

На правах рукописи

*Цзин Тао.*

Цзин Тао

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА И АЛГОРИТМА СМЕНЫ  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ЗАПРОГРАММИРОВАННЫХ ШИРОТНО-  
ИМПУЛЬСНО МОДУЛИРУЕМЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ  
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОДУЛЕЙ  
ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХУРОВНЕВОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ  
НАПРЯЖЕНИЯ С ФИКСИРУЮЩИМИ ДИОДАМИ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор **Радионов Андрей Александрович**

Официальные оппоненты:

**Хакимьянов Марат Ильгизович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа;

**Дыбко Максим Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроники и электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Защита состоится 28 декабря 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте по адресу:

[https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/06diss\\_tao.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/06diss_tao.pdf)

Автореферат разослан «\_»\_\_\_\_\_ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351) 267-91-23, email: grigorevma@susu.ru.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.298.05  
доктор технических наук, профессор



Григорьев  
Максим Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Эффективность работы и качество преобразованной электроэнергии полупроводниковых преобразователей в значительной степени зависит от выбора конкретной стратегии широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Существующий в настоящее время метод предварительно запрограммированной ШИМ (ПЗШИМ), основанный на использовании предварительно рассчитанных последовательностей переключений полупроводниковых модулей преобразователя, был специально разработан для минимизации потерь и повышения качества преобразованной электроэнергии. Исследование, развитие и совершенствование стратегий ПЗШИМ имеет особую актуальность при проектировании и обеспечении электромагнитной совместимости трёхуровневых трёхфазных активных выпрямителей напряжения (АВН) с фиксирующими диодами, широко применяемых в промышленных мехатронных системах, автоматизированном электроприводе, возобновляемой и распределённой электроэнергетике.

Проблема расчёта требуемой последовательности переключений ПЗШИМ связана с выполнением требований нормативных показателей качества напряжения на входе преобразователя при низкой частоте переключений полупроводниковых модулей. В большинстве случаев только один локальный минимум целевой функции оптимизации может быть найден после значительных вычислительных затрат. Научно-обоснованные методы и алгоритмы расчёта последовательностей переключений ПЗШИМ, а также их смены в зависимости от различных режимов работы преобразователей, позволят увеличить эффективность и качество преобразованной мощности без увеличения частоты переключений полупроводниковых ключей.

На этом основании, можно сделать вывод об актуальности рассматриваемого в рамках диссертационной работы исследования.

**Степень научной разработанности проблемы.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований алгоритмов ШИМ полупроводниковых преобразователей, методов синтеза их систем управления, качества преобразованной электроэнергии и электромагнитной совместимости опубликованы в трудах многих известных ученых: С.В. Брованов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Р.Т. Шрейнер, D.G. Holmes, J. Holtz, B. Wu, J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng, Frede Blaabjerg, Damoun Ahmadi, Mohamed S. A. Dahidah, Georgios Konstantinou, Vassilios G. Agelidis, Biswarup Das, J. Napoles, R. Portillo, J. I. Leon, M. A. Aguirre, L. G. Franquelo, Dehong Xu, Yangfan Zhang, G. Narayanan, Rajapandian Ayyanar, V. T. Ranganathan, Amirhossein Moeini, Hui Zhao, Shuo Wang, Kamal Al-Haddad и многие другие.

Анализ большого количества научных публикаций указанных авторов позволил определить проблемную область, связанную с методами расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей АВН, а также алгоритмов смены данных последовательностей.

**Объект исследования** – предварительно запрограммированные ШИМ последовательности переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого АВН с фиксирующими диодами.

**Предмет исследования** – методы расчёта и алгоритм смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов поиска и алгоритма смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами.

**Идея работы** заключается в применении методов роя частиц и барьерных функций для поиска предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами с возможностью смены данных последовательностей в зависимости от требуемых показателей качества напряжения на входе АВН.

Для достижения поставленной цели были решены основные **задачи**:

1. Проведен патентно-литературный обзор в области современного состояния трёхуровневых трёхфазных преобразователей, в особенности АВН, показывающий степень научной новизны идеи работы, основных научно-технических проблем и способов их решения;

2. Разработан метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами для создания обладающей четвертьволновой симметрией формы напряжения на входе АВН при удалении отдельных гармонических составляющих с возможностью получения нескольких последовательностей ПЗШИМ;

3. Разработан метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами для создания обладающей четвертьволновой симметрией формы напряжения на входе АВН при подавлении отдельных гармонических составляющих;

4. Разработан алгоритм смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами, позволяющий осуществить смену различных последовательностей ПЗШИМ без увеличения средней частоты переключений полупроводниковых модулей в пределах периода напряжения на входе АВН;

5. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном исследовательском стенде для проверки адекватности разработанных методов расчёта и алгоритма смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами.

**Методы исследований.** Результаты исследований получены с помощью использования аналитических и численных методов решения нелинейных уравнений, методов оптимизации функций, функции Уолша, тригонометрического ряда Фурье, метода роя частиц, логических операций, численного моделирования, теории автоматического управления. Разработанные методы расчёта и алгоритмы реа-

лизованы в программе Matlab с помощью встроенных функций *fsolve* и *fmincon*. Результаты экспериментальных исследований получены на лабораторном исследовательском стенде – модульный интеграционно-исследовательский комплекс «Многоуровневый силовой электронный преобразователь».

