

На правах рукописи



Маклаков Александр Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ
С ФИКСИРОВАННОЙ СРЕДНЕЙ ТОЧКОЙ В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

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:

Брованов Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники и электротехники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Хакимьянов Марат Ильгизович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования промышленных предприятий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

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

Защита состоится 25 апреля 2017 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. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте по адресу: <http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/maklakov-aleksandr-sergeevich>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 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, доцент

Григорьев

Максим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Увеличение мирового спроса на энергоресурсы повлекло за собой развитие новых силовых преобразовательных устройств и новых полупроводниковых технологий, способных управлять сверх большими потоками электрической энергии с минимальными потерями и негативным влиянием на окружающую среду. Последние экономические прогнозы свидетельствуют о том, что развитие и совершенствование рынка силовых преобразователей для различных областей промышленности и энергетики будет продолжаться в XXI веке с объемом роста в ближайшие годы среднегодовых инвестиций в данную отрасль по разным источникам до 10%. В первую очередь, это будет связано с реконструкцией энергетической инфраструктуры и реализацией проектов по возобновляемой энергетике развитых стран Европы и США, а также с увеличением спроса со стороны быстрорастущих экономик Китая, России, Индии, Бразилии и Южной Африки. Тем самым, исследования в области повышения энергоэффективности полупроводниковых преобразователей и улучшение показателей качества преобразуемой ими электроэнергии приобретает особую значимость.

В течении последних 5–10 лет на современных отечественных и зарубежных предприятиях активно внедряются электроприводы большой мощности на базе многоуровневых преобразователей частоты различных топологий и многопульсных схем соединения с питающей сетью. Ввиду больших мощностей, на фоне ужесточения отечественных и международных стандартов к электромагнитной совместимости (ЭМС) и энергосбережению, системы электроприводов большой мощности являются наиболее перспективными в отношении повышения энергоэффективности и качества потребляемой электроэнергии. Из всего разнообразия рассматриваемых топологий преобразователей, трехуровневые преобразователи частоты с фиксированной средней точкой наиболее широко используются в области больших мощностей. Даже незначительное увеличение КПД такого преобразователя приведет к существенной экономии потребляемой электроэнергии приводом. Новизна способов повышения энергоэффективности работы трехуровневых преобразователей частоты определяет необходимость совершенствования и исследования используемых схемных решений, алгоритмов модуляции и систем управления.

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

Степень научной разработанности проблемы. Фундаментальные исследования принципов работы различных топологий, методов управления и модуляции полупроводниковых преобразователей частоты в области электропривода переменного тока нашли отражения во многих научных трудах. Значительный вклад в эту область исследований внесли известные российские и зарубежные ученые: С.В. Брованов, А.Б. Виноградов, М.В. Гельман, Г.С. Зиновьев, В.В. Крючков, Н.В. Пронин, М.И. Хакимьянов, Т.Р. Храмшин, Е.Е. Чаплыгин, Р.Т. Шрейнер, H. Akagi, S. Bernet, T. Brückner, B. Bose, N. Celanovic,

S. Dieckerhoff, S.S. Fazel, J.P. Felix, D.G. Holmes, J. Holtz, M.P. Kazmierkowski, S. Kouro, J.I. Leon, T.A. Lipo, M. Malinowski, J. Mazumdar, B.P. McGrath, M. Mehra, N. Mohan, M. Molinas, A. Nabae, J.O. Pontt, J. Rodriguez, S. Sirisukprasert, B. Wu и многие другие.

Однако степень теоретических и прикладных исследований способов повышения энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой посредством применения гибридных алгоритмов модуляции в составе высоковольтного электропривода большой мощности не соответствует полному рассмотрению в отечественной и зарубежной литературе.

Объект исследования – трехуровневый преобразователь частоты с фиксированной средней точкой (ЗУ ПЧ с ФСТ) в составе электропривода большой мощности (ЭП БМ) на основе гибридного алгоритма модуляции.

Предмет исследования – показатели качества преобразуемой электроэнергии и энергоэффективности ЗУ ПЧ с ФСТ на базе активного выпрямителя (АВН) и автономного инвертора напряжения (АИН) в составе ЭП БМ.

Целью диссертационной работы является разработка гибридного алгоритма модуляции для повышения энергоэффективности ЗУ ПЧ с ФСТ в составе электропривода большой мощности.

Идея работы заключается в применении гибридного алгоритма модуляции ЗУ ПЧ с ФСТ, позволяющего осуществить переключение между алгоритмами пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) и широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) в зависимости от режима работы ЭП БМ. При этом гибридный алгоритм позволяет снизить потери, возникающие при переключении вентилях при ПВШИМ, за счет снижения числа этих переключений при ШИМ с УВГ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

1. Проведен патентно-литературный обзор в области современного ЭП БМ для определения наиболее промышленно применимых технических решений, их основных проблем и способов устранения;

2. Создана логико-математическая модель ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН для проведения исследований и оценки показателей качества преобразуемой электроэнергии и энергоэффективности при различных методах и алгоритмах модуляции;

3. Созданы логические модели алгоритмов ПВШИМ и ШИМ с УВГ для проведения сравнительного анализа показателей качества преобразуемой электроэнергии и энергоэффективности ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН в составе ЭП БМ;

4. Разработан гибридный алгоритм модуляции и методами математического моделирования проведены исследования повышения энергоэффективности и улучшения показателей качества преобразуемой электроэнергии при его использовании в ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН;

5. Проведены экспериментальные исследования на действующем электрооборудовании главного электропривода прокатной клетки стана 5000 ЛПЦ №9 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) для проверки адекватности разработанных моделей.

Методы исследования. Теоретические исследования и решение поставленных задач проводились с помощью использования аналитических и численных методов решения алгебраических уравнений и систем дифференциального и интегрального исчисления, преобразования Фурье, теории матриц, метода обобщенных векторов, логических операций, методов аналитической геометрии, методов численного моделирования, базовых положений теории автоматического управления и методов синтеза регуляторов многосвязных систем. Разработанные логико-математические модели реализованы в среде визуального программирования Matlab/Simulink. Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях на действующем оборудовании.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается научно-обоснованной постановкой задачи и корректным применением современных методов математического моделирования и подтверждается результатами выполняемых расчетов, а также достаточно малым расхождением результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Логико-математическая модель 3У ПЧ с ФСТ, учитывающая совместную работу АВН и АИН при различных методах и алгоритмах модуляции;

2. Гибридный алгоритм модуляции 3У ПЧ с ФСТ, который позволяет осуществить без дополнительных переключений переход между алгоритмами ПВШИМ и ШИМ с УВГ;

3. Результаты сравнительного анализа показателей качества преобразуемой электроэнергии 3У ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН при алгоритме ПВШИМ с базовой последовательностью переключений пространственных векторов и при алгоритме ШИМ с УВГ с четвертьволновой симметрией;

4. Результаты экспериментальных исследований и теоретического анализа гибридного алгоритма модуляции 3У ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН в составе главного электропривода прокатной клетки стана 5000 ЛПЦ №9 ОАО «ММК».

