

Старостина Ярослава Константиновна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО  
ТРАНСФОРМАТОРНО-ТРАНЗИСТОРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ  
РЯДА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Специальности: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск 2019

Работа выполнена на кафедре Электропривод и автоматизация промышленных установок федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Сидоров Сергей Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Артюхов Иван Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Электроэнергетика и электротехника»  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.»

**Макаров Валерий Геннадьевич**,  
доктор технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой электропривода и электротехники  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет имени  
Н.П. Огарева», г. Саранск**

Защита состоится "21" февраля 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова" по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус № 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова" и на сайте [www.chuvsu.ru](http://www.chuvsu.ru).

Автореферат разослан "21" ноября 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д.212.301.06

Н.В. Руссова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Асинхронные двигатели достаточно широко используются и эксплуатируются в промышленности различных отраслей. По различным статистическим данным, асинхронный электропривод переменного тока занимает от 70 до 90% в общем количестве промышленных электроприводов. Применяемые асинхронные двигатели, наибольшая доля которых имеет короткозамкнутый ротор, имеют номинальное напряжение 0,4 кВ и номинальную мощность в диапазоне до 100 кВт. Важно иметь в виду, что включение асинхронных электроприводов напрямую к трехфазной питающей сети приводит к трем опасным последствиям:

1. Негативное воздействие на асинхронный двигатель, так как токи во время пуска и торможения двигателя, достигают 5,5-7,0 кратного от номинального значения тока статора, что в свою очередь отрицательно влияет на изоляцию статорных обмоток, при этом вызывая её преждевременный физический износ и старение изоляции, приводящее к уменьшению её сопротивления и увеличивая токи утечки.

2. Отрицательное воздействие на питающую сеть, так как достаточно большие броски пускового тока, вызывают кратковременные глубокие посадки напряжения в сети питания, что приводит к нарушению в работе всех электроприемников, запитанных от этой электрической сети.

3. Пагубное воздействие на механические передачи технологических агрегатов, так как во время электромагнитных переходных процессов формируются электромагнитные моменты знакопеременного значения с амплитудой, в несколько раз превышающей номинальное значение.

В последние годы в связи с усовершенствованием знаний в области силовой преобразовательной полупроводниковой техники появилась возможность для уменьшения опасных воздействий на асинхронный электропривод и систему электроснабжения в целом, возникающих в режимах пуска и торможения асинхронных двигателей, вследствие применения пуско-регулирующих устройств, построенных на данной элементной базе. В области таких устройств, а также разработки устройств управления асинхронными электроприводами на основе полупроводниковой техники можно выделить работы следующих ученых: Браславский И.Я., Донской Н.В., Зиновьев Г.С., Иванов А.Г., Кобзев А.В., Осипов О.И., Розанов Ю.К., Соколовский Г.Г., Терехов В.М., Толстов Ю.Г. и другие. При построении высокоэффективных, энергосберегающих асинхронных электроприводов, надлежит применять теорию управления по критерию минимума мгновенной потребляемой мощности.

Важно отметить, что также актуальной проблемой является унификация оборудования. При достижении высокой степени унификации оборудования открывается возможность сократить финансово-экономические и трудовые затраты на производство дорогостоящих устройств и оборудования в целом. Процедура унификации в асинхронных электроприводах может быть реализована при применении одинаковых, подобных типов комплектующих элементов, входящих в состав оборудования, например, полупроводниковых приборов.

Отличающиеся друг от друга принципиальные требования управления и регулирования напряжения статорных обмоток асинхронного двигателя различных типов и назначений промышленных установок, повлияли на создание устройств регулирования существенно различающихся друг от друга, что в свою очередь приводит к определенным трудностям начиная со стадии изготовления, а затем при наладке и эксплуатации оборудования. Предпосылки унификации силового и преобразовательного оборудования, выполненных на единой полупроводниковой аппаратурной базе, открывают возможность для разрешения такого рода трудностей и проблем.

**Целями диссертационной работы** являются:

- разработка и исследование, унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля, пригодного для построения ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов малой и средней мощности, конкурирующего с аналогами и ликвидирующего отрицательные качества существующих альтернативных технических решений в плане энергосбережения и сохранения качества потребляемой электроэнергии;

- построение ряда маловентильных электроприводов на основе унифицированного регулятора напряжения и частоты в статорных обмотках асинхронного двигателя, соответствующего требованиям национальных стандартов, а также типовым требованиям, предъявляемым к статическим и динамическим свойствам общепромышленных механизмов, и обеспечивающего работу асинхронного двигателя в тех или иных квадрантах механической характеристики.

**Объектом исследования** являются электротехнические системы и комплексы, имеющие в своем составе асинхронные двигатели малой и средней мощности с короткозамкнутым ротором.

**Предметом исследования** является унифицированный трансформаторно-транзисторный модуль, применяемый для построения ряда малоэлементных энергосберегающих асинхронных электроприводов.

**Задачи научного исследования:**

1. Провести обзор и анализ существующих устройств управления и принципов стабилизации с их помощью трёхфазного напряжения статорных обмоток асинхронного двигателя.

2. Выявить основные принципы, достоинства и новые возможности модульного построения маловентильных регуляторов напряжения и регуляторов частоты при разработке унифицированных систем асинхронного электропривода на базе трансформаторно-транзисторного модуля.

3. Разработать и исследовать схему унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля.

4. Разработать и провести исследование асинхронного электропривода на базе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля в режиме амплитудного пуска двигателя и стабилизации напряжения питания в пределах двух квадрантов механической характеристики асинхронного двигателя.

4. Разработать и провести исследование асинхронного электропривода на базе двухвентильной схемы трансформаторно-транзисторного регулятора

напряжения в пределах четырехквadrантной механической характеристики.

5. Разработать и провести исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе трансформаторно-транзисторного модуля со свойствами циклоконвертора с комбинированной модуляцией.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана схема унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля, применяемого для построения ряда маловентильных энергосберегающих асинхронных электроприводов малой и средней мощности.

2. Разработан новый способ амплитудного управления статорного напряжения асинхронного двигателя в пусковых, установившихся и тормозных режимах работы с применением трансформаторно-транзисторного регулятора напряжения.

3. Разработан новый способ амплитудно-частотного регулирования асинхронным электроприводом на основе трёхвентильного регулятора с комбинированной фазо-широтно-импульсной модуляцией статорного напряжения.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы определяется широкими возможностями использования разработанной схемы унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля, находящей применение в построении ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов с различными функциональными свойствами и улучшенной формой потребляемого тока.

