

Маклаков А.С.¹, Радионов А.А.^{2,3}, Цзин Т.⁴¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск² Московский политехнический университет³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова⁴ Китайский университет Цзиляна, Ханчжоу, Китай

АЛГОРИТМ СМЕНЫ СТРАТЕГИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ЗАПРОГРАММИРОВАННОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Формирование стратегий управления переключением полупроводниковых ключей силовых преобразователей с помощью заранее заданных последовательностей начинается во второй половине 20-го века. Основная идея стратегий заключается в модулировании напряжения преобразователя с определённым спектром гармоник. Следует отметить, что контролировать спектр гармоник трудноосуществимо в условиях низкой частоты переключений полупроводниковых модулей преобразователей классическими методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ), такими как синусоидальной ШИМ или пространственно-векторной ШИМ. Низкая частота переключений в диапазоне от 150 до 900 Гц является следствием ограниченных возможностей полупроводниковой базы в области номинальных мощностей преобразователей свыше мегаватта. Развитие и исследование подобных способов управления переключением полупроводниковых модулей для преобразователей большой мощности является наиболее актуальным направлением ввиду их известных проблем в области электромагнитной совместимости, качества преобразованной электроэнергии и электрических потерь при частых коммутациях ключей, приводящих к перегревам. Существует ряд научных исследований, которые показывают эффективность изменения последовательностей подключений ключей преобразователей в процессе их работы, но алгоритм их смены подробно не рассмотрен в научной литературе. Статья посвящена разработке алгоритма смены стратегий предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых (ПЗШИМ) последовательностей переключений ключей трёхуровневого преобразователя. Сформулированы требования к разрабатываемому алгоритму, учитывающие значения коэффициента модуляции, угол сдвига внутренней ЭДС преобразователя от напряжения сети, а также состояния полупроводниковых модулей каждой фазы преобразователя. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном оборудовании и показана работоспособность предложенного алгоритма. Определены перспективы использования результатов исследования для высоковольтных преобразователей.

Ключевые слова: силовая преобразовательная техника, силовая электроника, широтно-импульсная модуляция, заранее заданные последовательности переключений, трёхуровневый преобразователь

ВВЕДЕНИЕ

Развитие силовой преобразовательной техники в области больших мощностей привело к широкому внедрению энергосберегающих систем преобразования и передачи электрической энергии на основе двунаправленных трёхуровневых преобразователей частоты [1-3]. Они позволяют обеспечить:

1. Рекуперацию электрической энергии в питающую сеть в тормозных режимах электропривода.
2. Поддержание нулевого сдвига первой гармоники тока по отношению к входному напряжению.
3. Компенсацию реактивной мощности в точке подключения к питающей сети.
4. Обеспечение норм международных стандартов качества напряжения и потребляемого тока в диапазоне низких и средних частот.

Следует отметить, что последний пункт трудноосуществим в условиях низкой частоты переключений полупроводниковых модулей преобразователей классическими методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ), такими как синусоидальной ШИМ или пространственно-векторной ШИМ. Низкая частота переключений в диапазоне от 150 до 900 Гц является следствием ограниченных возможностей полупроводниковой базы в области номинальных мощностей преоб-

разователей свыше мегаватта. Повышение частоты переключений полупроводниковых ключей при такой мощности приведет к существенным дополнительным электрическим потерям и перегревам [4-6].

Специалистами и учеными в области силовой преобразовательной техники был развит специальный метод ШИМ, который в международной литературе получил название «предварительно запрограммированная ШИМ» (ПЗШИМ) (с англ. pre-programmed PWM), направленный на решение проблем обеспечения электромагнитной совместимости высокомоощных преобразователей. Развитие и исследование ПЗШИМ для управления переключением полупроводниковых ключей преобразователей большой мощности является наиболее актуальным направлением ввиду их широкоизвестных проблем в области электромагнитной совместимости, качества электроэнергии и значительных потерь при коммутации, приводящих к перегревам. ПЗШИМ обладает следующими полезными свойствами в сравнении с другими методами модуляции [7, 8]:

- 1) ниже динамические коммутационные потери;
- 2) лучше показатели качества электроэнергии на низкой частоте коммутации ключей;
- 3) действующее значение внутренней ЭДС преобразователя больше за счет снижения количества переключений;
- 4) уменьшились массогабаритные показатели си- нус-фильтров.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье [9] был применен алгоритм смены синусоидальной ШИМ на векторную ШИМ для достижения баланса напряжений конденсаторов звена постоянного тока трёхуровневого преобразователя. Опубликованные в работе [10] результаты работы алгоритма смены пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник снизили динамические потери ключей в установившихся режимах работы инвертора напряжения. Исследования в работах [11, 12] показали повышение эффективности инверторов электроприводов ветрогенераторов посредством смены пространственно-векторной ШИМ на ШИМ с удалением выделенных гармоник в установившихся режимах. Существует ряд и других работ, которые тем или иным образом показывают эффективность изменения стратегий ШИМ преобразователей в процессе их работы.

Однако литературный обзор показал, что алгоритм смены различных методов ШИМ не представлен, а вопрос смены одной стратегии ПЗШИМ на другую не рассмотрен вовсе.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ СТАТЬИ

Цель данной статьи – продемонстрировать разработанный авторами алгоритм, позволяющий осуществить смену различных стратегий ПЗШИМ трёхуровневого преобразователя без дополнительных переключений и коротких замыканий в силовой цепи. Алгоритм смены стратегий ПЗШИМ может улучшить качество преобразованной электроэнергии широтно-импульсно модулируемыми высоковольтными силовыми полупроводниковыми преобразователями в различных режимах работы. В работе представлены результаты экспериментальных исследований на лабораторном исследовательском стенде для подтверждения работоспособности предложенного алгоритма.

