

На правах рукописи



Глызин Илья Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СО СТАТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта», РУТ (МИИТ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Иньков Юрий Моисеевич

Официальные оппоненты: **Вольский Сергей Иосифович,**

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы», профессор.

Коротков Сергей Михайлович,

кандидат технических наук, ООО «ММП- Ирбис», начальник отдела АС/DC источников питания общего назначения.

Ведущая организация - Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»)

Защита диссертации состоится «23» июня 2022г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9, аудитория 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан «___» апреля 2022г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Российские железные дороги являются второй по величине транспортной системой мира. Протяженность электрифицированных железных дорог в России составляет более 43 тыс. км. «Программой электрификации участков железных дорог сети ОАО «РЖД» на период до 2050 г.» предусмотрена электрификация участков железных дорог переменным током, а также перевод с постоянного на переменный ток нескольких участков железных дорог, что обуславливает востребованность электрического подвижного состава (ЭПС) переменного тока на сети железных дорог.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 года № 204 повышение средней скорости движения грузопотока до 1319 км/сут. Повышение маршрутной скорости движения поездов является одним из условий эффективного развития транспортной системы Российской Федерации. Железнодорожный транспорт является основным видом транспорта России. Одним из приоритетных направлений развития ЭПС является повышение энергетической эффективности и, как следствие, уменьшение стоимости жизненного цикла ЭПС.

На ЭПС переменного тока преобразование электрической энергии, поступающей из контактной сети к тяговым двигателям, осуществляется преобразовательной системой, состоящей из тягового трансформатора и вентильного преобразователя. Преобразовательная система серийно выпускаемых электровозов переменного тока состоит из тягового трансформатора и выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП).

Тяговый электропривод современного электровоза переменного тока состоит из преобразовательной системы, в состав которой входят тяговый трансформатор, полупроводниковый преобразователь электроэнергии и асинхронные тяговые двигатели. При этом наиболее важной задачей является создание способов и алгоритмов управления, обеспечивающих требуемые тягово-энергетические показатели и электромагнитную совместимость электровоза с инфраструктурой в условиях изменяющихся параметров системы тягового электроснабжения, что и опреде-

ляет актуальность темы диссертационной работы.

Степень разработанности темы. Исследованиями в области повышения энергоэффективности тяговых электроприводов занимались такие ученые, как Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман, Ю.М. Иньков, В.А. Кучумов, В.Д. Тулупов, Л.А. Мугинштейн, Н.А. Ротанов, В.П. Феоктистов, Р.Р. Мамошин, А.Н. Савоськин, В.В. Литовченко, А.Л. Лозановский, Н.С. Назаров, Б.И. Хомяков, Ю.А. Басов, С.В. Власьевский, Ю.М. Кулинич. Эти исследования послужили научной основой для постановки задач данной диссертационной работы.

Целью настоящей работы является повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока со статическими тяговыми преобразователями, оснащенными усовершенствованной системой управления.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

1) выполнен анализ существующих систем управления входными преобразователями электроподвижного состава переменного тока и структуры электрической части тягового электропривода с асинхронными тяговыми двигателями.

2) разработан способ компенсации реактивной мощности при реализации опережающего фазового сдвига входного тока относительно напряжения на токоприемнике электровоза с четырехквadrантным преобразователем.

3) разработана комплексная компьютерная модель системы для работы на одной фидерной зоне двух электровозов переменного тока с различными преобразовательными системами.

4) выбран эффективный метод управления четырехквadrантным преобразователем в режиме компенсации реактивной мощности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложена адаптированная к изменяющимся параметрам тяговой сети система автоматизированного управления тяговым преобразователем;

- разработана комплексная математическая модель системы «тяговая сеть – электровоз переменного тока с четырехквadrантным (4q-S) преобразователем»;

- на основе результатов анализа электромагнитных процессов в тяговом

электроприводе и полученных на их основании рекомендаций по управлению тяговым преобразователем разработаны технические требования к электровозам переменного тока новых поколений.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что её рекомендации могут быть полезны при формировании алгоритмов работы систем управления тяговым электроприводом электроподвижного состава нового поколения; кроме того, по результатам исследований разработаны «Технические требования для грузовых электровозов Восточного полигона». Результаты диссертации использованы в учебном процессе в вузах при подготовке специалистов для железнодорожного транспорта.

Создана математическая модель системы: «тяговая сеть – электровоз», позволяющая изучать электромагнитные процессы в указанной системе. При помощи разработанной модели выполнен анализ электромагнитных процессов.