**Практическая ценность работы.** В соответствии с «Энергетической стратегией Российской Федерации», главным направлением государственной энергетической политики является повышение энергоэффективности промышленных объектов, таким образом конечные результаты диссертационного исследования могут быть применены в низковольтных сетях переменного тока при регулировании статорного напряжения асинхронного короткозамкнутого двигателя средней мощности в режимах пуска, торможения и позиционирования.

**Методы и методология исследования:** для решения поставленных задач использовались законы электротехники, электромеханики, теории автоматического управления, численного решения дифференциальных уравнений и проведения математических моделирований с использованием программно-математических средств (пакеты программ MathCad, MatLab, MBTU), а также проведение анализа существующих теоретических и практических результатов учёных в данной области.

**Основные положения, выносимые на защиту** следующие:

1. Схема унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля, применяемого для построения ряда асинхронных электроприводов малой и средней мощности с использованием предельно минимального количества управляемых полупроводниковых вентилях в силовой схеме регулирующего устройства. Модульный принцип выполнения и простота конструкции предлагаемых устройств, позволяют реализовывать малогабаритные и недорогие устройства управления. При этом обеспечиваются значительно меньшее энергопотребление и меньшая величина коэффициента несинусоидальности

напряжения статора асинхронного электропривода большинства общепромышленных механизмов.

2. Способ амплитудного управления статорного напряжения с применением унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля, обеспечивающий минимальные значения мгновенной потребляемой мощности при пусковом, тормозном режимах работы, а также режиме позиционирования асинхронного двигателя, с повышенной надёжностью и большим сроком безаварийной эксплуатации, за счет минимальных электрических потерь и предельно высокого коэффициента полезного действия регулирующих устройств. Высокочастотный принцип импульсной модуляции напряжения в статорных обмотках двигателя, обеспечивает квазисинусоидальность и отсутствие фазового сдвига кривой потребляемого тока, гарантирующее приближение коэффициента мощности к единице.

3. Результаты теоретических исследований и компьютерного моделирования унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля, а также построенных на его основе ряда маловентильных электроприводов, подтверждающие достижение высокого уровня энергетических показателей (минимальные значения мгновенной потребляемой мощности и коэффициента несинусоидальности статорного напряжения).

**Достоверность результатов** подтверждается согласием результатов аналитического исследования, математического моделирования и экспериментальной проверки полученных результатов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы сообщались в качестве докладов и выступлений на всероссийских и международных научно-технических конференциях: 1-я Крымская научно-техническая конференция (г.Севастополь, 2014г.); Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (г.Севастополь, 2014, 2015 гг.); VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу «АЭП-2014» (г. Саранск, 2014г.); IX Международная (XX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу «АЭП-2016» (г.Пермь, 2016 г.); III Международный молодёжный форум (г.Томск, 2015г.); V Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа (г. Ульяновск, 2016 г.); 19-й Всероссийская молодежная научная школа-семинар: "Актуальные проблемы физической и функциональной электроники" (г.Ульяновск, 6-8 декабря 2016г.); XVI Международная научно-практическая конференция "Энерго- и ресурсосбережение - XXI век" (МИК-2018) (г.Орел, июль 2018г.) и др.

По результатам производственного семинара на ООО "Ульяновский механический завод" был получен отзыв на диссертационную работу.

Результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конкурсах: региональный этап Всероссийского конкурса «Премия ВОИР - 2018» по направлению "Лучшее изобретение" в г.Ульяновск (награждена дипломом финалиста); региональный этап Всероссийского конкурса «Инженер года - 2018» по направлению "Инженерное искусство молодых" в г.Ульяновск

(награждена дипломом победителя); Всероссийский конкурс «Инженер года - 2018» по направлению "Инженерное искусство молодых" (получен сертификат и знак «Профессиональный инженер России», а также как победитель конкурса награждена дипломом и памятной медалью «Лауреат конкурса» и занесена в реестр профессиональных инженеров России по версии «Инженерное искусство молодых»).

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы на ведущих предприятиях г.Ульяновска: ООО "УАЗ-Автокомпонент" при разработке вытяжной системы газоочистки для внутрикоровшевого модифицирования; АО "Авиастар-СП" в металлургическом производстве для построения системы управления краном-штабелером; ООО "Контакт-М" при разработке проекта "Двухуровневой транспортной системы секции подъема крана-штабелера грузоподъемностью 100 кг на Производстве окончательной сборки".

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении научно-исследовательской работы на тему «Разработка энергосберегающего малоэлементного устройства для асинхронных электроприводов средней мощности грузоподъемных механизмов» (2016-2018гг.) по договору о предоставлении гранта № 9533ГУ2015 от 01.02.2016г. по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК) при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

**Личный вклад автора.** Цели и задачи диссертационного исследования были сформулированы научным руководителем работы, который в процессе выполнения работы осуществлял верификацию результатов и оказывал консультативное содействие. Общая концепция диссертации, ее структура, уровень понимания рассматриваемых в ней проблем, сформулированные основные результаты и выводы работы, положения, выносимые на защиту, отражают конкретный творческий вклад автора и исключительно его точку зрения на рассматриваемую проблематику. В совместных работах с научным руководителем и другими соавторами принимала участие в проведении аналитических расчетов, в интерпретации, систематизации и обобщении полученных результатов.

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 32 научные работы, в том числе 3 статьи в изданиях, рецензируемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации и 2 статьи в электронном издании IEEE, рецензируемом наукометрической базой Scopus, 2 охранных документа - патент на изобретение, 1 заявка на получение охранных документа - патент на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, заключения, списка литературы, включающего 135 наименований и 4 приложений, приведенных на 27 страницах. Рукопись содержит 160 страниц основного текста, 77 рисунков и 1 таблицу.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность темы, определён круг рассматриваемых вопросов, дана краткая характеристика работы в целом.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней приведен обзор существующих устройств стабилизации и регулирования напряжения статорных обмоток асинхронного двигателя, сформулированы основные требования предъявляемые к таким устройствам. Рассмотрены современные схемотехнические решения стабилизаторов переменного напряжения на базе вольтодобавочных трансформаторов. Приведено описание импульсно-дискретных трансформаторно-тиристорных устройств для регулирования напряжения асинхронных двигателей средней мощности. Исследованы основные принципы широтно-импульсного регулирования напряжения в соответствии с нормативными требованиями к уровню электромагнитной совместимости электропривода с питающей сетью и нагрузкой.

