

На правах рукописи

Нгуен Тхе Хиен



**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
С СИСТЕМОЙ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ
И АЛГОРИТМОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ
СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ДИАПАЗОНОМ
ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ КОММУТАЦИИ ИНВЕРТОРА**

*Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и
системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Васильев Богдан Юрьевич

Официальные оппоненты:

Мещеряков Виктор Николаевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра автоматизированного электропривода и роботехники, заведующий кафедрой;

Лукичев Дмитрий Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита диссертации состоится **04 июля 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В процессе модернизации шахт и рудников во Вьетнаме одной из ключевых задач становится усовершенствование горно-транспортного оборудования. Применение транспортных систем с двигателями внутреннего сгорания сопровождается значительными выбросами вредных веществ, что негативно сказывается на экологической ситуации. В период с 2019 по 2024 гг. горнодобывающая отрасль Вьетнама столкнулась с нехваткой топлива, вызванной ростом энергозатрат, что привело к увеличению себестоимости производства и энергопотребления. Прогнозируется, что к 2030 г. расходы на углеводородное топливо в стране возрастут на 22-25 % по сравнению с 2025 г.

В таких условиях для обеспечения устойчивого развития горной отрасли важно переходить на оборудование, оказывающее минимальное воздействие на окружающую среду. Одним из перспективных решений является внедрение электрического транспортного оборудования, которое способствует снижению экологического ущерба и укреплению устойчивого развития в этой отрасли. Однако его реализация сопровождается рядом технических сложностей, среди которых одной из главных задач остается повышение энергоэффективности.

Автоматизированный электропривод является важнейшим компонентом электрического транспортного оборудования. Его энергоэффективность во многом определяется качеством применяемых алгоритмов управления, включая алгоритмы модуляционных систем управления (далее - МСУ) и алгоритмы двигательных систем управления (далее - ДСУ). В модуляционных системах управления широко используются алгоритмы широтно-импульсной модуляции (далее - ШИМ) и их усовершенствованные модификации, такие как пространственно-векторная ШИМ и ШИМ с предмодуляцией. Однако их

применение сопряжено с рядом технических сложностей. Одной из ключевых проблем их применения в автоматизированных электроприводах является формирование высокочастотных импульсов напряжения на статор электродвигателей, формируемых инверторами преобразователей частоты. В спектре этих напряжений присутствуют высшие гармонические составляющие, что оказывает существенное влияние на электромагнитные и механические параметры двигателя. В частности, такие воздействия могут вызывать перегрев статора, повышение уровня вибраций и увеличение пульсаций электромагнитного момента. Эти факторы негативно сказываются на динамических и энергетических характеристиках двигателя, снижая его общую эффективность и надежность.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных развитию электроприводов, в современной научной литературе недостаточно глубоко изучены вопросы совершенствования и модернизации системы прямого управления моментом на основе трехуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой (далее - ТИСФНТ) в асинхронных электроприводах (далее - АЭП). Одним из ключевых направлений в этой области является повышение динамических и энергетических характеристик за счет разработки и внедрения эффективных алгоритмов модуляционной и двигательной систем управления.

Степень разработанности темы исследования. Современные исследования, посвященные развитию автоматизированных электроприводов, включая асинхронные электроприводы, представлены в трудах авторитетных ученых, таких как вьетнамские ученые Ф.К. Нгуен, К.М. Та, К.Т. Чан; русские ученые А.Е. Козярук, Ю.Н. Калачев, Р.Т. Шрейнер, В.В. Рудаков, В.В. Москаленко и иностранные ученые Johann W. Kolar, Bimal K. Bose, R.T.S. Christian, B.T. Andre.

В то же время проблемы развития тяговых асинхронных

электроприводов занимались такие исследователи, как вьетнамские ученые Т.Х. Нгуен, Х.С. Ле, Т. Б. Фам, Ю.М. Иньков, А. Е. Козярук, Andrzej M., Christian L. Stojanovic, Rüdiger R. Schmehl.

Объект исследования – асинхронный электропривод современного горнотранспортного оборудования.

Предмет исследования – система электродвижения современного горнотранспортного оборудования и способ повышения ее динамических и энергетических характеристик.

Цель работы – повышение динамических и энергетических характеристик асинхронных электроприводов системы электродвижения современного горнотранспортного оборудования.

Идея заключается в создании и внедрении алгоритмов стохастической модуляции со стабилизированным диапазоном изменения частоты коммутации инвертора в модуляционной системе управления, а также в модификации двигательной системы управления на основе системы прямого управления, применяемой в системе электродвижения современного горнотранспортного оборудования с использованием ТИСФНТ и нового алгоритма матричного регулятора.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проведение анализа факторов, влияющих на динамические и энергетические характеристики электроприводов в системе электродвижения современного горнотранспортного оборудования, с идентификацией факторов, оказывающих наиболее значительное влияние на их характеристики.

2. Исследование и разработка алгоритма стохастической модуляции со стабилизированным диапазоном изменения частоты коммутации инвертора преобразователя частоты для минимизации негативного влияния на динамические и энергетические характеристики электроприводов, при этом не ухудшая их управляемость асинхронного электропривода.

3. Анализ подходов к реализации систем прямого управления на базе ТИсФНТ, разработка нового алгоритма управления и исследование его влияния на характеристики асинхронного двигателя, включая частота вращения, высокочастотные пульсации потокосцепления статора и момента, КПД и средняя частота переключения транзисторов инверторе.

4. Разработка структуры АД в системе электродвижения современного горнотранспортного оборудования с применением разработанного алгоритма управления с использованием методов имитационного моделирования.

Научная новизна работы:

1. Определены границы параметров алгоритма стохастической модуляции, обеспечивающие устранение в спектре выходного напряжения и тока высших гармонических составляющих частот без ухудшения энергетических и динамических характеристик асинхронного электропривода.

2. Установлена зависимость базовых активных векторов выходного напряжения с регулируемыми переменными в качественной форме для синтеза системы прямого управления на базе ТИсФНТ, позволяющей уменьшить высокочастотные колебания момента и потокосцепления статора с повышением КПД асинхронного электропривода.

3. Установлена зависимость зон нечувствительности шестипозиционного релейного регулятора момента и границ изменения частот коммутации инвертора с целью снижения количества переключения транзисторов в системе прямого управления на базе ТИсФНТ.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по пунктам:

п. 1 – Развитие общей теории электротехнических ком-

плексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

п. 3 – Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана математическая модель алгоритма стохастической модуляции, реализованная с использованием компьютерного имитационного моделирования. Определены границы частоты коммутации инвертора, обеспечивающие эффективное устранение пакетов высших гармонических составляющих в спектре выходных напряжений и токах ПЧ. Это позволяет повысить эффективность преобразования энергии в автономном инверторе, улучшить его электромагнитную совместимость ТНсФНТ с асинхронным двигателем.

