ток в силовую сеть для устранения гармоник нагрузки и получения единичного коэффициента мощности. Существующие системы управления АФ чаще всего используют ПИ-регулятор, который отличается хорошей эффективностью управления, надежностью, простым алгоритмом, ясным физическим смыслом параметров, простой реализацией и высокой надежностью. Но этот метод имеет относительно большее время нарастания и время установления. Традиционный ПИД-регулятор требует точных линейных математических моделей, которые трудно получить и которые могут не давать удовлетворительных результатов при изменении параметров или возмущениях нагрузки. Пропорционально-резонансный регулятор дает возможность реализации определенной компенсации гармоник без использования чрезмерных вычислительных ресурсов.

Что касается алгоритмов формирования компенсирующего воздействия, в настоящее время обширно используется метод пространственно-векторной ШИМ.

Разработка алгоритма работы активного фильтра по возмущению

Так как устройство активной фильтрации разрабатывается непосредственно для судовых электроприводов поршневых компрессоров, при проектировании алгоритмов его работы следует отталкиваться от природы и формы возникающих иска-

жений тока в сети. Нелинейность нагрузки электроприводов поршневых компрессоров заключается в том, что они приводят в движение механическую нагрузку с неравномерным моментом сопротивления, тем самым создавая пульсации тока в обмотках электродвигателя. В результате произведенных экспериментальных и аналитических исследований выявлено, что искажения тока при работе поршневых компрессоров являются интергармоническими и наибольшей амплитуды достигают при частоте меньше частоты сети. Также периодичность возникающих искажений показывает их предсказуемость и возможность представления в виде аналитической формулы [5]. Следовательно, алгоритм реализуемого программного обеспечения построен на основе определения закономерности искажения и имеет дополнительную ступень исключения основной гармоники из текущего значения синусоиды. Это требуется для точного расчета параметров интергармонических составляющих тока и напряжения. С помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) отсчеты периодического входного сигнала (несинусоидального тока и напряжения) $x(n)$ определяются в виде комплексного ряда:

$$\begin{aligned} \dot{A}_k &= \sum_{n=0}^{N-1} \left[x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - jx(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = \\ &= a_k + jb_k, \end{aligned}$$

где N – число отводов на период основной гармоники.

Амплитуды и начальные фазы гармоник:

$$\dot{A}_k = \sqrt{a_k^2 + jb_k^2};$$

$$\psi_k = \arctg\left(\frac{b_k}{a_k}\right).$$

Определение параметров гармоник искажения тока и напряжения происходит путем выделения из текущего значения основной (первой) гармоники с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Далее происходит анализ разности текущего значения электрического тока и выделенной гармоники.

Полученные результаты, представленные в виде ряда Фурье, подаются в систему управления для дальнейшей генерации управляющих сигналов по частотному принципу. Управляющий сигнал формируется после того, как определены амплитуды и начальные фазы гармоник. Для вычисления N -точечного ДПФ требуется N^2 операций. Чтобы уменьшить количество операций, используется БПФ.

Адаптивный гистерезисный регулятор тока изменяет полосу гистерезиса в соответствии с мгновенным изменением компенсационного тока для оптимизации требуемой частоты коммутации. Применение такого алгоритма позволяет увеличить быстродействие системы управления, исключает временные ошибки и упрощает работу системы. Однако область применения АФ, работающих по данному алгоритму, несколько ограничена ввиду необходимости присутствия периодической нагрузки или фиксированных помех.

Проектирование программного обеспечения

Подробно рассмотрим вопрос проектирования программного обеспечения системы управления АФ на основе формирования сигналов в частотной области. В случае применения разрабатываемого устройства непосредственно для компенсации ис-

кажений тока электроприводов судовых поршневых компрессоров алгоритм формирования сигнала компенсации строится на основе возмущений действительного сигнала.

Программирование микропроцессора производится на языке программирования MATLAB с применением визуализационного пакета моделирования Simulink, группы блоков Aimagin Waijung. Данный способ реализации программы АФ позволяет обеспечить не только его автономную работу, но и непрерывную передачу данных в реальном времени на ПК для мониторинга работы устройства. Для организации подключения к микроконтроллеру, загрузки в него программы и отладки используется протокол ST-Link. Основным объектом программирования является отладочная многофункциональная плата STM32F4Discovery [6].