**Во второй главе** выявлены принципы модульного построения для разработки унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля на основе анализа современных регулирующих устройств модульного исполнения, выполненных на базе полупроводниковых моновентильных коммутирующих элементов, как средств унификации асинхронных электроприводов.

Исследован транзистор типа IGBT, как ключевой элемент моновентильного коммутирующего устройства. В качестве транзисторных ключей были выбраны IGBT-транзисторы фирмы IR с изолированным затвором, что объясняется некоторыми преимуществами их по сравнению с аналогами МОП-транзисторами. Параметры выбранного транзистора: тип – IRG4PH50U; предельный средний ток – 27 А; максимально допустимое напряжение – 1200 В; время включения – 200 - 400 нс; время выключения – 400 нс - 6мкс.

Проанализирован гармонический состав выходного напряжения модульного моновентильного коммутирующего устройства. Приведены и описаны основные принципы широтно-импульсного регулирования и стабилизации трёхфазного напряжения на статоре асинхронного двигателя.

Обосновано применение вольтодобавочного трансформатора в составе коммутирующего устройства в режиме равноинтегральных переключений. Рассмотрено применение энергетически эффективных цепей защиты регулятора от коммутационных перенапряжений.

**Третья глава** посвящена построению ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов на основе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля. Разработаны и исследованы следующие схемы асинхронных электроприводов:

1) Одноквадрантный асинхронный электропривод на основе моновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля.

2) Четырёхквадрантный асинхронный электропривод с импульсным регулированием статорного напряжения на базе двухвентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля.

3) Частотно-регулируемый асинхронный электропривод на основе трёхвентильного трансформаторно-транзисторного модуля с комбинированной фазо-широтно-импульсной модуляцией.

С целью повышения технико-экономических показателей пускового режима асинхронного двигателя необходима разработка устройства с минимизированным количеством полупроводниковых элементов-вентилей и практически синусоидальной формой тока статорных обмоток, для этого необходимо построить схему регулирующего устройства на базе трехфазного вольтодобавочного трансформатора.

Особенностью включения в схему разрабатываемого регулятора (рисунок 1) этого трансформатора является то, что типом соединения между собой первичных обмоток является звезда, при этом клеммы первых выводов подключены к источнику напряжения, в данном случае представленного электрической сетью общего назначения.

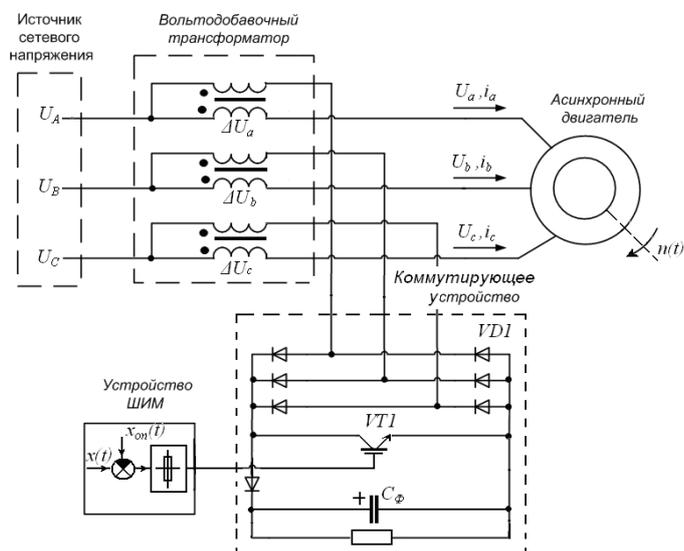


Рисунок 1 – Схема асинхронного электропривода на основе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля.

Важно отметить, что функции нулевой точки этой звезды будет выполнять трехфазный диодный мост, к зажимам переменного тока которого подключены вторые выводы первичных обмоток вольтодобавочного трансформатора. При этом к зажимам постоянного тока трехфазного диодного моста в прямом направлении включен единственный в данной схеме полупроводниковый вентиль (биполярный IGBT-транзистор), выполняющий роль ключевого элемента, управление которым осуществляется широтно-модулированным импульсным сигналом высокой частоты, поступающего с выхода устройства широтно-импульсной модуляции. Что касается особенности включения вторичных обмоток вольтодобавочного трансформатора, то эти обмотки включены по отношению к статорными обмотками асинхронного двигателя встречно-последовательно и присоединены к той же электрической сетью общего назначения, создавая дополнительное напряжения отрицательного знака.

В схеме, представленной на рисунке 1, коммутационные переключения состояний транзистора, обеспечивают трансформаторно-транзисторный модуль возможностью одновременного регулирования дополнительного напряжения отрицательного знака во всех трёх фазах обмоток статора асинхронного двигателя без образования пауз в форме кривой выходного напряжения, что в свою очередь обеспечивает создание практически идеальных форм токов как на сетевом входе, так и в обмотках статора асинхронного двигателя.

Для устранения отрицательных последствий коммутационных перенапряжений в схему трансформаторно-транзисторного модуля выводится схема защиты от коммутационных перенапряжений, представляющая собой RC-цепь, подключенная параллельно транзистору через разделительный диод. В цепи защиты от коммутационных перенапряжений конденсатор  $C_\phi$  выполняет роль демпфирующего фильтра.

Технико-экономический эффект при применении одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля в составе асинхронного электропривода достигается уменьшением количества силовых полупроводниковых элементов (в известных схемах устройств, являющиеся аналогами разрабатываемого устройства, применяется как минимум шесть, а в схеме трансформаторно-транзисторного модуля – один), а также, образованием в процессе модуляции, происходящей на высокой частоте, плавной регулировки напряжения с высокой точность стабилизации и образованием непрерывной практически синусоидальной формы кривой тока статорных обмоток. При том, что под воздействие высокочастотной модуляции попадает уменьшаемая в процессе пускового режима часть статорного напряжения асинхронного двигателя. Другие положительные результаты, которые могут быть достигнуты применением трансформаторно-транзисторного модуля, в качестве пускового элемента для асинхронного двигателя, а так же элемента стабилизации напряжения питания:

- отказ от применения дорогостоящих устройств компенсации реактивной мощности, из-за существенного снижения потребляемой реактивной мощности асинхронным двигателем в режиме пуска;

- уменьшение броска пускового тока не менее чем на 50%, снижение износа и увеличение срока службы электрической и механической части электропривода;

- устранение падений напряжений в сети, за счет перевода трансформаторно-транзисторного модуля в режим стабилизации (в режиме периодической стабилизации в периоды максимального электропотребления всеми электроприемниками на промышленном объекте, либо в режиме постоянной стабилизации, когда промышленный объект слишком удалён от центра питания и имеет низкое качество сетевого напряжения, изменение сетевого напряжения вольтодобавочным трансформатором и транзисторным ключом будет производиться только в коридоре значений от -10(15) до +10(15) % от номинального значения сетевого напряжения) и так далее.