Методология и методы исследования. Для решения задач использованы следующие методы исследования:

- численные и аналитические методы решения дифференциальных уравнений;
- методы анализа и расчета полупроводниковых преобразователей электрической энергии;
- методы математического моделирования сложных электротехнических систем;
- методы экспериментального определения параметров и характеристик электротехнических комплексов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Способ управления 4q-S преобразователем электровоза в режиме тяги.
2. Результаты анализа электромагнитных процессов в электротехнической системе «тяговая сеть – электровоз».
3. Алгоритм управления тяговым преобразователем при реализации опережающего фазового сдвига входного тока относительно напряжения на токоприемнике электровоза с 4q-S преобразователем.

Степень достоверности и апробация полученных результатов диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждается удовлетворительным совпадением полученных в работе результатов с данными экспериментальных исследований, полученных при испытаниях грузовых электровозов на экспериментальном кольце ИЦ «ВНИИЖТ» (г. Щербинка), а также с результатами других исследователей, работающих в этом направлении.

Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на XXVII Международной научно-технической и практической конференции «Силовые и распределительные трансформаторы. Реакторы. Системы диагностики» (Иньков Ю.М., Глызин И.И. «Применение аморфной стали для изготовления магнитопровода тяговых трансформаторов перспективного электроподвижного состава»), 2018 г., Москва; на Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта «Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта», 2019 г., Москва; на научно-практической конференции "Неделя науки МИИТ", 2017 и 2019 гг., Москва, а также на научных семинарах кафедры «Электропоезда и локомотивы» МИИТа в 2016-2020 гг.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из общей характеристики работы, 4 глав, выводов, библиографического списка из 84 наименований и содержит 125 страницы основного текста, 8 таблиц и 51 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, формулированы цели работы и поставлены задачи исследования.

Первая глава посвящена аналитическому обзору существующих схем входных преобразователей электроэнергии для электроподвижного состава переменного тока.

В первой главе отмечается, что одной из основных проблем создания ЭПС переменного тока является повышение энергетических показателей, таких как КПД, коэффициент мощности и коэффициент энергетической эффективности. Низкие значения коэффициента мощности указывают на большую величину реак-

тивной мощности, приводят к снижению пропускной способности линий электропередачи, увеличению падения напряжения в тяговой сети и недоиспользованию мощности всей системы тягового электроснабжения. Кроме того, использование традиционных выпрямителей переменного напряжения, работающих на активную индуктивную нагрузку, сопровождается значительными искажениями тока в тяговой сети, что ухудшает электромагнитную совместимость (ЭМС) электроподвижного состава с системой электроснабжения. С системой тягового электроснабжения непосредственно связан входной преобразователь тягового электропривода ЭПС переменного тока.

Входные преобразователи классифицируются следующим образом: выпрямители с естественной коммутацией тока; выпрямители с принудительной коммутацией тока; выпрямители с поэтапной принудительной коммутацией тока; импульсные выпрямители с регулированием выходного напряжения (тока); четырёхквadrантные преобразователи.

Тяговый электропривод, включающий входной выпрямитель с естественной коммутацией и АИН с ШИМ обеспечивает коэффициент мощности на уровне 0,8. Вместе с тем в преобразователе частоты такого тягового электропривода потери мощности на коммутацию тока в АИН с ШИМ прямо пропорциональны количеству переключений и имеют более высокий уровень. Применение выпрямительно-инверторных преобразователей приводит к значительному уменьшению коэффициента мощности электровоза, снижению величины напряжения на тяговых двигателях за счет индуктивных потерь и значительному мешающему воздействию на линии связи и устройства СЦБ, использующие рельсовые цепи. Для устранения указанных недостатков входные преобразователи оснащают устройствами принудительной коммутации тиристорных плеч одного из регулируемых мостов, появляется возможность управления как моментом включения вентиля, так и моментом их выключения, что позволяет минимизировать угол сдвига основной гармоники сетевого тока электровоза относительно напряжения на токоприемнике и регулировать величину коэффициента мощности на входных зажимах выпрямителя.

Алгоритм работы вентиляльного преобразователя на полностью управляемых ключевых элементах при регулировании уровня выходного напряжения состоит в том, чтобы посредством многократного включения и выключения силовых ключей в пределах одной полуволны напряжения контактной сети обеспечить форму переменного напряжения, близкую к синусоидальной. Коэффициент мощности такого преобразователя в широком диапазоне нагрузок составляет не менее 0,99.