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан способ повышения энергоэффективности 3У ПЧ с ФСТ на основе гибридного алгоритма модуляции в составе ЭП БМ;

2. Создана логико-математическая модель 3У ПЧ с ФСТ для исследования совместной работы АВН и АИН при алгоритме ПВШИМ с базовой последовательностью переключений пространственных векторов и при алгоритме ШИМ с УВГ с четвертьволновой симметрией, расчета электромагнитных процессов и анализа показателей качества преобразуемой электроэнергии;

3. Разработан гибридный алгоритм модуляции, позволяющий повысить КПД преобразователя путем осуществления переключения между алгоритмами ПВШИМ и ШИМ с УВГ.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработаны технические предпосылки для повышения энергоэффективности ЗУ ПЧ с ФСТ в составе промышленных электроприводов большой мощности различного применения. Практическое использование предложенного гибридного алгоритма модуляции ЗУ ПЧ с ФСТ позволит повысить КПД и улучшить показатели качества потребляемой электроэнергии систем ЭП БМ. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению «Мехатроника и робототехника» в Южно-Уральском государственном университете (НИУ).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 42-й ежегодной конференции сообщества IEEE по промышленной электронике (IECON 2016), Италия, Флоренция, 2016 г.; 7-й международной конференции по промышленной мехатронике (ICMM 2016), Сингапур, 2016 г.; XVI международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» (ЭППТ 2015), Россия, Екатеринбург, 2015 г.; IEEE north west Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference, Россия, Санкт-Петербург, 2015–2017 г.г.; International Siberian conference on control and communications (Россия, Омск, 2015 г.); International conference on mechanical engineering, automation and control systems (Россия, Томск, 2014–2015 г.г.); международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Россия, Челябинск, 2015–2016 г.г.; 12-ой международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП 2014), Россия, Новосибирск, 2014 г.; научно-технических семинарах кафедры мехатроники и автоматизации ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» (2015–2017 г.г.); научно-техническом семинаре кафедры электроники и электротехники ФГАОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», 2017 г.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 16 печатных трудах, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России, 7 статей в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus и WoS.

Личный вклад автора. В научных трудах, в том числе написанных в соавторстве, автору принадлежат основные идеи и проработка вопросов по созданию гибридного алгоритма модуляции, разработка математического аппарата для реализации логико-математических моделей и логических моделей алгоритмов ПВШИМ и ШИМ с УВГ, оценка показателей качества преобразуемой электроэнергии и энергоэффективности ЗУ ПЧ с ФСТ в составе ЭП БМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 118 наименований. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, в том числе 77 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сформулирована цель диссертационной работы.

В первой главе структурирован и представлен обзор известных принципов построения силовых схем электроприводов большой мощности (ЭП БМ) на базе многоуровневых преобразователей частоты. Рассмотрены основные топологии, методы модуляции и способы управления преобразователями, а также сформулированы их основные достоинства и недостатки. На основе проведенного патентно-литературного обзора показана актуальность повышения энергоэффективности 3У ПЧ с ФСТ (укрупненная функциональная схема которого приведена на рисунке 1) ввиду их наибольшего распространения в составе ЭП БМ.

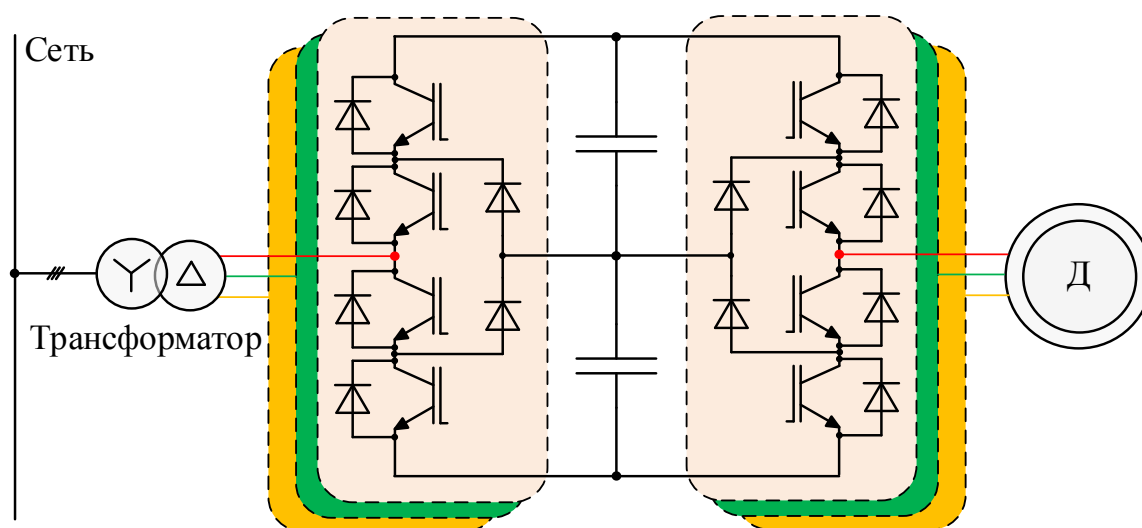


Рисунок 1 – Укрупненная функциональная схема 3У ПЧ с ФСТ

Отмечено, что существующие на данный момент публикации, связанные с исследованиями современных систем ЭП БМ на базе многопульсных схем соединения с питающей сетью и 3У ПЧ с ФСТ при современных методах модуляции не отражают комплексного подхода к исследованию способов повышения их энергоэффективности и показателей качества потребляемой электроэнергии. Связано это с отсутствием комплексного математического описания 3У ПЧ с ФСТ, позволяющего исследовать совместную работу АВН и АИН в составе ЭП БМ на базе многопульсных схем соединения с питающей сетью при таких алгоритмах модуляции, как ШИМ с УВГ и ПВШИМ.

