

*На правах рукописи*



**ЛЕ ВАН КАНЬ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ ТРЕХУРОВНЕВЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С ФИКСИРОВАННОЙ  
НЕЙТРАЛЬНОЙ ТОЧКОЙ**

**Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет».

**Научный руководитель:** **Шишков Александр Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Брованов Сергей Викторович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Электроника и Электротехника», (г. Новосибирск)

**Николаев Александр Аркадьевич**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника», (г. Магнитогорск)

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», (г. Москва)

Защита состоится «16» июня 2025 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на официальном сайте <http://magtu.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.324.05  
канд. техн. наук, доцент



Одинцов Константин Эдуардович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Стратегия модернизации любой современной отрасли народного хозяйства, использующей электроприводы (ЭП) для приведения в движение технологических объектов, включает в себя не только повышение производительности, но и внедрение новых перспективных технологий и технических процессов, направленных на повышение энергосбережения. Для достижения этой цели одним из приоритетных оптимальных решений является переход от нерегулируемых ЭП к регулируемым с использованием преобразователей частоты (ПЧ), наиболее перспективными из которых являются многоуровневые ПЧ. Применение регулируемых ЭП на базе ПЧ (ЭП-ПЧ) имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными: 1) повышение энергоэффективности благодаря возможности оптимизации работы электродвигателя и снижения пиковых нагрузок на сеть, что позволяет значительно экономить электроэнергию; 2) возможность точной регулировки скорости и крутящего момента, плавный пуск и остановка электродвигателей; 3) гибкость эксплуатации, позволяющая адаптировать параметры работы к различным условиям и требованиям производственного процесса.

Применение ПЧ на базе инверторов в составе ЭП, помимо увеличения затрат и необходимости более сложных систем управления, также сталкивается с рядом значительных проблем. Использование силовых полупроводниковых элементов приводит к увеличению потерь электроэнергии из-за высокой частоты коммутации. Высокая частота коммутации, в свою очередь, сопровождается нагревом оборудования, снижением срока службы и даже выходом из строя. Прямой подход к решению этой проблемы заключается в снижении частоты коммутации, что приводит к значительным искажениям кривой выходного тока ПЧ. Таким образом, техническое противоречие между коммутационными потерями и качеством выходного тока становится основной проблемой ПЧ в составе ЭП. Для устранения этой проблемы было предложено множество схемотехнических решений, основным из которых является использование инверторов с большим числом уровней в ПЧ. Очевидно, что такое решение увеличивает стоимость оборудования, а также требует более сложного управления. В связи с этим наблюдается значительный интерес к использованию трехуровневых топологий с фиксированной нейтральной точкой (ФНТ) для ПЧ вместо топологий с большим числом уровней.

Однако для автономного инвертора напряжения (АИН) этого ПЧ, помимо задач повышения качества электроэнергии и снижения коммутационных потерь, необходимо учитывать его характерные недостатки, такие как дисбаланс напряжения нейтральной точки (НТ) и высокий уровень синфазного (СФ) напряжения. Одним из наиболее эффективных и экономически оправданных подходов к их устранению остается совершенствование и разработка алгоритмов управления. Несмотря на значительное количество предложенных исследований, большинство решений направлено на улучшение лишь отдельных параметров, что нередко приводит к ухудшению других характеристик.

В связи с этим тема данного исследования приобретает высокую актуальность и требует дальнейшей проработки в рамках диссертационной работы.

**Степень разработанности.** Исследования и разработки, посвященные решению задач схемотехнических решений и систем управления трехуровневых ПЧ для

повышения энергосбережения в ЭП, широко представлены в научной литературе. Значительный вклад в эту область внесли известные учёные, как отечественные, так и зарубежные, такие как Т.Р. Храмшин, А.А. Николаев, А.С. Анучин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, А.С. Сарваров, С.В. Брованов, И.Я. Браславский, А.М. Зюзев, Г.С. Зиновьев, М.В. Пронин, Е.Е. Чаплыгин, О.Б. Шонин, А.Б. Виноградов, В.В. Крючков, Р.Т. Шрейнер, Г.П. Корнилов, А.С. Маклаков, а также A. Nabaе, H. Akagi, B. Wu, J. Rodriguez, J.I. Leon, D.G. Holmes, J. Holtz, N. Mohan, S. Bernet, N. Celanovic, B.P. McGrath, S.S. Fazel, N. Zargari и многие другие.

Несмотря на значительное количество работ, основной фокус исследований направлен на важные критерии, такие как улучшение качества выходного тока и снижение коммутационных потерь, представляющие собой две основные задачи, которые трудно решить одновременно при эксплуатации ПЧ. В этом контексте некоторые аспекты, такие как баланс напряжения НТ и снижение высоких уровней СФ напряжения, не получили достаточного внимания с точки зрения их негативного влияния на систему.

С учетом вышеперечисленного, одновременное рассмотрение четырёх указанных критериев становится важным направлением для дальнейших исследований и совершенствования существующих технологий. Данный вопрос заслуживает детального рассмотрения в рамках отдельного научного исследования.

**Объект исследования** – система электропривода, состоящая из питающей электросети переменного тока, трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтральной точкой и электродвигателя на стороне нагрузки.

**Предмет исследования** – система управления автономного инвертора напряжения трехуровневого преобразователя частоты в составе электропривода.

**Цель диссертационной работы** – повышение энергосбережения электропривода на базе трехуровневого преобразователя частоты посредством усовершенствованной системы управления автономного инвертора напряжения на основе пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ).

**Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:**

1. Проведение патентно-литературного обзора текущего состояния ЭП на базе ПЧ, а также теоретического и экспериментального анализа алгоритмов ШИМ и систем управления, применяемых в современных ПЧ. Определение четырех ключевых показателей для исследования и разработки систем управления АИН трехуровневого ПЧ: качество электроэнергии, коммутационные потери, баланс напряжения НТ и уровень СФ напряжения.

2. Разработка общей имитационной модели ЭП-ПЧ для анализа ключевых показателей при реализации различных последовательностей переключений (ПП) в системе управления АИН на основе ПВШИМ.

3. Разработка усовершенствованных систем управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ с различными ПП для улучшения ключевых показателей.

4. Проведение теоретических и экспериментальных исследований усовершенствованных систем управления АИН ПЧ по ключевым показателям.

5. Разработка имитационной модели главного ЭП прокатной клетки толстолистового стана 5000 в среде *Simulink* пакета *Matlab* для оценки эффективности усовершенствованной системы управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ.

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

1. Разработана общая имитационная модель ЭП-ПЧ, отличающаяся от известных тем, что система управления АИН на основе ПВШИМ поддерживает возможность реализации различных ПП.

2. Разработаны усовершенствованные системы управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ с пятиступенчатой ПП (ПВШИМ 1) и с семиступенчатой ПП (ПВШИМ 2), отличающиеся от известных систем возможностью управления напряжением НТ. ПВШИМ 1 реализует переход между различными вариантами пятиступенчатой ПП, что способствует улучшению качества электроэнергии и баланса напряжения НТ. ПВШИМ 2 характеризуется перераспределением продолжительности включения силовых ключей, что ведет к улучшению четырех ключевых показателей.

3. Разработана усовершенствованная система управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ с гибридной ПП (ПВШИМ 3), отличающаяся от известных систем возможностью настраивать степень оптимизации четырех ключевых показателей в соответствии с требованиями системы с помощью коэффициента гибридизации  $\lambda$ .

4. Разработана имитационная модель главного ЭП горизонтального валка толстолистного стана 5000, отличающаяся от известных моделей использованием системы управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 2, что способствует повышению энергосбережения системы.

Практическая ценность и реализация работы заключается в разработке усовершенствованных систем управления АИН трехуровневого ПЧ на основе ПВШИМ, что способствует улучшению показателей.

Реализация данных систем управления в общей имитационной модели подтвердила, что: при ПВШИМ 1 средние значения отклонения напряжения НТ и суммарного коэффициента гармонических искажений тока уменьшаются на 46,14% и 12,46% соответственно; при ПВШИМ 2 эти значения уменьшаются на 54,93% и 14,78%, кроме того, средние значения коммутационных потерь и продолжительности высоких уровней СФ напряжения снижаются на 6,7% и 18,26% соответственно; при ПВШИМ 3 аналогичные показатели уменьшаются на 44,9%, 2,46%, 11,7% и 33,18% соответственно.

При внедрении данных систем управления на лабораторном комплексе «Трехуровневый силовой преобразователь» от компании «Imperix Ltd» средние значения отклонения напряжения НТ и суммарного коэффициента гармонических искажений тока при ПВШИМ 1 уменьшаются на 50,48% и 47,24% соответственно; ПВШИМ 2 снижает эти показатели на 64,37% и 22,71%; а ПВШИМ 3 обеспечивает компромисс между показателями с помощью коэффициента гибридизации  $\lambda$ : при увеличении  $\lambda$  эти значения увеличиваются, а при уменьшении  $\lambda$  – уменьшаются.