2. Разработана система управления АЭП, включающая блок регуляторов, состоящих из шестипозиционного релейного регулятора момента, двухпозиционного релейного регулятора потокосцепления статора, а также алгоритма ядра системы прямого управления. Предложенное решение обеспечивает повышение коэффициента полезного действия и снижение средней частоты коммутации инвертора как в переходных, так и в установившихся режимах работы АЭП при разработке и модернизации электрических машин с АЭП в подразделении исследований и развития энергетических машин Вьетнама ПАО «Viettel», что подтверждено актом внедрения основных результатов работы от 19 мая 2024.

Методология и методы исследования. Научные и практические результаты, представленные в диссертационной работе, были получены посредством применения следующих подходов и методов: теоретического аппарата обобщенной

электрической машины; современных методов управления и теории электроприводов; методик имитационного моделирования, включающих численное решение систем дифференциальных уравнений; подходов для оценки характеристик электромагнитной совместимости с использованием компьютерного моделирования; а также экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение алгоритма стохастической модуляции со стабилизированным диапазоном изменения частоты коммутации инвертора в модуляционной системе управления трехуровневым инвертором напряжения позволяет устранить в спектрах напряжения и тока низко- и высокочастотные гармонические составляющие с уменьшением средней частоты коммутации инвертора без ухудшения характеристик асинхронного электропривода.

2. Применение алгоритма прямого управления моментом на базе трёхуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой и шестипозиционного релейного регулятора момента, реализующего алгоритм стохастической модуляции, способствует снижению средней частоты переключений силовых транзисторов, уменьшению высокочастотных пульсаций токов и увеличению КПД АЭП, что позволяет повысить его динамические и энергетические характеристики.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования, а также подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными на электротехническом стенде ПАО «Viettel».

Апробация результатов. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: международной научно-технической конференции «Автоматизация-2022» (г. Сочи, 2022 г.),

на международной конференции МЕЕТ-2022 (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), на научной конференции студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. СанктПетербург, 2023 г.), XXV на международной молодёжной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2024» (г. Ухта, Республика Коми, 2024 г.).

Личный вклад автора. В рамках работы разработаны следующие научно-технические решения: компьютерная модель для анализа влияния различных алгоритмов в модуляционной системе управления инвертором преобразователей частоты на показатели электромагнитной совместимости ТИСФНТ и асинхронного двигателя; двигательная система управления на основе системы прямого управления с усовершенствованными алгоритмами управления преобразователем, обеспечивающая снижение динамических энергетических потерь и повышение КПД асинхронного электропривода.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее - Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 2 патента на изобретения.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 188 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 197 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 26 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность доценту кафедры электро-

энергетики и электромеханики Горного университета Васильеву Б.Ю. за поддержку и помощь в подготовке диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ актуальных проблем, связанных с эксплуатацией горно-транспортного оборудования во Вьетнаме. Установлено, что использование электрического оборудования является одной из перспективных и эффективных мер, направленных на улучшение экологической ситуации в горной промышленности. Рассмотрена структура АЭП и выполнен анализ проблем электромагнитной совместимости (ЭМС), возникающих при взаимодействии инвертора и АД.

Во второй главе выполнена разработка эквивалентной схемы АЭП для сравнительного анализа алгоритмов управления ПЧ по гармоническому составу выходного напряжения инвертора. Выполнена разработка алгоритма стохастической модуляции со стабилизированным диапазоном изменения частоты коммутации инвертора, позволяющего повысить уровень ЭМС электротехнических систем.

В третьей главе приведен анализ структуры СПУ АЭП с ТИСФНТ. Установлена зависимость базовых активных векторов выходного напряжения инвертора с регулируемыми переменными асинхронного двигателя. Разработана система управления АЭП с усовершенствованными алгоритмами управления ПЧ.

В четвёртой главе представлено технико-экономическое обоснование от внедрения разработанной в диссертации усовершенствованной системы электродвижения горно-транспортного оборудования.

Заключение отображает обобщенные выводы по результатам исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение алгоритма стохастической модуляции со стабилизированным диапазоном изменения частоты коммутации инвертора в модуляционной системе управления трехуровневым инвертором напряжения позволяет устранить в спектрах напряжения и тока низко- и высокочастотные гармонические составляющие с уменьшением средней частоты коммутации инвертора без ухудшения характеристик асинхронного электропривода.

Работа ПЧ (IGBT или MOSFET) в АЭП современного горно-транспортного оборудования сопровождается рядом технических проблем, главной из которых является генерация высокочастотных импульсов выходного напряжения инвертора. Это связано с принципом их работы, основанным на ШИМ. Эти импульсы напряжения формируют основные, высокочастотные и низкочастотные гармоники, которые значительно оказывают влияние качество работы АЭП:

- основная гармоника напряжения формирует потокосцепление статора, создавая основной магнитный поток, необходимый для нормального вращения двигателя;
- высокочастотные гармоники вызывают колебания потокосцепления статора, которые не участвуют в создании полезного момента, но приводят к нагреву статора и увеличению вибраций асинхронного двигателя;
- низкочастотные гармоники приводят к медленным пульсациям потокосцепления, которые усиливают колебания электромагнитного момента.

В современных системах ШИМ обычно реализуется с постоянной частотой коммутации инвертора. Среди используемых алгоритмов можно выделить синусоидальную ШИМ

(СШИМ), пространственно-векторную ШИМ и ШИМ с передоуляцией. Для исследования различного алгоритма модуляции была разработана эквивалентная схема АЭП, которая включает источник постоянного напряжения $U_{dc} = 100$ В, ТИСФНТ с емкостью конденсаторов 1 мкФ, эквивалентную трехфазную симметричную нагрузку с активным сопротивлением 1 Ом и индуктивностью 0,5 мГн, частоту управляемых сигналов (f_1) 50 Гц. Результаты исследования разработанной схемы с использованием компьютерных имитационных моделей в сфере Matlab/Simulink и постоянной частотой коммутации (f_{set}) 5000 Гц представлены на рисунке 1(а). На этом рисунке можно отметить, что этот алгоритм модуляции формирует пакеты высших гармонических составляющих в спектре выходных напряжений и токов инвертора, усиливая их искажения. Эти гармоники могут вызывать резонансные явления в АД, что приводит к нагреву статора, увеличению вибраций, а также усилению пульсаций электромагнитного момента АД, и снижению эффективности и надежности его работы.