СТРАТЕГИИ ПЗШИМ

Формирование стратегий управления полупроводниковыми преобразователями с помощью заранее заданных последовательностей переключений полупроводниковых модулей начинается во второй половине 20-го века. Основная идея данных стратегий заключается в модулировании напряжения преобразователя с определённым спектром гармоник вне зависимости от величины амплитуды или частоты самого сигнала. Развитие и исследование подобных способов управления переключением полупроводниковых ключей для преобразователей большой мощности является наиболее актуальным направлением ввиду их широко известных проблем в области электромагнитной совместимости, качества электроэнергии и значительных потерь при коммутации, приводящих к перегревам.

В научной литературе предложены несколько стратегий к формированию спектров сигналов с помощью ПЗШИМ. Все они основаны на поиске углов переключений α по определённому критерию оптимальности. Любая стратегия ПЗШИМ с четвертьволновой симметрией задаёт форму выходного напряжения внутренней ЭДС преобразователя, подавая сигналы управления полупроводниковыми модулями в заранее заданные моменты времени с помощью предварительно рассчитанных углов переключений $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$, в количе-

стве N штук за четверть периода напряжения внутренней ЭДС преобразователя в интервале от 0 до $\pi/2$ при условии, что $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \pi/2$. При подавлении отдельных гармонических составляющих дополнительно вводятся ограничения по уровню каждой n -й гармонической составляющей напряжения внутренней ЭДС преобразователя. Типовая форма сигнала фазной ЭДС с ПЗШИМ показана на рис. 1.

Логика формирования сигналов управления переключением полупроводниковых модулей преобразователя посредством ПЗШИМ показана на рис. 2, где α_1, α_2 и α_3 – углы переключения, полученные на основе заданных значений коэффициента модуляции M , фазы сигналов θ_A, θ_B и θ_C , формирующиеся на основе значений α и θ . Затем α_1, α_2 и α_3 сравниваются с сигналами θ_A, θ_B и θ_C , формируя логические сигналы управления для каждой фазы трёхуровневого преобразователя. Для любых других последовательностей переключений схема строится схожим образом [13].

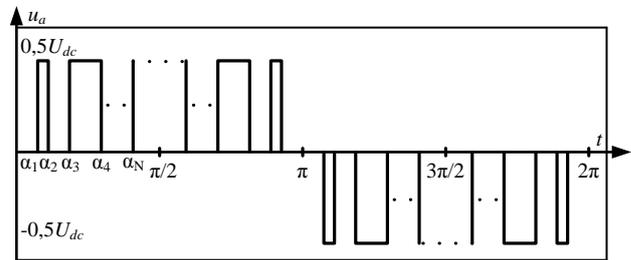


Рис. 1. Типовая форма сигнала фазной ЭДС преобразователя с ПЗШИМ

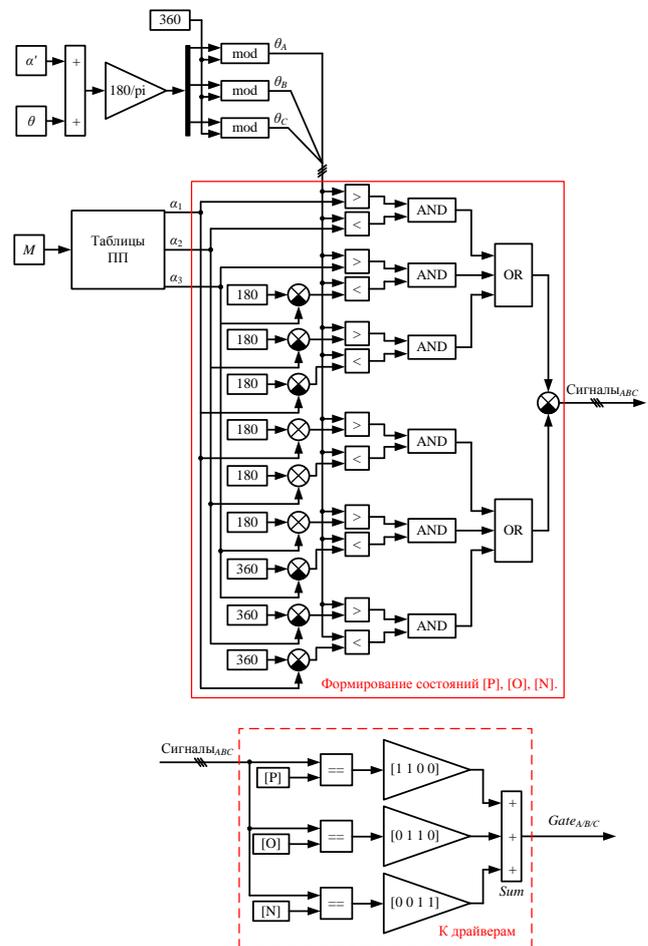


Рис. 2. Пример логической схемы ПЗШИМ

АЛГОРИТМ СМЕНЫ РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ ПЗШИМ

В основу требований к разрабатываемому алгоритму смены ПЗШИМ положено:

1. Исключение возможных коротких замыканий в силовой цепи.
2. Минимизация переключений.

На рис. 3 представлена блок-схема созданного алгоритма, в которой основными функциональными блоками являются: «Определение текущей последовательности переключений (ТПП)», «Идентификация смены ТПП», «Формирование предыдущей последовательности переключений (ППП)», «Сравнение ТПП и ППП» и «Формирование новой последовательности переключений (НПП)».