Необходимость введения в схему регулирующего устройства вольтодобавочного трансформатора, оправдана достаточно низким значением габаритной мощности, а также коротким временным интервалом работы этого трансформатора.

Способ регулирования осуществляется таким образом, чтобы монотонное снижение встречного напряжения обмоток вольтодобавочного трансформатора до нулевого уровня, приводило к плавному увеличению величины напряжения в статорных обмотках асинхронного двигателя, с нуля до номинального значения.

$$U_{a(e,c)}(t) = U_{A(B,C)}(t) - \Delta U_{a(e,c)}(t) \rightarrow U_{сн} \text{ при } \Delta U_{a(e,c)}(t) \rightarrow 0.$$

Необходимый закон регулирования напряжения статорных обмоток асинхронного двигателя определяется формой сигнала управления  $x(t)$  на входе с устройства широтно-импульсного модулирования. Этот сигнал в данном случае позволяет осуществить в начальный пусковой момент времени небольшой по длительности скачек статорного напряжения, с последующим монотонным возрастанием по линейному закону этого же напряжения.

Регулирование происходит за счет изменения времени длительности включенного и отключенного состояния транзисторного ключа в процессе каждого такта модуляции. Преимуществом трансформаторно-транзисторного модуля при регулировании напряжения статорных обмоток асинхронного двигателя является то, что существует возможность задать любую зависимость изменения дополнительного встречного напряжения, реализовать который может транзисторный ключ, получая ту или иную форму сигнала управления  $U_y$  с входа устройства широтно-импульсного модулирования.

В третьей главе также приведена оценка энергетической эффективности асинхронного электропривода с регулятором статорного напряжения, построенного на базе трансформаторно-транзисторного модуля. Учитывая то, что разрабатываемый и исследуемый трансформаторно-транзисторный модуль в своей конструкции имеет единственный транзисторный ключ, таким образом можно сделать вывод об уменьшении массогабаритных показателей самого модуля и меньших размерах необходимого радиатора естественного охлаждения, по сравнению с известными схемами активных выпрямителей, автономных инверторов и преобразователей частоты, к тому же радиатор может быть воздухоохлаждаемым, в отличие от мощных гидравлических систем охлаждения электроприводов мощностью 100кВт.

КПД модуля с учетом потерь рассеивания в демпфирующем устройстве цепи защиты от коммутационных перенапряжений, возникающих в транзисторном ключе, остается на достаточно высоком уровне (85-90)%, таким образом, доказана эффективность асинхронных электроприводов, построенных на базе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля, общепромышленных объектов, с точки зрения энергопотребления.

Целью построения четырёхквadrантного асинхронного электропривода на основе трансформаторно-транзисторного модуля, является расширение функциональных возможностей за счёт придания этому устройству свойств реверсивного четырёхквadrантного электропривода, регулирование которого было бы возможным не только в двигательном, но и в тормозном режимах работы при осуществлении двигателем вращения в прямом и обратном направлениях.

На рисунке 2 приведена схема четырёхквadrантного электропривода переменного тока.

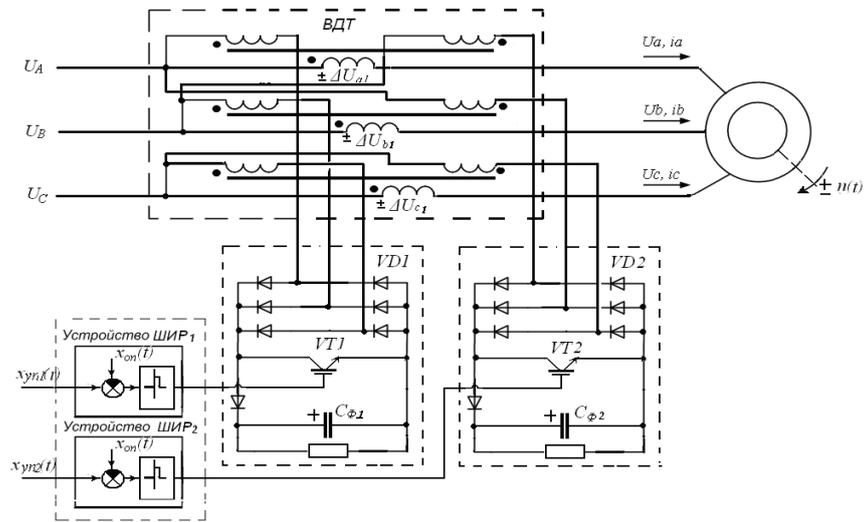


Рисунок 2 - Схема четырёхквadrантного позиционного асинхронного электропривода на основе трансформаторно-транзисторного модуля.

Для расширения функциональных свойств асинхронного привода в состав вольтодобавочного трансформатора достаточно включить ещё одну трёхфазную первичную обмотку, снабжённую вторым транзисторным ключом  $VT2$ . При этом, если первая обмотка с ключом  $VT1$  создаёт прямо чередующееся встречное напряжение отрицательного знака ( $-\Delta U_{a,b,c}$ ), то вторая первичная обмотка предназначена для индуцирования в общей вторичной обмотке согласного напряжения положительного знака ( $+\Delta U_{a,b,c}$ ) с обратным чередованием фаз. Это обеспечивается соответствующим перекрёстным подключением двух фаз второй обмотки к общему источнику сетевого напряжения.

Способ регулирования асинхронного двигателя во всех четырёх квадрантах механических характеристик  $\omega(M)$  при изменении частоты вращения  $\omega = 0 \div \pm\omega_0$  и электромагнитного момента  $M = 0 \div \pm M_{max}$  предлагается суммировать результирующее трёхфазное напряжение в статорных обмотках двигателя с приложенным в согласном направлении обратно чередующимся напряжением в обмотках второго трёхфазного вольтодобавочного трансформатора (рисунок 3).