Для решения проблем с высшими гармоническими составляющими в АЭП, использующих ТИСФНТ, могут быть применены различные стратегии. Одним из эффективных решений является внедрение модифицированных систем управления инвертором, основанных на ШИМ с переменной частотой коммутации – рисунок 1(б). Особенно перспективным является использование алгоритма стохастической модуляции, обеспечивая значительное снижение уровня высших гармонических составляющих в спектре выходных напряжения и тока без ухудшения ее динамических и энергетических характеристик АЭП.

Проблема применения алгоритма стохастической модуляции без ограничения частоты коммутации инвертора заключается в том, что использование такого алгоритма модуляции в АЭП может привести к значительному увеличению частоты

коммутации инвертора (рисунок 1(в)). Это, в свою очередь, может привести к росту потерь мощности в ПЧ. Увеличенная частота коммутации также сопровождается повышенным тепловыделением и увеличением риска тепловых повреждений транзисторов ПЧ. В связи с этими проблемами был разработан алгоритм стохастической модуляции со стабилизированным диапазоном изменения частоты коммутации, то есть частоты несущих сигналов находятся в определённых пределах. На рисунке 2 показаны спектрограммы выходного напряжения инвертора при применении разработанного алгоритма в АЭП, а спектрограммы выходного тока – рисунок 3. На рисунке 4 показано количество переключения транзисторов инвертора VT и на рисунке 5 – зависимость энергетических и динамических характеристик АЭП от коэффициента модуляции m . Осциллограммы построены методом компьютерного имитационного моделирования эквивалентной схемы АЭП для следующих диапазонов частот несущих сигналов ($f_{\min} \div f_{\max}$): (а) 1000÷5000 Гц, (б) 2000÷5000 Гц, (в) 3000÷5000 Гц и (д) 4000÷5000 Гц.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы о преимуществах разработанного алгоритма:

- увеличение уровня электромагнитной совместимости: на основании анализа таблицы 1 и 2, рисунках 2 и 3 можно отметить, что максимальная амплитуда гармоник при применении такого алгоритма демонстрирует низкие значения во всех исследовательских диапазонах частот. Гармонические составляющие стремятся концентрироваться на крайних диапазонах частот несущих сигналов. Значительное снижение максимальных амплитуд гармоник способствует повышению электромагнитной совместимости электротехнических систем;

- повышения эффективности преобразования энергии: поскольку амплитуды гармоник уменьшаются, электромагнитные помехи (ЭМП) также уменьшаются, и, следовательно, потери

из-за ЭМП уменьшены, что повышает эффективность преобразования энергии ТИСФНТ;

- на рисунке 4 показано, что количество переключения транзисторов инвертора (красная линия) находится в среднем значении между $f_{\min}$ и $f_{\max}$ (черные линии). Это, в свою очередь, приводит к уменьшению частоты коммутации инвертора напряжения и снижению его тепловыделений и вероятности теплового повреждения транзисторов в ПЧ;

- сохранение управляемости: в независимости от коэффициента модуляции (m) сохраняет энергетическую и динамическую характеристики АЭП (рисунок 5).

Таким образом, применение разработанного алгоритма позволяет устранить в спектрах напряжения и тока низко- и высокочастотные гармонические составляющие с уменьшением средней частоты коммутации инвертора без ухудшения характеристик АЭП.

2. Применение алгоритма прямого управления моментом на базе трёхуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой и шестипозиционного релейного регулятора момента, реализующего алгоритм стохастической модуляции, способствует снижению средней частоты переключений силовых транзисторов, уменьшению высокочастотных пульсаций токов и увеличению КПД АЭП, что позволяет повышение его динамических и энергетические характеристики.

Принцип СПУ заключается в расчете и создании на обмотках статора такого вектора выходного напряжения инвертора ПЧ, который обеспечивает целенаправленные изменения регулируемых параметров двигателя: потокосцепления статора и электромагнитного момента АД.

СПУ состоит из двух основных канала регулирования (рисунок 6): первый канал предназначен для управления потокос-

цеплением статора (Ψ_s), обеспечивая его стабилизацию и контроль; второй канал представляет собой двухконтурную структуру, в которой внешний контур отвечает за регулирование частоты вращения, а внутренний – за управление электромагнитным моментом двигателя (М).

СПУ в АЭП на базе двухуровневого инвертора (ДИ) основывается на двухпозиционном релейном регуляторе потокосцепления статора $d\Psi = [+1; 0]$, (рисунок 7(а)) и трехпозиционном релейном регуляторе момента $dM = [+3; 0; -3]$ (рисунок 7(б)). Пространство векторов напряжения делится на шесть секторов, который охватывает угол в 60° (таблица 3).

При использовании СПУ на базе ДИ возникают несколько значительных недостатков. Ограниченное количество выходных напряжений (восемь – рисунок 8(а)) ДИ затрудняет точное формирование требуемого вектора выходного напряжения, что негативно сказывается на точности управления моментом и потокосцеплением статора. А в рабочих режимах для обеспечения требуемых характеристик ДИ необходимо работать на высоких частотах коммутации инвертора, что существенно повышает коммутационные потери в силовых ключах.

Для устранения этих недостатков ДИ в СПУ АЭП целесообразно использовать ТИСФНТ, который имеет более количество выходных напряжений (двадцать семь – рисунок 8(б)), позволяя значительно повысить точности управления параметров двигателя, а также снизить частоту переключений каждого силового ключа. Традиционная СПУ АД на базе ТИСФНТ также основывается на двухпозиционном релейном регуляторе потокосцепления статора и трехпозиционном релейном регуляторе момента. В такой системе пространство векторов напряжения ТИСФНТ делится на 12 секторов, который охватывает угол в 30° (таблица 4). Возможные состояния переключения строек инвертора представлены на таблице 5.

Таблица 5 – Возможные состояния ТИСФНТ (х-стойки)

Состояние	Sx1	Sx2	Sx3	Sx4
P	1	1	0	0
O	0	1	1	0
N	0	0	1	1

Проблема традиционной СПУ на базе ТИСФНТ заключается в том, в переходном процессе использование такой системы управления приводит к значительному увеличению частоты коммутации инвертора, и в рабочих процессах с нагрузкой первый канал управления потокоцеплением статора не обеспечивает его стабилизацию и контроль в зоне нечувствительности. В связи с этими проблемами была разработана СПУ на базе ТИСФНТ с шестипозиционным релейным регулятором момента. Оценка выходных векторов напряжения можно делать вывод, что выходные векторы напряжения сформируются три активных уровневых вектора напряжения со значениями:

– первые уровневые векторы напряжения: V1 POO, V2 PPO, V3 OPO, V4 OPP, V5 OOP, V6 POP, V8 ONN, V9 OON, V10 NON, V11 NOO, V12 NNO, V13 ON ($U_{dc}/3$);

– вторые уровневые векторы напряжения: V14 PON, V15 OPN, V16 NPO, V17 NOP, V18 ONP, V19 PNO ($U_{dc}/\sqrt{3}$);

– третьи уровневые векторы напряжения: V20 PNN, V21 PPN, V22 NPN, V23 NPP, V24 NNP, V25 PNP ($2U_{dc}/3$).