Определены задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке математического описания 3У ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН. Созданная логико-математическая модель на основе дискретных логических функций, описывающих состояния полупроводниковых приборов, отличается от известных учетом совместной работы АВН и АИН при различных методах и алгоритмах модуляции. В основу разработанной логико-математической модели положена система уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{abcr} = u_{dc1} \cdot \left(F_{abc1r} - \frac{1}{3} \cdot \sum_{n=a}^{b,c} F_{n1r} \right) + u_{dc2} \cdot \left(F_{abc2r} - \frac{1}{3} \cdot \sum_{n=a}^{b,c} F_{n2r} \right) \\ u_{abcv} = u_{dc1} \cdot \left(F_{abc1v} - \frac{1}{3} \cdot \sum_{n=a}^{b,c} F_{n1v} \right) + u_{dc2} \cdot \left(F_{abc2v} - \frac{1}{3} \cdot \sum_{n=a}^{b,c} F_{n2v} \right) \\ u_{dc1} = \frac{(F_{a1r} \cdot i_{ar} + F_{b1r} \cdot i_{br} + F_{c1r} \cdot i_{cr}) - (F_{a1v} \cdot i_{av} + F_{b1v} \cdot i_{bv} + F_{c1v} \cdot i_{cv})}{C_{dc1} \cdot p} \\ u_{dc2} = \frac{(F_{a2r} \cdot i_{ar} + F_{b2r} \cdot i_{br} + F_{c2r} \cdot i_{cr}) - (F_{a2v} \cdot i_{av} + F_{b2v} \cdot i_{bv} + F_{c2v} \cdot i_{cv})}{C_{dc2} \cdot p} \end{array} \right. , \quad (1)$$

которая получена посредством использования дискретных логических функций γ_{abc} , описывающих состояния полупроводниковых приборов ЗУ ПЧ с ФСТ:

- для АВН

$$\gamma_{abcr} = \begin{cases} 1, & \rightarrow (S_{abc1r} \text{ and } S_{abc2r}) = 1 \text{ and } (S_{abc3r} \text{ and } S_{abc4r}) = 0 \\ 0, & \rightarrow (S_{abc2r} \text{ and } S_{abc3r}) = 1 \text{ and } (S_{abc1r} \text{ or } S_{abc4r}) = 0 \\ -1, & \rightarrow (S_{abc3r} \text{ and } S_{abc4r}) = 1 \text{ and } (S_{abc1r} \text{ and } S_{abc2r}) = 0 \end{cases} , \quad (2)$$

- для АИН

$$\gamma_{abcv} = \begin{cases} 1, & \rightarrow (S_{abc1v} \text{ and } S_{abc2v}) = 1 \text{ and } (S_{abc3v} \text{ and } S_{abc4v}) = 0 \\ 0, & \rightarrow (S_{abc2v} \text{ and } S_{abc3v}) = 1 \text{ and } (S_{abc1v} \text{ or } S_{abc4v}) = 0 \\ -1, & \rightarrow (S_{abc3v} \text{ and } S_{abc4v}) = 1 \text{ and } (S_{abc1v} \text{ and } S_{abc2v}) = 0 \end{cases} . \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3): S_{abc1r} – S_{abc4r} – состояния полупроводниковых модулей каждой фазной стойки a , b и c АВН, (0, 1); S_{abc1v} – S_{abc4v} – состояния полупроводниковых модулей каждой фазной стойки a , b и c АИН, (0, 1); u_{dc1} , u_{dc2} – мгновенные значения напряжений на эквивалентных емкостях звена постоянного тока, В; u_{abcr} и u_{abcv} – фазные напряжения АВН и АИН, В; i_{abcr} и i_{abcv} – фазные токи АВН и АИН, А; C_{dc1} , C_{dc2} – эквивалентные значения емкостей звена постоянного тока, Ф. Системы уравнений (2) и (3) определяют состояния коммутационных функций F в системе (1). Коммутационные функции F формируют логические сигналы (0, 1), определяющие уровень напряжения звена постоянного тока, подключаемого к каждой фазе АВН и АИН как

$$\begin{aligned} F_{a1r} &= \frac{\gamma_{ar}(\gamma_{ar} + 1)}{2}; F_{a2r} = \frac{\gamma_{ar}(\gamma_{ar} - 1)}{2}; F_{a1v} = \frac{\gamma_{av}(\gamma_{av} + 1)}{2}; F_{a2v} = \frac{\gamma_{av}(\gamma_{av} - 1)}{2}; \\ F_{b1r} &= \frac{\gamma_{br}(\gamma_{br} + 1)}{2}; F_{b2r} = \frac{\gamma_{br}(\gamma_{br} - 1)}{2}; F_{b1v} = \frac{\gamma_{bv}(\gamma_{bv} + 1)}{2}; F_{b2v} = \frac{\gamma_{bv}(\gamma_{bv} - 1)}{2}; \\ F_{c1r} &= \frac{\gamma_{cr}(\gamma_{cr} + 1)}{2}; F_{c2r} = \frac{\gamma_{cr}(\gamma_{cr} - 1)}{2}; F_{c1v} = \frac{\gamma_{cv}(\gamma_{cv} + 1)}{2}; F_{c2v} = \frac{\gamma_{cv}(\gamma_{cv} - 1)}{2}. \end{aligned}$$

Предложенное математическое описание позволяет проводить исследования статических и динамических режимов работы, оценку показателей качества преобразуемой электроэнергии и энергоэффективности ЗУ ПЧ с ФСТ при учете совместной работы АВН и АИН на основе различных методов и алгоритмов модуляции. Кроме того, система уравнений (1) является удобной для синтеза системы управления (СУ) преобразователем посредством линеаризации коммутационных функций F . Возможность перехода к линеаризованной модели в рамках поставленной задачи подтверждается достаточно высокой частотой коммутации полупроводниковых модулей в режиме модуляции по сравнению с частотой выходного напряжений АВН и АИН.

На основе принятых допущений была получена структурная схема ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН, которая оказалась подобной известной структурной схеме двухуровневого ПЧ. Из чего сделан вывод, что при синтезе СУ ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН могут быть использованы идентичные методы, как и при синтезе двухуровневого ПЧ. Для синтеза замкнутой СУ с необходимыми показателями качества регулирования был применен принцип подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией.

Выбор структуры и настройка параметров регуляторов СУ ЗУ ПЧ с ФСТ был осуществлен в соответствии с принятыми критериями качества регулирования. Контур регулирования тока был настроен на «модульный оптимум», который считается оптимальным для большинства объектов управления с точки зрения быстродействия и перерегулирования тока. Контур регулирования напряжений был настроен на «симметричный оптимум», который позволяет обеспечить основное требование к СУ АВН в составе ЗУ ПЧ с ФСТ – поддержания напряжения в звене постоянного тока на номинальном уровне. В том числе, статическую инвариантность по возмущающему воздействию – изменению тока АВН, при соответствующих данной настройке статических и динамических показателей регулирования всей СУ.