При запуске алгоритма происходит определение номера ТПП и формируется при этом соответствующий сигнал «1» или «2»:

$$ТПП = \begin{cases} 1, & \text{ПЗШИМ №1;} \\ 2, & \text{ПЗШИМ №2.} \end{cases} \quad (1)$$

В случае если сигнал на смену ПЗШИМ инициируется, то с выхода блока «Идентификация смены ТПП» формируется заданный номер стратегии ПЗШИМ, и логический сигнал «1» поступает на блок формирования ППП. На этом этапе появляется логический сигнал, обозначающий переход на новую стратегию ПЗШИМ:

$$ППП = f(ТПП, СПП) = \begin{cases} 1, & \text{ТПП = 1, СПП = 1;} \\ 2, & \text{ТПП = 2, СПП = 1.} \end{cases} \quad (2)$$

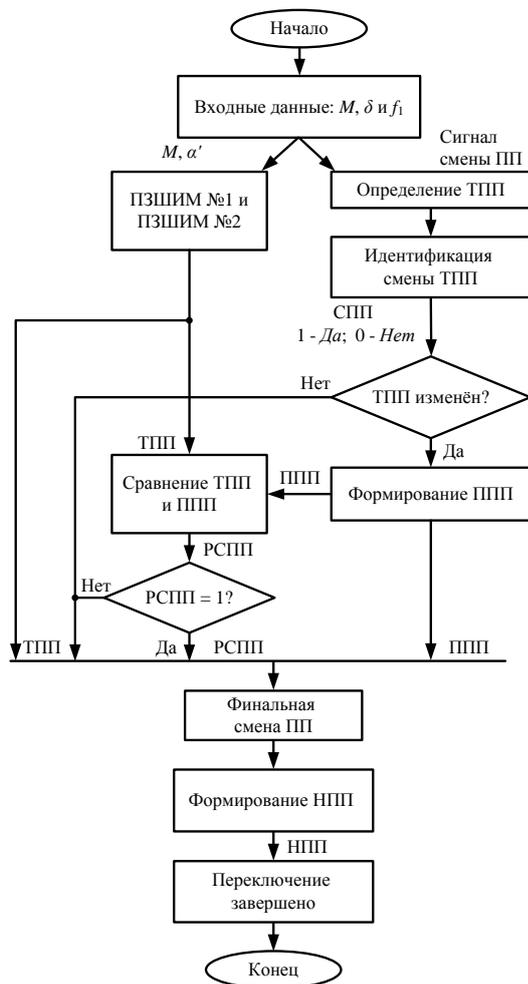


Рис. 3. Блок-схема предложенного алгоритма

Далее происходит сравнение состояний ТПП и ППП. Компаратор разрешает или запрещает смену стратегий ПЗШИМ. В алгоритме данный этап обозначен промежуточной переменной «результат сравнения последовательностей переключений (РСПП)». Если состояния работы полупроводниковых модулей при ТПП и ППП отличаются, то РСПП выдаст логический сигнал «0», а если нет, то логический сигнал «1»:

$$РСПП = f(ТПП, ППП) = \begin{cases} 0; \\ 1. \end{cases} \quad (3)$$

На последнем этапе работы алгоритма логические сигналы ТПП, ППП и РСПП проверяются, и, если все логические сигналы «1», то смена стратегии ПЗШИМ выполняется:

$$НПП = f \begin{pmatrix} ТПП, \\ ППП, \\ РСПП \end{pmatrix} = \begin{cases} 1, & \text{ТПП = 1, ППП = 2, РСПП = 1;} \\ 2, & \text{ТПП = 1, ППП = 1, РСПП = 1.} \end{cases} \quad (4)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проверка работоспособности предложенного алгоритма была выполнена в лаборатории силовой преобразовательной техники Южно-Уральского государственного университета. Фотография исследовательского оборудования представлена на рис. 4.

В среде программирования Matlab/Simulink был разработан исполняемый код алгоритма смены ПЗШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей преобразователя, затем он интерпретирован в C/C++ код и загружен в микроконтроллер TMS320C28346 платформы управления силовыми трёхуровневыми полупроводниковыми модулями P924F33 Vincotech. Посредством консольного соединения с платформой управления и специализированного программного обеспечения осуществлялось графическое отображение и управление данными микроконтроллера.

Результаты работы разработанного алгоритма смены последовательностей переключений ПЗШИМ продемонстрированы на рис. 5, а.

Первая область «А» (рис. 5, б) показывает переход от ПЗШИМ №1 к ПЗШИМ №2, а вторая область «В» (рис. 5, в) показывает переход от ПЗШИМ №2 к ПЗШИМ №1. Для демонстрации был выбран период времени от 0,1 до 0,5 с.

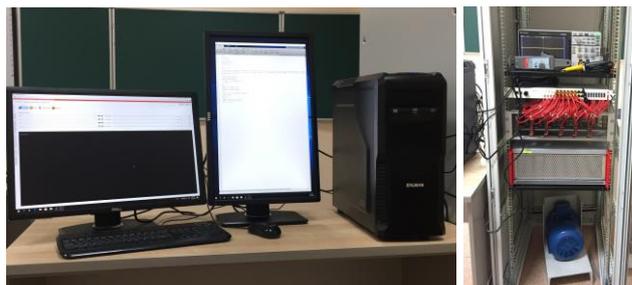


Рис. 4. Общий вид исследовательского стенда

На **рис. 6** продемонстрирована смена двух стратегий ПЗШИМ №1 и ПЗШИМ №2. В момент времени $t=0,02$ с поступает сигнал смены ПП. Фазные ЭДС преобразователя сразу меняют свою форму, так как вступившая в работу по сигналу «Финальная смена

ПП» новая стратегия ПЗШИМ имеет уже другие моменты переключений полупроводниковых модулей преобразователя. Из **рис. 6** можно убедиться, что смена последовательностей ПЗШИМ происходит без дополнительных переключений.