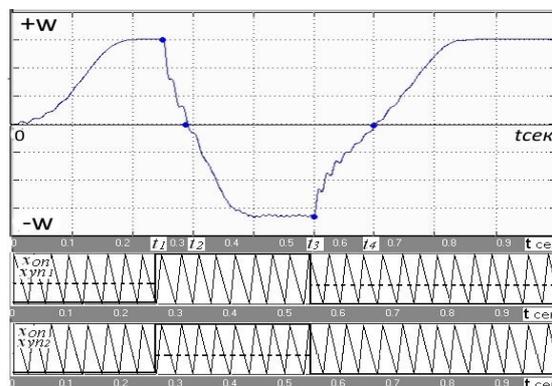


Рисунок 3 - Способ изменения частоты вращения асинхронного двигателя с помощью устройств широтно-импульсного регулирования.

Для работы в первом квадранте при  $\omega \geq 0; M \geq 0$  или четвёртом квадранте при  $\omega \leq 0; M \geq 0$  напряжение в обмотках первого трансформатора следует

регулировать ( $x_{yn1} \rightarrow 0$ ), а напряжение в обмотках второго трансформатора сохранять на нулевом уровне ( $x_{yn2} = 0$ ), в то время, как для работы во втором квадранте при  $\omega \geq 0; M \leq 0$  или третьем квадранте при  $\omega \leq 0; M \leq 0$  напряжение в обмотках первого трансформатора сохранять на постоянном уровне, равным напряжению питающей сети ( $x_{yn1} = \max$ ), а напряжение в обмотках второго трансформатора регулировать ( $x_{yn2} = \text{var}$ ). Повторяющиеся процесс торможения, а затем процесс разгона в прямом направлении будут происходить аналогично, при этом роль транзисторных ключей  $VT1$  и  $VT2$  взаимно поменяется. Управление транзисторными ключами осуществляется с помощью устройств широтно-импульсного регулирования (ШИР<sub>1</sub>, ШИР<sub>2</sub>).

Разработанная трёхвентильная схема трансформаторно-транзисторного модуля (рисунок 4), основанная на специальной конструкции трёхфазного вольтодобавочного трансформатора, представляет собой циклоконвертор с комбинированной фазо-широтно-импульсной модуляцией, может быть использована для применения в регулируемых электроприводах и для упрощения силовых цепей частотно-регулируемых приводов переменного тока, и минимизации количества силовых полупроводниковых ключей в их схемах. Каждая из двух первичных обмоток вольтодобавочного трансформатора образуют две схемы звезды, а одна вторичная обмотка, являющаяся общей для этих двух первичных обмоток, включается последовательно с трёхфазным сетевым источником питания, напряжения которого имеют чередование фаз А-С-В, и статорными обмотками асинхронного двигателя, таким образом, что первая из них присоединена встречно, а вторая – согласно с напряжениями сети, обеспечивая появление в общей вторичной обмотке трансформатора с помощью первой обмотки встречного напряжения с чередованием фаз А-С-В и с помощью второй обмотки – согласного напряжения с чередованием фаз В-А-С.

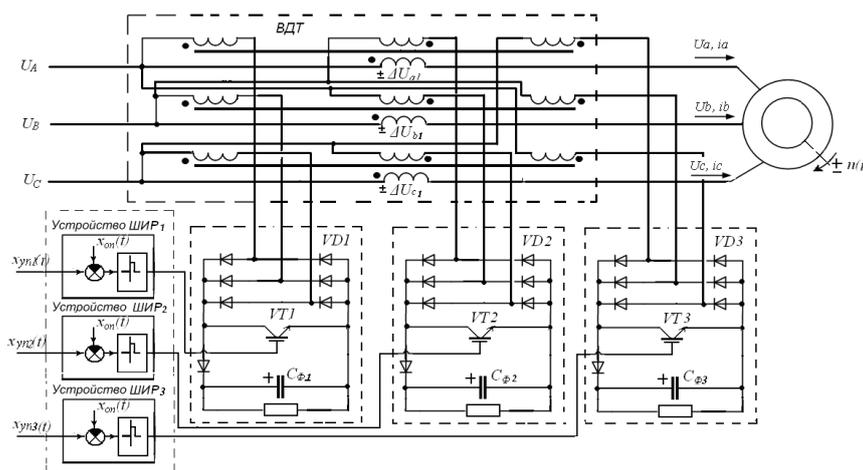


Рисунок 4- Схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе трёхвентильного трансформаторно-транзисторного модуля.

Способ управления заявленным устройством предлагается изменить таким образом, что бы каждое высокочастотное переключение первичных обмоток вольтодобавочного трансформатора на периоде сопровождалось изменением чередования фаз напряжений питающего источника, при этом для получения

чередования фаз источника А-С-В ( $-\Delta U_a, -\Delta U_c, -\Delta U_b$ ) все указанные транзисторные ключи при первом переключении на периоде выключают; при втором подключении для создания питающего напряжения с чередованием фаз В-А-С ( $+\Delta U_b, +\Delta U_a, +\Delta U_c$ ) включают транзисторные ключи в цепях питания первой и второй из указанных первичных обмоток вольтодобавочного трансформатора, а при третьем подключении для создания напряжения питания с чередованием фаз С-В-А ( $+\Delta U_c, +\Delta U_b, +\Delta U_a$ ) включают транзисторные ключи в цепях первой и третьей из числа указанных первичных обмоток вольтодобавочного трансформатора, причём для создания нулевых пауз в результирующем напряжении статора включают силовой транзистор в цепи первой и выключают силовые транзисторы в цепях второй и третьей из указанных ранее первичных обмоток.

**В четвертой главе** отражены результаты экспериментальных исследований асинхронных электроприводов, построенных на базе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля

На рисунке 5 изображена компьютерная модель асинхронного электропривода, выполненная на базе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля, построенная в программном пакете Matlab/Simulink. Данная модель иллюстрируют протекание пускового режима в разомкнутой системе асинхронного электропривода. Результаты, полученные в ходе компьютерного моделирования, представлены на рисунке 6.