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования подтверждается проверкой адекватности полученных результатов на основании достаточно малого расхождения теоретических и экспериментальных данных.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами для создания обладающей четвертьволновой симметрией формы напряжения на входе АВН при удалении отдельных гармонических составляющих с возможностью получения нескольких последовательностей без необходимости использования начальных углов переключений;

2. Метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами для создания обладающей четвертьволновой симметрией формы напряжения на входе АВН при подавлении отдельных гармонических составляющих;

3. Результаты расчета предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами;

4. Алгоритм смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами, позволяющего осуществить переключение между различными последовательностями углов переключений.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами на основе метода роя частиц;

2. Рассчитана предварительно запрограммированная ШИМ последовательность переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами, позволяющая обеспечить требуемый международными стандартам качества уровень коэффициента гармонических искажения (КГИ) и отдельных гармонических составляющих при 13 переключений за четверть периода напряжения на входе АВН;

3. Разработан алгоритм смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого АВН с фиксирующими диодами, позволяющий осуществить смену заданных последовательностей ПЗШИМ без увеличения средней частоты переключений полупроводниковых модулей в пределах периода напряжения на входе АВН.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что разработанные методы расчёта являются универсальными и могут быть использованы для поиска любых предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого преобразователя. Полученные результаты расчетов последовательностей переключений могут быть использованы при проектировании трехуровневых преобразователей для любых областей применения. Использование на практике разработанного алгоритма смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами повысит КПД и улучшит показатели качества потребляемой электроэнергии. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке аспирантов по специальностям 05.09.12 «Силовая электроника» в Южно-Уральском государственном университете.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы», г. Челябинск, Россия, 2018 и 2021 г.г.; международной научно-технической конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники (англ. IEEE north west Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference), г. Санкт-Петербург, Россия, 2019 г.; научном семинаре аспирантов «Электротехнические комплексы и системы автоматизации в металлургии» (англ. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice), г. Магнитогорск, Россия, 2019–2020 г.г.; 45-й ежегодной конференции сообщества IEEE по промышленной электронике (англ. the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES) (IECON)), г. Лиссабон, Португалия, 2019 г.; научно-технических семинарах кафедры мехатроники и автоматизации Южно-Уральского государственного университета (2018–2021 г.г.).

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано в 11 печатных трудах, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России, 9 статей в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus и WoS.

**Личный вклад автора.** Программная и аппаратная реализация методов расчёта и алгоритма, проверка теоретических и практических результатов работы были выполнены автором лично. Постановка проблемы, цели и задач работы, а также анализ результатов выполнялись автором совместно с научным руководителем.

**Связь исследований с научно-техническими программами.** Часть диссертационной работы выполнялась в рамках проекта фундаментальных научных исследований «Исследование и разработка методики, моделей и алгоритмов повышения эффективности преобразования электроэнергии полупроводниковыми преобразователями», проводимый совместно РФФИ и Челябинской областью.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 189 наименований. Работа изложена на 135 страницах машинописного текста, в том числе 82 рисунка и 11 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, определены объект и предмет исследования, сформирована цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая значимость исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** основное внимание уделено анализу современного состояния развития активных выпрямителей напряжения (АВН) и устройствам на их основе в области больших мощностей и высоких напряжений.

На основании обширного патентно-литературного обзора сделан вывод, что применение систем силовой преобразовательной техники на основе активных выпрямителей для рекуперации энергии является самым эффективным решением в области энергосберегающих систем электропривода и распределенной энергетики. Многие учёные и инженеры по всему миру продолжают работать над совершенствованием данных систем. В целом, основные причины, по которым АВН широко используются это – двунаправленное управление потоком электрической энергии с заданным  $\cos(\varphi)$ , обеспечение требований международных стандартов электромагнитной совместимости, высокий КПД 95–98%.

Отмечено, что в настоящее время многоуровневые АВН позволяют обеспечить электромагнитную совместимость мощных потребителей электрической энергии в диапазоне от десятков до сотен мегаватт. Среди всех известных многоуровневых топологий наиболее эффективной определена Neutral Point Clamped (NPC) на основе фиксирующих диодов. На рисунке 1, показана фазная стойка трёхуровневого преобразователя по NPC топологии. Нулевой уровень напряжения на входе преобразователя формируется при протекании тока через полностью управляемые ключи  $S_{1a}$  или  $\bar{S}_{2a}$  и фиксирующие диоды  $D_{1a}$  или  $D_{2a}$ . Каждый полупроводниковый прибор получает только половину напряжения звена постоянного тока  $U_{dc}$ .

Известно, что качество напряжения на входе любого преобразователя во многом определяется выбором конкретного алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Проанализировав достаточное количество научной литературы было классифицировано три наиболее распространённых метода ШИМ: синусоидальная ШИМ (СШИМ), пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ) и предварительно запрограммированная ШИМ (ПЗШИМ). Было определено, что ПЗШИМ имеет больше преимуществ для использования в АВН.

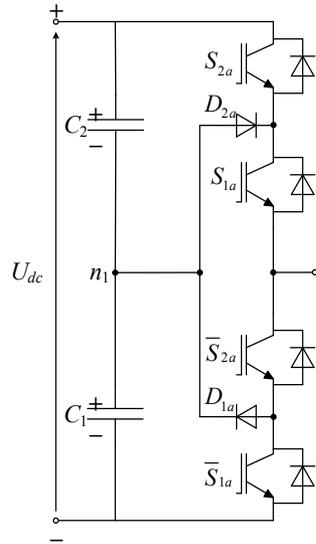


Рисунок 1 – Фазная стойка топологии NPC преобразователя:

Проанализированы формы сигналов ПЗШИМ для трёхфазного трёхуровневого АВН, обладающие четвертьволновой симметрией, полуволновой симметрией и несимметрией. В рамках диссертационного исследования выбрана форма с четвертьволновой симметрией, представленная на рисунке 2. При данной форме напряжение на входе АВН описывается выражением

$$u(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{4}{n\pi} \left[ \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) \right] \cdot \sin(n\omega t) \right), \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота,  $t$  – время,  $n$  – номер гармоники,  $N$  – количество переключений,  $\alpha$  – углы переключения,  $k$  – порядковый номер угла переключения от 1 до  $N$ .