Применение системы управления на основе ПВШИМ 2 в главном ЭП прокатной клетки толстолистного стана 5000 позволило бы повысить КПД ПЧ на 0,6%, а также снизить потребление электроэнергии за счет сокращения коммутационных потерь на 43,3% и уменьшения высших гармоник в спектре тока ПЧ на 11,42%, что обеспечило бы экономию около 1,3 млн рублей в год.

Результаты выполненных исследований внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении студентов по направлению подготовки 13.04.02. Электроэнергетика и электротехника.

**Методика проведения исследований.** В процессе решения поставленных задач использованы известные методы теоретических и экспериментальных

исследований. Научные результаты получены с помощью аналитических методов решения нелинейных уравнений, анализа Фурье сигналов напряжения и тока, логических операций, матричных преобразований, синтеза пространственных векторов, аналитической геометрии, численного моделирования и теории автоматического управления. Разработанные математические модели реализованы в среде визуального программирования *Matlab & Simulink*. Результаты экспериментальных исследований получены на лабораторном стенде.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты научных исследований, показывающие важность учета дисбаланса напряжения НТ и высоких уровней СФ напряжения для ПЧ в составе ЭП.
2. Общая имитационная модель системы ЭП-ПЧ с системой управления АИН на основе ПВШИМ с различными ПП.
3. Усовершенствованные системы управления АИН ПЧ в составе ЭП на основе ПВШИМ 1, ПВШИМ 2 и ПВШИМ 3.
4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований на лабораторном стенде, подтверждающие адекватность усовершенствованных систем управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ.
5. Имитационная модель главного ЭП горизонтального вала толстолистого стана 5000 и результаты исследований в ней, доказывающие эффективность систем управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 2.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечиваются научно обоснованной постановкой задачи и корректным применением современных методов математического моделирования. Важным фактором подтверждения достоверности является результативность проведенных расчетов. Кроме того, значимость придается минимальному расхождению между результатами расчетов и данными, полученными в результате экспериментальных исследований.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Исследование, проведенное в рамках диссертационной работы, полностью соответствует области исследований, определенной в паспорте специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии, электрические аппараты, системы ЭП, электроснабжения и электрооборудования; п. 3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления; п. 4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов).

**Апробация результатов диссертационной работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 конференциях и семинарах: 80-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (г. Москва, 24–28 января 2022 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Наука – общество – технологии – 2022» (SST – 2022)

(г. Москва, 1–4 марта 2022 г.); International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) (г. Сочи, 27–31 марта 2023 г.); International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (г. Магнитогорск, 29 сентября – 1 октября 2023 г.); International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) (г. Сочи, 27–31 марта 2024 г.).

**Публикации.** В рамках темы диссертации было опубликовано **10** научных трудов, включая **4** статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, а также **5** статей в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы из **162** наименований. Работа изложена на **168** страницах машинописного текста, содержит **77** рисунков, **21** таблицу и приложения объемом **12** страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** подчеркнута актуальность темы исследования, выделены основные черты научной новизны, теоретическая и практическая ценность работы, а также сформулированы цель и задачи проводимого исследования.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния и структуры регулируемых ЭП-ПЧ. Рассмотрены типичные топологии многоуровневых ПЧ и их применение в промышленности, что подчеркивает актуальность исследования трехуровневых ПЧ. Для таких преобразователей используются две трехуровневые топологии с ФНТ: одна выполняет функции активного выпрямителя напряжения (АВН), другая – АИН, что показано на рисунке 1.

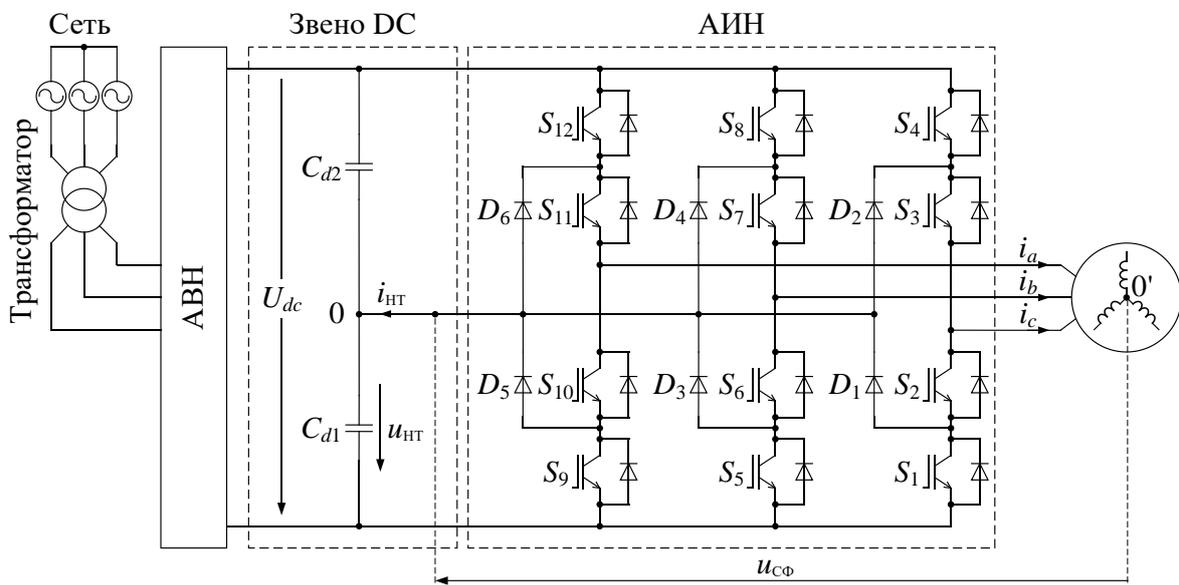


Рисунок 1 – Силовая схема АИН ПЧ

Анализ существующих алгоритмов для системы управления трехуровневых ПЧ показал, что в области высоких мощностей, где низкая частота коммутации (150–750 Гц) обусловлена необходимостью минимизации коммутационных потерь, алгоритм ПВШИМ с удалением выделенных гармоник и его модификации достигают высокой эффективности в управлении АВН преобразователя благодаря способности значительно улучшать электромагнитную совместимость, исключая высшие гармоники в спектре напряжения и тока на стороне сети. Однако для

трехуровневых ПЧ, помимо внимания к качеству электроэнергии и коммутационным потерям, необходимо решить ещё две важные задачи: баланс напряжения НТ и минимизацию высоких уровней СФ напряжения. Дисбаланс напряжения НТ приводит к ряду негативных последствий, включая: 1) возникновение перенапряжений на пассивных и активных компонентах силовой цепи, что снижает их ресурс и может привести к отказу; 2) нарушение симметрии уровней выходного напряжения, сопровождающееся искажением форм выходных кривых напряжения и тока. Повышенные уровни СФ напряжения могут приводить к следующим отрицательным эффектам: перенапряжению в изоляции обмоток электродвигателя, усилению электромагнитных помех, а также увеличению высокочастотных токов, протекающих через подшипники электродвигателя. В контексте указанных вызовов алгоритмы ПВШИМ демонстрируют значительный потенциал благодаря своей универсальности и многофункциональности, что открывает новые перспективы для научных исследований и совершенствования систем управления АИН преобразователя.

В ходе исследования были введены следующие показатели: суммарный коэффициент гармонических искажений тока ( $K_i$ ), коэффициенты искажений 5-й ( $K_{i(5)}$ ), 7-й ( $K_{i(7)}$ ) гармоник, максимальное относительное отклонение напряжения НТ ( $\delta u_{\text{НТ.}m}$ ), относительное число пар переключений силовых ключей по отношению к классической семиступенчатой ПП ( $n_{\text{ПК}}$ ), а также коэффициент заполнения импульсов высоких уровней  $\pm U_d/3$  или  $\pm U_d/2$  СФ напряжения за один период  $T_1$  основной гармоники выходного напряжения ( $\gamma_{\text{СФ}}$ ). Оптимизация конкретного критерия сводится к минимизации соответствующего показателя.

$$K_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{m(n)}^2}}{I_{m(1)}} \cdot 100\%; K_{i(5)} = \frac{I_{m(5)}}{I_{m(1)}} \cdot 100\%; K_{i(7)} = \frac{I_{m(7)}}{I_{m(1)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\delta u_{\text{НТ.}m} = \frac{\Delta u_{\text{НТ.}m}}{U_{dc}} \cdot 100\% = \frac{|u_{Cd1} - u_{Cd2}|_{\max}}{U_{dc}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$n_{\text{ПК}} = \frac{N_{\text{ПК}}}{N_{\text{ПК}(7\text{ПП})}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{СФ}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{СФ.}i}}{T_1} \cdot 100\%. \quad (4)$$

**Во второй главе** проведен анализ силовой схемы и принципа работы АИН в составе ЭП-ПЧ. Была разработана общая имитационная модель ЭП-ПЧ с системой управления АИН в графической среде *Simulink* пакета *Matlab* (рисунок 2). Сравнительный анализ трех классических ПП при ПВШИМ показал, что оптимизация одного показателя может привести к ухудшению других, что является неотъемлемым недостатком существующих методов. Использование базовой ПП вызывает значительное увеличение коэффициентов  $n_{\text{ПК}}$  и  $\gamma_{\text{СФ}}$ , в то время как применение пятиступенчатой ПП приводит к существенному увеличению коэффициентов  $K_i$  и  $\delta u_{\text{НТ.}m}$ . Благодаря своей способности гармонично сбалансировать все четыре показателя, алгоритм ПВШИМ с семиступенчатой ПП является наиболее широко применяемым в настоящее время.