Предложенная таблица переключения напряжения ТИСФНТ (таблица 6). Отличие предложенной таблицы заключается в том, что во втором канале для управления электромагнитным моментом двигателя используется шестипозиционный релейный регулятор $dM = [+3; +2; +1; -1; -2; -3]$ (рисунок 9). Разработка таблицы заключается в двух основных аспектах: сохранение зоны нечувствительности регулятора момента ($c = cost$) и выбор векторов напряжения инвертора для минимизации частоты коммутации инвертора.

Применение алгоритма СПУ на базе ТИСФНТ с шестипозиционным релейным регулятором момента, в отличие от базового трехпозиционного релейного регулятора момента, приводит к следующим преимуществам:

- снижение коэффициента искажения тока при различных нагрузках (рисунки 10(а) и 10(б)). Это, в свою очередь, значительно уменьшает пульсации токов и потокосцепления статора, что позволяет уменьшить высокочастотные пульсации момента;

- увеличение КПД АЭП на 2 % (рисунок 10(в)).

- снижение средней частоты коммутации на 15 % в переходном процессе и на 2 % в установившихся режимах, что приводит к значительному уменьшению коммутационных потерь. Это способствует снижению тепловыделений и вероятности теплового повреждения транзисторов (рисунок 10(г)).

Таким образом, применение разработанного алгоритма способствует снижению высокочастотных пульсаций токов, повышению КПД АЭП, а также уменьшению частоты переключений силовых транзисторов. Это, в свою очередь, обеспечивает улучшение динамических и энергетических характеристик АЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи по повышению динамических и энергетических характеристик АЭП за счет создания и внедрения алгоритмов стохастической модуляции с ограничением диапазона изменения частоты коммутации инвертора в модуляционной системе управления и модификации двигательной системы управления на основе СПУ на базе трехуровневого инвертора и нового алгоритма матричного регулятора.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ актуальных проблем эксплуатации электрические оборудования в горной промышленности, выявлено, что современные электрические горно-транспортные оборудования целесообразно рассматриваются как одну из эффективных мер по улучшению экологического воздействие и повышению экономической устойчивости развития.

2. Разработана эквивалентная схема автоматизированного асинхронного привода в программной среде имитационного моделирования Matlab, позволяющая оценивать уровень электромагнитной совместимости выходных напряжений и токов ТИсФНТ при различных алгоритмах его управления.

3. Установлено, что использование в управлении преобразователем частоты алгоритма стохастической широтно-импульсной модуляцией со стабилизированным диапазоном коммутации инвертора позволяет устранить в спектре выходного напряжения и тока высшие гармонические составляющие без ухудшения энергетической и динамической характеристик асинхронного привода; и также снизить пульсации выходных токов автономного инвертора.

4. Разработана ДСУ АЭП, включающей блока релейных регуляторов (шестипозиционный регулятор момента и двухпозиционный регулятор потокосцепления статора) и ядра системы прямого управления и ее отладка.

5. Установлено, что внедрение СПУ на ТИсФНТ, управляемым разработанной таблицей переключения напряжения, значительно улучшило энергетической и динамической характеристик АЭП с уменьшенной средней частотой коммутации инвертора.

6. Проведено технико-экономическое обоснование эффективности внедрения разработанной усовершенствованной системы электродвижения и предложенного способа ее управления, демонстрирующее снижение эксплуатационных затрат.

Дальнейшее исследование направлено на развитие и

практическую реализацию предложенных алгоритмов по повышению энергетических и динамических характеристик АЭП за счёт усовершенствования алгоритмов стохастической модуляции и систем прямого управления. В частности, планируется адаптация и внедрение разработанных алгоритмов в условиях горной промышленности Вьетнама с учётом её специфики, а также проведение анализа экономической эффективности при эксплуатации модернизированных АЭП на базе ТИСФНТ и матричных регуляторов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Нгуен, Т.Х. Анализ автономных роботизированных машин горного производства с автономными системами электродвижения / **Т.Х. Нгуен**, Б.Ю. Васильев // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 5 (163). С. 59-69. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69.

2. Васильев, Б.Ю. Анализ системы широтно-импульсной модуляции с функциональным изменением частоты коммутации в электроприводах транспорта с аккумуляторным источником / Б.Ю. Васильев, **Т.Х. Нгуен** // Горное оборудование и электромеханика. 2024. №3 (173). С. 3-12. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-3-3-12.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

3. Васильев, Б.Ю. Анализ влияния полупроводниковых преобразователей на батарею и двигатель асинхронного привода шахтных горно-транспортных машин / Б.Ю. Васильев, **Т.Х. Нгуен** // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 299–318. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_299.

4. Vasilev B.Y. Stochastic Pulse-Width Modulation and Modification of Direct Torque Control Based on a Three-Level Neutral-Point Clamped Inverter / B.Y. Vasilev, **T.H. Nguyen** // Energies 2024 Vol.17, Issue 23. 24 p. <https://doi.org/10.3390/en17236017>.

Патенты:

5. Патент на изобретение № 2808304 Российская Федерация, СПК В60L 50/51 (2019.01) В60L 50/60 (2019.01) В60L 15/20 (2006.01). Система электродвижения автономных шахтных горно-транспортных средств. Заявка № 2023110528 : заявл. 25.04.2023 : опубл. 28.11.2023, Бюл. № 34 / Васильев Б.Ю., **Нгуен Т.Х.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 9 с., ил.

6. Патент на изобретение № 2821420 Российская Федерация, СПК Н02Р 21/12 (2024.01). Устройство прямого управления моментом асинхронного двигателя на основе трехфазного трехуровневого автономного инвертора NPC. Заявка № 2023135524 : заявл. 27.12.2023 : опубл. 24.06.2024, Бюл. № 18 / Васильев Б.Ю., **Нгуен Т.Х.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 10 с., ил.