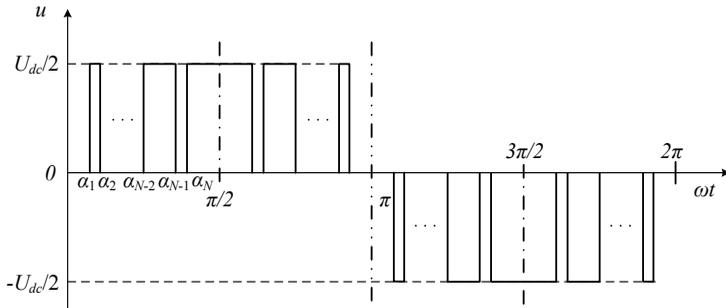


Рисунок 2 – Форма трёхуровневого сигнала при четвертьволновой симметрии

Углы переключений в пределах четверти периода должны находиться в следующем соотношении

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \pi / 2. \quad (2)$$

На основе анализа научной литературы классифицированы два основных подхода к формированию спектров сигналов с помощью ПЗШИМ: удаление отдельных гармонических составляющих (с англ. – selective harmonic elimination (SHE) и подавление отдельных гармонических составляющих (с англ. – selective harmonic mitigation (SHM)). Разница данных стратегий заключается в том, что SHE полностью устраняет выделенные гармоники на всём диапазоне коэффициента модуляции АВН, а SHM позволяет найти последовательности углов переключений полупроводниковых модулей АВН для подавления гармоник в пределах установленных ограничений, которыми являются требования стандартов качества электроэнергии.

Аналитический обзор современного состояния технологий выпрямления электрической энергии устройствами в области больших мощностей и высоких напряжений показал актуальность проводимых исследований и развития методов расчёта и выбора предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазных трёхуровневых АВН. Научная работа в данном направлении позволит решить научно-технические проблемы

при проектировании АВН и обеспечении электромагнитной совместимости с питающей сетью. Было обнаружено, что в литературе отсутствуют методики по реализации алгоритмов смены последовательностей переключений ПЗШИМ при удалении и подавлении отдельных гармонических составляющих имеющих форму с четвертьволновой симметрией. Определены задачи исследования.

**Во второй главе** разработаны методы расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений трёхфазного трёхуровневого преобразователя при удалении и подавлении отдельных гармонических составляющих.

Было определено, что для правильной постановки задачи поиска углов переключений следует учитывать следующие факторы: схему подключения преобразователя к питающей сети; частоту переключения полупроводниковых модулей; возможные резонансы токов/напряжений в точке подключения к питающей сети; настройку системы управления преобразователя; тепловые режимы работы силовых компонентов преобразователя.

В ходе диссертационного исследования было опробовано несколько методов поиска последовательностей углов переключений ПЗШИМ при удалении отдельных гармонических составляющих, среди которых метод доверительных окрестностей с ломаным шагом показал наилучшие результаты. Было использовано следующее выражение для определения начальных углов переключений полупроводниковых модулей трёхуровневого АВН обладающей четвертьволновой симметрией ШИМ формой напряжения с удалением отдельных гармонических составляющих, полученное на основании спектральных разложений сигналов с помощью функций Уолша

$$\begin{cases} \alpha_{2k-1}^0 = 30^\circ + 120^\circ \cdot k / (N+1) - \Delta\alpha \\ \alpha_{2k}^0 = 30^\circ + 120^\circ \cdot k / (N+1) + \Delta\alpha \\ \alpha_N^0 = 90^\circ - \Delta\alpha \end{cases}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество углов переключений;  $k = 1, 2, \dots, (N-1)/2$  – порядковый номер угла переключения;  $\Delta\alpha = 0 \dots 0,5$  – начальное рассогласование углов переключения для достижения лучших результатов поиска.

Связь между углами переключений и гармоническим спектром сигнала на входе АВН определяется с помощью системы управлений

$$\begin{cases} U_1 = \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot \cos(\alpha_k) = \frac{\pi}{4} \cdot M \\ U_n = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot \cos(n \cdot \alpha_k) = 0, \quad \text{где } n = 5, 7, 11, \dots \end{cases}, \quad (4)$$

где  $U_1$  – уровень основной гармоники;  $U_n$  – уровень  $n$ -ой гармоники;  $M$  – индекс модуляции, определяемый в пределах от нуля до максимального значения  $\frac{4}{\pi}$ .