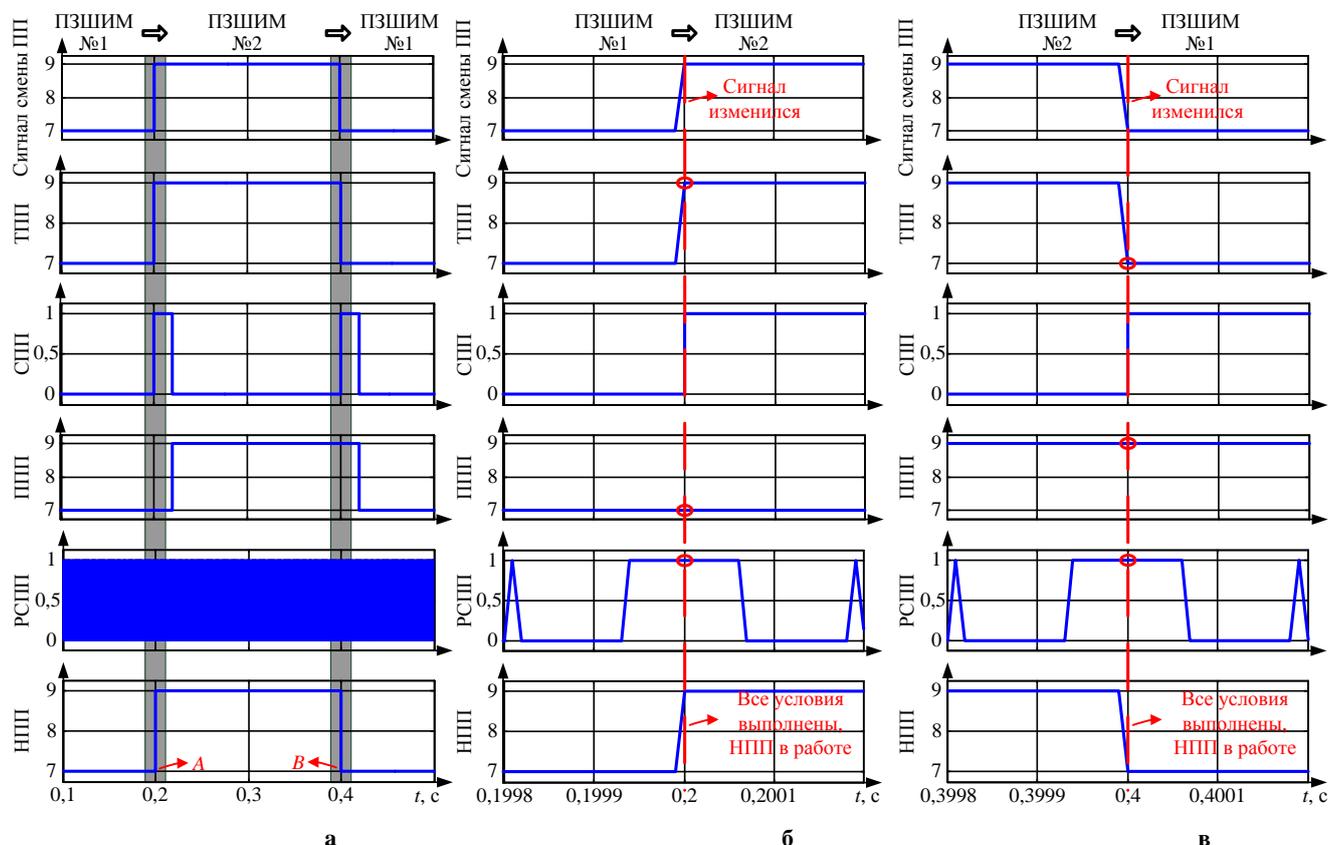


Рис. 5. Смена двух последовательностей ПЗШИМ (а), увеличение области «А» момента переключения с ПЗШИМ №1 на ПЗШИМ №2 (б), увеличение области «В» момента переключения с ПЗШИМ №2 на ПЗШИМ №1 (в)