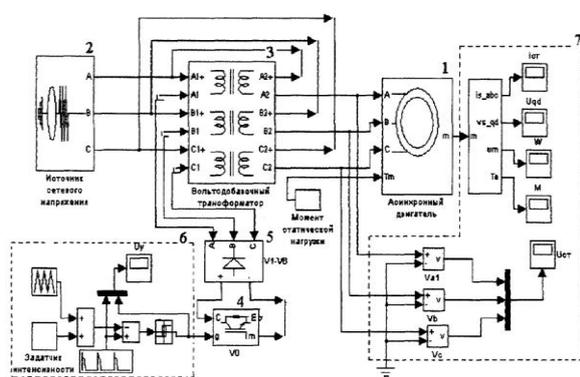
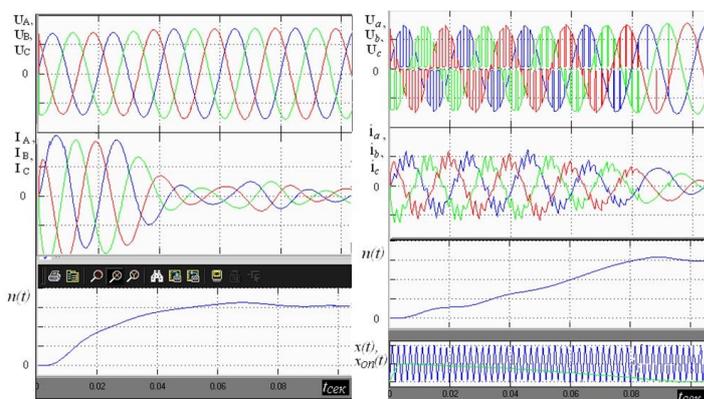


Рисунок 5 - Модель одноквadrантного асинхронного электропривода на основе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля.



а)

б)

Рисунок 6 – Осциллограммы, отражающие формы фазных напряжений, токов обмоток статора и скорости вала, полученные в результате компьютерного моделирования асинхронного двигателя при прямом (а) и плавном (б) пуске.

Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка и модель механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной (dq-оси) системе координат.

На рисунке 6б приведена осциллограмма форм результирующих фазных напряжений обмоток статора двигателя во время запуска асинхронного электропривода. Из этих полученных форм вытекает вывод о наличии зависимости между встречным добавочным напряжением отрицательного знака и результирующими напряжениями фаз обмоток статора. Данная зависимость заключается в том, что при встречном добавочном напряжении отрицательного знака, снижающегося монотонно по линейному закону до нулевого уровня, действующее значение результирующего напряжения на обмотках статора в свою очередь будет монотонно увеличиваться, при этом по завершению пускового переходного процесса достигнет максимальной амплитуды, уровень которой равен уровню номинального сетевого трехфазного питающего напряжения.

Сравнивая с процессом пуска асинхронного двигателя при прямом подключении к сети питания, основными характеристиками которого являются сравнительно высокое быстродействие (время запуска  $t_n=0,1c$ ), а также превышенный пусковой ток (как минимум в 3 раза выше установившееся значение) (рисунок 6а), полученный результат компьютерного моделирования при применении предлагаемого регулирующего устройства на основе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля, доказывает уменьшение практически на половину начального пускового скачка пусковых токов в фазах статорных обмотках  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ , обусловленное плавным увеличением значения напряжений в фазах обмоток статора по любому допустимо возможному закону его изменения во времени, что в свою очередь приводит к уменьшению электромагнитного момента и снижению быстродействия, с увеличением времени нарастания скорости вала  $n(t)$ . Часто, основным требованием достаточно большого числа технологических механизмов, участвующих в различных промышленных процессах, является подобное демпфирование переходных процессов при запуске асинхронного двигателя.

При проведении спектральный анализ гармонического состава статорного напряжения асинхронного двигателя на частоте ШИМ 1кГц, коэффициент ТНД составил 8%. Увеличение частоты модуляции ШИМ улучшает гармонический состав статорного напряжения асинхронного двигателя. Оптимальная несущая частота ШИМ около 2 кГц. Дальнейшее повышение частоты ШИМ приводит к существенному уменьшению коэффициента ТНД, однако имеет свои отрицательные последствия.

Сопоставление графика мгновенной потребляемой мощности из сети по фазе А в разомкнутой системе асинхронного одноквадрантного электропривода на основе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля, полученного интегрированием значений мгновенной мощности (рисунок 7), с графиком мгновенной потребляемой мощности из сети по фазе А в режиме пуска асинхронного двигателя, подключенного напрямую к питающей сети (рисунок 8), позволяет сделать главный вывод о том, что при применении унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля в асинхронных электроприводах для плавного пуска двигателя, количество потребляемой электроэнергии, затраченное на осуществление запуска двигателя

с нулевых начальных условий до установившейся скорости, уменьшается почти в 2 раза.

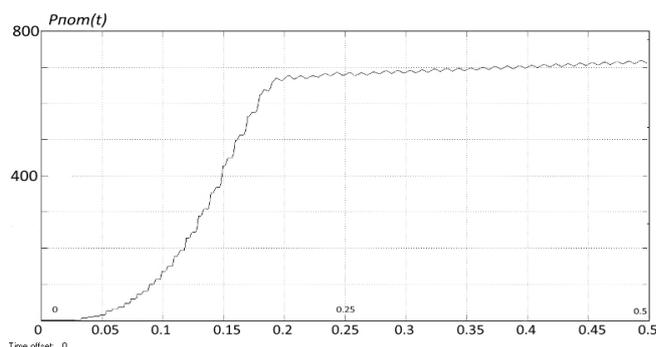


Рисунок 7 - График мгновенной потребляемой мощности из сети по фазе А в разомкнутой системе асинхронного одноквadrантного электропривода.

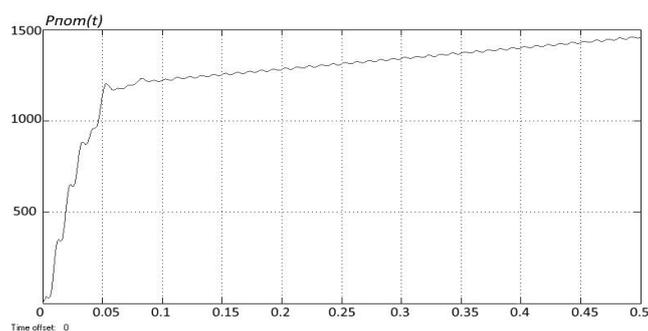


Рисунок 8 – График мгновенной потребляемой мощности из сети  $P_{nom}(t)$  по фазе А в режиме прямого пуска асинхронного двигателя

Результаты компьютерного моделирования процесса плавного запуска одноквadrантного асинхронного электропривода, построенного на базе одновентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля, подтверждаются Техническим отчетом №1/19 "Исследование пусковых характеристик электромашинного преобразователя частоты ПВС-8-800УЗ с использованием пускорегулирующего устройства", составленного в рамках экспериментального исследования, проведенного в электролаборатории ООО "Энергомониторинг".