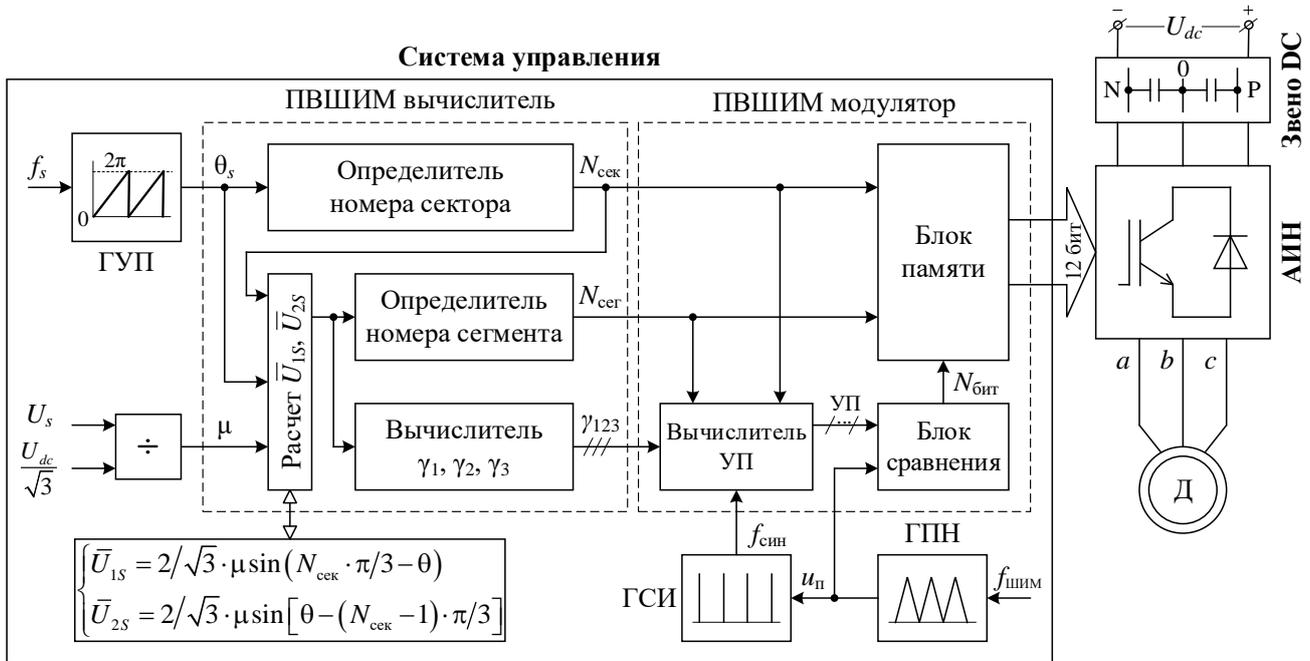


Рисунок 2 – Общая имитационная модель ЭП-ПЧ с системой управления АИН по ПВШИМ (ГУП – генератор угла поворота, ГПИ – генератор пилообразного напряжения, ГСИ – генератор синхронизирующих импульсов, УП – уровень переключений)

**В третьей главе** разработаны усовершенствованные системы управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ с пятиступенчатой ПП (ПВШИМ 1), с семиступенчатой ПП (ПВШИМ 2) и с гибридной ПП (ПВШИМ 3).

Во-первых, разработана усовершенствованная система управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 1 (рисунок 3). Основным принцип ПВШИМ 1 заключается в переходе между четырьмя вариантами пятиступенчатой ПП: «P», «PN», «NP» и «N». Переход осуществляется в зависимости от направления и величины сигнала обратной связи, основанного на мгновенном отклонении напряжения НТ, с целью коррекции напряжения НТ в направлении, противоположном измеренному отклонению. Для примера, в сегменте 1 (сектор I) были идентифицированы четыре варианта пятиступенчатой ПП:

- вариант «P»: [000] → [P00] → [PPO] → [PO0] → [000],
- вариант «PN»: [P00] → [000] → [OON] → [000] → [P00],
- вариант «NP»: [OON] → [000] → [P00] → [000] → [OON],
- вариант «N»: [000] → [OON] → [ONN] → [OON] → [000].

Эти варианты обеспечивают различное направление и степень влияния на напряжение НТ. Напряжение НТ увеличивается при использовании варианта «P» и уменьшается при варианте «N». При использовании вариантов «PN» и «NP» напряжение НТ может быть увеличено или уменьшено в зависимости от разницы между длительностями включения комбинаций  $p$ -типа и  $n$ -типа малых базовых векторов в течение периода ШИМ.

Результаты моделирования работы трехуровневых АИН представлены на рисунке 4. Сравнительный анализ показал, что по сравнению с классическими пятиступенчатой и семиступенчатой ПП, ПВШИМ 1 позволяет существенно снизить значение  $\delta u_{нт.m}$  во всем диапазоне коэффициента  $\mu$ , и средние значения  $\overline{\delta u_{нт.m}}$  составляют 8,69%, 6,08% и 4,68% соответственно. С точки зрения качества тока при ПВШИМ 1 коэффициент  $K_i$  уменьшается по сравнению с классической

пятиступенчатой ПП, однако остается выше, чем при классической семиступенчатой ПП. Средние значения  $\bar{K}_i$  составляют 3,05%, 2,03% и 2,67% соответственно.