Целевая функция записывается в виде

$$E = (U_1 - \frac{\pi}{4} \cdot M)^2 + \dots + U_q^2 \rightarrow \min . \quad (5)$$

На рисунке 3 представлена обобщённая блок-схема разработанного алгоритма поиска

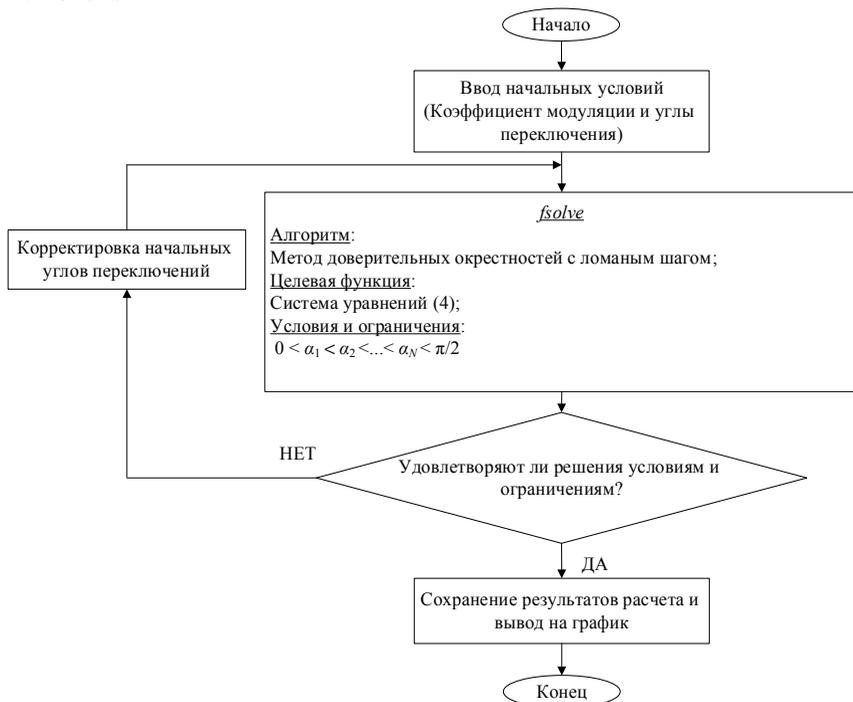


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма поиска последовательностей углов переключений ПЗШИМ при удалении отдельных гармонических составляющих методом доверительных окрестностей с ломаным шагом

С помощью разработанного алгоритма были получены последовательности углов переключений полупроводниковых модулей для шестипульсных, двенадцатипульсных и восемнадцатипульсных схем подключения к питающей сети. Четырнадцать последовательностей представлены в диссертационной работе: №1 – 5 и 7; №2 – 5, 7, 11 и 13; №3 – 5, 7, 11, 13, 17 и 19; №4 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 и 25; №5 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25; 29 и 31; №6 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37; №7 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41 и 43; №8 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47 и 49; №9 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47, 49, 53 и 55, №10 – 11, 13, 23 и 25; №11 – 5, 7, 11, 13, 23 и 25; №12 – 5, 7, 17 и 19; №13 – 17, 19, 35 и 37; №14 – 5, 7, 17, 19, 35 и 37 (через тире указы номера удалённых гармоник).

Для поиска большего количества последовательностей углов переключений ПЗШИМ при удалении отдельных гармонических составляющих был разработан алгоритм на основе метода роя частиц (МРЧ). Исходные данные алгоритма следующие: размер популяции роя частиц  $N=25$ ; размерность пространства поиска роя частиц  $D=3$  (в зависимости от количества углов переключений от  $\alpha_1$  до  $\alpha_D$ ); максимальное количество итераций  $iter_{max}=125$ ; инерционный вес от  $\omega_{min}=0,2$  до  $\omega_{max}=0,7$ ; весовые коэффициенты  $c_1=1,5$  и  $c_2=1,5$ ; граница пространства поиска для случайной инициализации вектора положения каждой частицы роя от  $x_{min}=0$  до  $x_{max}=\pi/2$ ; начальная скорость каждой частицы случайным образом выбирается в диапазоне от  $v_{min}=-\pi/10$  до  $v_{max}=\pi/10$ ; коэффициент модуляции  $M$  изменяется от 0,7 до 1,15 с шагом 0,01. Более подробное описание данного метода приведено в полном тексте диссертационной работы.

Получены результаты расчёта двух последовательностей переключений ПЗШИМ для удаления 5, 7, 11 и 13-й гармонических составляющих напряжения на входе трехуровневого трёхфазного преобразователя методом МРЧ, а также спектры линейного напряжения на входе трёхуровневого преобразователя, где также найдены отличия от результатов расчета, полученных методом доверительных окрестностей с ломаным шагом. Результаты сравнения двух последовательностей при коэффициенте модуляции 0,7 и 0,9 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение трёх последовательностей переключений ПЗШИМ при удалении 5, 7, 11 и 13 гармоник

		$M = 0,7$			$M = 0,9$		
		Послед.1	Послед.2	Послед.3	Послед.1	Послед.2	Послед.3
УП (°)	$\alpha_1$	42,91	6,67	15,39	24,65	9,39	16,73
	$\alpha_2$	47,78	15,68	51,04	29,97	20,53	50,61
	$\alpha_3$	56,25	40,70	59,53	40,05	35,07	56,69
	$\alpha_4$	66,29	61,93	72,32	48,27	65,77	77,52
	$\alpha_5$	70,36	76,58	89,37	55,63	75,59	87,09
КГИ (%)		51,05	35,12	36,88	41,26	39,27	33,22

Последовательности переключений были проанализированы на предмет показателя КГИ. Полученные результаты оформлены в виде графика и показаны на рисунке 4, где видно, что КГИ оказался различным, практически, на всём диапазоне изменения  $M$ , но при этом, все три последовательности переключений ПЗШИМ успешно удаляют 5, 7, 11 и 13 гармонические составляющие спектра напряжения на входе преобразователя.