Общий структурный вид программного обеспечения АФ приведен на рис. 2. Для работы трехфазного АФ используются 6 датчиков тока на основе эффекта Холла. Все они подключены к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) микроконтроллера. Следовательно, для получения информации о значениях токов необходимо считать данные с портов ADC, для чего используется блок Regular ADC. Значения токов, используемые для гистерезисного регулятора генератора импульсов, подаются напрямую в систему управления.

Значения с датчиков, установленных в силовой цепи, записываются в блок Memory в течение 1 с. Далее сохраненные данные обрабатываются блоком Intergarmonic Analyzer (рис. 3) [7], действующим по разработанному алгоритму выделения интергармоник. Допустим, анализатор определил следующий состав электрического тока каждой фазы:

$$I_{L1}(t) = 24.3 \cdot \sin \omega t + 3.187 \cdot \sin(0.54\omega t + \pi) + 2.549 \cdot \sin(1.44\omega t + \pi);$$

$$I_{L2}(t) = 24.3 \cdot \sin(\omega t + \pi/3) + 3.187 \cdot \sin(0.54\omega t + 4\pi/3) + 2.549 \cdot \sin(1.44\omega t + 4\pi/3);$$

$$I_{L3}(t) = 24.3 \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) + 3.187 \cdot \sin(0.54\omega t + 5\pi/3) + 2.549 \cdot \sin(1.44\omega t + 5\pi/3),$$

где I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} – фазные токи электродвигателя, А.

Таким образом, электрический ток имеет интергармонические составляющие. Программное

обеспечение выделяет только интергармонические составляющие и отправляет их в инвертор АФ в противофазе:

$$I_{d1}(t) = -3.187 \cdot \sin(0.54\omega t + \pi) - 2.549 \cdot \sin(1.44\omega t + \pi);$$

$$I_{d2}(t) = -3.187 \cdot \sin(0.54\omega t + 4\pi/3) - 2.549 \cdot \sin(1.44\omega t + 4\pi/3);$$

$$I_{d3}(t) = -3.187 \cdot \sin(0.54\omega t + 5\pi/3) - 2.549 \cdot \sin(1.44\omega t + 5\pi/3),$$

где I_{d1}, I_{d2}, I_{d3} – фазные токи инвертора АФ, А.

Следовательно, на выходе блока формируется требуемый для подавления искажения сигнал, который подается через гистерезисный регулятор на генератор импульсов Advanced PWM. Сгенерированные им импульсы через оптодрайверы подаются

на затворы IGBT или MOSFET транзисторов, собранных по схеме моста Ларионова. На выходе моста создается электрический ток, который через трансформатор тока производит подавление гармоник в силовой цепи.