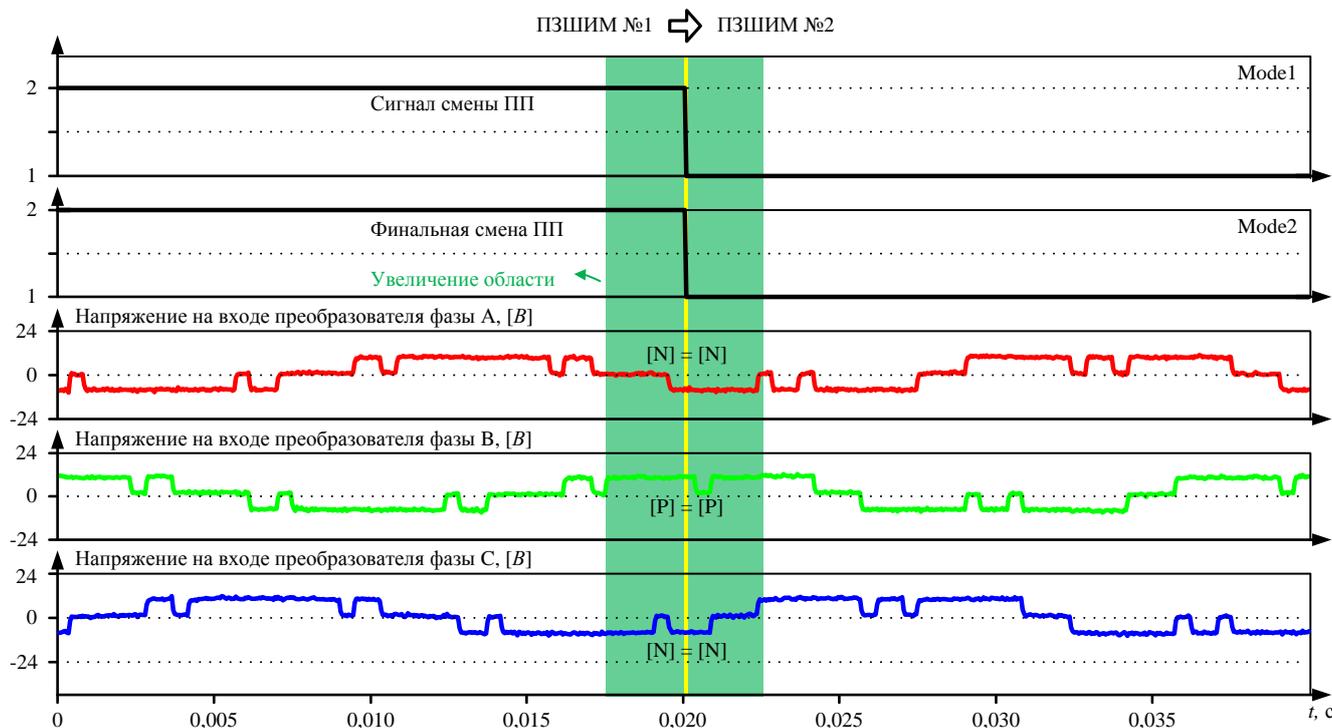


Рис. 6. Измеренные сигналы фазных ЭДС преобразователя

Рис. 7 демонстрирует смену двух стратегий ПЗШИМ №1 и ПЗШИМ №2, где в увеличенном масштабе на **рис. 8** можно увидеть, что фазные ЭДС преобразователя не меняют свою форму по сигналу смены ПП. При $t = 0,02$ с ПЗШИМ №2 имеет различные состояния с ПЗШИМ №1, что не позволяет осуществить смену ПЗШИМ. Смена ПЗШИМ выполняется алгоритмом через время Δt , когда состояния последовательностей ПЗШИМ полностью совпадают.

Далее продемонстрирован ещё один эксперимент при выполнении перехода между двумя последовательностями ПЗШИМ с высокой и низкой частотой переключений полупроводниковых модулей. На **рис. 9** показаны измеренные сигналы фазных ЭДС преобразователя при переходе от ПЗШИМ с частотой 150 Гц к ПЗШИМ с частотой 750 Гц, а на **рис. 10** продемонстрирована их обратная смена.

На основе результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод о работоспособности предложенного алгоритма при различных вариантах смены последовательностей ПЗШИМ. Если условия смены не выполняются в момент поступления сигнала смены ПЗШИМ, то алгоритм позволяет определить момент, при котором все условия для переключения будут выполнены. Это даёт возможность избежать коротких замыканий и дополнительных переключений полупроводниковых модулей преобразователя.