Третья глава посвящена разработке гибридного алгоритма модуляции, осуществляющего переключение между алгоритмами пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) и широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ).

Предварительно были рассмотрены алгоритмы ПВШИМ и ШИМ с УВГ в отдельности. Реализация алгоритма ПВШИМ основана на базовой последовательности базовых пространственных векторов для каждого региона и сектора. Реализация алгоритма ШИМ с УВГ основана на четвертьволновой симметрии и поддержании уровня первой гармоники выходного фазного напряжения преобразователя на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции. Предложенные логические модели алгоритмов ПВШИМ и ШИМ с УВГ позволили провести исследования электромагнитных процессов в ЗУ ПЧ с ФСТ в составе ЭП БМ посредством математического моделирования.

Разработанный гибридный алгоритм модуляции в составе системы управления АИН (рисунок 2) позволяет осуществить переключение между алгоритмами ШИМ с УВГ и ПВШИМ при выполнении следующих требований:

1. Измеряемый угол поворота пространственного вектора θ_v , задающего фазного напряжения преобразователя в системе координат dq должен быть общим как для ШИМ с УВГ, так и ПВШИМ;
2. Амплитуда, частота и угол пространственного вектора задающего фазного напряжения преобразователя должны оставаться неизменными при переходе с одного алгоритма модуляции на другой;
3. Переход возможен либо без изменения коммутационных состояний $\{S_v\}$ в трех фазах инвертора, либо при коммутации только в одной из трех фаз;
4. Переход от одного алгоритма модуляции к другому происходит на границах полупериодов ПВШИМ.

Выполнение всех вышеперечисленных требований обеспечило сохранение принципа минимизации числа коммутации ключей 3У ПЧ с ФСТ при смене алгоритмов модуляции.

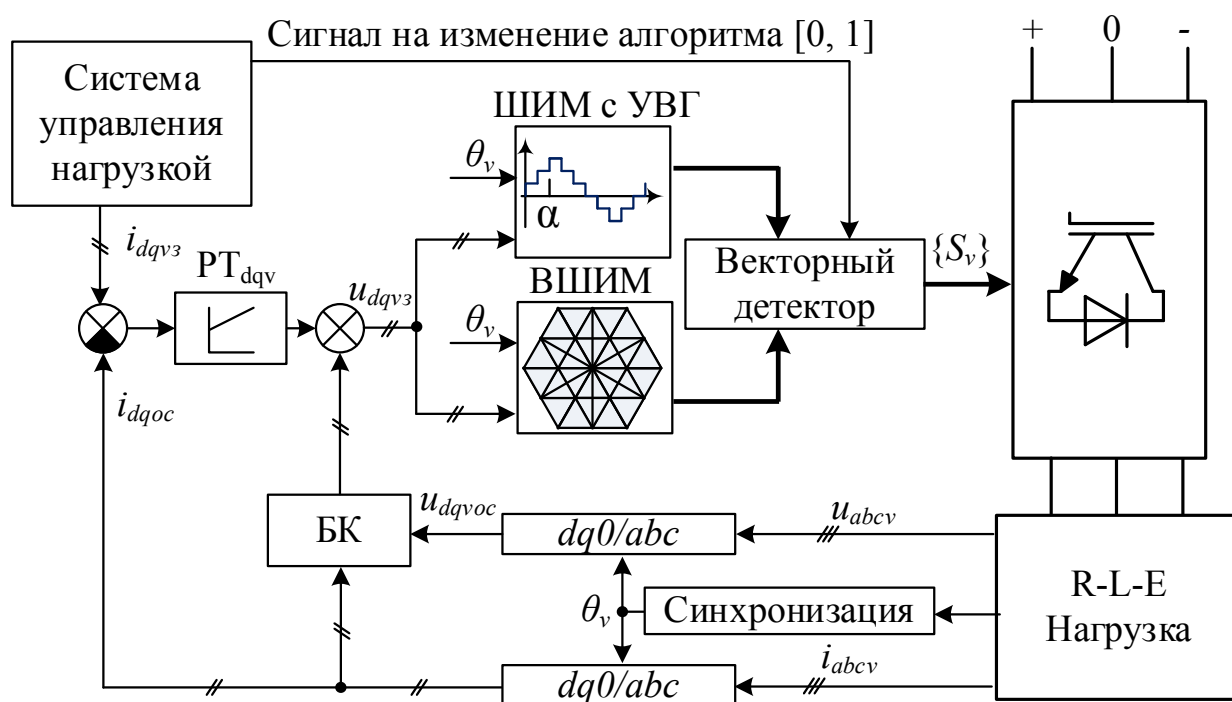


Рисунок 2 – Функциональная схема гибридного алгоритма модуляции

Функциональная схема гибридного алгоритма модуляции (см. рисунок 2) состоит из: узла синхронизации с нагрузкой; блоков координатных преобразований $dq0/abc$, преобразующих сигналы токов i_{abcv} и напряжений u_{abcv} нагрузки из неподвижной системы координат abc во вращающуюся систему координат $dq0$; блока компенсации перекрестных связей (БК); внешней системы управления нагрузкой; линейного двумерного регулятора тока PT_{dqv} , который, в зависимости от сигнала рассогласования заданных токов i_{dqv3} и сигналов обратной связи i_{dqoc} , формирует задающее фазное напряжения АИН в системе координат $dq0$; векторный детектор (рисунок 3).