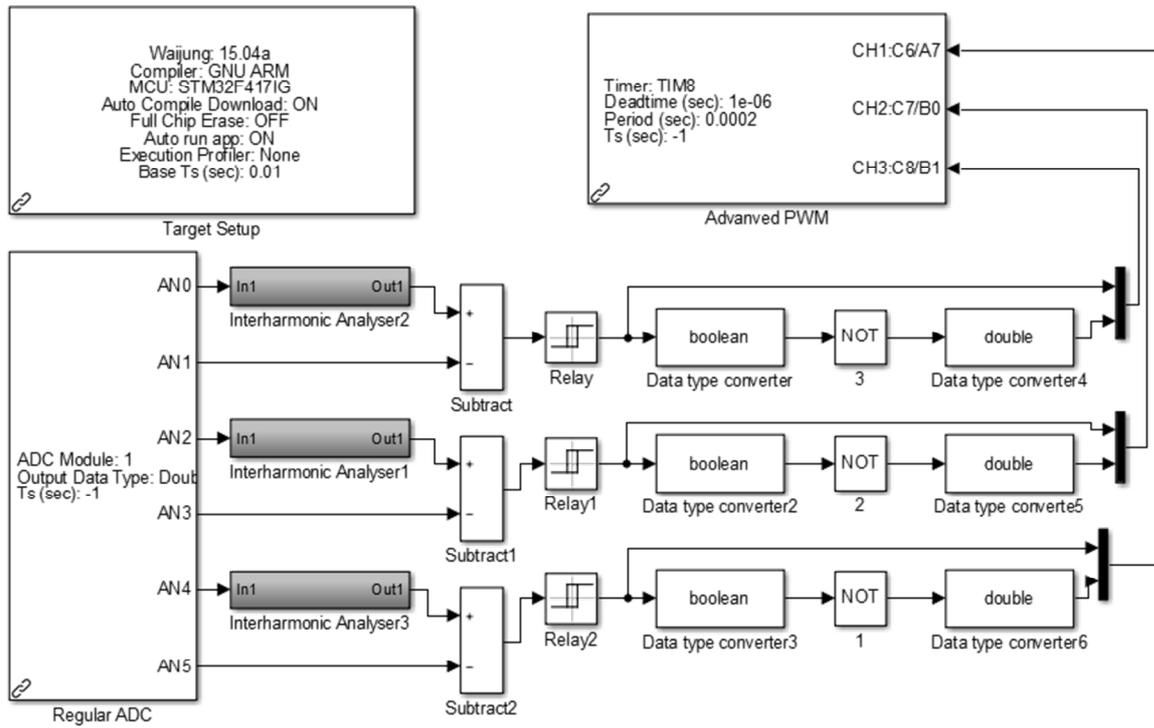


Рис. 2. Программа в среде программирования Simulink

Fig. 2. Software in the Simulink environment

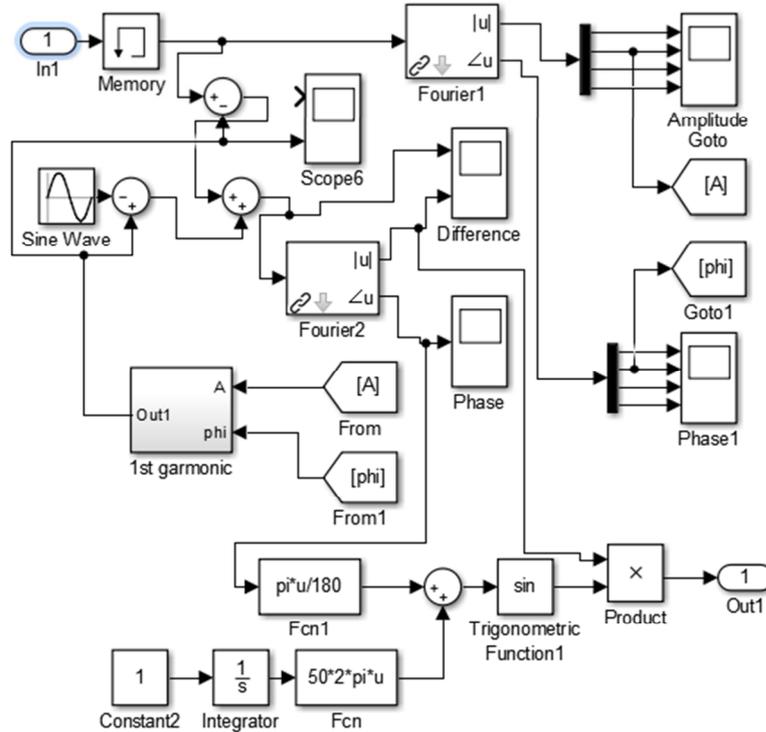


Рис. 3. Подпрограмма Interharmonic Analyzer

Fig. 3. Subprogram Interharmonic Analyzer

Аппаратное моделирование и прошивка платы

Прошивка платы происходит с применением интерфейса VCP – Virtual COM Port. Использование отладчика и компилятора GNU-ARM позволя-

