

---

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-124-130  
УДК 004.94:629.5.064.5  
EDN: NRSBTX

А.В. Вынгра<sup>1</sup>, С.Г. Черный<sup>1,2</sup>, П.А. Ерофеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ТОКА СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕЧЕТКИМИ АЛГОРИТМАМИ

Актуальность исследования обусловлена широким развитием и распространением на судах электронной техники, требующей высоких показателей качества электроэнергии для корректной и надежной работы. Целью является поиск оптимальных и эффективных алгоритмов и методов управления системами повышения качества электроэнергии на судах, в частности активными фильтрами тока. Исследование производилось с помощью имитационного компьютерного моделирования электрических схем и регуляторов в системе Matlab/Simulink.

В статье рассматриваются аспекты активной фильтрации тока для гармоник низкой частоты. Разработана имитационная модель автономной системы электроснабжения, включающая неидеальный источник электроэнергии, линии электропередач и нелинейный потребитель. Для повышения качества электрической энергии в системе спроектирован активный фильтр тока, подключенный параллельно нагрузке. В основе генерирования компенсирующего воздействия рассмотрен и исследован регулятор на нечеткой логике.

В ходе моделирования определены оптимальные настройки правил нечеткого регулирования активной компенсации тока, проанализированы полученные данные работы активного фильтра с нечетким регулятором. Выявлены сильные и слабые стороны работы регуляторов, определен дальнейший вектор проведения исследований. По окончании моделирования и проектирования устройства возможна сборка пробной модели с проверкой ее работоспособности и эффективности использования.

**Ключевые слова:** активный фильтр, гармоники, показатели качества электроэнергии.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

---

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-124-130  
UDC 004.94:629.5.064.5  
EDN: NRSBTX

A. V. Vyngra<sup>1</sup>, S. G. Chernyi<sup>1,2</sup>, P. A. Yerofeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of the Crimea, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

## ACTIVE CURRENT FILTER WITH FUZZY ALGORITHMS FOR MARINE POWER SYSTEMS

Today, marine electronics is advancing vigorously, finding more and more applications aboard ships, so high quality of electric power for its correct and trouble-free operation becomes a relevant challenge. The purpose of this study was to search optimal and efficient control algorithms and methods for the systems intended to improve power quality aboard ships, in particular, active current filters. The study was performed as computer-based simulation of electric circuits and controllers in Matlab/Simulink.

This paper discusses active filtering of current in terms of low-frequency harmonics. It suggests a simulation model of an autonomous power system consisting of an imperfect power supply, transmission lines and a non-linear consumer. To improve power quality, the system has an active current filter connected in parallel with the load. The compensator was chosen as a fuzzy-logic controller.

---

*Для цитирования:* Вынгра А.В., Черный С.Г., Ерофеев П.А. Исследование активного фильтра тока судовых электро-энергетических систем с нечеткими алгоритмами. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 124–130.

*For citations:* Vyngra A.V., Chernyi S.G., Yerofeev P.A. Active current filter with fuzzy algorithms for marine power systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; Special Issue 1: 124–130 (in Russian).

The simulation made it possible to determine optimal settings for the fuzzy logic of active current compensation, as well as to analyse the performance of active filter with fuzzy-logic controller. The study highlighted pros and cons of this controller type, as well as promising paths of further studies. After the simulation stage, once the device is designed, the next step could be to build up a breadboard system to check its operability and efficiency.

**Keywords:** active filter, harmonics, power quality.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

В настоящее время практически на всех судах используются нагрузки на основе силовой электроники, такие как источники бесперебойного питания (ИБП), импульсные блоки питания, устройства частотного управления электродвигателями, электроприводы с переменной нагрузкой.

Все это оборудование на основе силовой электроники потребляет ток от источника, который имеет нелинейный характер и состоит из множества гармоник [1]. Из-за этого нелинейного тока электроэнергетическая система должна поставлять довольно большое количество реактивной мощности из источника, поскольку ток, потребляемый из источника, не синусоидальный, а напряжение источника и ток не совпадают по фазе [2–4], что, в свою очередь, приводит к дополнительному потреблению топлива судовыми дизель-генераторами. Чтобы уменьшить эти гармонические искажения, традиционно используются пассивные фильтры [5] и симметрирующие устройства.