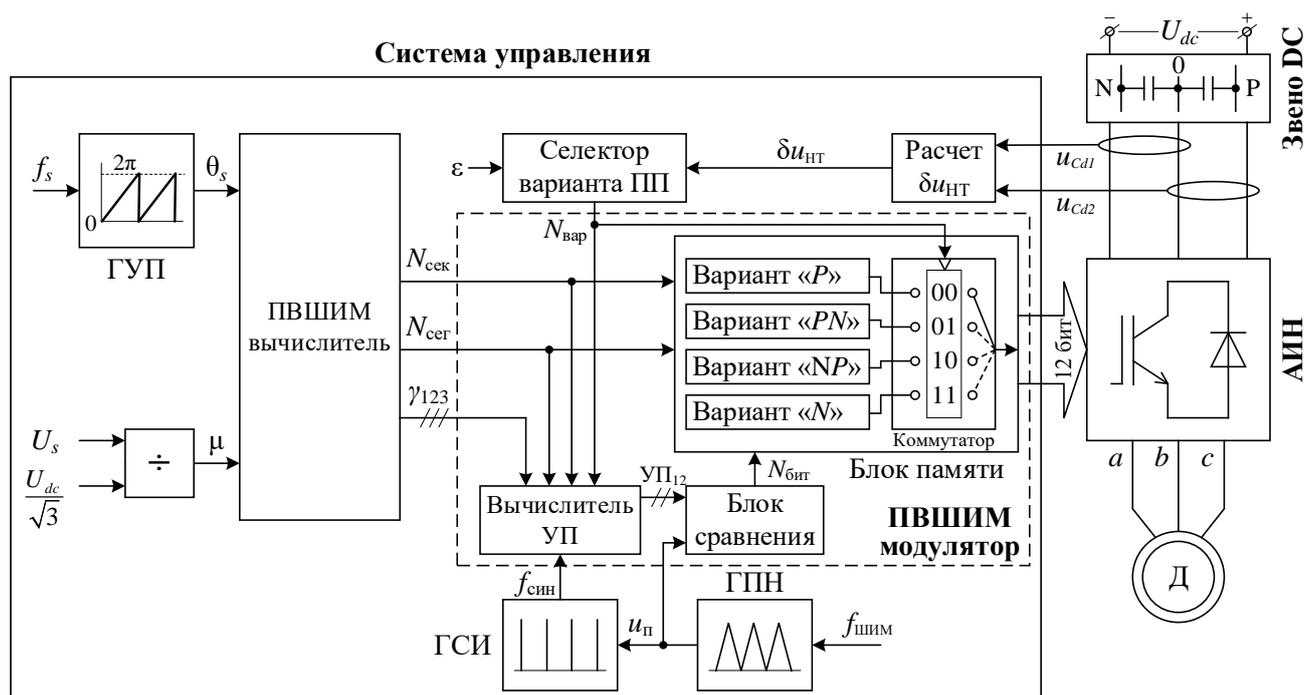


Рисунок 3 – Функциональная схема ЭП-ПП с системой управления АИИИ по ПВШИМ 1

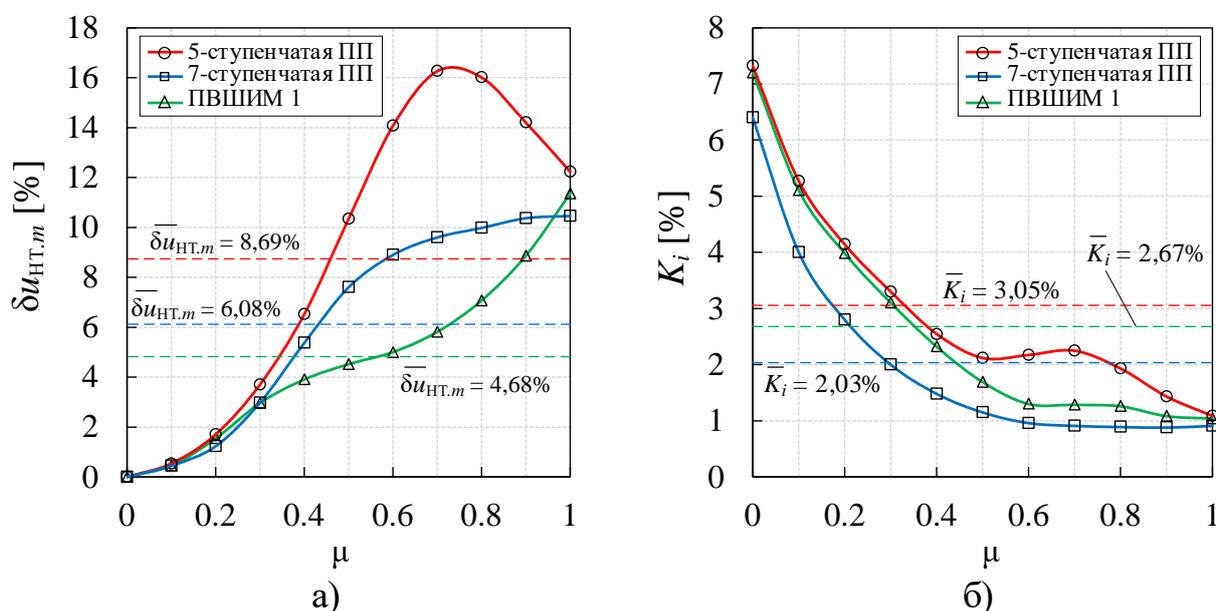


Рисунок 4 – Величины  $\delta u_{NT,m}$  (а),  $K_i$  (б) при изменении коэффициента модуляции  $\mu$

Таким образом, можно сделать вывод, что ПВШИМ 1 эффективно устраняет основные недостатки классической пятиступенчатой ПП, обеспечивая значительное улучшение баланса напряжения НТ и минимизацию связанных с этим негативных эффектов. Однако для ЭП большой мощности, где предъявляются высокие требования к качеству электроэнергии из-за низкой частоты коммутации, данный алгоритм не является оптимальным решением.

Во-вторых, разработана усовершенствованная система управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 2 (рисунок 5). Основной принцип ПВШИМ 2 заключается в корректировке среднего значения тока НТ за период ШИМ до нулевого уровня путем регулирования продолжительности включения между комбинациями состояний  $p$ -типа и  $n$ -типа распределенного вектора в семиступенчатой ПП на величину регулирования  $\Delta\gamma$ . Например, для сегмента  $1a$  (сектор I) продолжительности  $\gamma_{1p}$ ,  $\gamma_{1n}$  распределенного вектора  $\bar{U}_{M1}$  вычисляются на основании системы уравнений:

$$\begin{cases} \gamma_{1p} = \gamma_1/2 \cdot (1 + \Delta\gamma); \\ \gamma_{1n} = \gamma_1/2 \cdot (1 - \Delta\gamma). \end{cases} \quad (5)$$

За период ШИМ среднее значение тока НТ, вызванного базовыми векторами в семиступенчатой ПП, определяется выражением:

$$\bar{i}_{НТ} = \sum \gamma_k i_{НТ.k}, \quad (6)$$

где  $k$  – индекс базового вектора, используемого в семиступенчатой ПП;  $i_{НТ.k}$  – ток НТ, вызванный влиянием базового вектора с индексом  $k$ .

Результаты решения уравнения  $\bar{i}_{НТ} = 0$  позволяют определить величины  $\Delta\gamma$ , которые интегрируются в систему управления АИН (рисунок 5).

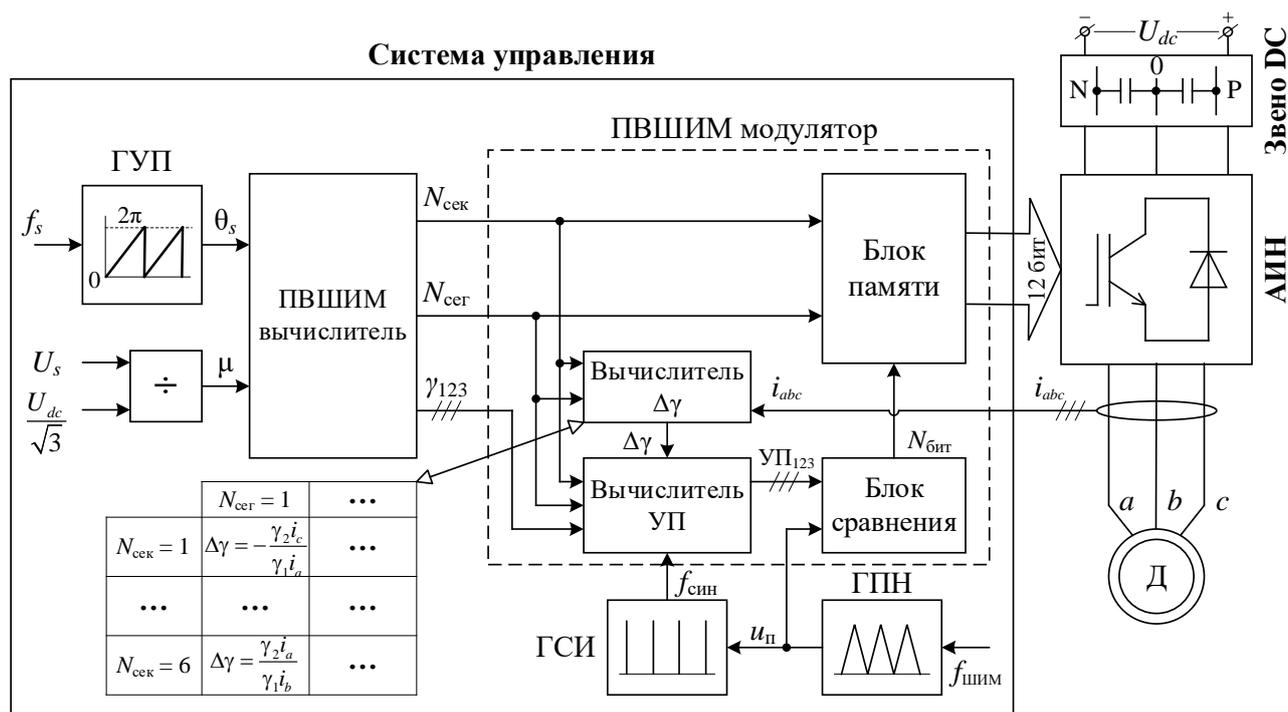


Рисунок 5 – Функциональная схема ЭП-ПЧ с системой управления АИН по ПВШИМ 2

В-третьих, разработана усовершенствованная система управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 3 (рисунок 6). ПВШИМ 3 использует гибридную ПП, которая обеспечивает выполнение следующих четырех условий:

- 1) управление напряжением НТ аналогично ПВШИМ 2;
- 2) достижение допустимого уровня качества выходного тока;
- 3) снижение коммутационных потерь по сравнению с ПВШИМ 2 и отсутствие дополнительных переключений силовых ключей при переходе между пятиступенчатой и семиступенчатой ПП;

4) улучшение показателя  $\gamma_{сф}$ , связанного со снижением высоких уровней СФ напряжения по сравнению с ПВШИМ 2.

