

УДК 004.05
DOI: 10.15827/0236-235X.141.159-164

Дата подачи статьи: 03.09.22, после доработки: 12.09.22
2023. Т. 36. № 1. С. 159–164

Комплексная разработка программно-аппаратных компонентов фильтра преобразователя частоты для работы в судовых сетях ограниченной мощности

С.Г. Черный^{1,2}, к.т.н., доцент, sergiublack@gmail.com

А.С. Соболев¹, аспирант, sobolev.alexandr1496@gmail.com

¹ Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, 298300, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург, 198035, Россия

В сложных энергетических системах используется большое количество различных потребителей с нелинейной нагрузкой, в основном являющихся сложными техническими и дорогостоящими устройствами. Из-за нелинейности нагрузки таких потребителей в сети возникают электромагнитные помехи, которые негативно влияют на работу. Вследствие их воздействия зачастую могут значительно снижаться качество сигналов и питания, а также срок службы устройств. Из-за электромагнитных помех, возникающих в слаботочных сигналах управления силовыми элементами, существует вероятность возникновения короткого замыкания в преобразователях частоты, которое приводит к полному выводу устройства из строя. Для снижения влияния электромагнитных помех на приборы зачастую применяют пассивную либо активную фильтрацию.

Данная статья посвящена разработке и проектированию экспериментального образца активного фильтра для использования его в слаботочных цепях преобразователей частоты, а также разработке алгоритма работы системы управления активным фильтром. Метод исследования заключался в обзоре существующих решений, чтобы понять, как работают алгоритмы на других устройствах. Система управления, под которую разрабатывался алгоритм, реализована на отладочной платформе STM32F411E-DISCO. Такое решение позволит преодолеть проблемы, возникающие в процессе реализации устройства активного фильтра.

Алгоритм работы для данного фильтра разрабатывался в программном комплексе MATLAB, благодаря чему нет необходимости в его дальнейшем переводе в код на языке C++, который загружается в микроконтроллер.

Ключевые слова: помехи, система управления, программирование, моделирование, активный фильтр.

Влияние электромагнитных помех на сложные технические устройства зачастую может вызвать негативные последствия (ухудшение качества сигналов и питания, уменьшение срока службы устройств и различные поломки), а на слаботочные сигналы управления силовыми ключами в преобразователях частоты может привести к короткому замыканию и полному выходу из строя всего преобразователя. Чтобы минимизировать влияние электромагнитных помех, необходимо применять их фильтрацию.

В данной статье описываются разработанный авторами экспериментальный образец слаботочного активного фильтра и алгоритм его работы. В качестве отладочной платформы, на которой будет реализована система управления, планируется применение устройства на

микроконтроллере STM32F411 с ядром ARM Cortex-M4. В работе [1] данное решение для управления инвертором показало довольно стабильную работу. Использование такой отладочной платформы в устройстве активного фильтра позволит удовлетворить все его функциональные потребности. Составление алгоритма работы фильтра и его отладка планируются в программном комплексе MATLAB, как и в работе [2]. Данный комплекс обладает обширным функционалом, удобным преобразованием структурного алгоритма в код на языке C++ для дальнейшей его загрузки в микроконтроллер, а также возможностью отладки алгоритма работы в среде имитационного моделирования Simulink. На основании этих работ был сделан сравнительный анализ зарубежных аналогов разрабатываемого устройства.

Разработка аппаратной части

Реализация системы активной фильтрации была осуществлена внедрением контактной группы исполнительных элементов фильтра в цепь управления преобразователя частоты. При возникновении помех в данной цепи контактная группа замыкает нужную дорожку на землю, тем самым предотвращая короткое замыкание при одновременном открытии двух силовых ключей.

Ближайшими аналогами предлагаемого устройства являются активные фильтры:

- VLT Advanced Active Filter (AAF 006), позволяющий фильтровать непосредственно питающий потребителя сигнал, на который могут накладываться помехи; работает с токами до 400 А и диапазоном напряжений 380–480 В;
- ABB AccuSine PCS+, также позволяющий фильтровать лишь питающий потребителя

сигнал; работает с токами до 300 А и в диапазоне напряжений 380–480 В.