ет проверить работоспособность программы и исключить ошибки кода. Код источника компилируется в файл «.с». Ниже приведен отрывок генерируемого кода для блока генерации ШИМ.

```
/* S-Function (stm32f4_advanced_pwm): '<Root>/Advanved PWM' */  
if (inverter_B.Saturation1 < 0.0)  
{  
/* Disable while negative duty */  
TIM8->CCER &= (uint16_t)~((TIM_CCx_Enable | TIM_CCxN_Enable) <<  
TIM_Channel_1);  
}  
else  
{  
TIM8->CCER |= (uint16_t)((TIM_CCx_Enable | TIM_CCxN_Enable) << TIM_Channel_1);  
TIM8->CCR1 = (uint16_t)((uint32_t)AdvanvedPWM_PERIOD*inverter_B.Saturation1/  
100);  
}  
}
```

Следующим этапом производится подключение к плате, загрузка, проверка и запуск непрерывного выполнения программы. Интерфейс отладчика

позволяет определить возможные ошибки алгоритма на любом этапе его выполнения (рис. 4).

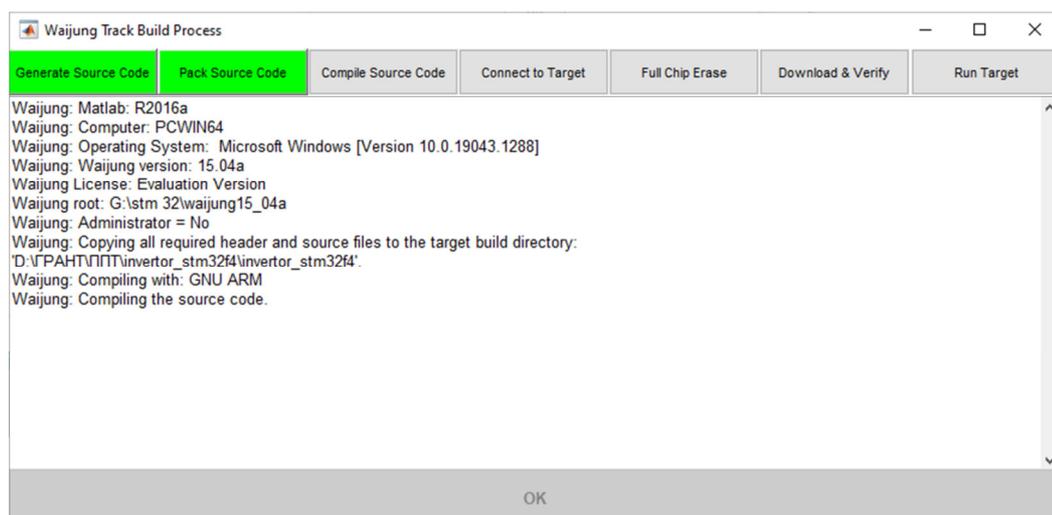


Рис. 4. Интерфейс отладчика

Fig. 4. Debugger Interface

В результате применения рассмотренного алгоритма и принципов программирования отладочная плата в структуре АФ позволила эффективно снизить уровень интергармонических составляющих в сети. Следует заключить, что при увеличении дискретизации полученного с АЦП сигнала быстродействие программы генерации импульсов не снижается, что объясняется применением анализатора гармоник с подсистемой записи сигнала.

Заключение

В результате исследований создано программ-

ное обеспечение АФ с применением математической среды программирования MATLAB. Приведен основной алгоритм программы, заключающийся в работе АФ по возмущению. Произведена компиляция кода, отладка и прошивка платы. Применение разработанной программы и алгоритма для генерации импульсов АФ позволило обеспечить непрерывную компенсацию интергармонических искажений тока в сети при высоком быстродействии системы управления.