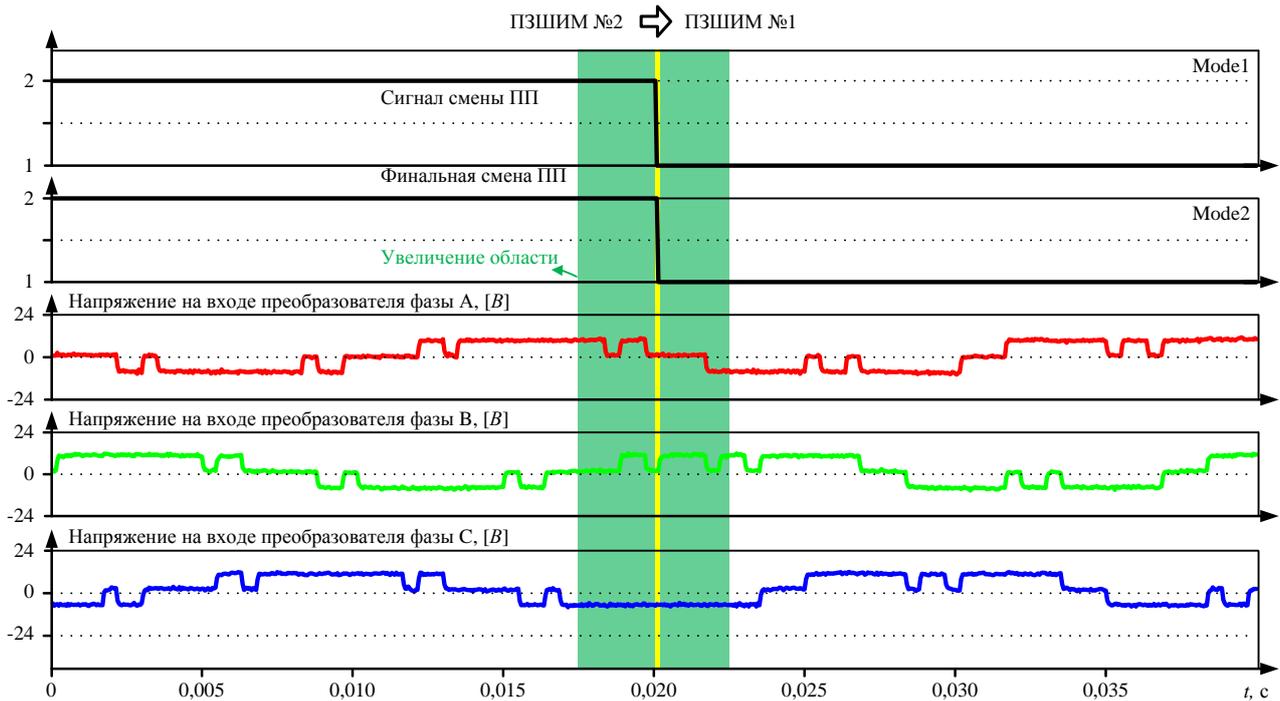


Рис. 7. Измеренные сигналы фазных ЭДС преобразователя

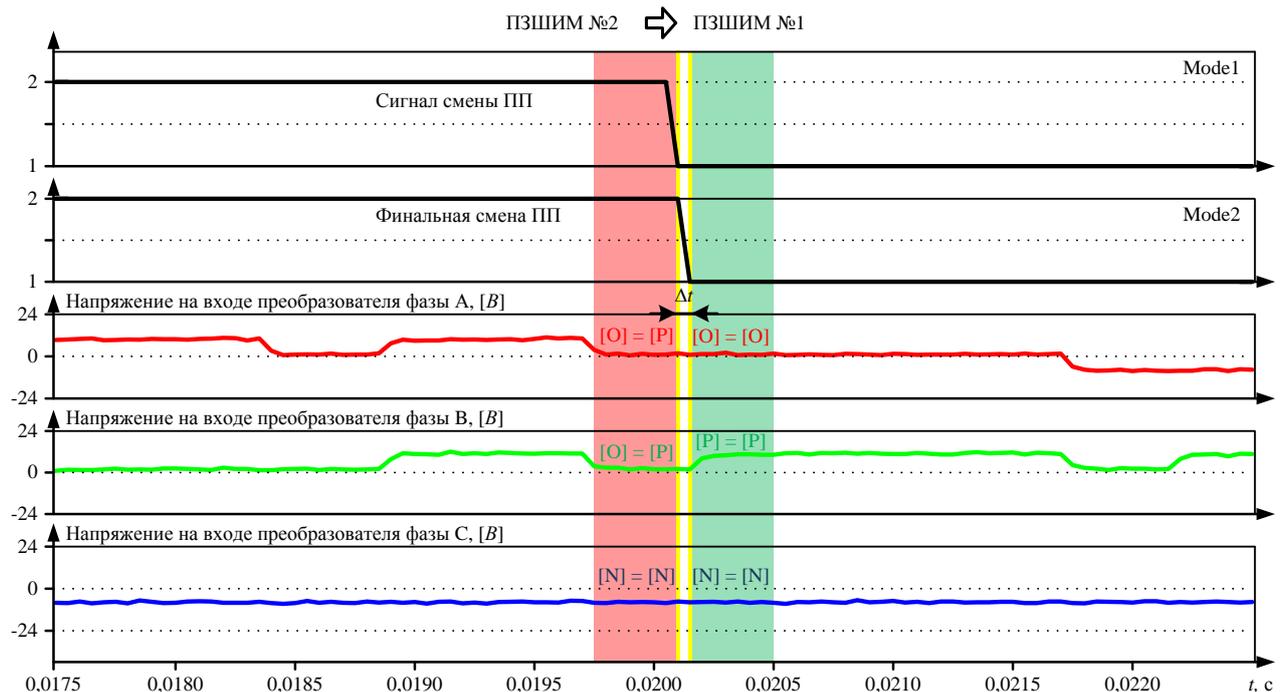


Рис. 8. Смена ПЗШИМ (увеличение рис. 7)

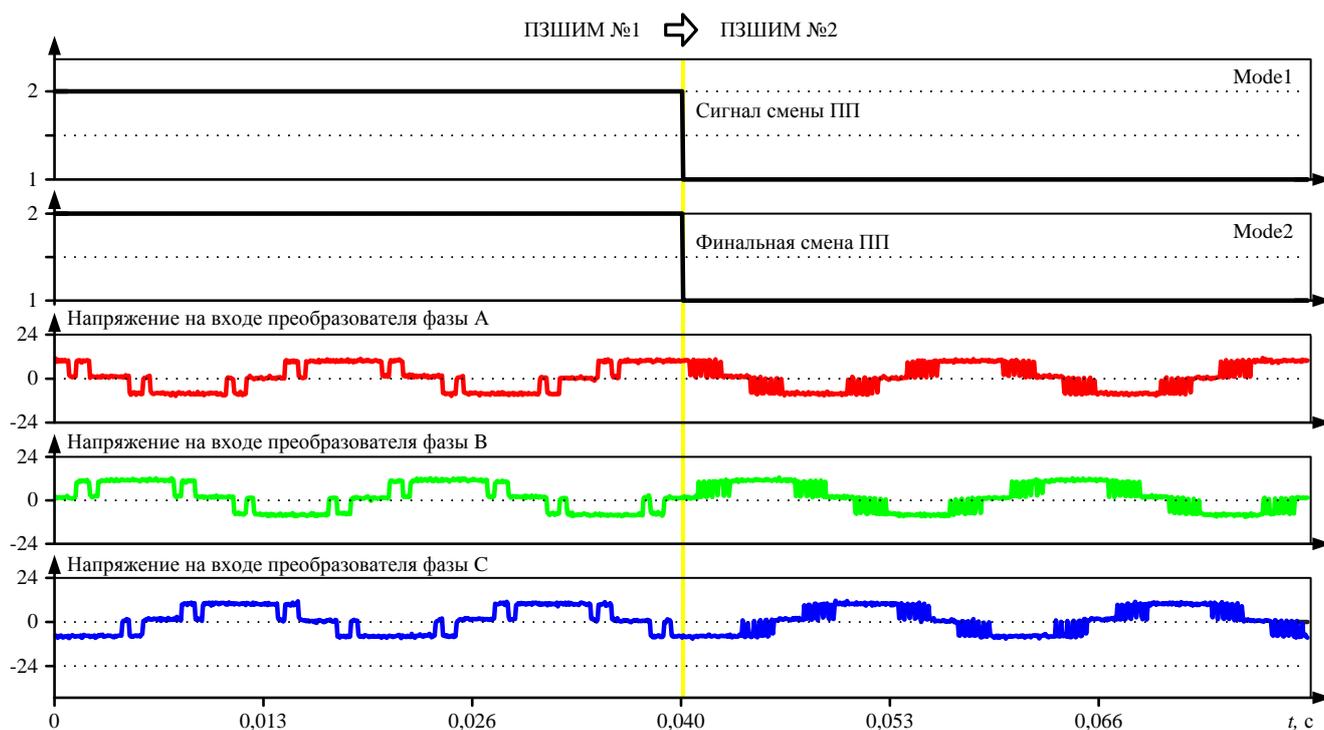


Рис. 9. Переход от ПЗШИМ (150 Гц) к ПЗШИМ (750 Гц)