Преимущество представленного устройства заключается в том, что данный фильтр будет работать непосредственно в управляющей цепи инвертора и в случае возникновения в ней электромагнитных помех позволит сохранить целостность дорогостоящих силовых элементов частотного преобразователя, а это значительно повышает его надежность.

Для обеспечения гальванической развязки силовой части схемы и системы управления были использованы оптопары [3]. Принципиальная схема устройства активного фильтра изображена на рисунке 1.

Для системы управления реализуемого устройства была выбрана отладочная платформа STM32F411. STM32F411E-DISCO – это отладочная плата из серии Discovery производства ST Microelectronics для изучения возмож-

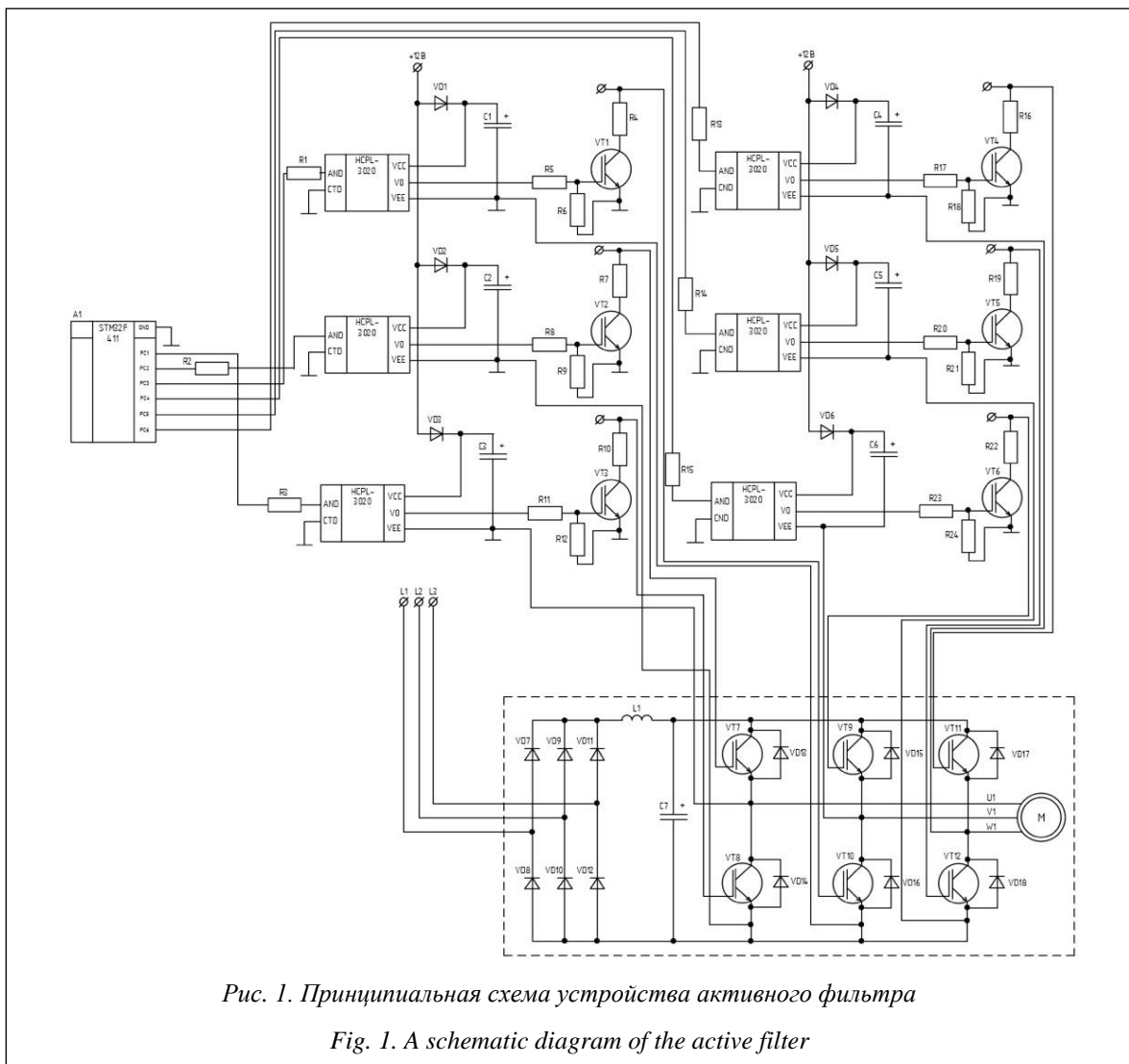


Рис. 1. Принципиальная схема устройства активного фильтра

Fig. 1. A schematic diagram of the active filter

ностей микроконтроллера STM32F411 с ядром ARM Cortex-M4 [4].