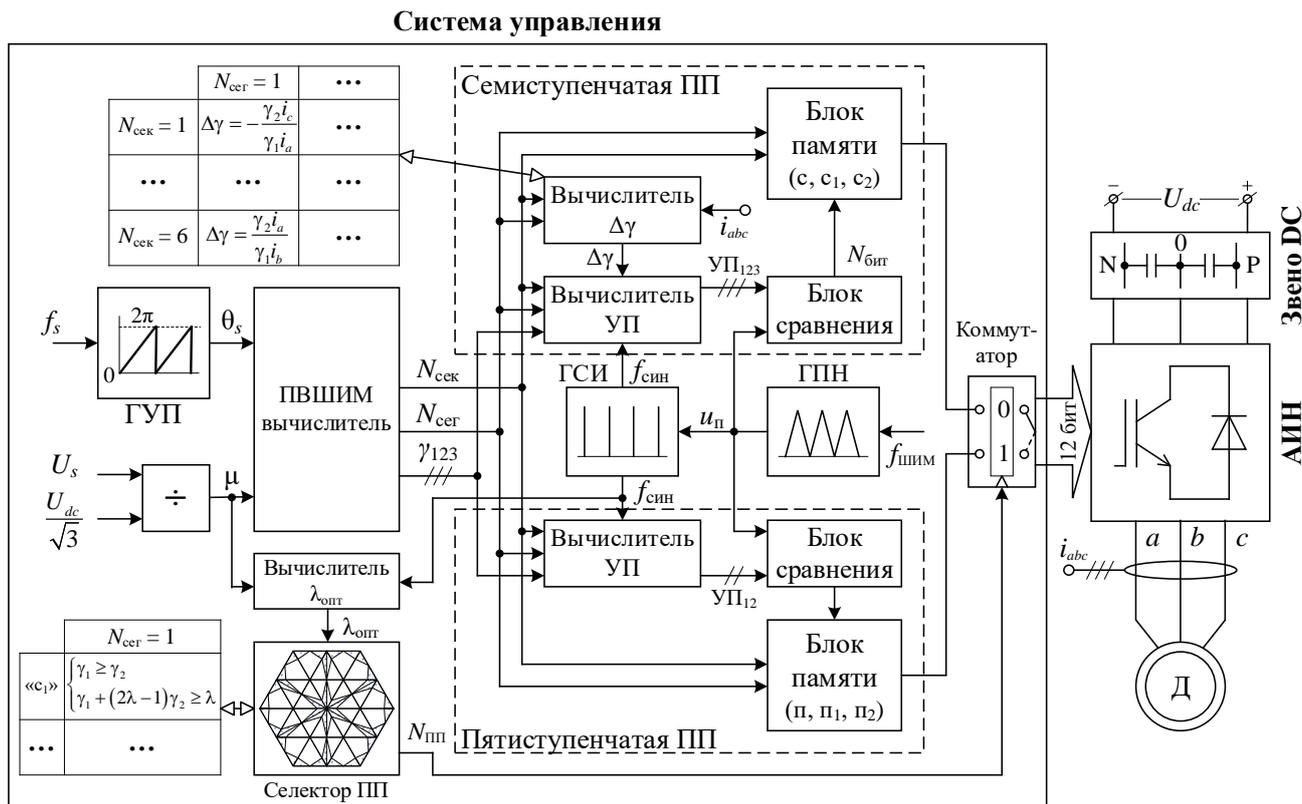


Рисунок 6 – Функциональная схема ЭП-ПЧ с системой управления АИИ по ПВШИМ 3

Как показано на рисунке 7, пятиступенчатая ПП активируется в областях (п, п<sub>1</sub>, п<sub>2</sub>), где влияние малых базовых векторов минимально или длительности включения двух малых базовых векторов, участвующих в модуляции пространственного вектора, приблизительно равны. В остальных областях (с, с<sub>1</sub>, с<sub>2</sub>) активируется семиступенчатая ПП, и управление напряжением НТ осуществляется в соответствии с ПВШИМ 2. Разделение областей осуществляется на основании условий из таблицы 1 с использованием коэффициента гибридизации  $\lambda$ , определяемого уравнением:

$$\lambda = \frac{d}{\bar{U}_{\delta.m}} = d\sqrt{3}, (0 \leq \lambda \leq 1), \quad (7)$$

где  $\bar{U}_{\delta.m} = 1/\sqrt{3}$  – нормированная величина модуля малого базового вектора;  $d$  – часть стороны сегмента, соответствующая расширению области включения пятиступенчатой ПП.

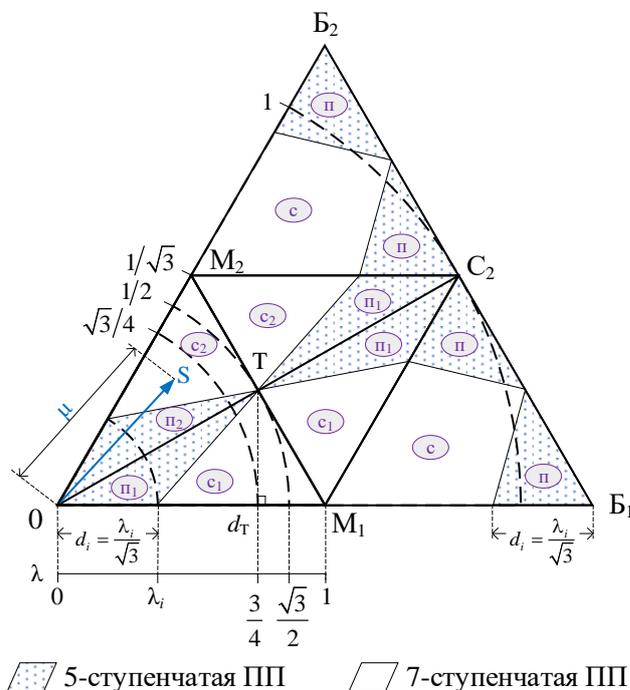


Рисунок 7 – Векторная диаграмма гибридной ПП в секторе I

Таблица 1 – Условия переключения между областями в гибридной ПП

Сегмент 1 и сегмент 3			
Область «с <sub>1</sub> »	Область «с <sub>2</sub> »	Область «п <sub>1</sub> »	Область «п <sub>2</sub> »
$\begin{cases} \gamma_1 \geq \gamma_2 \\ \gamma_1 + (2\lambda - 1)\gamma_2 \geq \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 < \gamma_2 \\ (2\lambda - 1)\gamma_1 + \gamma_2 \geq \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 \geq \gamma_2 \\ \gamma_1 + (2\lambda - 1)\gamma_2 < \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 < \gamma_2 \\ (2\lambda - 1)\gamma_1 + \gamma_2 < \lambda \end{cases}$
Сегмент 2 и сегмент 4			
Область «с»		Область «п»	
$\begin{cases} \gamma_1 + (1 - 2\lambda)\gamma_2 \leq 1 - \lambda \\ (1 - 2\lambda)\gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 - \lambda \end{cases}$		$\begin{cases} \gamma_1 + (1 - 2\lambda)\gamma_2 > 1 - \lambda \\ (1 - 2\lambda)\gamma_1 + \gamma_2 > 1 - \lambda \end{cases}$	

Результаты исследований работы системы при ПВШИМ 3 (рисунок 8) показывают зависимость показателей качества от коэффициентов  $\mu$  и  $\lambda$ . При определенном значении коэффициента модуляции  $\mu$  показатели находятся в пределах значений, соответствующих при  $\lambda = 0$  и  $\lambda = 1$ .