На рисунке 9 представлена компьютерная модель асинхронного электропривода, построенного на базе двухвентильного трансформаторно-транзисторного модуля, в программной среде Matlab/Simulink. Результаты моделирования асинхронного электропривода на основе двухвентильного трансформаторно- транзисторного модуля, приведенные на рисунке 10.

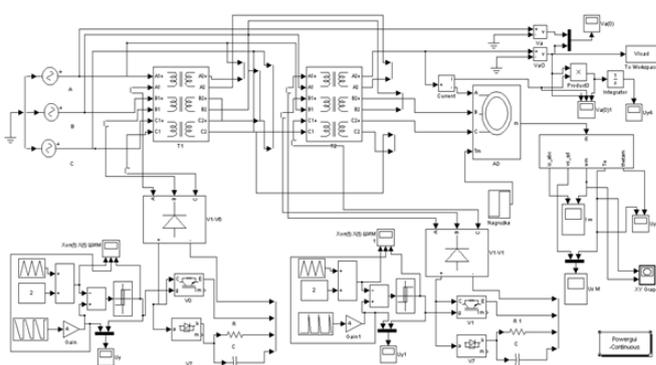


Рисунок 9 – Компьютерная модель асинхронного электропривода на основе двухвентильного трансформаторно- транзисторного модуля.

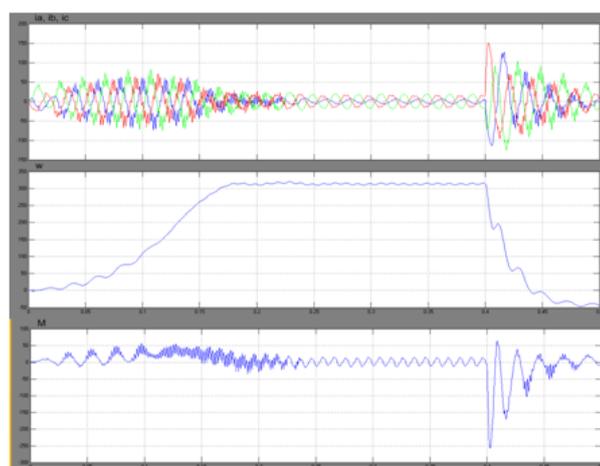


Рисунок 10 - Графики напряжения, скорости и момента вращения асинхронного электропривода, на основе двухвентильного трансформаторно- транзисторного модуля.

Результаты компьютерного моделирования полностью соответствуют, указанным принципам плавного пуска и подтверждают возможность перехода электропривода в тормозной режим с последующим разгоном асинхронного двигателя в обратную сторону.

Следует отметить, что применение двухвентильного трансформаторно-транзисторного модуля в составе позиционного асинхронного электропривода, является эффективным решением, с точки зрения энергосбережения, так как потребление электроэнергии остается также на меньшем уровне, чем потребление электроэнергии при прямом включении асинхронного двигателя в сеть.

При анализе гармонического состава выходного напряжения двухвентильного трансформаторно-транзисторного модуля на статорной обмотке асинхронного двигателя был получен коэффициент несинусоидальности равный 21.53%, данное значение входит в допустимые нормативными стандартами пределы.

Проверка работоспособности трёхвентильного трансформаторно-транзисторного модуля с комбинированной фазо-шиотно-импульсной модуляцией проведена путём компьютерного моделирования, на рисунке 11 приведена модель данного устройства в программе *MatLab/Simulink*. Представленные на рисунке 12 результаты моделирования воспроизводят традиционный характер изменения в процессе пуска асинхронного двигателя статорных напряжений, токов и скорости вала  $n(t)$ , доказывая эффективность разработанного устройства.

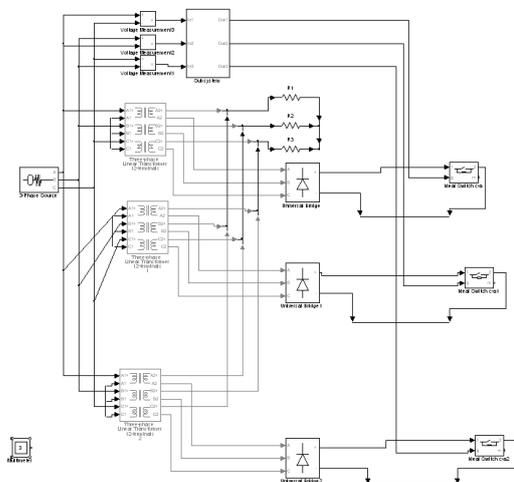


Рисунок 11 - Компьютерная модель трансформаторно-транзисторного модуля с комбинированной фазо-шиотно-импульсной модуляцией.

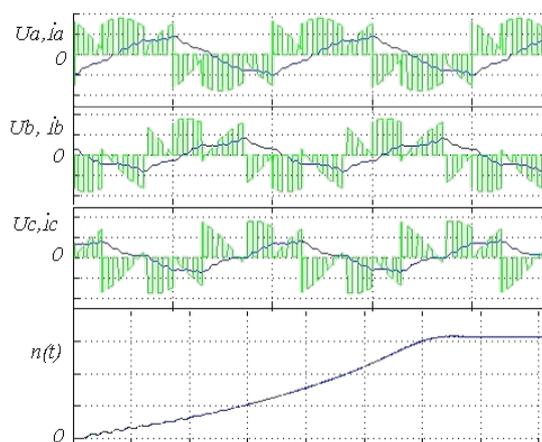


Рисунок 12 - Графики статорных напряжений и токов, скорости вала  $n(t)$ , полученные в процессе пуска асинхронного двигателя.

Представленные на рисунке 12 диаграммы дополняют картину частотного регулирования маловентильного асинхронного привода процессами изменения не только частоты, но величины выходного напряжения импульсного регулятора. Необходимо учитывать, что коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора равен единице, поэтому встречное подключение первой из

указанных обмоток к сети с помощью первого транзистора при условии выключенного состояния второго и третьего транзисторов приведёт к обнулению результирующего напряжения в статорных обмотках двигателя, а согласное подключение второй или третьей первичных обмоток с помощью второго и третьего транзисторов к разным сетевым фазам при включённом состоянии первого транзистора способно привести к формированию результирующего трёхфазного напряжения в статорных обмотках асинхронного двигателя с периодом, состоящим из трёх тактов в работе транзисторных ключей. Видно, что указанные переключения способны привести к возникновению в статорных обмотках асинхронного двигателя симметричной системы фазных напряжений и токов, основные гармоники которых, как известно, участвуют в получении вращающегося электромагнитного поля. Как следует из выше описанного принципа работы регулятора, получение паузы в фазных напряжениях статора  $U_a = U_b = U_c = 0$  обеспечивается без прерывания токов включением первого транзистора с одновременным выключением второго и третьего транзисторов, что в свою очередь доказывает энергоэффективность предлагаемого устройства.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана и исследована принципиально новая схема унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля для построения ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов средней мощности, конкурирующий с аналогами и ликвидирующего отрицательные качества существующих альтернативных технических решений в плане энергосбережения и сохранения качества потребляемой электроэнергии.