Плата включает в себя все необходимое для быстрого старта разработки: внутрисхемный программатор ST-LINK/V2, гироскоп, электронный компас, ST MEMs цифровой микрофон, аудиоЦАП с интегрированным драйвером динамиков класса D, разъем USB OTG micro-AB, светодиоды и кнопки (рис. 2).

В качестве силовых исполнительных элементов использовались MOSFET-транзисторы IRFD110PBF [5, 6], обладающие высоким быстродействием и следующими характеристиками: структура – n-канал; максимальное напряжение сток-исток $U_{си}$, В – 100; максимальное напряжение затвор-исток $U_{зи}$ макс., В – 20; сопротивление канала в открытом состоянии $R_{си}$ вкл. (макс.) при I_d , R_{ds} (on) – 0.54 Ом/0.6 А 10 В; максимальная рассеиваемая мощность $P_{си}$ макс., Вт – 1.3; крутизна характеристики, S – 0.8; максимальный ток сток-исток при 25 С $I_{си}$ макс., А – 1; корпус – HVMDIP-4; пороговое напряжение на затворе, В – 4; вес, г – 0.6.

Разработка программного решения

В качестве платформы, на которой проектировался алгоритм работы системы управления активного фильтра, был выбран MATLAB, а

именно среда моделирования Simulink [7], которая входит в пакет MATLAB. Она идеально подходит для создания моделей и алгоритмов работы сложных электротехнических систем, так как имеет обширную инструментальную базу. Удобство работы с данной средой моделирования обеспечивает графический интерфейс, который дает возможность создавать различные диаграммы и алгоритмы. Simulink также имеет огромный выбор библиотек, состоящих из настраиваемых блоков, что позволяет до мелочей проработать систему.

При совместной работе Simulink и других программных интерфейсов пакета MATLAB появляется возможность автоматически генерировать исходный код созданных алгоритмов на языке C++ для реализации системы в режиме реального времени. Пример интерфейса среды моделирования Simulink представлен на рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-1/2023-1-dop/4.jpg>).

Выбор MATLAB/Simulink обусловлен наличием функции генерации кода, то есть без особых навыков программирования можно задать необходимый алгоритм работы для системы управления и скомпилировать для нее код, тем более, что все предыдущие модели системы были созданы именно в этой среде [8].