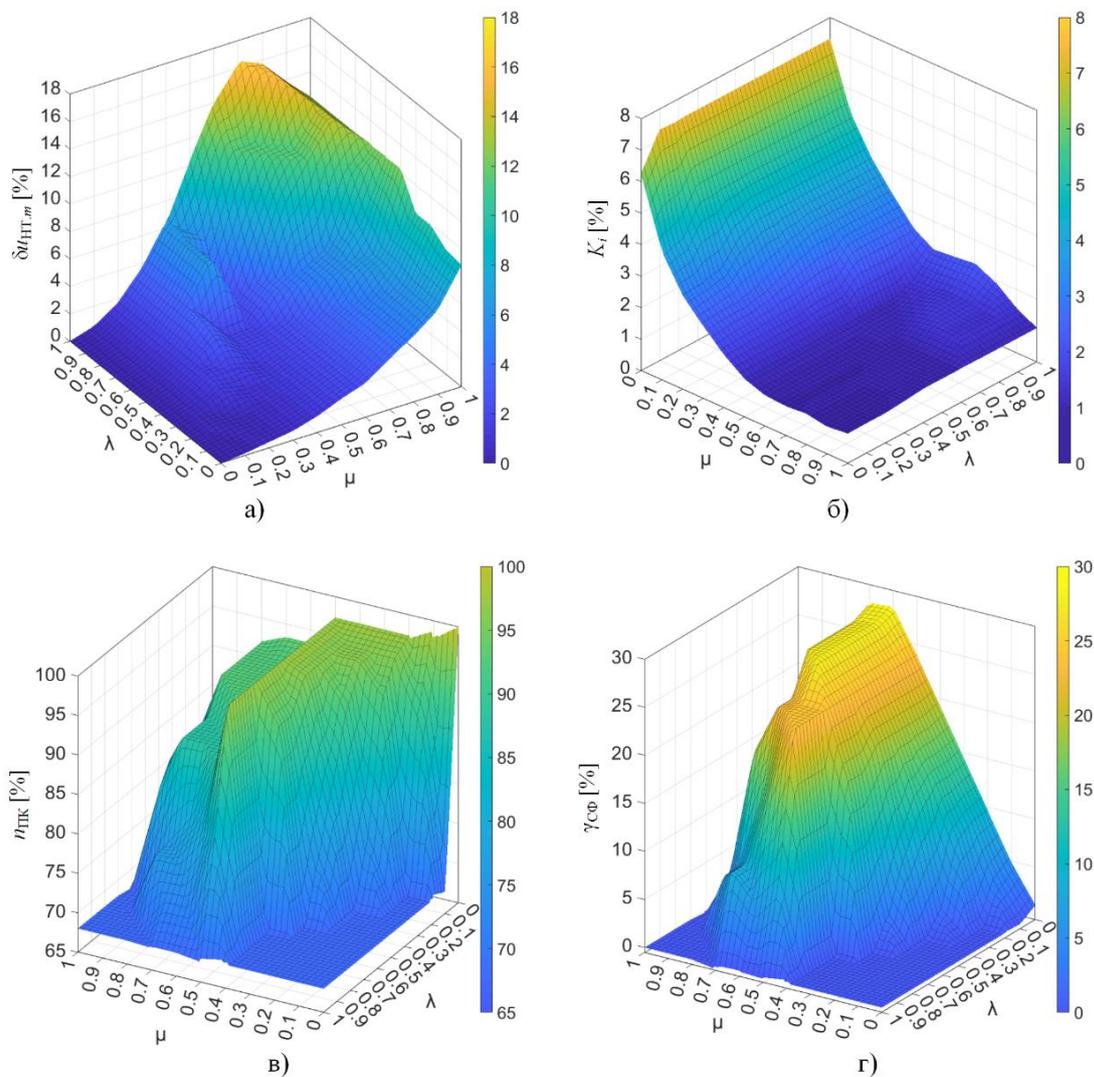


Рисунок 8 – Пространства статического состояния величин  $\delta u_{нт.м}$  (а),  $K_i$  (б),  $\eta_{ПК}$  (в),  $\gamma_{сф}$  (г) при изменении коэффициентов  $\mu$  и  $\lambda$

Анализ полученных данных позволил определить оптимальный коэффициент гибридизации в зависимости от коэффициента модуляции. Следует отметить, что

для разных условий работы системы существует индивидуальная зависимость  $\lambda_{\text{опт}} = f(\mu)$ . Для текущей модели эта зависимость определяется системой уравнений:

$$\lambda_{\text{опт}} = \begin{cases} 1,6071\mu^2 + 0,825\mu - 0,0036 & \text{при } 0 \leq \mu \leq 0,5; \\ -0,7143\mu^2 - 0,1571\mu + 1,0571 & \text{при } 0,5 < \mu \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

На рисунке 9 представлены зависимости коэффициентов  $\delta u_{\text{НТ.м}}$ ,  $K_i$ ,  $n_{\text{ПК}}$ ,  $\gamma_{\text{СФ}}$  от коэффициента  $\mu$  для ПВШИМ с классическими ПП, ПВШИМ 2 и ПВШИМ 3.

ПВШИМ 2 демонстрирует значительное улучшение показателей, достигая оптимального уровня качества выходного тока и баланса напряжения НТ, а также существенно снижая коммутационные потери и высокие уровни СФ напряжения. Средние значения величин составляют:  $\overline{\delta u_{\text{НТ.м}}} = 2,74\%$ ,  $\overline{K_i} = 1,73\%$ ,  $\overline{n_{\text{ПК}}} = 93,3\%$  и  $\overline{\gamma_{\text{СФ}}} = 15,67\%$  (рисунок 10).

ПВШИМ 3 также демонстрирует улучшение показателей, обеспечивая допустимый уровень выходного тока и баланса напряжения НТ, близкий к показателям ПВШИМ 2, но с еще большим снижением коммутационных потерь и уровней СФ напряжения. Средние значения коэффициентов составляют:  $\overline{\delta u_{\text{НТ.м}}} = 3,35\%$ ,  $\overline{K_i} = 1,98\%$ ,  $\overline{n_{\text{ПК}}} = 88,3\%$  и  $\overline{\gamma_{\text{СФ}}} = 12,81\%$  (рисунок 10).

— Базовая ПП —\*— 5-ступенчатая ПП —□— 7-ступенчатая ПП —△— ПВШИМ 2 —○— ПВШИМ 3

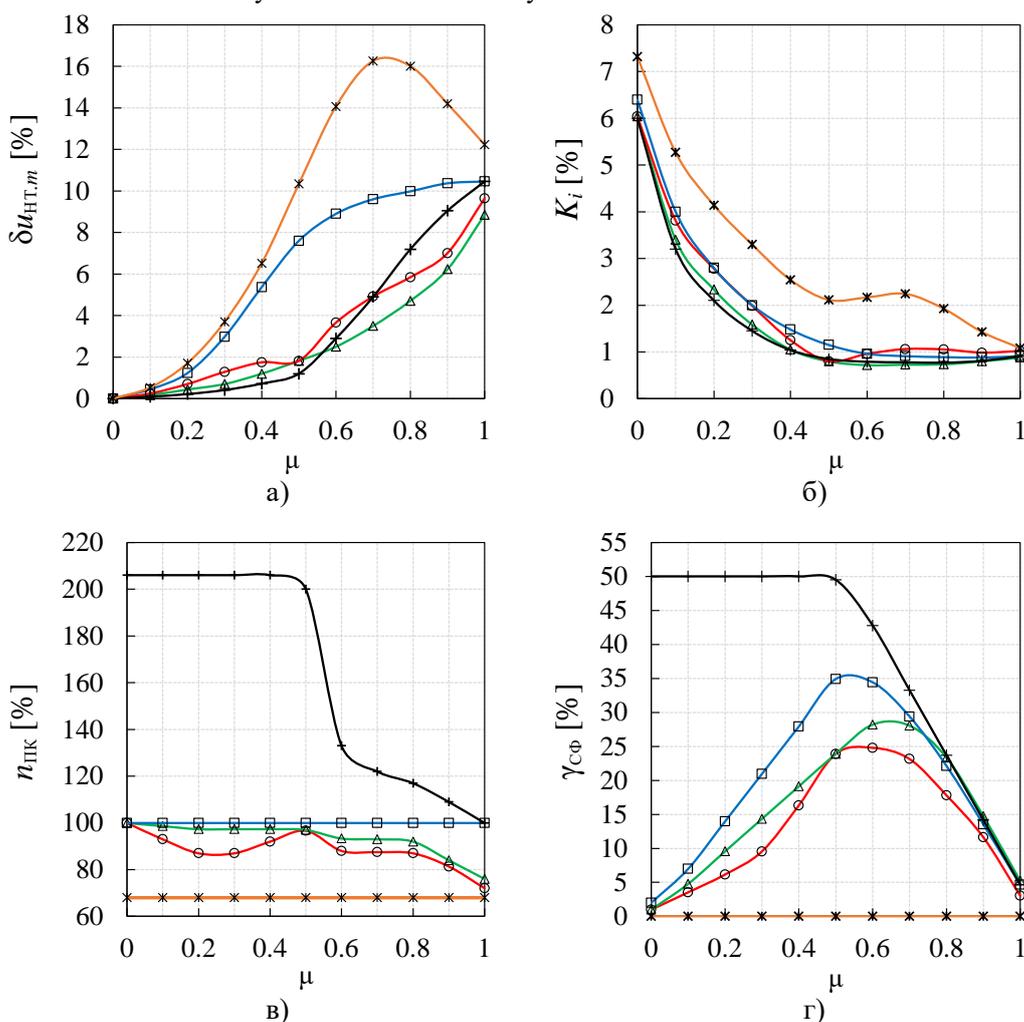


Рисунок 9 – Величины  $\delta u_{\text{НТ.м}}$  (а),  $K_i$  (б),  $n_{\text{ПК}}$  (в),  $\gamma_{\text{СФ}}$  (г) при изменении коэффициента модуляции  $\mu$

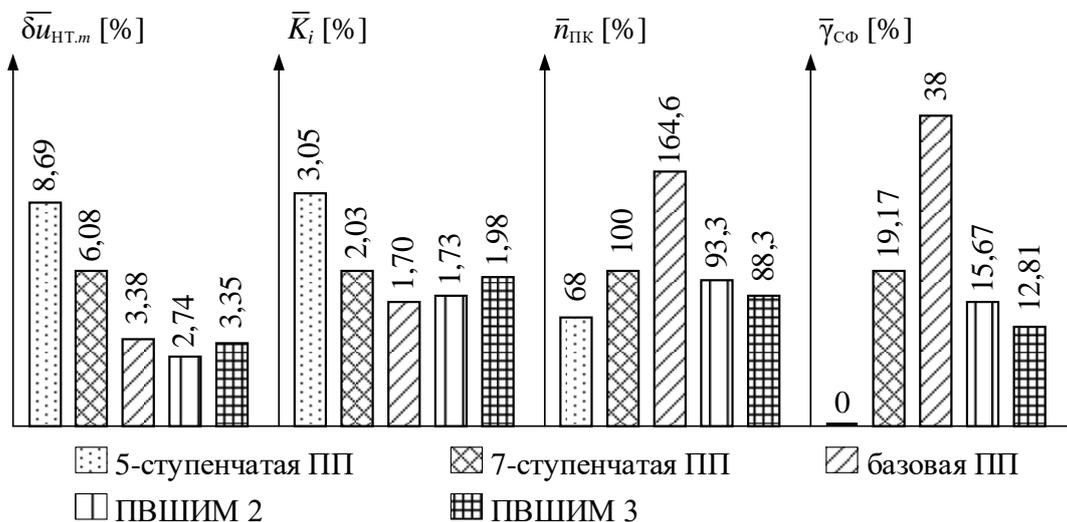


Рисунок 10 – Сравнение алгоритмов ПВШИМ по среднему значению коэффициентов  $\delta u_{HT.m}$  (а),  $K_i$  (б),  $n_{ПК}$  (в),  $\gamma_{сф}$  (г)

Таким образом, результаты исследования показывают, что ПВШИМ 2 может заменить базовую ПП в ЭП большой мощности, где предъявляются строгие требования к качеству электроэнергии при низкой частоте коммутации. Это обеспечивается благодаря лучшему качеству выходного тока среди предложенных алгоритмов. В приложениях, требующих гибкого управления параметрами ЭП, оптимальным выбором является ПВШИМ 3, так как она позволяет настраивать характеристики в зависимости от требований пользователя с помощью коэффициента  $\lambda$ .