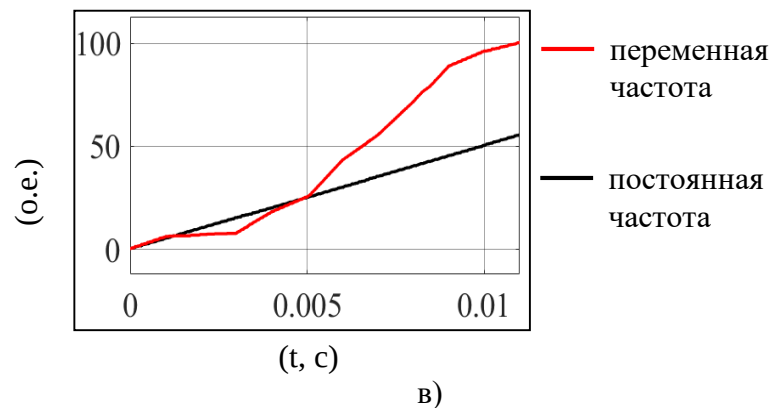
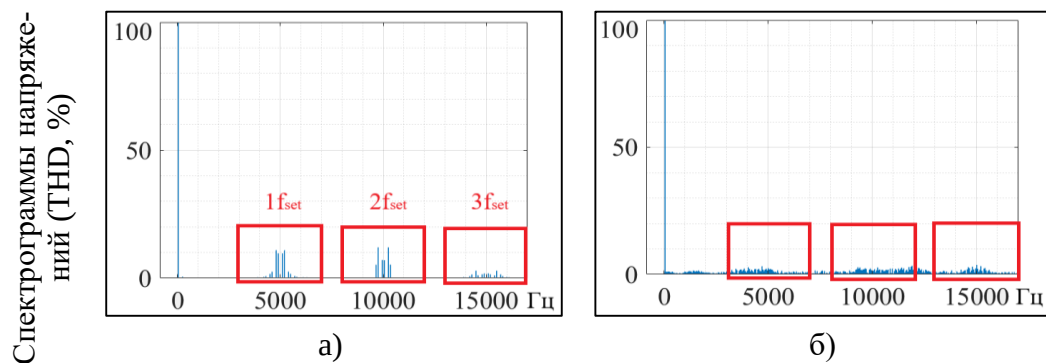
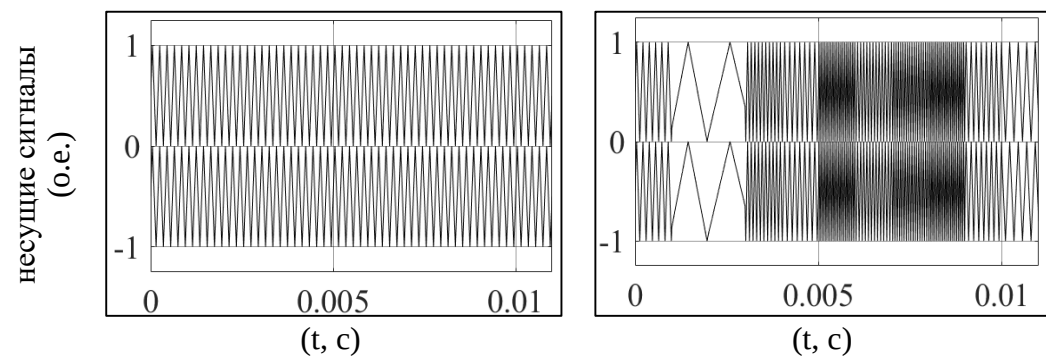


Рисунок 1 – Широтно-импульсная модуляция: а) с постоянной частотой коммутации инвертора; б) с переменной частотой коммутации инвертора; в) средняя частота переключения транзисторов

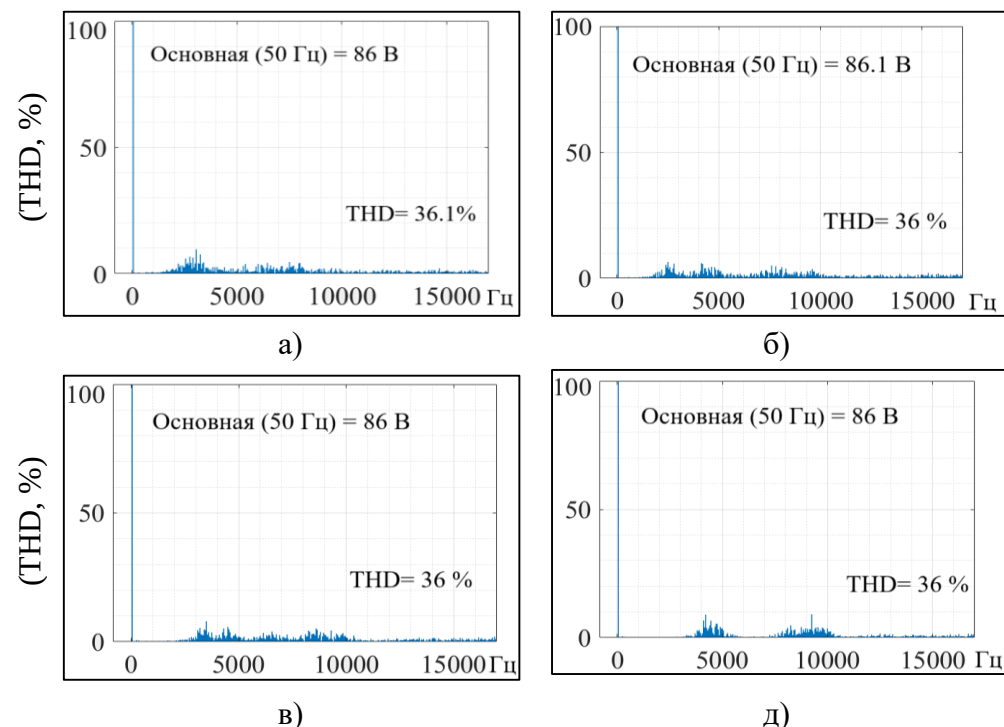


Рисунок 2 – Спектрограммы выходного напряжения: а) 1000÷5000 Гц; б) 2000÷5000 Гц; в) 3000÷5000 Гц; д) 4000÷5000 Гц

Таблица 1 – Максимальная амплитуда гармоника напряжения

Частотная область, Гц	Максимальная амплитуда гармоника напряжения при f_{set} , В				
	5000	1000÷5000	2000÷5000	3000÷5000	4000÷5000
1000	0,1	2	0,5	0,1	0,2
2000	0,1	3	4	0,1	0,2
3000	0,1	5	2	3	0,2
4000	2	4	5	6	2
5000	11	3	5	3	9
6000	2	2	6	2	0,5
7000	0,1	2	2	5	0,3
8000	0,1	2	2	2	6
9000	5	4	2	1	6
10000	12	2	1	1	3