Для реализации ПО системы управления активным фильтром использовался програм-

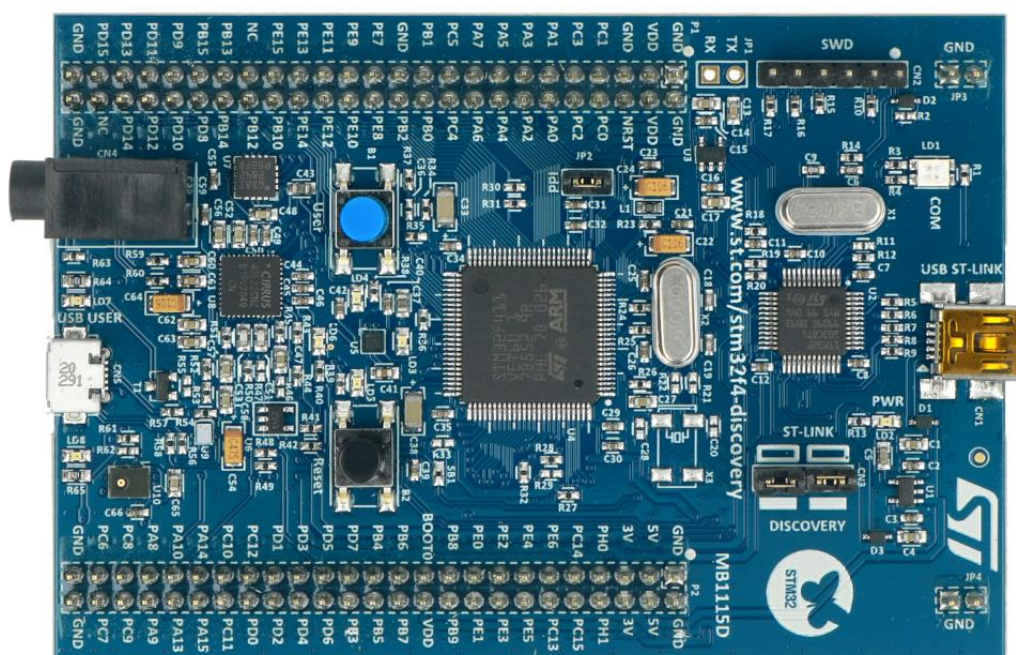


Рис. 2. Внешний вид отладочной платформы STM32F411E-DISCO

Fig. 2. The appearance of the STM32F411E-DISCO debug platform

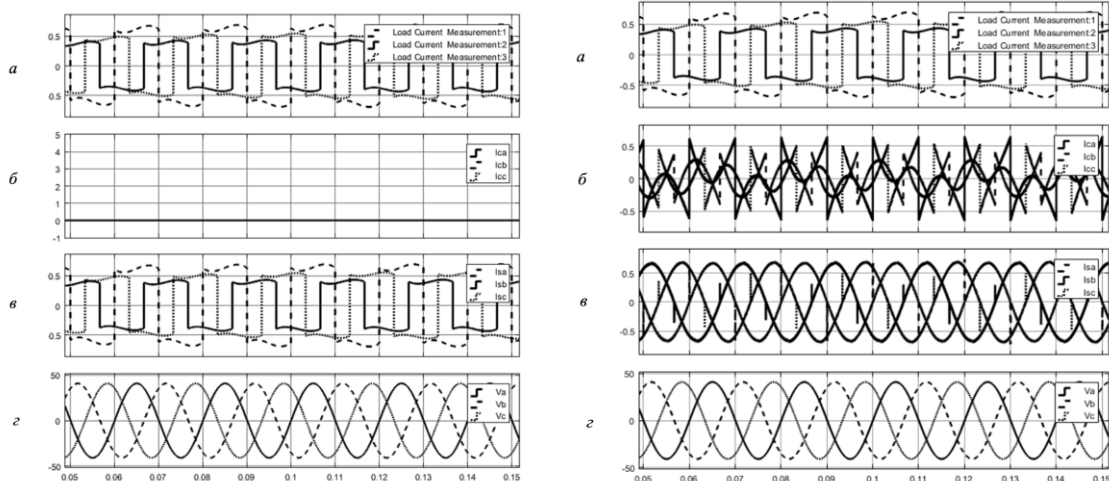


Рис. 3. Результаты измерений без активного фильтра (слева) и с активным фильтром (справа): а) ток нагрузки; б) ток активного фильтра; в) ток источника; г) напряжение источника

Fig. 3. Measurement results without an active filter (left) and with an active filter (right): а) load current; б) active filter current; в) source current; г) source voltage

мный комплекс MATLAB. Сначала был разработан структурный алгоритм работы активного фильтра [9]. Общий вид модели представлен на рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-1/2023-1-dop/5.jpg>).

Принцип его работы основан на сравнении входящего сигнала управляющих каналов активного фильтра с эталонным значением, которое является закономерностью и задается вручную [10]. При наличии отклонений подается сигнал на затворы ключей, они срабатывают, и появившиеся помехи отводятся из основной цепи.

Данный алгоритм был преобразован в код на языке C++ для его дальнейшей загрузки в систему управления [11]. Далее представлена часть листинга данного кода:

```

/*
 * File: finvert.c
 *
 * Created with Waijung Blockset
 *
 * Real-Time Workshop code generated
 for Simulink model finvert.
 *
 * Model version : 1.16
 * Real-Time Workshop file version :
 8.10 (R2016a) 10-Feb-2016
 * Real-Time Workshop file generated
 on : Thu Jul 07 23:23:52 2022
 * TLC version : 8.10 (Jan 14 2016)
 * C/C++ source code generated on :
 Thu Jul 07 23:23:54 2022

```

```

*
 * Target selection: stm32f4.tlc
 * Embedded hardware selection: ARM
 Compatible->Cortex - M4
 * Code generation objectives: Unspec-
 ified
 * Validation result: Not run
 */

```

Результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink [12] (рис. 3) подтвердили эффективность разработанного алгоритма, используемого для управления отладочной платформой.