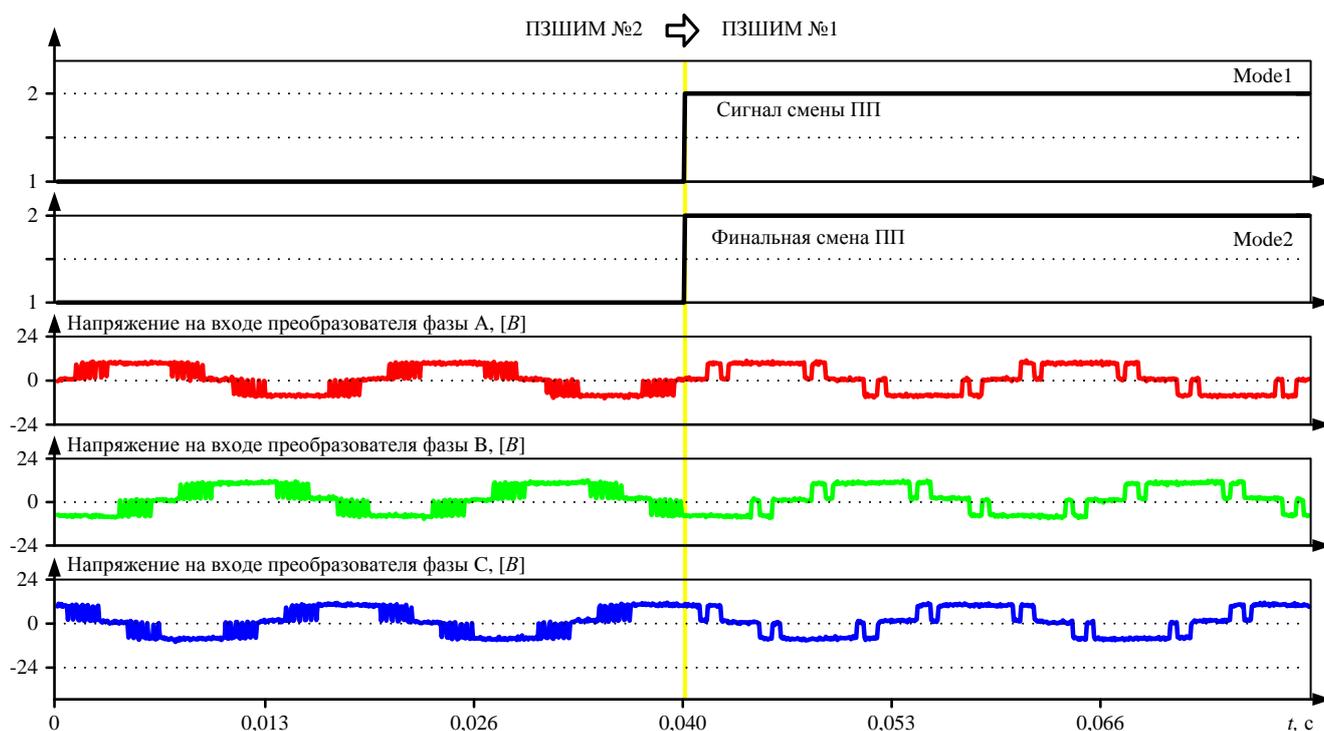


Рис. 10. Переход от ПЗШИМ (750 Гц) к ПЗШИМ (150 Гц)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье продемонстрирован алгоритм смены ПЗШИМ трёхфазного трехуровневого преобразователя, позволяющего изменять последовательности ПЗШИМ без дополнительных переключений и коротких замыканий в силовой цепи.

2. Доказана работоспособность предложенного алгоритма путём анализа экспериментальных данных, полученных с помощью измерительного оборудования исследовательского стенда.

3. Предложенный алгоритм имеет перспективы использования для высоковольтных преобразователей, в

частности в области ветроэнергетических комплексов, электроприводов металлургических прокатных станов и мощных судовых электроприводов, где применяются трёхуровневые преобразователи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук МК-3803.2022.4.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. New Jersey. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017. 480 p.
2. Medium-Voltage Drives: Challenges and existing technolo-

- gy / H. Abu-Rub, S. Bayhan, S. Moinoddin, M. Malinowski, J. Guzinski // IEEE Power Electronics Magazine. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 29-41. doi: 10.1109/PEL.2016.2551802
3. Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications // International Ural Conference on Green Energy. IEEE, 2018. Pp. 275-281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364
 4. The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics / J.I. Leon, S. Kouro, L.G. Franquelo, J. Rodriguez, B. Wu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 5. Pp. 2688-2701. doi: 10.1109/TIE.2016.2519321
 5. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Denisevich A.S. Analysis of Influence of Frequency Converters with Active Rectifiers on the Power Quality in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728819
 6. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Antropova L.I. Features of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for Power Quality Analysis in Internal Power Supply Systems // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). IEEE, 2020. Pp. 774-778. doi: 10.1109/EIconRus49466.2020.9038988
 7. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021. Pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
 8. Цзин Тао. Разработка методов расчёта и алгоритма смены предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого активного выпрямителя напряжения с фиксирующими диодами: дис. ... кан. техн. наук. 05.09.12 / Цзин Тао. Челябинск, 2021.
 9. Hybrid PWM strategy of SVPWM and VSPWM for NPC three-level voltage-source inverter / W. Jiang, S. Du, L. Chang, Y. Zhang, Q. Zhao // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 25. No. 10. Pp. 2607-2619. doi: 10.1109/TPEL.2010.2041254
 10. Adjustable proportional hybrid SVPWM strategy for neutral-point-clamped three-level inverters / C. Xia, H. Shao, Y. Zhang, X. He // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60, no. 10. Pp. 4234-4242. doi: 10.1109/TIE.2012.2213558
 11. Zhang Y. Hybrid PWM scheme for grid-connected PV inverter: M.-Eng / Yang Fan Zhang. Zhejiang, 2014.
 12. Hybrid PWM Scheme for the Grid Inverter / Y. Zhang, D. Xu, C. Yan, S. Zou // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2015. Vol. 3. No. 4. Pp. 1151-1159. doi: 10.1109/JESTPE.2015.2451159
 13. A flexible hybrid selective harmonic elimination transition algorithm to provide variable frequency of output voltage in 3L-NPC inverter / T. Jing, A.S. Maklakov, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov // 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2019. Pp. 3307-3311. doi: 10.1109/IECON.2019.8927054