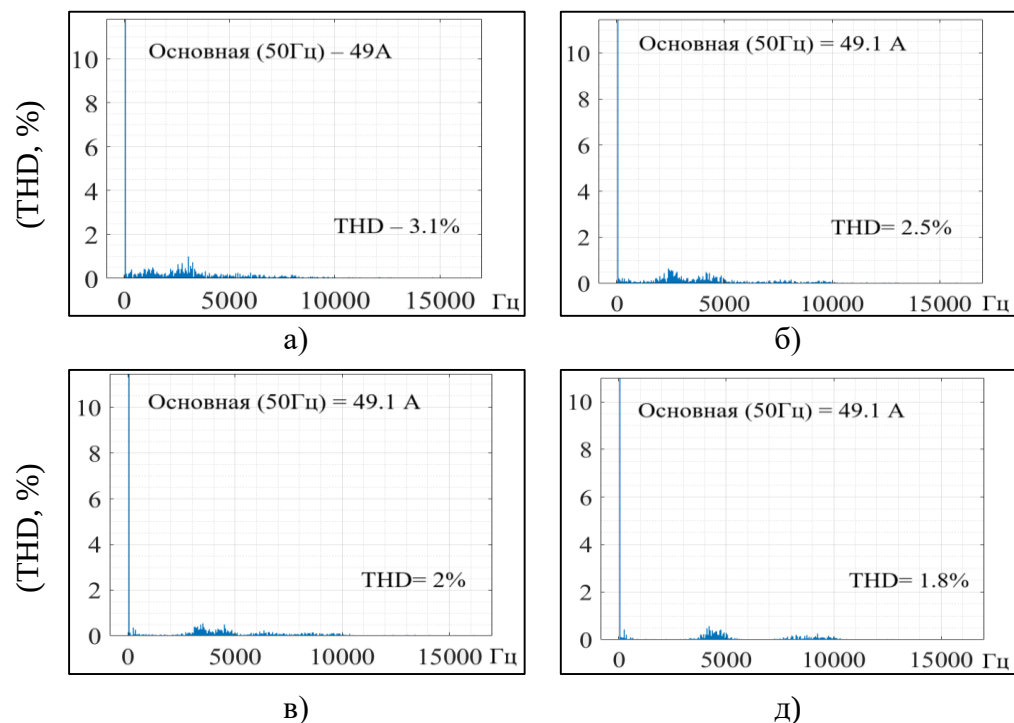


Рисунок 3 – Спектрограммы выходного тока: а) 1000÷5000 Гц; б) 2000÷5000 Гц; в) 3000÷5000 Гц; д) 4000÷5000 Гц

Таблица 2 – Максимальная амплитуда гармоника тока

Частотная область, Гц	Максимальная амплитуда гармоника тока при f_{set} , А				
	5000	1000÷5000	2000÷5000	3000÷5000	4000÷5000
1000	0,4	0,8	0,4	0,3	0,1
2000	0,01	0,7	0,4	0,05	0,01
3000	0,01	0,5	0,3	0,3	0,01
4000	0,1	0,5	0,3	0,3	0,4
5000	0,8	0,3	0,2	0,1	0,6
6000	0,1	0,1	0,1	0,05	0,01
7000	0,01	0,1	0,1	0,1	0,01
8000	0,01	0,1	0,05	0,02	0,1
9000	0,2	0,1	0,02	0,02	0,1
10000	0,4	0,04	0,01	0,01	0,01