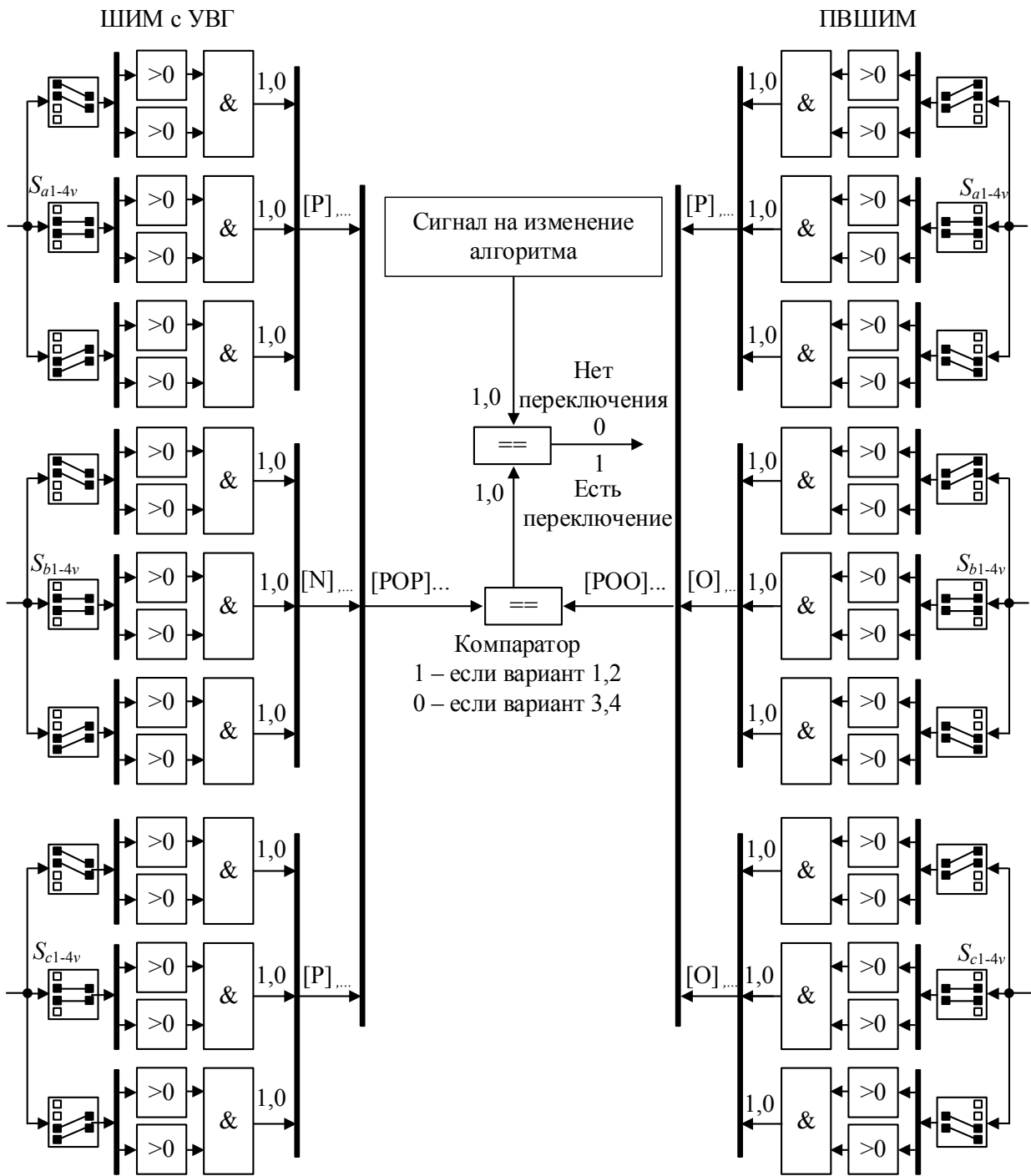


Рисунок 3 – Функциональная схема векторного детектора

Предложенный векторный детектор (см. рисунок 3) выполняет функцию слежения за формируемыми состояниями [P], [O] и [N] алгоритмов ШИМ с УВГ и ПВШИМ, а в момент появления сигнала с верхнего уровня управления нагрузкой осуществляет смену алгоритмов, если последнее является возможным.

В четвертой главе приведены результаты проверки работоспособности предложенных логико-математических моделей ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН при алгоритмах ШИМ с УВГ и ПВШИМ. Представлен сравнительный анализ показателей качества преобразуемой электроэнергии при данных алгоритмах путем

проведения теоретических и экспериментальных исследований на примере главного электропривода прокатной клетки стана 5000 ЛПЦ №9 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (рисунок 4).

Исследуемый ЭП БМ представляет собой систему (рисунок 4), в которой синхронный двигатель (СД) номинальной мощностью 12 МВт каждого рабочего валка подключается к трем параллельно соединенным ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН через понижающие трансформаторы, которые образуют 18-пульсную схему соединения с питающей сетью.