Поступила в редакцию 26 мая 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SWITCHING ALGORITHM OF PREPROGRAMMED PULSE-WIDTH MODULATION PATTERNS FOR THREE-LEVEL CONVERTER

Alexander S. Maklakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Research and Innovation Services, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, alexandr.maklakov.ru@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Nosov Magnitogorsk state Technical University, Moscow, Russia, radionov.mail@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3914-4429>

Tao Jing

Ph.D. (Engineering), Lecturer, School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang, China, jingtao19940214@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1371-1031>

The formation of semiconductor switching strategies for power converters based on preprogrammed switching patterns begins in the second half of the 20th century. The main idea of the strategies is to modulate the converter output voltage with a defined harmonics spectrum. It should be noted that it is difficult to control the harmonic spectrum at a low switching frequency of converter semiconductor modules using classical pulse-width modulation (PWM) methods, such as sinusoidal PWM or space-vector PWM. The low switching frequency in the range from 150 Hz to 900 Hz is a consequence of limited capabilities of the semiconductors of converter power ratings above one megawatt. The development and research of the switching methods of semiconductor modules for high-power converters are the most relevant directions due to their well-known problems in electromagnetic compatibility, power quality and switching losses leading to overheating. There are some scientific articles presenting the effectiveness of changing the modulation methods,

but the changing algorithm is not considered in detail. This article is devoted to the development of an algorithm for changing strategies for pre-programmed pulse-width modulated (PPWM) for a three-level converter. The requirements for the developed algorithm are formulated on a modulation index, a shift angle of the output converter voltage and power converter semiconductor module states. Experimental studies were carried out on laboratory equipment and the efficiency of the proposed algorithm was shown. The prospects of research results for high-voltage converters are determined.

Keywords: power converters, power electronics, pulse-width modulation, preprogrammed PWM, three level converter

REFERENCES

1. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. New Jersey. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017. 480 p.
2. Abu-RubH., Bayhan S., Moinoddin S., Malinowski M.,

- Guzinski J. Medium-Voltage Drives: Challenges and existing technology. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2016. vol. 3, no. 2, pp. 29–41. doi: 10.1109/MPEL.2016.2551802
3. Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications. 2018 International Ural Conference on Green Energy. IEEE, 2018, pp. 275–281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364
 4. Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B. The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 5, pp. 2688–2701. doi: 10.1109/TIE.2016.2519321
 5. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Denisevich A.S. Analysis of Influence of Frequency Converters with Active Rectifiers on the Power Quality in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728819
 6. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Antropova L.I. Features of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for Power Quality Analysis in Internal Power Supply Systems. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 774–778. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038988
 7. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mil. 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
 8. Jing T. *Razrabotka metodov rascheta i algoritma smeny predvaritelno zaprogramirovannykh shirotno-impulsno moduliruemyykh posledovatel'nostey pereklyucheniya poluprovodnikovyykh module tryekhfaznogo tryekhurovneвого aktivnogo vypryamitelya napryazheniya s fiksiruyushchimi diodami. Kand. Diss.* [Development of calculation methods and algorithm for changing preprogrammed pulse width modulation switching patterns of semiconductor modules for three-phase three-level neutral-point clamped active front end. Kand. Diss.]. Chelyabinsk, 2021.
 9. Jiang W., Du S., Chang L., Zhang Y., Zhao Q. Hybrid PWM strategy of SVPWM and VSVPWM for NPC three-level voltage-source inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, no. 10, pp. 2607–2619. doi: 10.1109/TPEL.2010.2041254
 10. Xia C., Shao H., Zhang Y., He X. Adjustable proportional hybrid SVPWM strategy for neutral-point-clamped three-level inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 10, pp. 4234–4242. doi: 10.1109/TIE.2012.2213558
 11. Zhang, Yang Fan. "Hybrid PWM scheme for grid-connected PV inverter". Zhejiang, 2014. 81 p.
 12. Zhang Y., Xu D., Yan C., Zou S. Hybrid PWM Scheme for the Grid Inverter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 1151–1159. doi: 10.1109/JESTPE.2015.2451159
 13. Jing T., Maklakov A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. A flexible hybrid selective harmonic elimination transition algorithm to provide variable frequency of output voltage in 3L-NPC inverter. *IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Oct. 2019. Pp. 3307–3311. doi: 10.1109/IECON.2019.8927054

Маклаков А.С., Радионов А.А., Цзин Т. Алгоритм смены стратегий предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляции трехуровневого преобразователя // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 3(56). С. 36–43. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-36-43](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-36-43)

Maklakov A.S., Radionov A.A., Jing T. Switching Algorithm of Preprogrammed Pulse-Width Modulation Patterns for Three-Level Converter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 36–43. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-36-43](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-36-43)