Недостатками пассивных фильтров являются компенсация гармоник с фиксированным значением частот и проблемы резонанса в сети. Эти недостатки можно преодолеть путем применения мощных электронным устройств, называемых активными фильтрами [6]. Известно, что активные фильтры являются дорогостоящими, поэтому для снижения стоимости создаются комбинированные активные фильтры, включающие упрощенные параллельные активные фильтры с добавлением и недорогих параллельных пассивных фильтров. Комбинированные активные фильтры формируются для трехфазной трехпроводной системы, работающей симметрично, что вполне применимо для судовых электроэнергетических систем [7].

Для выявления и оценки опорного тока, а также для генерации компенсирующего тока параллельным активным фильтром используют множество методов и алгоритмов, таких как теория мгновенной мощности ( $pq$ ) или теория синхронной системы отсчета (метод вращающейся систе-

мы координат  $id, iq$ ) [8]. Настоящая статья сосредоточена на новом методе управления, использование которого не требует множества вычислений, тем самым снижая нагрузку на микропроцессор системы управления АФ. Для управления инвертором постоянного напряжения конденсатора и извлечения опорных токов предложено применять регулятор на нечеткой логике.

## Математическое описание работы активного фильтра

### Active filter operation: mathematical description

В точках подключения нагрузки при одинаковой величине напряжения на источнике и нагрузке для компенсации гармоник вводится дополнительный гармонический ток с противоположной полярностью. Это, в свою очередь, улучшает качество электроэнергии распределительных систем за счет подавления первоначальных искажений.

Мгновенный ток источника можно представить в виде

$$i_n(t) = i_n(t) - i_{af}(t), \quad (1)$$

где  $i_n$  – мгновенный ток нагрузки, А;  $i_{af}$  – мгновенный ток активного фильтра, А;  $t$  – время, с.

Напряжение источника представлено как

$$U_n(t) = U_m \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения источника, В;  $\omega$  – угловая частота тока, рад/с.

В случае нелинейной нагрузки ток нагрузки имеет гармоническую составляющую, а также основную составляющую, которую можно представить как

$$\begin{aligned} i_n(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = \\ &= I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \left( \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $n$  – номер гармоники;  $\varphi$  – фаза гармоники, рад.

Мгновенная мощность нагрузки может быть рассчитана как

$$p_n(t) = u_n(t) \cdot i_n(t) = U_m I_1 \sin^2 \omega t \cdot \cos \varphi_1 + U_m I_1 \sin \omega t \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \omega t + U_m \sin \omega t \cdot \left( \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \right). \quad (4)$$

Эта мощность нагрузки имеет гармоническую, реактивную и активную составляющие

$$p_n(t) = p_p(t) + p_a(t) + p_r(t), \quad (5)$$

где  $p_p$  – мгновенная реактивная мощность;  $p_a$  – мгновенная активная мощность;  $p_r$  – мгновенная мощность гармоник.

Из (4) активная полезная мощность, потребляемая нагрузкой, представлена как

$$p_a(t) = U_m I_1 \sin^2 \omega t \cdot \cos \varphi_1 = u_n(t) \cdot i_n(t). \quad (6)$$

Если активный фильтр отдает гармоническую и реактивную мощность, то ток источника  $i_n(t)$  будет чисто синусоидальным и синфазным с напряжением источника. Токи трехфазного источника после компенсации можно выразить как

$$i_{ua}^*(t) = \frac{p_n(t)}{u_u(t)} = I_1 \sin \omega t \cdot \cos \varphi_1 = I_{\max} \sin \omega t, \quad (7)$$

$$I_{\max} = I_1 \cos \varphi_1.$$

Аналогично

$$i_{ub}^*(t) = I_{\max} \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$i_{uc}^*(t) = I_{\max} \sin(\omega t + 120^\circ).$$

## Регулятор на нечеткой логике

Fuzzy-logic controller

В большинстве используемых в настоящее время устройств автоматизации технологических процессов нечеткая логика позволяет применить опыт операторов для управления процессами.