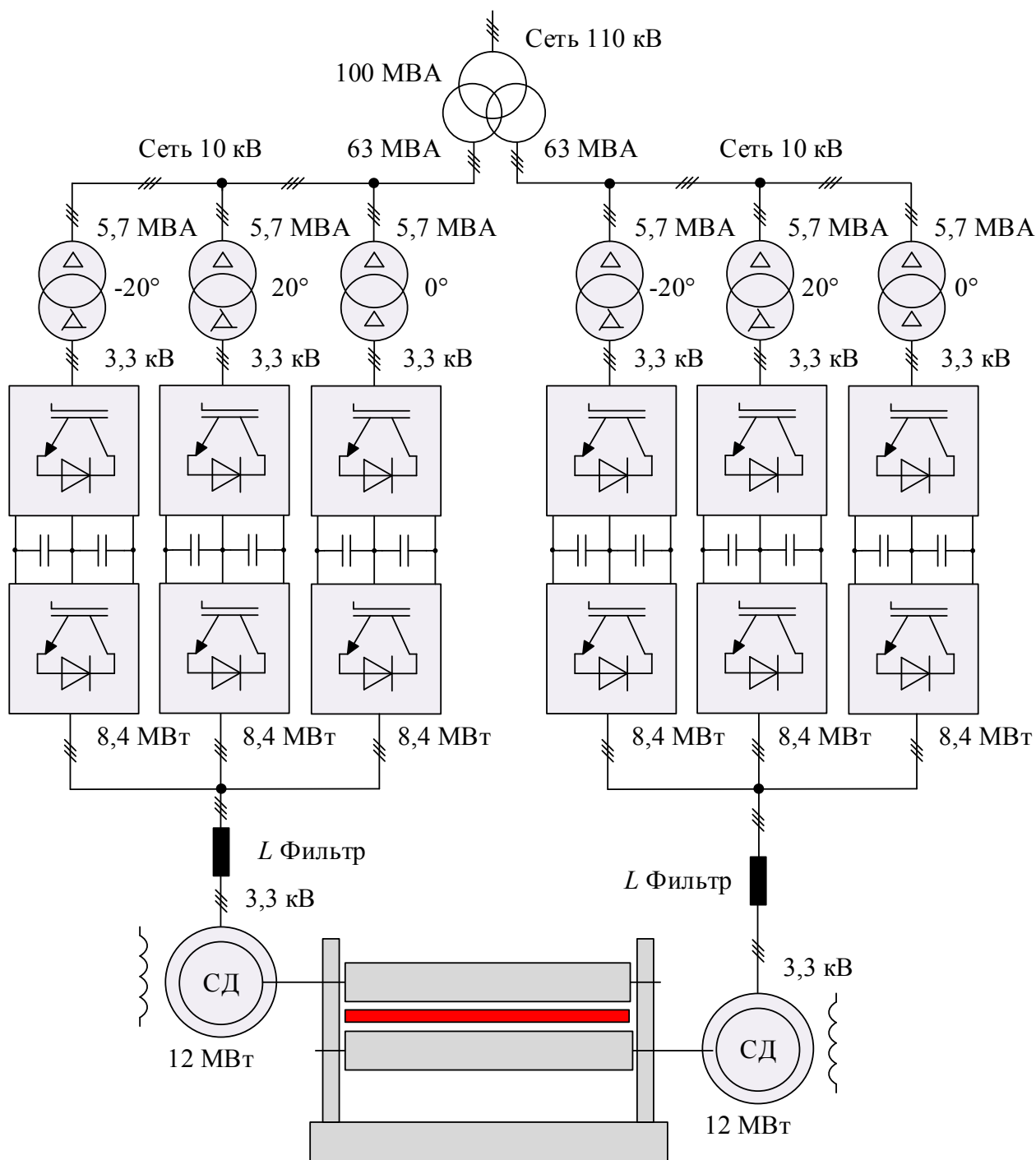


Рисунок 4 – Схема исследуемого объекта

При экспериментальных исследованиях на действующем оборудовании прокатной клетки стана 5000 ЛПЦ №9 ОАО «ММК» были получены спектры и суммарные коэффициенты гармонических составляющих (THD) напряжения и тока сети при работе привода с различными нагрузками.

Эксперименты на действующем оборудовании в точке подключения к питающей сети 10кВ и результаты моделирования были проведены при потреблении 50%, 100% и 200% от номинального тока двигателя. Анализ результатов моделирования и экспериментальных исследований показал достаточную сходимость как спектрального состава, так и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения сети. Расхождение в полученных данных составило менее 3...4%, что доказывает адекватность разработанной математической модели 3У ПЧ с ФСТ на базе АВН при алгоритме ШИМ с УВГ.

Для проверки адекватности разработанной модели 3У ПЧ с ФСТ на базе АИН при алгоритме ПВШИМ были проведены экспериментальные исследования с целью получения спектра и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока нагрузки при работе двигателя в номинальном режиме (с номинальным напряжением, частотой и потребляемым током). Анализ спектра тока двигателя показал отсутствие гармоник до 50-й. Наибольшее влияние наблюдается в области 60-й и 120-й гармоник высокочастотного спектра тока, а суммарный коэффициент гармонических составляющих при этом составляет 1,95%.

Для получения результатов моделирования спектра и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока двигателя был использован алгоритм ПВШИМ для АИН с базовой последовательностью базовых векторов и частотой коммутации полупроводниковых модулей порядка 300 Гц. Сравнение результатов экспериментальных исследований и результатов математического моделирования показали незначительное расхождение с результатами эксперимента по суммарному коэффициенту гармонических составляющих и спектру тока порядка 3...4%, что доказывает адекватность разработанной математической модели 3У ПЧ с ФСТ на базе АИН при алгоритме ПВШИМ.

Сравнительный анализ показателей качества напряжения и тока 3У ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН был проведен при алгоритме ПВШИМ с базовой последовательностью переключений пространственных векторов при частоте коммутации ключей 300 Гц и при алгоритме ШИМ с УВГ с четвертьволновой симметрией для четырех вариантов удаления гармоник. Определено, что суммарный коэффициент гармонических составляющих и спектр тока двигателя главного привода прокатной клетки стана 5000 ОАО «ММК» при алгоритме ПВШИМ с базовой последовательностью базовых векторов и частотой коммутации 300 Гц полупроводниковых модулей АИН имеют близкие значения при алгоритме ШИМ с УВГ с удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37 гармоник. Сравнительные характеристики результатов моделирования рассматриваемых алгоритмов показаны на рисунке 5, откуда явно видно сниже-

ние количества переключений N на 56,7% при методе ШИМ с УВГ с сохранением на одинаковых уровнях суммарных коэффициентов гармонических составляющих (ТНД) выходного напряжения АИН u_v и тока двигателя i_l , что привело к увеличению КПД_v АИН.

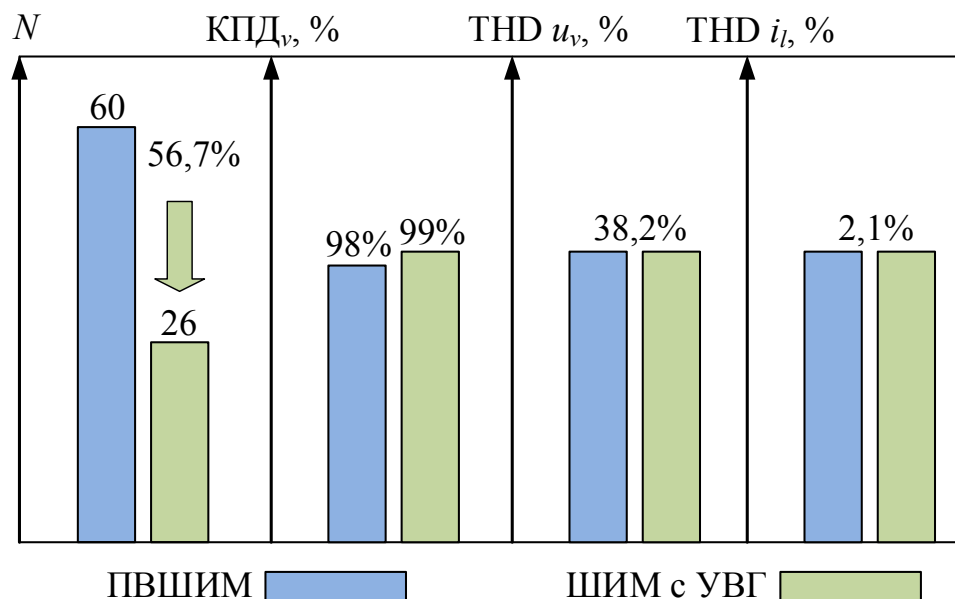


Рисунок 5 – Сравнение алгоритмов ПВШИМ и ШИМ с УВГ

Моделирование работы гибридного алгоритма модуляции проводилось в программе Matlab/Simulink на разработанных математических моделях, проверенных ранее на адекватность. Результаты моделирования процесса перехода между алгоритмами ПВШИМ и ШИМ с УВГ для одного из возможных вариантов переключения показаны на рисунке 6 и рисунке 7.