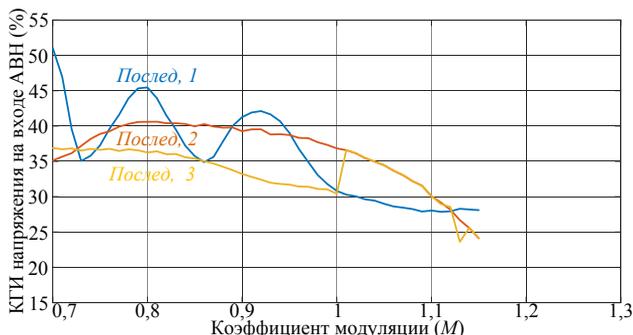


Рисунок 4 – Зависимости КГИ для трёх последовательностей углов переключений ПЗШИМ

На основании проведённых расчётов и анализа сделан вывод, что разработанный алгоритм на основе МРЧ для поиска последовательностей углов переключения ПЗШИМ с удалением гармонических составляющих из спектра напряжения на входе преобразователя позволяет получить больше результатов без необходимости перебора начальных условий.

Более сложной задачей было нахождение последовательностей углов переключений ПЗШИМ при подавлении коэффициентов отдельных гармонических составляющих. В данной диссертационной работе был применён метод барьерных функций, реализованный с помощью функции *fmincon* программы Matlab пакета Optimization toolbox.

Связь между углами переключений и гармоническим спектром сигнала на входе АВН определяется с помощью системы уравнений

$$\begin{cases} \left| \frac{\pi}{4} \cdot M - U_1 \right| \leq \delta_1 \cdot L_1 \\ \frac{1}{|U_1|} \cdot \frac{4}{n \cdot \pi} \cdot \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot \cos(n \cdot \alpha_k) \leq \delta_n \cdot L_n, \quad \text{где } n = 5, 7, 11, \dots \end{cases}, \quad (6)$$

где  $L_1$  – ограничение, определяющее уровень первой гармоники в зависимости от коэффициента модуляции;  $L_n$  – ограничения уровней каждой  $n$ -ой гармонической составляющей,  $\delta_n$  – корректирующий коэффициент.

Целевая функция записывается в виде

$$E = \sqrt{\frac{U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + \dots + U_{49}^2}{U_1^2}} \rightarrow \min. \quad (7)$$

На рисунке 5 представлена обобщённая блок-схема разработанного алгоритма поиска последовательностей углов переключений полупроводниковых модулей трёхуровневого преобразователя.

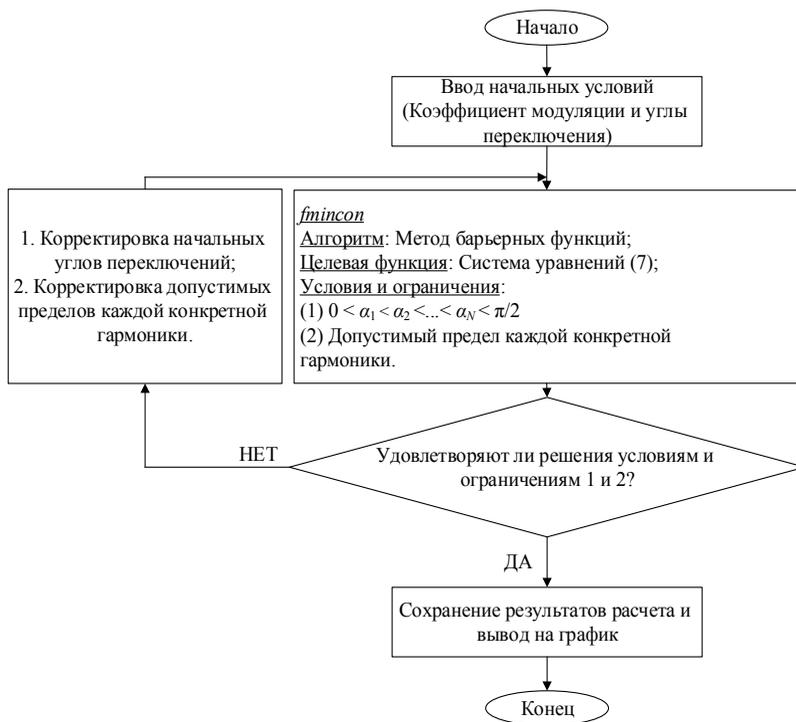


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма поиска последовательностей углов переключений ПЗШИМ при подавлении отдельных гармонических составляющих методом барьерных функций

При написании диссертационной работы удалось найти решения системы уравнений (6) с 13-ю и 15-ю углами переключений с подавлением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47, 49 гармонических составляющих. Значения каждой отдельной гармонической составляющей ниже 50-й находятся ниже установленных международными стандартами пределов. Последовательность при 13 углах переключений позволила практически полностью исключить 13, 25 и 35-ю гармоники из спектра напряжения на входе АВН. Последовательность при 15 углах переключений позволила практически полностью исключить 5, 23, 31, 35, 41, 43 и 47-ю гармоники из спектра напряжения на входе АВН при заданном коэффициенте модуляции. Таким образом, полученные решения ПЗШИМ при каждом отдельном коэффициенте модуляции представляют собой комбинацию удаления и подавления гармонических составляющих. Также следует отметить, что уровни подавляемых гармоник будут изменяться в зависимости от значения коэффициента модуляции.

**В третьей главе** предложен алгоритм смены рассчитанных в Главе 2 предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого преобразователя с фиксирующими диодами. Сформулированы требования к разрабатываемому алгоритму смены последовательностей ПЗШИМ: 1) значения коэффициента модуляции и угла сдвига напряжения на входе преобразователя от напряжения сети являются одинаковыми для всех последовательностей ПЗШИМ; 2) переход от одной последовательности ПЗШИМ к другой происходит по специальному сигналу без остановки ШИМ модулятора; 3) в каждый момент времени любая последовательность ПЗШИМ формирует три возможных комбинации ключей [P], [O] или [N] для каждой фазы преобразователя, которые необходимо учитывать. Смена различных последовательностей ПЗШИМ возможна при полном отсутствии или только при одном различии в формируемых состояниях [P], [O], [N]. Все моменты смены последовательностей ПЗШИМ можно разделить на четыре варианта в зависимости от формируемых состояний [P], [O], [N]: Вариант 1 – формируемые состояния [P], [O], [N] не изменяются; Вариант 2 – изменяется одно состояние [P], [O], [N]; Вариант 3 – изменяется два состояния [P], [O], [N]; Вариант 4 – изменяются все состояния [P], [O], [N].