Целями базовых правил нечеткой логики являются формализация и применение человеческого умозаключения. Таким образом, нечеткая логика является частью искусственного интеллекта. Базы правил нечеткой логики представляют собой набор правил, которые обычно используются параллельно, но в некоторых приложениях могут быть объединены.

Применяются правила следующего типа: IF – «утверждение», THEN – «результат». Базы правил нечеткой логики, подобно традиционным экспертным системам, основываются на базе знаний, построенной на основе человеческого опыта.

Нечеткий регулятор используется для регулирования напряжения конденсатора в звене постоянного тока инвертора в блоке расчета мгновенной мощности.

## Формирование правил нечеткой логики для работы параллельного активного фильтра

Development of fuzzy-logic settings for parallel active filter

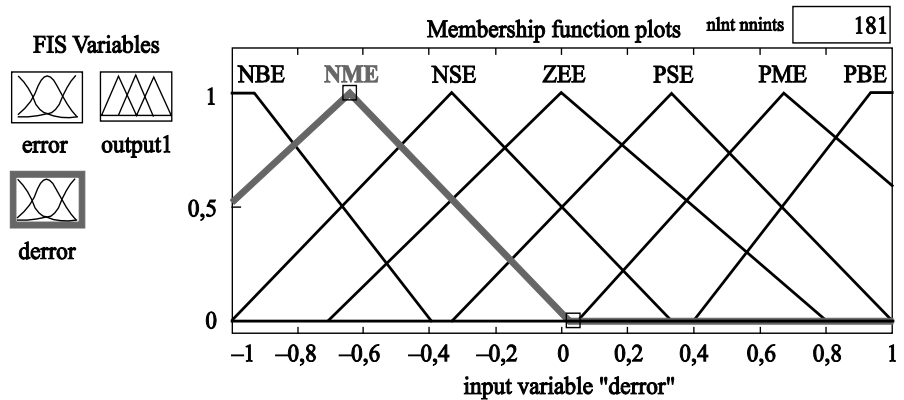
Любой объект имеет степень принадлежности, которая варьируется от 0 до 1 в теории нечетких множеств, что позволяет нечеткой логике естественным образом обрабатывать все ситуации работы активного фильтра. Составление базы данных нечетких правил происходит в среде моделирования Matlab. Форма функций принадлежности в зависимости от необходимости может быть трапециевидной, гауссовой и т.д., а также симметричной или асимметричной.

Погрешность напряжения силового преобразователя определяется лингвистическими переменными, такими как положительная большая ошибка (PBE), отрицательная большая ошибка (NBE), положительная средняя ошибка (PME), отрицательная средняя ошибка (NME), положительная малая ошибка (PSE), отрицательная малая ошибка (NSE), нулевая ошибка (ZEE), где каждая переменная определяется постепенно меняющейся треугольной функцией принадлежности. Для ошибки (error) и производной ошибки (derror) выбрано семь нечетких множеств (рис. 1).

Для конкретного приложения в зависимости от входного разрешения выбирается количество нечетких уровней, которое не является фиксированным. Чтобы уменьшить сложность вычислений, применим треугольные значения нечеткого множества. Следовательно, регулятор оперирует тремя входными и выходными переменными: error, derror, и output. Далее составляем правила нечеткой логики в редакторе правил с использованием зависимостей, приведенных в таблице.

**Рис. 1.** Треугольные переменные функции принадлежности производной ошибки (derror)

**Fig. 1.** Triangular variables of membership function for the derivative error (derror)



База нечетких правил  
Base of fuzzy rules

<i>e/de</i>	NBE	NME	NSE	ZEE	PSE	PME	PBE
NBE	NBE	NBE	NBE	NBE	NME	NSE	ZEE
NME	NBE	NBE	NBE	NME	NSE	ZEE	PSE
NSE	NBE	NBE	NME	NSE	ZEE	PSE	PME
ZEE	NBE	NME	NSE	ZEE	PSE	PME	PBE
PSE	NME	NSE	ZEE	PSE	PME	PBE	PBE
PME	NSE	ZEE	PSE	PME	PBE	PBE	PBE
PBE	ZEE	PSE	PME	PME	PBE	PBE	PBE

Для  $n$  числа переменных нечеткие правила являются  $n$ -мерными. Следовательно, в результате составления базы данных нечетких правил получается плоскость логики принятия решений, построенную в трехмерном пространстве (рис. 2).