Список источников

1. Вынгра А. В., Черный С. Г., Соболев А. С. Трехфазный силовой активный фильтр последовательного типа для компенсации воздействия периодической нагрузки электродвигателей // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы»: сб. ст. III Всерос. науч.-техн. конф. (Анапа, 22–23 апреля 2021 г.). Анапа: ВИТ «ЭРА», 2021. С. 39–43.
2. Сычев Ю. А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2021.
3. Вынгра А. В. Автономный инвертор для однофазного активного фильтра гармонических искажений судовой сети // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2021-2-82-89>.
4. Герман-Галкин С. Г. Школа Matlab виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink урок 15. Исследование однофазного активного выпрямителя // Силовая электроника. 2012. Т. 4. № 37. С. 72–79.
5. Викулин В. Б., Устинов А. А. Некоторые вопросы оценки несинусоидальности напряжения судовой электростанции // Науч.-техн. сб. Рос. мор. рег. судоходства. 2018. № 50/51. С. 63–69.
6. 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](https://doi.org/10.18635/2071-2219-2018-6-24-26).
7. Свидетельство 2020616882. «InterHamonics Analyzer»: программа для ЭВМ (RU) / Вынгра А. В., Авдеев Б. А.; № 2020616882; заявл. 08.06.2020; опубл. 25.06.2020. Бюл. № 2020615843. Ч. 1. 600 Мб.

References

1. Vyngra A. V., Chernyi S. G., Sobolev A. S. Trekhfaznyi silovoi aktivnyi fil'tr posledovatel'nogo tipa dlia kompensatsii vozdeistviia periodicheskoi nagruzki elektrodvigatelei. Sostoianie i perspektivy razvitiia sovremennoi nauki po napravleniiu «ASU, informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy» [Three-phase power active filter of sequential type to compensate effects of periodic load of electric motors. Current state and prospects for development of modern science in ACS, information and telecommunication systems course]. *Sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii (Anapa, 22–23 apreliia 2021 g.)*. Anapa, VIT «ERA», 2021. Pp. 39–43.
2. Sychev Yu. A. *Fil'trokompensiruiushchie ustroistva s aktivnymi preobrazovateliami dlia povysheniia kachestva elektroenergii v elektrotekhnicheskikh kompleksakh neftegazovykh predpriatii: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Filter-compensating devices with active converters to improve quality of electricity in electrical complexes of oil and gas enterprises: diss. ... dr. tech. sci.]. Saint-Petersburg, 2021.
3. Vyngra A. V. Avtonomnyi invertor dlia odnofaznogo aktivnogo fil'tra garmonicheskikh iskazhenii sudovoi seti [Autonomous inverter for single-phase active filter of harmonic distortions of ship network]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya:*
4. German-Galkin S. G. Shkola Matlab virtual'nye laboratorii ustroistv silovoi elektroniki v srede Matlab-Simulink urok 15. Issledovanie odnofaznogo aktivnogo vypriamitelia [School Matlab virtual laboratories of power electronics devices in Matlab-Simulink environment, Lesson 15. Studying single-phase active rectifier]. *Silovaiia elektronika*, 2012, vol. 4, no. 37, pp. 72–79.
5. Vikulin V. B., Ustinov A. A. Nekotorye voprosy otsenki nesinusoidal'nosti napriazheniia sudovoi elektrostantsii [Some questions of assessing non-sinusoidal voltage of ship power plant]. *Nauchno-tekhnikeskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*, 2018, no. 50/51, pp. 63–69.
6. Avdeev B. A. Raschet poter' dvnapravlenno preobrazovatel'ia postoiannogo napriazheniia sudovoi elektrostantsii postoiannogo toka [Analysis of losses in bidirectional DC voltage converter of ship DC power plant]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2018, no. 6, pp. 24–26. DOI: [10.18635/2071-2219-2018-6-24-26](https://doi.org/10.18635/2071-2219-2018-6-24-26).
7. Vyngra A. V., Avdeev B. A. «InterHamonics Analyzer»: programma dlia EVM (RU) [InterHamonics Analyzer: computer software (RU)]. Svidetel'stvo 2020616882, no. 2020616882; 25.06.2020. Part 1. 600 Mb.

Статья поступила в редакцию 18.03.2022; одобрена после рецензирования 20.04.2022; принята к публикации 28.04.2022
The article was submitted 18.03.2022; approved after reviewing 20.04.2022; accepted for publication 28.04.2022

Информация об авторе / Information about the author

Алексей Викторович Вынгра – ассистент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; Elag1995@gmail.com

Aleksei V. Vyngra – Assistant of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; Elag1995@gmail.com