Четырехквadrантный преобразователь представляет собой импульсный выпрямитель, выполненный на основе управляемого однофазного моста со стабилизацией выходного напряжения. Каждое из силовых плеч преобразователя представляет собой силовой транзистор, встречно параллельно которому подключен диод. Коэффициент мощности четырехквadrантного преобразователя составляет 0,99. С развитием силовой электроники в качестве полупроводниковых ключей стали применять биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

На рисунке 1 представлены упрощенные схемы силовой цепи входного преобразователя тягового электропривода электровозов переменного тока ВЛ-80Р и SV1 с выпрямительно-инверторными преобразователями.

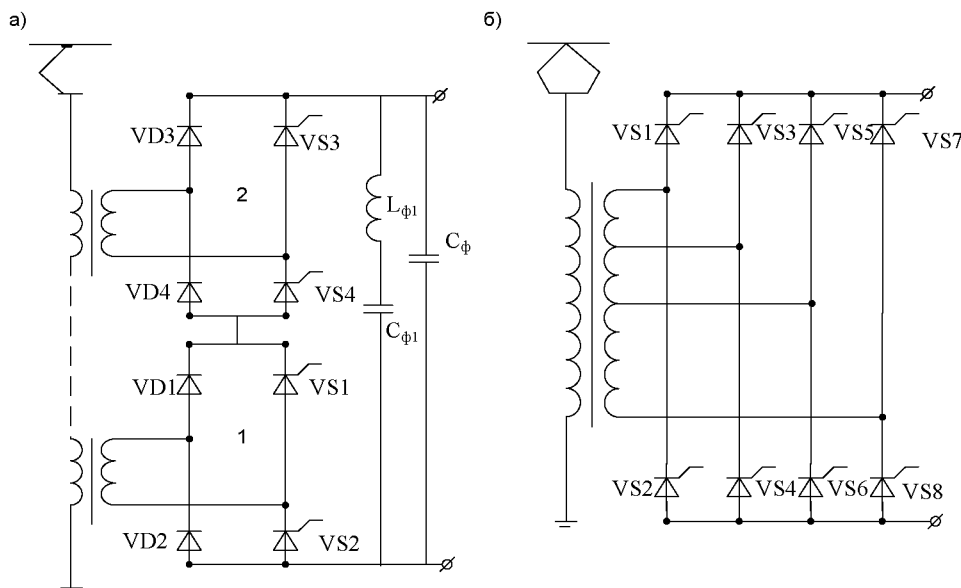


Рисунок 1 – Упрощенная схема силовой цепи преобразователя опытного электровоза типа SV1 (а) и электровоза серии ВЛ-80Р (б)

На схеме, представленной на рисунке 1,а, цифрами 1 и 2 обозначены два соединенных последовательно диодно-тиристорных моста и LC-фильтр (индук-

тивность $L_{\phi 1}$ и емкость $C_{\phi 1}$). Первый мост, состоящий из диодов VD1, VD2 и вентилях VS1, VS2 включен в работу постоянно, величина напряжения на конденсаторе C_{ϕ} звена выпрямленного напряжения поддерживается постоянной за счет фазового регулирования второго моста, состоящего из диодов VD3, VD4 и вентилях VS3, VS4. Существуют технические решения, при которых первый мост выполняется неуправляемым, как на электровозе Е-1200. Недостатком такого технического решения является отсутствие возможности отключения от тягового трансформатора неисправного электрооборудования при аварийных режимах работы электровоза.

Повышение выходного стабилизированного напряжения в звене выпрямленного напряжения преобразователя электровоза SV1 осуществляется включением тиристоров второго выпрямительного моста, состоящего из вентилях с естественной коммутацией.

Выполненный анализ преобразователей тяговых электроприводов ЭПС переменного тока, их систем управления и энергетических показателей, а также сформулированные требования к преобразователю тягового электропривода ЭПС, основным из которых является поддержание стабилизированного напряжения на выходных зажимах преобразователя, позволили сделать вывод о целесообразности применения четырехквadrантного преобразователя и предложить усовершенствованный алгоритм режима его работы, имея ввиду, что на перспективном ЭПС будут устанавливаться асинхронные тяговые двигатели.

В первой главе выполнен аналитический обзор тяговых электроприводов электроподвижного состава переменного тока с тяговыми двигателями пульсирующего тока.

Одним из основных элементов такого тягового электропривода является преобразователь электроэнергии, состоящий из тягового трансформатора и вентильного комплекта. При этом вентильный комплект на ЭПС с тяговыми двигателями пульсирующего тока представляет собой выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП) с естественной или принудительной коммутацией вентилях.