## Результаты моделирования

### Simulation results

Для проведения математического моделирования была составлена имитационная модель замкнутой системы электроснабжения в среде моделирования Matlab/Simulink.

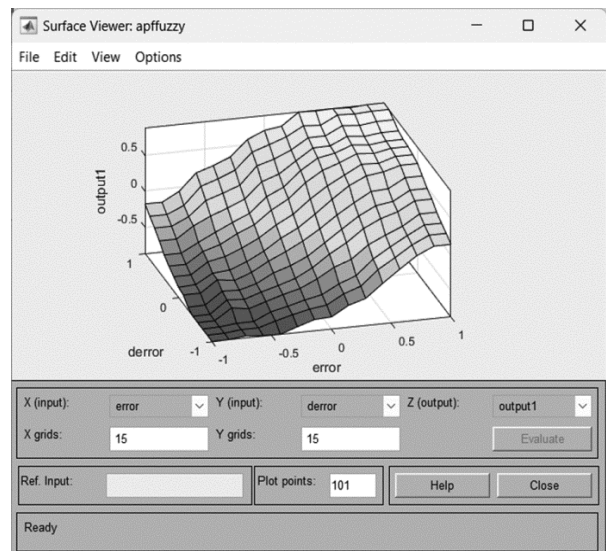
Модель включает: трехфазный источник напряжения, активный фильтр, дополнительный пассивный фильтр, два типа нагрузки, которые подключаются к сети поочередно в момент времени 0,1 с и 0,25 с, и различные блоки измерения электрических величин. Визуализация модели проведения на рис. 3. В качестве нелинейной нагрузки выступает несимметричный диодный мост.

Нечеткий регулятор реализован в блоке вычис-

ления напряжения конденсаторных батарей активного фильтра. На вход подается рассогласование заданного и текущего значений напряжения конденсаторных батарей и производная этого рассогласования (рис. 4).

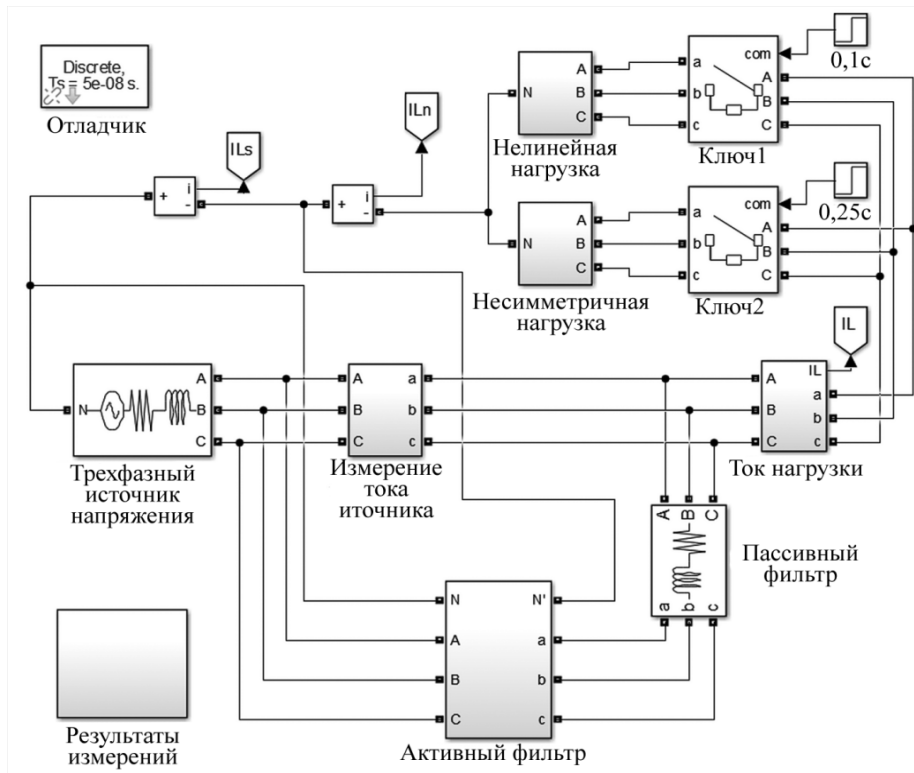
При моделировании исследовались значения токов нагрузки, фильтра и источника, а также напряжения источника. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

Как можно видеть на рис. 5, при протекании в системе несинусоидального и несимметричного токов нагрузки применение параллельного активного фильтра на нечеткой логике позволяет потреблять из сети симметричный синусоидальный ток, тем самым потребляя только активную мощность.