Заключение

В данной статье описана разработка экспериментального образца активного фильтра и алгоритма его работы. Система управления фильтра реализована на отладочной платформе STM32F411E-DISCO, а силовая часть – на высокоскоростных MOSFET-транзисторах IRFD110PBF. Алгоритм работы системы управления составлен в программном комплексе MATLAB. Тестирование работы алгоритма проведено в среде моделирования Simulink и показало его высокую эффективность. Данный алгоритм в дальнейшем был преобразован в код на языке C++ для последующей загрузки в отладочную платформу STM32F411E-DISCO. Анализ работ других авторов позволил упростить отдельные моменты разработки и реализации и избежать некоторых ошибок.

Литература

1. Вынгра А. Автономный инвертор для однофазного активного фильтра гармонических искажений судовой сети // Вестн. АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-82-89.
2. Вынгра А. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для силовых активных фильтров судовых электроэнергетических систем // Вестн. АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 73–79. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-73-79.
3. Tingting G., Yanqiang L., Dongdong C., Long X. A novel active damping control based on grid-side current feedback for LCL-filter active power filter. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 1319–1324. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.027.
4. Gabe I.J., Montagner V.F., Pinheiro H. Design and implementation of a robust current controller for VSI connected to the grid through an LCL filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 1444–1452. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2016097.
5. Shen X., Gao G., Wu Y., Lu J., Tan L., Dai M., Tian Y. Improvement of power quality in EAST power supply system based on hybrid active filter. *Fusion Engineering and Design*, 2020, vol. 161, art. 112076. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.112076.
6. Vyngra A.V. DC to AC Converter for active filter based on STM discovery platform. *Proc. IEEE Conf. EIConRus*, 2021, pp. 1133–1136. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396369.
7. Wan B.N., Xu G.S. Experimental advanced superconducting tokamak. *Chinese Science Bull.*, 2015, vol. 60, no. 23, pp. 2157–2168. DOI: 10.1360/N972014-01235.
8. Vyngra A.V., Avdeev B.A. Experimental study of the use of active filters in the electric drive power supply circuits. *Proc. Conf. EIConRus*, 2022, pp. 916–919. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755750.
9. Kulkarni A.G., Jha D.M., Qureshi D.F. Simulation of fault diagnosis of induction motor based on spectral analysis of stator current signal using fast fourier transform. *IJSET*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 104–136.
10. Bhujel N. Three phase shunt active power filter using dq0 transformation MATLAB central file exchange. *MATLAB Central File Exchange*, 2022. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62006-three-phase-shunt-active-power-filter-using-dq0-transformation> (дата обращения: 01.01.2022).
11. Špelko A, Blažič B, Papič I, Herman L. Active filter reference calculations based on customers' current harmonic emissions. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 1, art. 220. DOI: 10.3390/en14010220.
12. Vyngra A.V., Avdeev B.A. Improving the power quality of a marine automated digital substation by using an active filter. *Proc. IV Int. Sci. and Tech. Conf. RPA*, 2021, pp. 1–10. DOI: 10.1109/RPA53216.2021.9628669.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.141.159-164

Received 03.09.22, Revised 12.09.22
2023, vol. 36, no. 1, pp. 159–164

Integrated development of software and hardware components of the frequency converter filter for operating in power-limited ship networks

S.G. Chernyi^{1,2}, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, sergiiblack@gmail.com*
A.S. Sobolev¹, *Postgraduate Student, sobolev.alexandr1496@gmail.com*

¹ *Kerch State Maritime Technological University, Kerch, 298318, Russian Federation*

² *St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, 198035, Russian Federation*

Abstract. Complex energy systems use a large number of different consumers with a non-linear load. Most of them are complex technical and expensive devices. Due to the non-linearity of the load of these consumers, electromagnetic interference occurs in the network, which negatively affects the correct operation of such equipment. Due to the impact of electromagnetic interference on the operation of complex technical equipment operating in large power systems, a decrease in the quality of signals and power, as well as a noticeable decrease in the service life of devices affected by interference, can occur. In frequency converters, due to electromagnetic interference in low-current control signals of power elements, there is a possibility of a short circuit, which will lead to a complete failure of the device. To reduce the effect of electromagnetic interference on devices, passive or active filtering is often used.