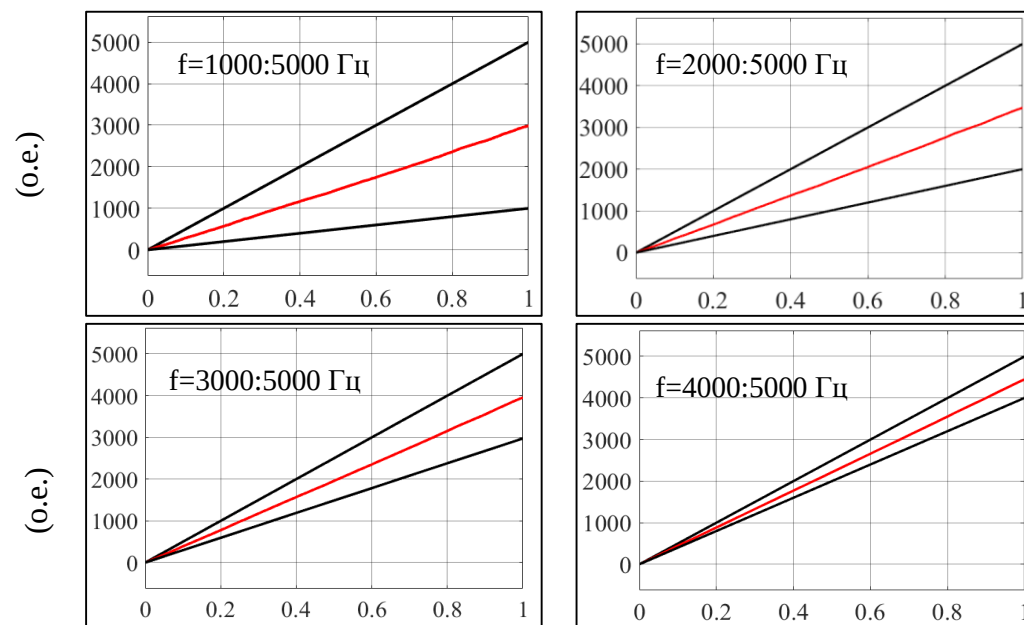


Рисунок 4 – Количество переключения транзисторов за 1 с

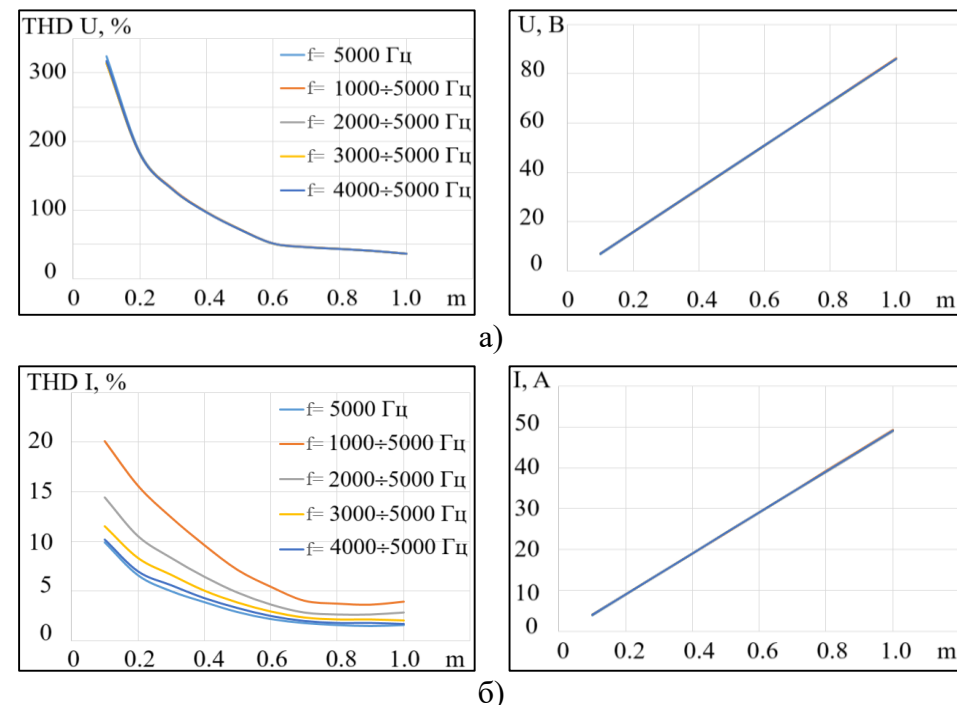


Рисунок 5 –Характеристик АЭП: а) напряжение; б) ток

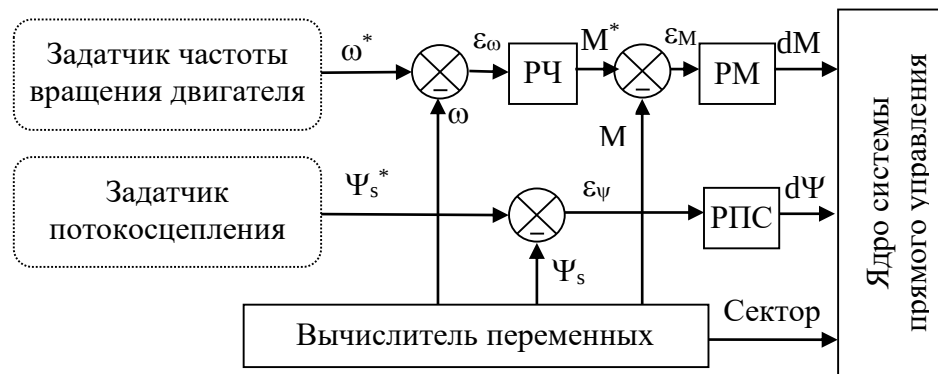
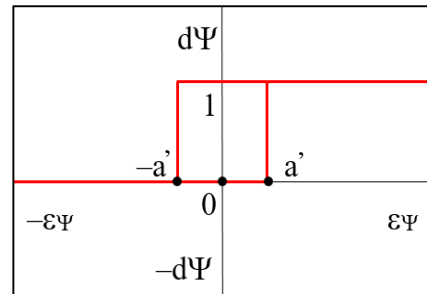


Рисунок 6 – Структурная схема каналов регулирования системы прямого управления моментом асинхронного электропривода

$$d\Psi_s = \begin{cases} 1, \text{если } \varepsilon_\psi(p) > a, \text{если } \frac{d[\varepsilon_\psi(p)]}{dt} > 0 \\ -1, \text{если } \varepsilon_\psi(p) < -a, \text{если } \frac{d[\varepsilon_\psi(p)]}{dt} < 0 \end{cases}$$

а)



$$dM = \begin{cases} 3, \text{если } \varepsilon_M(p) > b \\ -3, \text{если } \varepsilon_M(p) < -c \end{cases} \text{если } \frac{d[\varepsilon_M(p)]}{dt} > 0 \\ 0, \text{если } -c < \varepsilon_M(p) < c \\ \begin{cases} 3, \text{если } \varepsilon_M(p) > c \\ -3, \text{если } \varepsilon_M(p) < -b \end{cases} \text{если } \frac{d[\varepsilon_M(p)]}{dt} < 0 \end{cases}$$

б)

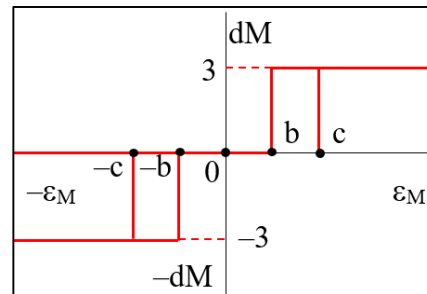
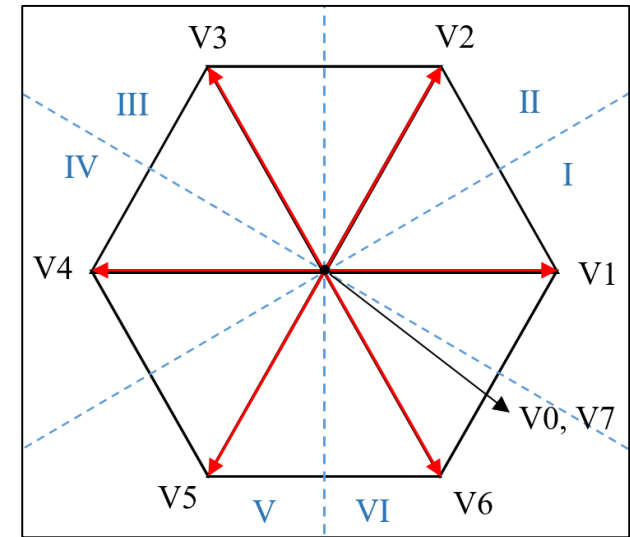
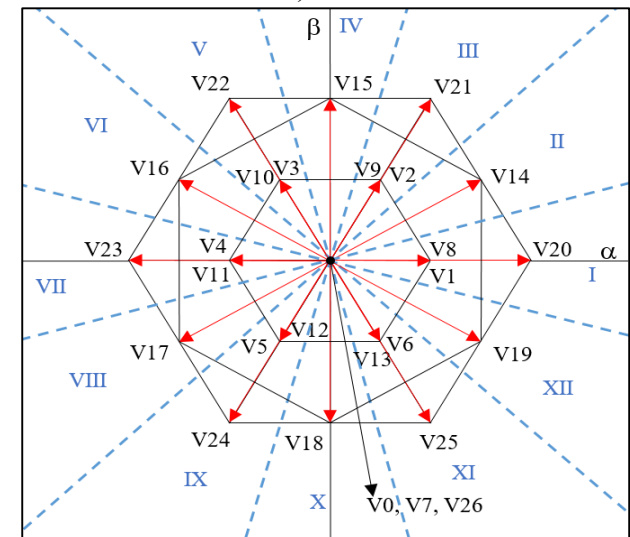