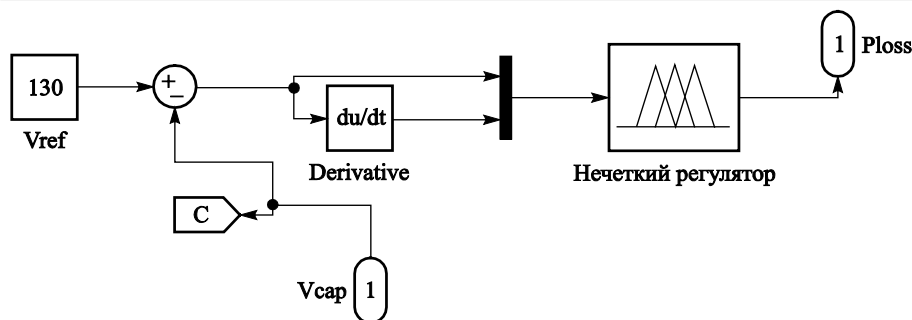
**Рис. 2.** Пространство нечетких правил

**Fig. 2.** Space of fuzzy rules



**Рис. 3.** Имитационная модель электроэнергетической системы с активным фильтром

**Fig. 3.** Power system with active filter: simulation model



**Рис. 4.** Регулятор напряжения конденсаторных батарей активного фильтра на нечеткой логике

**Fig. 4.** Fuzzy-logic voltage controller for active filter capacitor bank

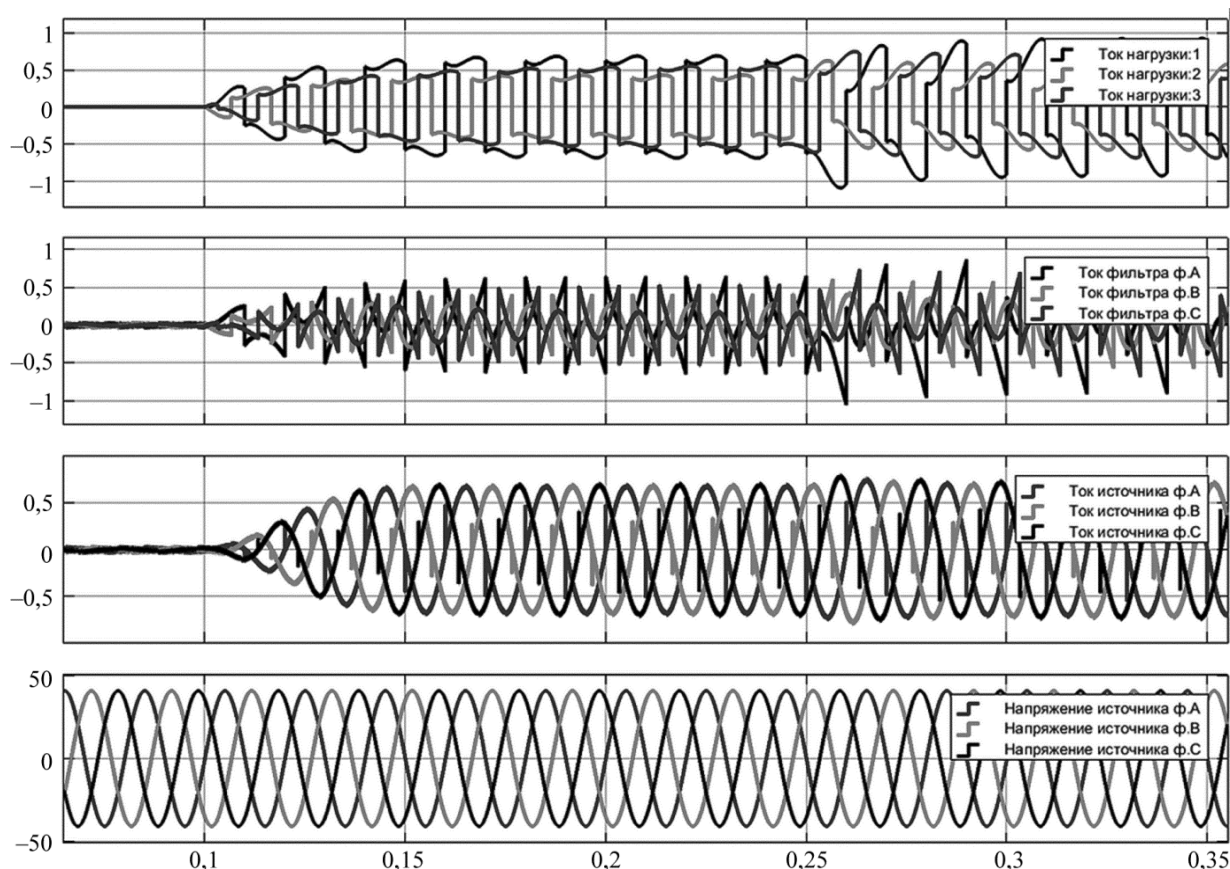
## Заключение

### Conclusion

В работе рассмотрены проектирование, моделирование и имитация системы активной фильтрации тока с целью компенсации реактивной мощности и гармоник в среде Matlab/Simulink. Результаты моделирования показали низкий коэффициент нелинейных искажений тока источника сети переменного тока и снижение реактивной мощности. По окончании моделирования и проектирования устройства возможна сборка пробной модели с проверкой ее работоспособности и эффективности использования.

## Список использованной литературы

1. Improvement of the current profile in grid-tied hybrid energy system by three-phase shunt active filter / Senapati R., Mishra S.P., Illa V., Senapati R.N. // Innovation in Electrical Power Engineering, Communication, and Computing Technology : Proceedings of IEPCCCT 2019. Singapore : Springer, 2020. P. 45–60. (Lecture Notes in Electrical Engineering ; Vol. 630). DOI: 10.1007/978-981-15-2305-2\_4.
2. Goyal V., Wadhawani S. Performance improvement of cycloconverter fed induction machine using shunt active power filter // Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems. Singapore : Springer,



**Рис. 5.** Результаты моделирования

**Fig. 5.** Simulation results

2020. P. 769–780. (Lecture Notes in Electrical Engineering ; Vol. 607). DOI: 10.1007/978-981-15-0214-9\_80.