**Четвертая глава** представляет собой результаты проверки адекватности системы управления АИН ПЧ на основе алгоритмов ПВШИМ.

Экспериментальный стенд представляет собой лабораторный комплекс «Трехуровневый силовой преобразователь» от компании «Imperix Ltd» (рисунок 11). Стенд включает в себя асинхронный двигатель (АД) мощностью 4 кВт с порошковой муфтой *Warner Electric Brakes* серии В65. Порошковая муфта обеспечивает нагрузочный момент, равный  $\pm 2,5$  Мн, и поддерживает момент нагрузки, пропорциональный току, который регулируется с помощью контроллера тока TCS250. IGBT-модули *Vincotech P924F33* используются для построения трехуровневых ПЧ. В среде *Matlab & Simulink* с использованием специализированных программных блоков из библиотеки «*Imperix Blockset*» были запрограммированы алгоритмы ПВШИМ. Во всех алгоритмах управление напряжением и частотой осуществлялось по закону  $U/f = const$  с форсировкой по напряжению в области низких частот, равной 5% от номинального напряжения статора АД. Затем программные коды



Рисунок 11 – Общий вид экспериментального стенда

алгоритмов были скомпилированы в C/C++ и интегрированы в платформу *B-Vox* через JTAG-эмулятор. С использованием USB-коннектора для подключения к платформе управления и программного обеспечения *B-Vox Control* проводилось графическое отображение и управление данными, которые были загружены на первом этапе из *Matlab & Simulink* в центральный сигнальный процессор TMS320C28346 платформы управления *B-Vox*. Измерения и отображение фазных токов и напряжений проводились с частотой дискретизации 50 мкс. Полученные данные импортировались в *Matlab* для дальнейшего анализа.

На рисунках 12 и 13 представлены зависимости  $\delta u_{HT.m}$ ,  $K_i$ ,  $K_{i(5)}$  и  $K_{i(7)}$  от нормированной заданной частоты  $f_s^*$  и их средние значения  $\overline{\delta u_{HT.m}}$ ,  $\overline{K_i}$ ,  $\overline{K_{i(5)}}$  и  $\overline{K_{i(7)}}$  во всем диапазоне частот  $f_s^*$  от 0 до 1,0. Здесь нормированная заданная частота рассчитывается по  $f_s^* = f_s / f_{s,ном}$ , где  $f_{s,ном} = 50$  Гц – номинальная частота статора АД. Анализ этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

– ПВШИМ 1 позволяет снизить средние значения  $\overline{\delta u_{HT.m}}$ ,  $\overline{K_i}$ ,  $\overline{K_{i(5)}}$  и  $\overline{K_{i(7)}}$  на 50,48%, 47,24%, 72,44% и 69,16% соответственно по сравнению с классической пятиступенчатой ПП;

– 5-ступенчатая ПП    – 7-ступенчатая ПП    – базовая ПП    – ПВШИМ 1    – ПВШИМ 2    – ПВШИМ 3

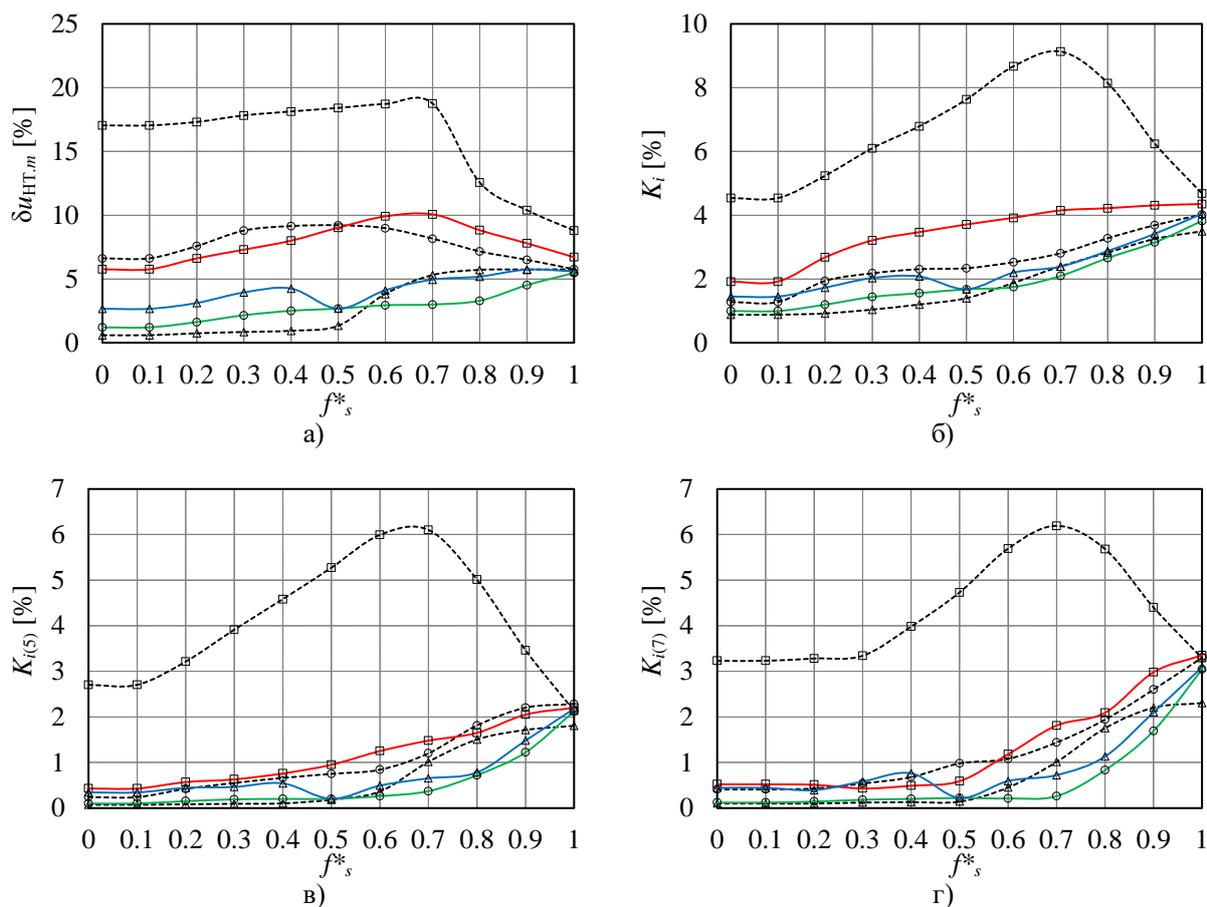


Рисунок 12 – Экспериментальные зависимости  $\delta u_{HT.m}$  (а),  $K_i$  (б);  $K_{i(5)}$  (в) и  $K_{i(7)}$  (г) от нормированной частоты  $f_s^*$  при номинальной нагрузке двигателя

– ПВШИМ 2 снижает среднее значение  $\overline{\delta u_{HT.m}}$ ,  $\overline{K_i}$ ,  $\overline{K_{i(5)}}$  и  $\overline{K_{i(7)}}$  на 64,37%, 22,71%, 50,0% и 48,8% соответственно по сравнению с классической семиступенчатой ПП;



Прокатная клетка стана оснащена двумя трехфазными синхронными двигателями (СД) типа DMMYZ 3867–20V немецкой компании *VEM Sachsenwerk GmbH*, предназначенными для привода двух горизонтальных валков. Питание каждого СД осуществляется от трех параллельно соединенных трехуровневых ПЧ. Поскольку система работает на низкой частоте коммутации 600 Гц, в систему управления АИН трехуровневых ПЧ был внедрен алгоритм ПВШИМ 2, который заменил известный алгоритм ПВШИМ с базовой ПП благодаря обеспечению лучшего качества выходного тока среди предложенных алгоритмов (рисунок 13).