Рисунок 7 – Характеристики релейных регуляторов: а) двухпозиционный релейный регулятор потокосцепления статора; б) трехпозиционный релейный регулятор момента



а)



б)

Рисунок 8 – Годограф: а) двухуровневый инвертор; б) трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой

Таблица 3 – Таблица переключения напряжения двухуровневого инвертора

dΨ	dM	Номер сектора					
		I	II	III	IV	V	VI
+1	+3	2	3	4	5	6	1
	0	7	0	7	0	7	0
	-3	6	1	2	3	4	5
0	+3	3	4	5	6	1	2
	0	0	7	0	7	0	7
	-3	5	6	1	2	3	4

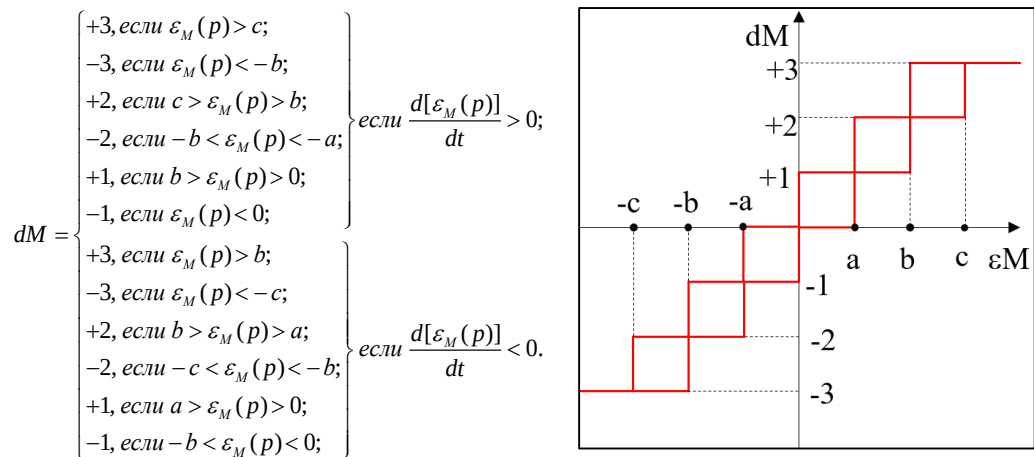


Рисунок 9 – Характеристика шестипозиционного релейного регулятора

Таблица 6 – Предложенная таблица переключения напряжения ТИСФНТ

dΨ	dM	Номер сектора											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
+1	+3	21	15	22	16	23	17	24	18	25	19	20	14
	+2	14	21	15	22	16	23	17	24	18	25	19	20
	+1	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	8	8
	-1	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
	-2	19	25	14	20	15	21	16	22	17	23	18	24
	-3	25	19	20	14	21	15	22	16	23	17	24	18
0	+3	22	16	23	17	24	18	25	19	20	14	21	15
	+2	16	22	17	23	18	24	19	25	14	20	15	21
	+1	10	10	11	11	12	12	13	13	8	8	9	9
	-1	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4
	-2	17	24	18	25	19	20	14	21	15	22	16	23
	-3	24	18	25	19	20	14	21	15	22	16	23	17

Таблица 4 – Таблица переключения напряжения трехуровневого инвертора

dΨ	dM	Номер сектора											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
+1	+3	21	15	22	16	23	17	24	18	25	19	20	14
	0	0	0	7	7	26	26	0	0	7	7	26	26
	-3	25	19	20	14	21	15	22	16	23	17	24	18
0	+3	22	16	23	17	24	18	25	19	20	14	21	15
	0	26	26	0	0	7	7	26	26	0	0	7	7
	-3	24	18	25	19	20	14	21	15	22	16	23	17

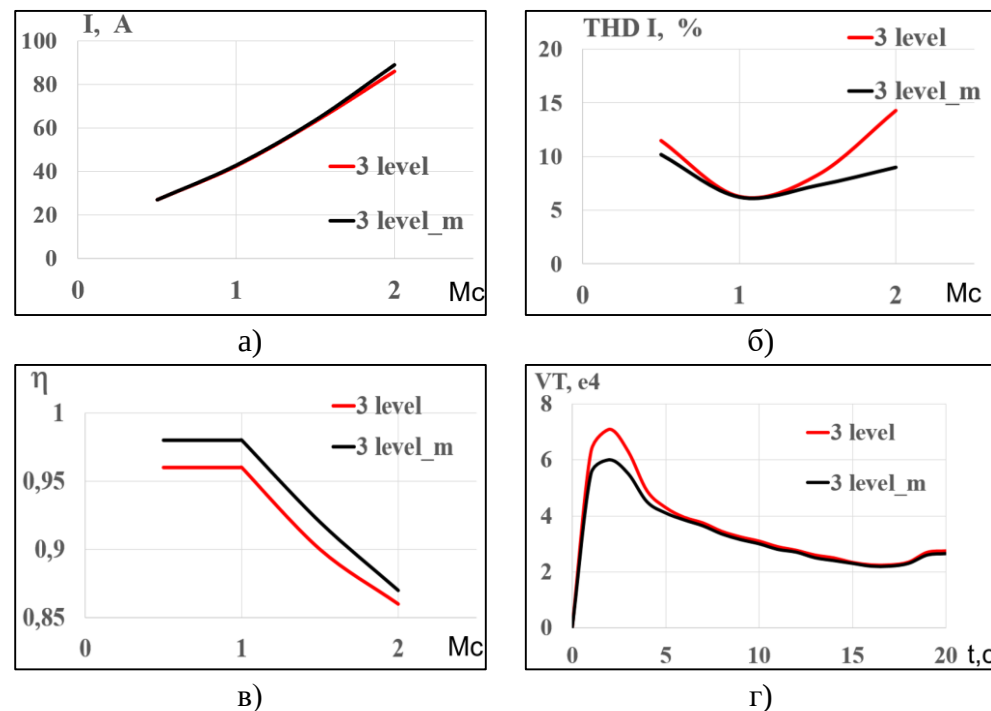


Рисунок 10 – Характеристики асинхронного электропривода: а) коэффициент искажения тока статора при различных нагрузках; б) амплитуда тока статора; в) средняя частота переключений транзисторов; д) коэффициент полезного действия АЭП. Примечание: 3 level – традиционная СПУ асинхронного двигателя на базе ТИСФНТ; 3 level_m – модификация СПУ асинхронного двигателя на базе ТИСФНТ с шестипозиционным релейным регулятором момента. Примечание: Mc – номинальная нагрузка (Н.м).