3. Hardware realization of a single-phase-modified P-Q theory-based shunt active power filter for harmonic compensation / *K.V. Singh, R. Kumar, H.O. Bansal, D. Singh* // *Intelligent communication, control and devices. Advances in intelligent systems and computing*. Singapore : Springer, 2020. P. 523–529. (Advances in Intelligent Systems and Computing ; Vol. 989). DOI: 10.1007/978-981-13-8618-3\_54.
  4. *Gopika N.P., Rishikesh N., Balavignesh S.* Power quality improvement using shunt active filter with SRF Theory for residential loads // *Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control : Select proceedings of i-CASIC 2020*. Singapore : Springer, 2021. P. 1289–1302. (Lecture Notes in Electrical Engineering ; Vol. 700). DOI: 10.1007/978-981-15-8221-9\_120.
  5. Evaluation and Procedure for estimation of interharmonics on the example of non-sinusoidal current of an induction motor with variable periodic load / *B.A. Avdeev, A.V. Vyngra, S.G. Chernyi* [et al.] // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 158412–158419. DOI 10.1109/ACCESS.2021.3130442.
  6. *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. DOI 10.24143/2073-1574-2022-2-73-79.
  7. *Вынгра А.В., Авдеев Б.А.* Проектирование, сборка и эксплуатация активного фильтра для компенсации интергармоник // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 12. С. 519–523. DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-519-524.
  8. Формирование управляющего сигнала силового активного фильтра для компенсации интергармонических составляющих тока : свидетельство о ГР программы для ЭВМ № 2023611158 Российская Федерация / *А.В. Вынгра*. № 2022686734; заявл. 28.12.2022; опубл. 17.01.2023. 1 с.