Результаты исследования показали, что среднее значение числа пар переключений силовых ключей при ПВШИМ 2 снижается на 43,3% по сравнению с известным алгоритмом (рисунок 15 а). Это способствует увеличению КПД ПЧ с 98,8% до 99,4% (рисунок 15 б), что соответствует росту на 0,6%. В результате достигается экономия в размере, примерно, 1,3 млн рублей в год.

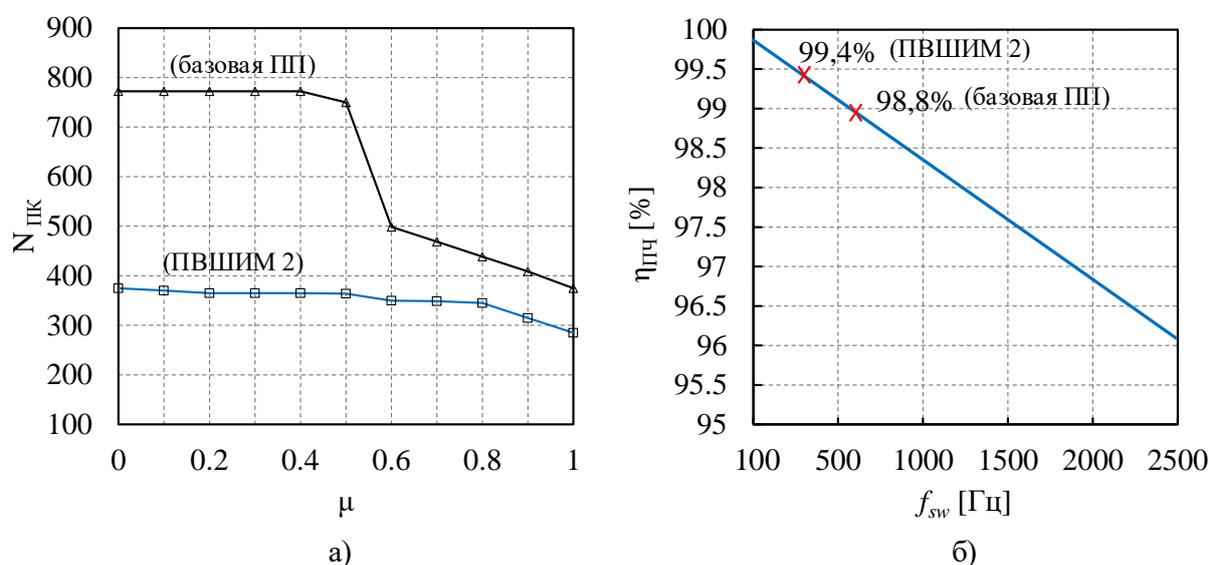


Рисунок 15 – Число пар переключений силовых ключей  $N_{ПК}$  за один период основной гармоники на выходе ПЧ при изменении коэффициента модуляции от 0 до 1,0 (а); КПД ПЧ в зависимости от частоты коммутации силовых ключей при номинальном напряжении 3,3 кВ (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. На основании сравнительного анализа существующих ЭП-ПЧ обоснована актуальность исследования повышения энергосбережения путем улучшения четырех ключевых показателей: качества электроэнергии, коммутационных потерь, баланса напряжения НТ и СФ напряжения посредством системы управления АИН ПЧ на основе усовершенствованных алгоритмов ПВШИМ.

2. Разработана общая имитационная модель ЭП-ПЧ с системой управления АИН на основе ПВШИМ с различными ПП. Проведен анализ преимуществ и недостатков трех классических ПП (базовой, пятиступенчатой, семиступенчатой) по четырем показателям.

3. Разработана усовершенствованная система управления АИН ПЧ на основе

ПВШИМ 1. Принцип ПВШИМ 1 заключается в переходе между различными вариантами пятиступенчатой ПП в зависимости от направления и величины сигнала обратной связи по мгновенному отклонению напряжения НТ. Это позволяет значительно улучшить баланс напряжения НТ и качество электроэнергии.

4. Разработана усовершенствованная система управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 2. Алгоритм обеспечивает перераспределение длительности включения между комбинациями состояний  $p$ - и  $n$ - типов малых базовых векторов в семиступенчатой ПП, что позволяет существенно улучшить ключевые показатели.

5. Разработана усовершенствованная система управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 3. Алгоритм использует гибридную ПП, объединяя преимущества пяти- и семиступенчатых ПП без необходимости дополнительных переключений силовых ключей. Это позволяет оптимизировать четыре ключевых показателя. Дополнительным преимуществом является возможность гибкой настройки степени оптимизации каждого показателя в зависимости от требований потребителя с помощью коэффициента гибридизации  $\lambda$ .

6. Экспериментальные исследования на лабораторном комплексе «Трехуровневый силовой преобразователь» компании «*Imperix Ltd*» подтвердили адекватность усовершенствованных систем управления АИН ПЧ на основе ПВШИМ 1, ПВШИМ 2 и ПВШИМ 3 в улучшении баланса напряжения НТ и повышении качества электроэнергии.

7. Разработана имитационная модель главного ЭП горизонтального валка толстолистового стана 5000 с использованием графической среды *Simulink* пакета *Matlab*. Анализ результатов исследования подтвердил, что применение ПВШИМ 2 способствует повышению КПД и энергосбережения системы.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Шишков, А.Н. Влияние последовательностей переключений на баланс напряжения нейтральной точки в трёхуровневом инверторе напряжения / А.Н. Шишков, М.М. Дудкин, **В.К. Ле** // Известия МГТУ «МАМИ». – 2023. – Т. 17. – №. 2. – С. 195–206. DOI: 10.17816/2074-0530-125204.

2. Шишков, А.Н. Оптимальная гибридная последовательность переключения для трехуровневого инвертора напряжения с пространственно-векторной ШИМ / А.Н. Шишков, М.М. Дудкин, А.С. Маклаков, **В.К. Ле** // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – Т. 60. – №. 3. – С. 61–71. DOI: 10.18503/2311-8318-2023-3(60)-61-71.

3. Шишков, А.Н. Алгоритм пространственно-векторной ШИМ с гибридной последовательностью переключений для регулируемых электроприводов

переменного тока на базе трехуровневого инвертора напряжения / А.Н. Шишков, М.М. Дудкин, **В.К. Ле**, Н.А. Еремин // Вестник Южно-Уральского государственного Университета. Серия: «Энергетика». – 2023. – Т. 23. – №. 4. – С. 34–46. DOI: 10.14529/power230404.

4. Шишков, А.Н. Баланс напряжения нейтральной точки в трехуровневом инверторе напряжения на основе пространственно-векторной ШИМ с семиступенчатой последовательностью переключений / А.Н. Шишков, М.М. Дудкин, **В.К. Ле**, Н.А. Еремин // Электротехника. – 2024. – №. 6. – С. 52–63. DOI: 10.53891/00135860-2024-6-52-63.

**Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus**

5. Shishkov, A.N. Neutral Point Voltage Balance in Three-Level Voltage Inverter Based on Space-Vector PWM with Seven-Stage Switching Sequence / A.N. Shishkov, M.M. Dudkin, **V.K. Le**, N.A. Eremin // Russian Electrical Engineering. – 2024. – №. 95. – pp. 475–485. DOI: 10.3103/S1068371224700524.

6. Dudkin, M.M. An Algorithm for a Space-Vector Pulse Width Modulation with a Hybrid Switching Sequence for a Three-Level Neutral Point Clamped Voltage Source Inverter / M.M. Dudkin, A.N. Shishkov, **V.K. Le** // Power System Technology. – 2024. – vol. 48. – №. 1. – pp. 55–84. DOI: 10.52783/pst.237.

7. Shishkov, A.N. Neutral Point Voltage Balance Based on Space-Vector PWM with Five-Stage Sequence for Three-Level Voltage Inverter / A.N. Shishkov, M.M. Dudkin, **V.K. Le**, N.A. Eremin // 2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russia. – IEEE, 2023. – pp. 586–592. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110815.

8. Shishkov, A.N. The Influence of Different Types of Switching Sequences in Space-Vector PWM on Output Characteristics of Three-Level Voltage Inverter / A.N. Shishkov, M.M. Dudkin, **V.K. Le**, N.A. Eremin // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russia. – IEEE, 2023. – pp. 690–696. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291119.

9. Shishkov, A.N. Optimizing DC Link Capacitors in Three-Level Voltage Inverter Based on Space-Vector PWM with Seven-Stage Switching Sequence / A.N. Shishkov, M.M. Dudkin, **V.K. Le**, N.A. Eremin // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russia. – IEEE, 2024. – pp. 949–956. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10516169.

**Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования РИНЦ**

10. Шишков, А.Н. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора напряжения с фиксированной нейтральной точкой / А.Н. Шишков, М.М. Дудкин, **В.К. Ле** // НАУКА – ОБЩЕСТВО – ТЕХНОЛОГИИ – 2022. – М., 2022. – С. 303–313.