This article discusses the development and design of an experimental sample of an active filter to use in low-current circuits of frequency converters, as well as the development of an algorithm for the operation of

an active filter control system. The research method is to review existing solutions in order to understand how the algorithms are implemented on other devices. The control system, the algorithm was developed for, is implemented on the debugging platform STM32F411E-DISCO. Such solution will make it possible to meet all the emerging needs that arise during the implementation of the active filter device.

The creation of the operation algorithm for this filter was carried out in the MATLAB software package. Due to this solution, it becomes possible to create an operation algorithm without additional difficulties associated with the further translation of the algorithm into C++ code loaded into the microcontroller.

Keywords: active filter, interference, control system, programming, modeling.

References

1. Vyngra A.V. Autonomous inverter for single-phase active filter of harmonic distortions in ship power network. *Vestn. of Astrakhan State Technical University. Ser.: Marine Engineering and Technologies*, 2021, no. 2, pp. 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-82-89 (in Russ.).
2. Vyngra A.V. Developing algorithms and software for power active filters of ship electric power systems. *Vestn. of Astrakhan State Technical University. Ser.: Marine Engineering and Technologies*, 2022, no. 2, pp. 73–79. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-73-79 (in Russ.).
3. Tingting G., Yanqiang L., Dongdong C., Long X. A novel active damping control based on grid-side current feedback for LCL-filter active power filter. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 1319–1324. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.027.
4. Gabe I.J., Montagner V.F., Pinheiro H. Design and implementation of a robust current controller for VSI connected to the grid through an LCL filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 1444–1452. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2016097.
5. Shen X., Gao G., Wu Y., Lu J., Tan L., Dai M., Tian Y. Improvement of power quality in EAST power supply system based on hybrid active filter. *Fusion Engineering and Design*, 2020, vol. 161, art. 112076. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.112076.
6. Vyngra A.V. DC to AC Converter for active filter based on STM discovery platform. *Proc. IEEE Conf. ElConRus*, 2021, pp. 1133–1136. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396369.
7. Wan B.N., Xu G.S. Experimental advanced superconducting tokamak. *Chinese Science Bull.*, 2015, vol. 60, no. 23, pp. 2157–2168. DOI: 10.1360/N972014-01235.
8. Vyngra A.V., Avdeev B.A. Experimental study of the use of active filters in the electric drive power supply circuits. *Proc. Conf. ElConRus*, 2022, pp. 916–919. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755750.
9. Kulkarni A.G., Jha D.M., Qureshi D.F. Simulation of fault diagnosis of induction motor based on spectral analysis of stator current signal using fast fourier transform. *IJISSET*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 104–136.
10. Bhujel N. Three phase shunt active power filter using dq0 transformation MATLAB central file exchange. *MATLAB Central File Exchange*, 2022. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62006-three-phase-shunt-active-power-filter-using-dq0-transformation> (accessed January 01, 2022).
11. Špelko A, Blažič B, Papič I, Herman L. Active filter reference calculations based on customers' current harmonic emissions. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 1, art. 220. DOI: 10.3390/en14010220.
12. Vyngra A.V., Avdeev B.A. Improving the power quality of a marine automated digital substation by using an active filter. *Proc. IV Int. Sci. and Tech. Conf. RPA*, 2021, pp. 1–10. DOI: 10.1109/RPA53216.2021.9628669.

Для цитирования

Черный С.Г., Соболев А.С. Комплексная разработка программно-аппаратных компонентов фильтра преобразователя частоты для работы в судовых сетях ограниченной мощности // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 1. С. 159–164. DOI: 10.15827/0236-235X.141.159-164.

For citation

Chernyi S.G., Sobolev A.S. Integrated development of software and hardware components of the frequency converter filter for operating in power-limited ship networks. *Software & Systems*, 2023, vol. 36, no. 1, pp. 159–164 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.141.159-164.