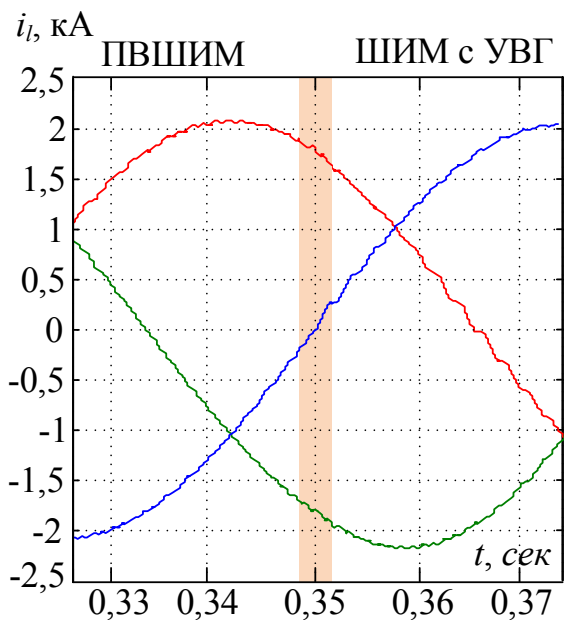


Рисунок 6 – Кривые токов двигателя при переключении алгоритмов

Рисунок 6 в момент времени $t=0,35$ сек демонстрирует отсутствие скачков тока при смене алгоритмов модуляции. Из результатов моделирования выходного напряжения АИН в момент времени $t=0,35$ сек (рисунок 7) можно видеть, что последним состоянием на рассматриваемом периоде квантования базовых векторов T_s ПВШИМ является [OON]. В этот момент алгоритм ШИМ с УВГ имеет идентичные состояния [OON], что и обеспечивает возможность перехода с одного алгоритма на другой.

Разработанный гибридный алгоритм модуляции также показал хорошую работоспособность при других рассмотренных в данной главе вариантах переключений.

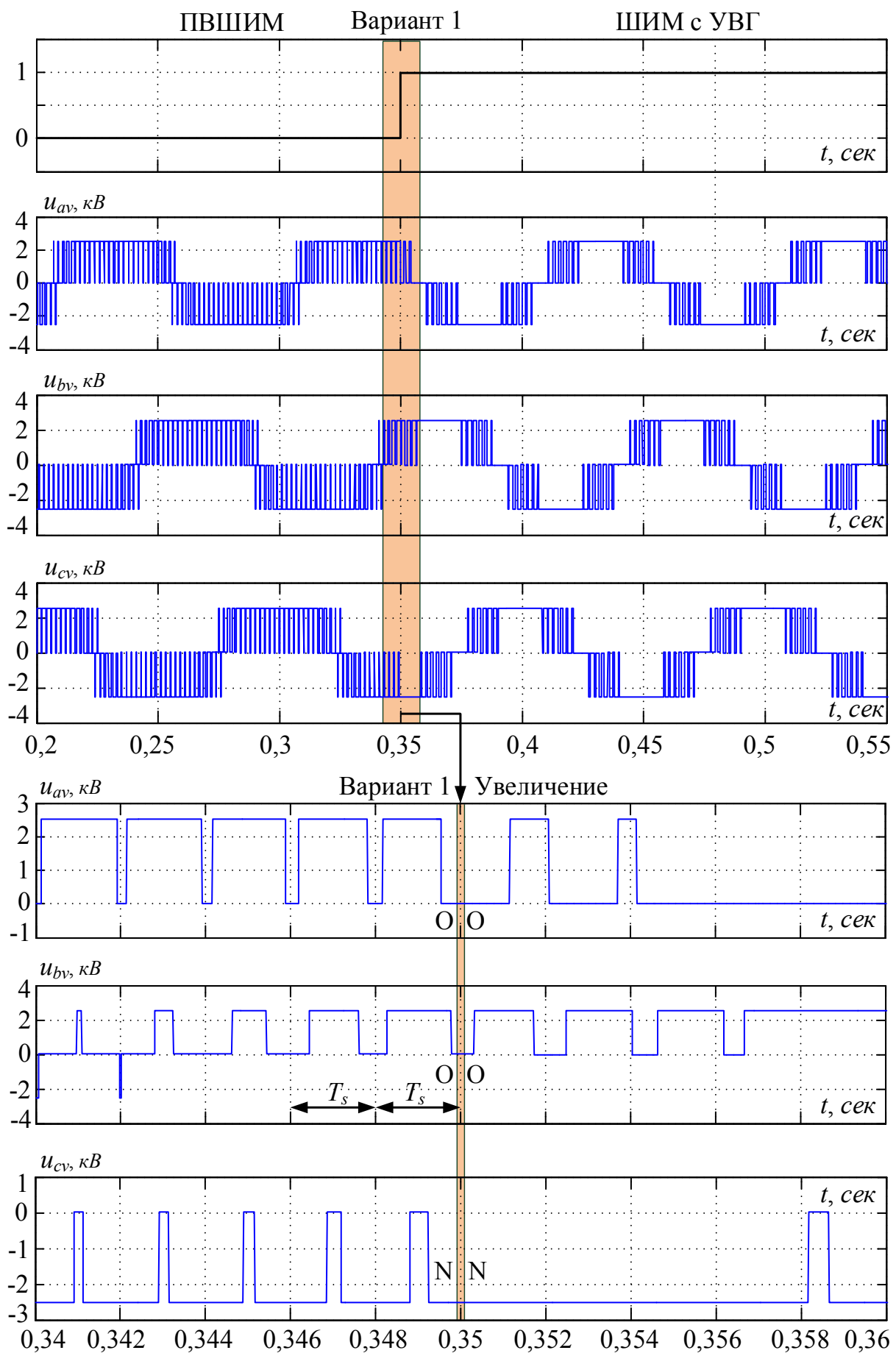


Рисунок 7 – Переход от алгоритма ПВШИМ к ШИМ с УВГ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. В результате проведенного обзора современного состояния силовой преобразовательной техники в области ЭП БМ определена актуальность исследований способов повышения энергоэффективности и показателей качества потребляемой электроэнергии путем совершенствования методов и алгоритмов модуляции ЗУ ПЧ с ФСТ.