## References

1. Improvement of the current profile in grid-tied hybrid energy system by three-phase shunt active filter / *Senapati R., Mishra S.P., Illa V., Senapati R.N.* // *Innovation in Electrical Power Engineering, Communication, and Computing Technology : Proceedings of IEPCCT 2019*. Singapore : Springer, 2020. P. 45–60. (Lecture Notes in Electrical Engineering ; Vol. 630). DOI: 10.1007/978-981-15-2305-2\_4.
2. *Goyal V., Wadhawani S.* Performance improvement of cycloconverter fed induction machine using shunt active power filter // *Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems*. Singapore : Springer, 2020. P. 769–780. (Lecture Notes in Electrical Engineering ; Vol. 607). DOI: 10.1007/978-981-15-0214-9\_80.
3. Hardware realization of a single-phase-modified P-Q theory-based shunt active power filter for harmonic compensation / *K.V. Singh, R. Kumar, H.O. Bansal, D. Singh* // *Intelligent communication, control and devices. Advances in intelligent systems and computing*. Singapore : Springer, 2020. P. 523–529. (Advances in Intelligent Systems and Computing ; Vol. 989). DOI: 10.1007/978-981-13-8618-3\_54.
4. *Gopika N.P., Rishikesh N., Balavignesh S.* Power quality improvement using shunt active filter with SRF Theory for residential loads // *Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control : Select proceedings of i-CASIC 2020*. Singapore : Springer, 2021. P. 1289–1302. (Lecture Notes in Electrical Engineering ; Vol. 700). DOI: 10.1007/978-981-15-8221-9\_120.
5. Evaluation and Procedure for estimation of interharmonics on the example of non-sinusoidal current of an induction motor with variable periodic load / *B.A. Avdeev, A.V. Vyngra, S.G. Chernyi* [et al.] // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 158412–158419. DOI 10.1109/ACCESS.2021.3130442.
6. *A. Vyngra.* Development of algorithms and software for power active filters of ship electric power systems // *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2022, No. 2, pp. 73–79, DOI 10.24143/2073-1574-2022-2-73-79 (in Russian).
7. *A. Vyngra, B. Avdeev.* Design, assembling and operation of active filter for compensation of interharmonics // *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2022, No. 12, pp. 519–523, DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-519-524 (in Russian).
8. Generation of controlling signal for active power filter compensating interharmonic current components. State Registration Certificate for Software, No. 2023611158 Russian Federation / *A.V. Vyngra*, No. 2022686734, appl. date 28.12.2022, publ. date 17.01.2023, 1 p. (in Russian).

## Сведения об авторах

*Вынгра Алексей Викторович*, преподаватель кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». Адрес: 298309, Россия, Республика Крым, Керчь, ул. Орджоникидзе, д. 82. E-mail: avyngra@mail.ru.

*Ерофеев Павел Андреевич*, преподаватель кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». Адрес: 298309, Россия, Республика Крым, Керчь, ул. Орджоникидзе, д. 82. E-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru.

*Черный Сергей Григорьевич*, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; заведующий кафедрой «Электрооборудование судов и автоматизация производства» ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». Адрес: 298309, Россия, Республика Крым, Керчь, ул. Орджоникидзе, д. 82. E-mail: sergiiblack@gmail.com.

## About the authors

*Aleksei V. Vyngra*, Lecturer, Marine Electrics and Automation Department, Kerch State Maritime Technological University, address: 82, Ordzhonikidze st., Kerch, Republic of Crimea, Russia, post code 298309, E-mail: avyngra@mail.ru.

*Pavel A. Yerofeev*, Lecturer, Marine Electrics and Automation Department, Kerch State Maritime Technological University, address: 82, Ordzhonikidze st., Kerch, Republic of Crimea, Russia, post code 298309, E-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru.

*Sergey G. Chernyi*, Assistant professor, St. Petersburg State Marine Technical University; Head of Marine Electrics and Automation Department, Kerch State Maritime Technological University, address: 82, Ordzhonikidze st., Kerch, Republic of Crimea, Russia, post code 298309, E-mail: sergiiblack@gmail.com.

Поступила / Received: 17.07.23  
Принята в печать / Accepted: 01.08.23  
© Коллектив авторов, 2023