На рисунке 6 видно, что в момент перехода отсутствуют резкие броски тока, а фазные напряжения новой последовательности начинаются при том же самом угле сдвига, как и у предыдущей последовательности.

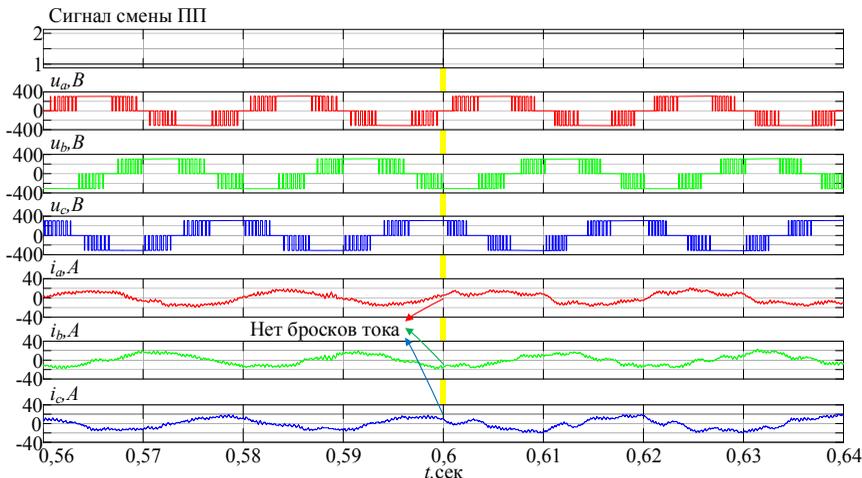


Рисунок 6 – Кривые переходных процессов мгновенных значений фазных токов и напряжений до, в момент и после смены последовательностей от ПЗШИМ  $N=15$  (удаление гармоник) к ПЗШИМ  $N=13$  (подавление гармоник)

Алгоритм смены различных последовательностей ПЗШИМ был применён в составе классической системы автоматического управления (САУ) трёхфазного трёхуровневого АВН. САУ выполнена на основе пространственно-векторного управления с синхронизацией по вектору напряжения сети. Логико-математическая модель алгоритма реализована в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink.

**В четвертой главе** проведены экспериментальные исследования. Проверка адекватности полученных результатов выполнялась в лаборатории силовой преобразовательной техники кафедры мехатроники и автоматизации Южно-Уральского государственного университета. Исследовательским стендом являлся модульный интеграционно-исследовательский комплекс «Многоуровневый силовой электронный преобразователь».

Для снятия осциллограмм и измерения мгновенных значений напряжений на входе трёхуровневого преобразователя использовалось графическое программное обеспечение на базе Windows™ платформы управления BoomBox. Измерение сигналов напряжения выполнялось с помощью изолированных датчиков напряжения ModuLink в диапазоне  $\pm 800\text{В}$  с частотой пропускания 60 кГц, чувствительностью 2,46 мВ/В. Датчики подключаются к платформе управления BoomBox по принципу «plug & play» и получают питание напрямую от платформы управления. Выходной сигнал передается по встроенной в кабели типа RJ45 экранированной витой паре. Дополнительная проверка полученных осциллограмм проводилась с помощью осциллографа Tektronix TBS2072 с пропускной способностью 80 МГц и частотой дискретизации до 1 Гвыб/с, модель дифференциального пробника HVP-08. На рисунке 7 показана физическая модель исследовательского стенда.

Результаты проведенных исследований на лабораторном оборудовании подтвердили адекватность разработанных в Главе 2 методов расчета. Было установлено, что экспериментальные последовательности переключений полностью совпадают с расчётными и могут быть рекомендованы для применения в серийно-выпускаемых трёхфазных трёхуровневых АВН и АИН. Ниже на рисунке 8 показаны осциллограммы мгновенных значений фазного напряжения на входе преобразователя при коэффициенте модуляции 1,05. Представленные осциллограммы соответствуют рассчитанным в Главе 2 последовательностям переключений №1, №2, №6 и одной последовательности, полученной методом МРЧ.

Верификация разработанного в Главе 3 алгоритма смены предварительно-запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей подтвердила его адекватность и работоспособность. На



Рисунок 7 – Общий вид исследовательского стенда

рисунке 9 показаны экспериментальные результаты смены двух последовательностей переключений – ПЗШИМ №1 (последовательностью переключений №1 с удалением выделенных гармонических составляющих (см. рисунок 8, а)) и ПЗШИМ №2 (последовательностью переключений, полученной МРЧ с удалением выделенных гармонических составляющих (см. рисунок 8, г)), где можно увидеть, что в момент получения сигнала «Mode1» (смены ПП) состояния ПЗШИМ №1 и ПЗШИМ №2 являются [NPN], что удовлетворяет Варианту 1 и смена последовательностей выполняется.