2. Разработан и исследован способ амплитудного регулирования статорного напряжения асинхронного двигателя, за счёт коммутации единственного ключа, представляющего собой IGBT-транзистор, обеспечивающий одновременное регулирование трехфазного напряжения на выходе с вольтодобавочного трансформатора во всех трёх фазах осуществляется без образования пауз в форме кривой выходного напряжения, что в свою очередь обеспечивает создание практически идеальных форм токов как на сетевом входе, так и в обмотках статора асинхронного двигателя.

3. Разработана энергетически эффективная цепь защиты трансформаторно-транзисторного модуля от коммутационных перенапряжений. Работа цепи защиты происходит с отсутствием возможных коммутационных потерь электроэнергии и отсутствием соответствующего ограничения в уменьшении коэффициента полезного действия.

4. Разработаны схемы асинхронных электроприводов на базе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля, определены параметры и принципы управления:

- Одновентильная схема трансформаторно-транзисторного модуля для управления режимом плавного пуска асинхронного двигателя;

- Четырёхквadrантный асинхронный электропривод с импульсным регулированием статорного напряжения, основанный на двухвентильной схеме трансформаторно-транзисторного модуля;

- Частотно-регулируемый асинхронный электропривода, выполненный на базе трёхвентильной схемы трансформаторно-транзисторного модуля с комбинированной фазо-широтно-импульсной модуляцией.

5. Показана согласованность результатов теоретического и экспериментального исследований.

**Практические рекомендации.** Разработанный унифицированный трансформаторно-транзисторный модуль имеет малые габариты и невысокую стоимость. Может быть использован в низковольтных распределительных электрических сетях общего назначения напряжением 0,4 кВ при осуществлении регулирования режимов запуска, торможения и позиционирования короткозамкнутого асинхронного двигателя электроприводов средней мощности (до 100 кВт).

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. Старостина, Я. К. Малоэлементное пуско-регулирующее устройство для асинхронного электропривода турбомеханизмов / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. - Т.16. - № 4-3. - С. 624-626

2. Старостина, Я. К. Пускорегулирующие устройства для асинхронного электропривода на диодно-транзисторных модулях / С. Н. Сидоров, Я. К. Старостина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2015. - № 4 (540). - С. 42-49

3. Старостина, Я. К. Построение ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов на основе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2017. - Т.17. - №2. - С. 67-74.

#### **Патенты на изобретение:**

4. Маловентильный четырёхквadrантный электропривод переменного тока и способ управления им : пат 2660187 Рос. Федерация : МПК Н 02 Р 1/26, Н 02 Р 1/22, Н 02 Р 3/20 / С. Н. Сидоров, Я. К. Старостина ; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. – №2017111355 ; заявл. 04.04.2017 ; опубл. 05.07.2018, Бюл. №19. - 10 с.

5. Пускорегулирующее устройство для асинхронного двигателя : пат 2596218 Рос. Федерация : МПК Н 02 Р 1/26, Н 02 Р 1/28 / С. Н. Сидоров, Я. К. Старостина ; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. – №2015117744/07 ; заявл. 12.05.2015 ; опубл. 10.09.2016, Бюл. №25. - 9 с.

#### **Публикации в изданиях, рецензируемых наукометрической базой Scopus:**

6. Starostina, Ya. K. Low-Element diode-transistor module use in the energy saving asynchronous positioning electric drive / Ya. K. Starostina, S. N. Sidorov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. (URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076338>).

7. Starostina, Ya. K. The Transformer and Transistor Module – The Principal Element of Control System Asynchronous Electric Drive in Systems of Positioning / Ya. K. Starostina / 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, 2018. – pp. 445-448. (URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8545952>).

#### **Публикации в других изданиях:**

8. Старостина, Я. К. Малоэлементное пуско–регулирующее устройство для асинхронного электропривода в режиме минимального энергопотребления / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Автоматизированный электропривод: тр. VIII междунар. (XIX Всерос.) конф. АЭП–2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 93–95.

9. Старостина, Я. К. Пуско–регулирующие устройства для асинхронного электропривода на диодно–транзисторных модулях / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: материалы междунар. науч.–техн. конф. – Севастополь: СевГУ, 2015. – С. 32–35.

10. Старостина, Я. К. Пускорегулирующие устройства для асинхронного электропривода на диодно–транзисторных модулях / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Автоматизированный электропривод: тр. IX междунар. (XX Всерос.) конф. АЭП–2016. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 297–300.

11. Старостина, Я. К. Энергетически эффективные цепи защиты пускорегулирующего устройства от коммутационных перенапряжений / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Электроэнергетика: материалы XII междунар. науч. – техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия–2017». – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2017. – Т. 3. – С. 285–287.

12. Старостина, Я. К. Трансформаторно–транзисторный модуль – главный элемент системы управления позиционным асинхронным электроприводом / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 11–й Всерос. науч.–техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2018 – С. 7–11.

13. Старостина, Я. К. Построение ряда асинхронных электроприводов на основе маловентильного транзисторно–трансформаторного модуля / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы XIV междунар. науч.–техн. конф. АПЭП–2018. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 2018. – Т. 7. – С. 283–287.

14. Старостина, Я. К. Построение ряда асинхронных электроприводов с улучшенными энергозатратными характеристиками на основе транзисторно–трансформаторного модуля / Я. К. Старостина // Энерго– и ресурсосбережение – XXI век: материалы XVI междунар. науч.–практ. конф. – Орёл: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2018. – С. 79–83.

СТАРОСТИНА Ярослава Константиновна

### **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСФОРМАТОРНО-ТРАНЗИСТОРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РЯДА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.11.19. Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,3.

Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 120 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета.

Ульяновский государственный технический университет,  
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.