2. На основе дискретных логических функций, описывающих состояния полупроводниковых приборов, разработана логико-математическая модель ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН отличающаяся от известных учетом совместной работы АВН и АИН при различных алгоритмах модуляции. Разработанная логико-математическая модель позволяет в полном объеме проводить исследования статических и динамических характеристик ЗУ ПЧ с ФСТ в составе ЭП БМ и показателей качества преобразуемой электроэнергии.

3. Предложено математическое описание ЗУ ПЧ с ФСТ как объекта управления, на основании чего получена структурная схема, которая при обоснованно принятых допущениях подобна известным структурным схемам двухуровневого мостового преобразователя частоты. Рекомендована настройка контуров регулирования и передаточные функции регуляторов тока и напряжения, обеспечивающие заданное качество регулирования в статических и динамических режимах.

4. Созданы логические модели алгоритма ПВШИМ, основанной на базовой последовательности базовых пространственных векторов, и алгоритма ШИМ с УВГ, основанной на четвертьволновой симметрии с сохранением постоянства заданного уровня первой гармоники, позволяющие проводить исследования электромагнитных процессов ЗУ ПЧ с ФСТ в составе ЭП БМ посредством математического моделирования.

5. Разработан гибридный алгоритм модуляции, который позволяет осуществить переключение между алгоритмами ШИМ с УВГ и ПВШИМ, обеспечивая при этом выполнение требований к минимизации числа коммутаций полупроводниковых ключей ЗУ ПЧ с ФСТ. В результате моделирования работы предложенного гибридного алгоритма модуляции в момент смены алгоритмов ПВШИМ и ШИМ с УВГ показан переход без дополнительных переключений полупроводниковых модулей, исключая скачки в кривых тока двигателя.

6. На основе проведенных исследований методом математического моделирования в условиях главного привода прокатной клетки стана 5000 ОАО «ММК» показано, что использование гибридного алгоритма модуляции ЗУ ПЧ с ФСТ, позволяющего осуществить переключение между алгоритмом ПВШИМ с базовой последовательностью базовых векторов на частоте коммутации ключей 300 Гц и алгоритмом ШИМ с УВГ с удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37 гармоник, приводит к снижению на 56,7% количества переключений полупроводниковых модулей АИН, а следовательно к повышению КПД порядка 1%, при идентичных суммарных коэффициентах гармонических составляющих тока и напряжения.

7. Проведенные на главном электроприводе прокатной клетки стана 5000 ОАО «ММК» экспериментальные исследования доказали адекватность разработанных математических моделей на основании сходимости результатов расчета спектрального состава и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и напряжения с реальными значениями в 3...4%. Экспериментально определено, что суммарный коэффициент гармонических составляющих тока двигателя при алгоритме ПВШИМ с базовой последовательностью базовых векторов и частотой коммутации 300 Гц полупроводниковых модулей АИН идентичен при алгоритме ШИМ с УВГ с удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37 гармоник.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций:

1. Гасияров, В.Р. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, **А.С. Маклаков** // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С. 4–9.

2. **Маклаков, А.С.** Математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью на базе активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения / **А.С. Маклаков** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 49–59. DOI: 10.14529/power160407

3. Радионов, А.А. Трехуровневый активный двунаправленный преобразователь частоты в составе реверсивных электроприводов среднего напряжения: современное состояние и способы управления / А.А. Радионов, **А.С. Маклаков** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 6(542). – С. 80–87. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-6-80-87

4. Радионов, А.А. Использование мощных электроприводов на базе активных двунаправленных преобразователей в составе промышленной Smart Grid системы / А.А. Радионов, **А.С. Маклаков**, А.Д. Чернышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 74–81. DOI: 10.14529/power150109

Издания, входящие в систему цитирования Scopus:

5. **Maklakov, A.S.** EMC evaluation of three level NPC converter based on space vector PWM / **A.S. Maklakov**, A.A. Radionov // Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRusNW 2015, pp. 236–240. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102269

6. Radionov, A.A. EMC analysis of 18-pulse AC-DC circuit consisting of three level AFE rectifiers based on PWMSHE method with three switching angles for quarter-period / A.A. Radionov, **A.S. Maklakov**, E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov, S.S.

Voronin // in Proc. 2016 IEEE North West Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference, EICONRUSNW 2016, 2016. pp. 659–663. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448269

7. Gasiyarov, V.R. Modelling and simulation of three level inverters for main drive of the plate mill rolling stand / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, **A.S. Maklakov** // MATEC WEB of conferences, 2016. DOI: 10.1051/matecconf/20164502001

8. Radionov, A.A. New control method of back to back converter / A.A. Radionov, **A.S. Maklakov**, E.A. Karyakina // in Pros. 2015 international Siberian conference on control and communications, SIBCON 2015, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147135

9. **Maklakov, A.S.** Integration prospects of electric drives based on back to back converters in industrial Smart Grid / **A.S. Maklakov**, A.A. Radionov // in Proc. 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE 2014, 2014. – pp. 770–774. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040790

10. Radionov, A.A. Smart Grid for main electric drive of plate mill rolling stand / A.A. Radionov, **A.S. Maklakov**, V.R. Gasiyarov // in Proc. 2014 international conference on mechanical engineering, automation and control systems, MEACS 2014, 2014. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986842

11. **Maklakov, A.S.** Power factor correction and minimization THD in industrial grid via reversible medium voltage AC drives based on 3L-NPC AFE rectifiers / **A.S. Maklakov**, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov // IECON Proceedings Industrial Electronics Conference, 2016. – pp. 2551–2556. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793315

Другие научные публикации:

12. **Маклаков, А.С.** Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя / **А.С. Маклаков**, А.А. Радионов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 30–37.

13. **Маклаков, А.С.** Анализ электромагнитной совместимости 18-пульсной схемы соединения трехуровневых АВН при использовании метода ШИМ с удалением выделенных гармоник / **А.С. Маклаков**, Е.А. Маклакова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 4, №1. – С. 66–73.

14. **Маклаков, А.С.** Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ / **А.С. Маклаков**, А.А. Радионов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 40–47.

15. Радионов, А.А. Активный выпрямитель напряжения как объект управления / А.А. Радионов, **А.С. Маклаков**, А.В. Белый // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – № 6. – С. 117–127.

16. **Маклаков, А.С.** Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 / **А.С. Маклаков** // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16–25.

Маклаков Александр Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ
С ФИКСИРОВАННОЙ СРЕДНЕЙ ТОЧКОЙ В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский Центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 04.2017. 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.