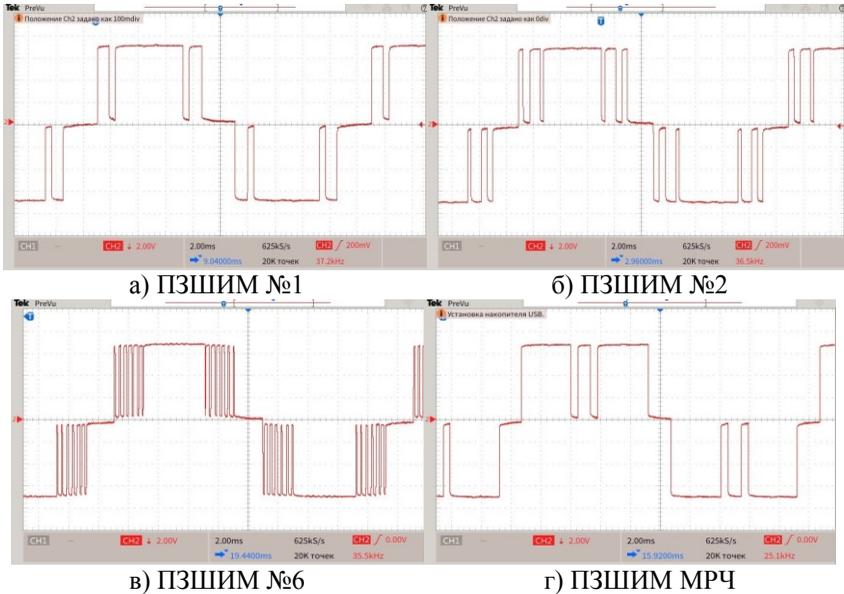


Рисунок 8 – Осциллограммы мгновенных значений фазного напряжения на входе преобразователя при коэффициенте модуляции 1,05

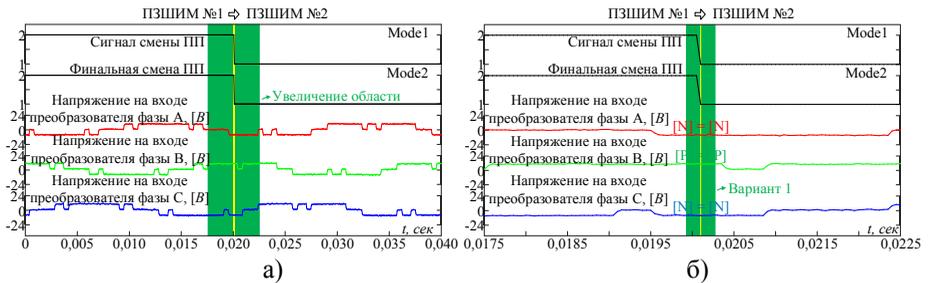


Рисунок 9 – Экспериментальные результаты работы алгоритма смены ПЗШИМ: а) осциллограммы мгновенных значений фазного напряжения на входе преобразователя при коэффициенте модуляции 1,05; б) увеличение в масштабе

На рисунке 10 показаны экспериментальные результаты обратной смены указанных ранее двух последовательностей переключений, где видно, что в момент получения сигнала «Mode1» последовательности не изменяются. Смена ПЗШИМ происходит через промежуток времени  $\Delta t$  при появлении сигнала «Mode2». Из эксперимента видно, что в момент времени  $t = 0,02$  сек (см. рисунок 11, б) последним состоянием ПЗШИМ №2 является [OON], а для ПЗШИМ №1 [PPO]. Согласно требованиям алгоритма смены последовательностей ПЗШИМ данный момент является запрещенным для перехода – Вариант 4. С этого момента алгоритм находится в ожидании появления сигнала «Mode 2». После промежутка времени  $\Delta t = 0,0000625$  сек разработанный алгоритм определяет момент, в который последовательности ПЗШИМ могут быть изменены – ПЗШИМ №2 и ПЗШИМ №1 имеют одинаковое состояния [OPN], которое удовлетворяет варианту 1, появляется разрешающий сигнал «Mode 2» и процесс смены ПЗШИМ выполняется.

Далее продемонстрирован ещё один эксперимент при выполнении перехода между двумя последовательностями ПЗШИМ с высокой и низкой частотой переключений полупроводниковых модулей. На рисунке 11 показаны измеренные фазные напряжения на входе преобразователя при переходе от ПЗШИМ  $N=3$  к ПЗШИМ  $N=13$  и от ПЗШИМ  $N=13$  к ПЗШИМ  $N=3$ .

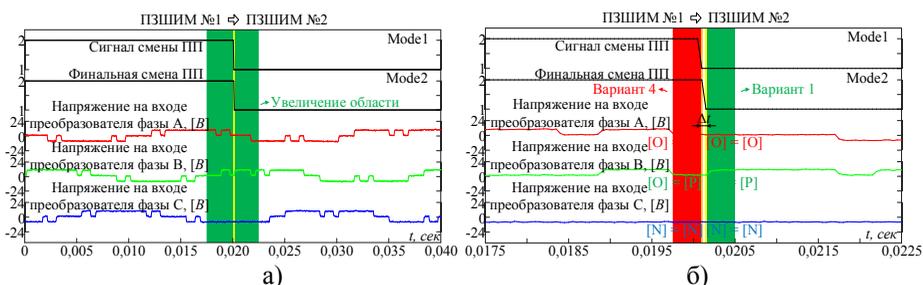


Рисунок 10 – Экспериментальные результаты работы алгоритма смены ПЗШИМ: а) осциллограммы мгновенных значений фазного напряжения на входе преобразователя при коэффициенте модуляции 1,05; б) увеличение в масштабе

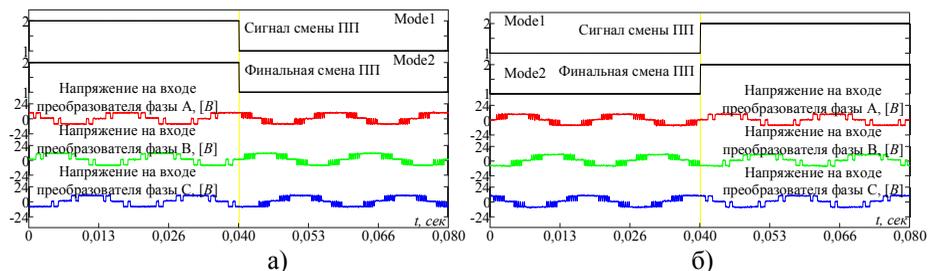


Рисунок 11 – Экспериментальные результаты работы алгоритма смены ПЗШИМ: а) переход от ПЗШИМ  $N=3$  к ПЗШИМ  $N=13$ ; б) переход от ПЗШИМ  $N=13$  к ПЗШИМ  $N=3$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами для создания обладающей четвертьволновой симметрией формы напряжения на входе АВН при удалении отдельных гармонических составляющих;

2. Разработан метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами на основе метода роя частиц с возможностью получения нескольких последовательностей без необходимости перебора начальных углов переключений;

3. Разработан метод расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого АВН с фиксирующими диодами для создания обладающей четвертьволновой симметрией формы напряжения на входе АВН при подавлении отдельных гармонических составляющих;

4. Разработан алгоритм смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого преобразователя с фиксирующими диодами, позволяющего осуществить переключение между различными последовательностями углов переключений без изменения фазы напряжения на входе преобразователя и без бросков тока и дополнительных переключений в силовой цепи в момент переключения;

5. Предложены применения разработанного алгоритма для АВН и АИН с целью использовать преимущества методов удаления и подавления отдельных гармонических составляющих. Подробно описан принцип работы алгоритма и приведены результаты математического моделирования.

6. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном исследовательском стенде для проверки адекватности разработанных методов расчёта предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого преобразователя. Полученные экспериментальные результаты подтвердили адекватность предложенных методов на основе полученных двенадцати осциллограмм различных последовательностей переключений ПЗШИМ.

7. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном исследовательском стенде для проверки адекватности алгоритма смены предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трехуровневого преобразователя. Полученные экспериментальные результаты подтвердили адекватность и работоспособность разработанного алгоритма на примере смены нескольких последовательностей переключений ПЗШИМ.

8. Предложенные методы расчета и алгоритм могут быть рекомендованы к применению в области проектирования трёхфазных трёхуровневых преобразователей большой мощности для снижения потерь и улучшения качества преобразованной электроэнергии.

## Научные публикации по теме диссертации:

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. **Цзин Тао.** Алгоритм смены шаблонов углов переключений ключей трёхуровневого преобразователя при широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник / Цзин Тао, А. А. Радионов, А. С. Маклаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 99-109.
2. Радионов, А. А. Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник / А. А. Радионов, А. С. Маклаков, **Т. Цзин** // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 1(42). – С. 38-44.

### *Публикации в зарубежных журналах Q2 SJR*

3. Maklakov, A.S. Finding the best programmable PWM pattern for three-level active front-ends at 18-pulse connection / A.S. Maklakov, **T. Jing**, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, T.A. Lisovskaya // Machines – 2021. – vol. 9, № 7. – 127.
4. **Jing, T.** Research of a flexible space-vector-based hybrid PWM transition algorithm between SHEPWM and SHMPWM for three-level NPC inverters / T. Jing, A. Radionov, A. Maklakov, V. Gasiyarov // Machines. – 2020. – Vol. 8. – No 3. – P. 57.
5. **Jing, T.** Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns / T. Jing, A.S. Maklakov, A.A. Radionov, S. Baskov, A. Kulmukhametova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems – 2019. – vol. 10, № 4. – 1875–1884.

### *Публикации в базе SCOPUS и WoS:*

6. **Jing, T.** Comparative Analysis of the SHEPWM and SHMPWM Techniques for the Three-Level NPC Inverter based on the THD of Voltage and Current / T. Jing, A.S. Maklakov, A.A. Radionov, T. A. Lisovskaya // in Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, Sept. 2020. pp. 113–118.
7. Lisovskaya, T.A. Linearization small deviation model of active front end rectifier / T.A. Lisovskaya, A.S. Maklakov, R.A. Lisovsky, **T. Jing** // in Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, Sept. 2020. pp. 133–136.
8. **Jing, T.** Two selective harmonic control techniques applied in 10Kv grid with three-level NPC inverter / T. Jing, A.S. Maklakov, A.A. Radionov // in Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, Oct. 2019. pp. 75–79.
9. **Jing, T.** Research on selective harmonic elimination technique based on particle swarm optimization / T. Jing, A.S. Maklakov, O.A. Gasiyarova // in Proc. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Jan. 2019. pp. 694–700.
10. **Jing, T.** 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 // in Proc. IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Oct. 2019, pp. 3307–3311.
11. **Jing, T.** A review of voltage source converters for energy applications / T. Jing, A.S. Maklakov // in Proc. 2018 International Ural Conference on Green Energy, Oct. 2018. pp. 275–281.

**Цзин Тао**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА И АЛГОРИТМА СМЕНЫ  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ЗАПРОГРАММИРОВАННЫХ ШИРОТНО-  
ИМПУЛЬСНО МОДУЛИРУЕМЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ  
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОДУЛЕЙ  
ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХУРОВНЕВОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ  
НАПРЯЖЕНИЯ С ФИКСИРУЮЩИМИ ДИОДАМИ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский Центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 11.2021. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ.л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.