Поскольку ВИП имеет значительно более низкие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), чем (4q-S) четырехквadrантный преобразо-

ватель, задача повышения энергоэффективности тягового электропривода ЭПС переменного тока может быть решена только на основе применения четырехквadrантного преобразователя в тяговом электроприводе.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям входного 4q-S преобразователя. Схема преобразователя (рисунок 2), на которой изображены: трансформатор Т, к зажимам первичной (сетевой) обмотки которого приложено напряжение контактной сети u_c ; вторичная (тяговая) обмотка трансформатора с индуктивностью L_T и напряжением u_T подключена к зажимам переменного тока транзисторного преобразователя, к зажимам постоянного тока преобразователя подключен конденсатор C_f .

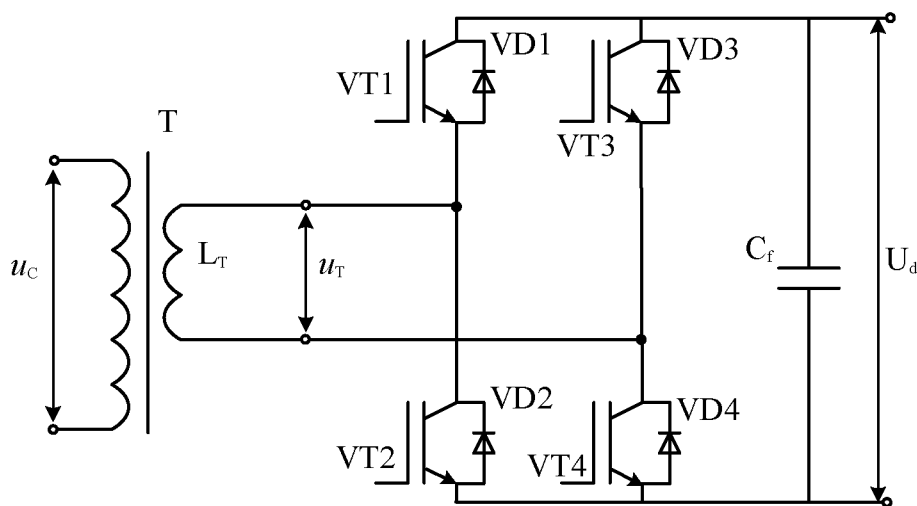


Рисунок 2 – Принципиальная схема 4q-S преобразователя

На рисунке 3 представлена эквивалентная расчётная схема 4q-S преобразователя электровоза. В эквивалентной схеме транзисторные ключи изображены идеальными ключами S1-S4, контактная сеть представлена в виде источника u_1 , индуктивные сопротивления контактной сети и трансформатора учтены в эквивалентной индуктивности L_1 , к выходным зажимам преобразователя подключен конденсатор фильтра C_1 , а нагрузка представлена в виде источника постоянного напряжения U_d .

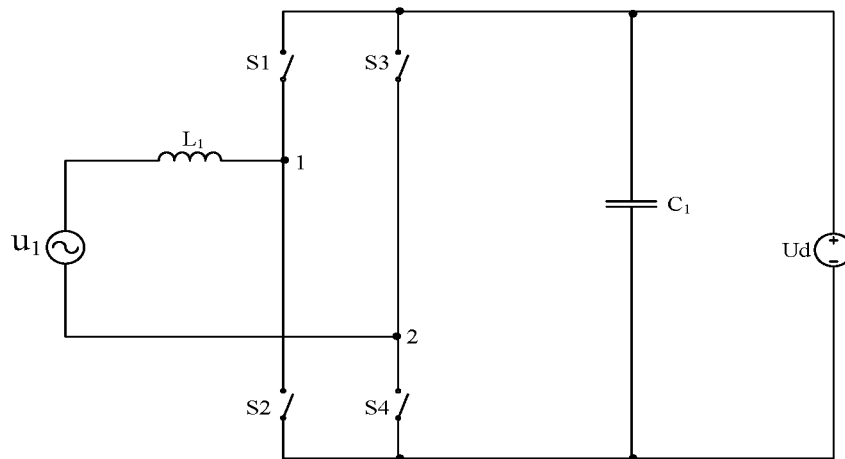


Рисунок 3 - Эквивалентная расчетная схема преобразователя

Управление 4q-S преобразователем осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) по синусоидальному закону модулирующим напряжением u_m , с частотой f_M и периодом T_M и высокочастотным сигналом несущей частоты u_H треугольной формы, с частотой f_H и периодом T_H с кратностью ε , определяемой соотношением

$$\varepsilon = \frac{f_H}{f_M} = \frac{T_M}{T_H}.$$

На опытных отечественных электровозах переменного тока кратность коммутации ШИМ $\varepsilon = 5$. Диаграммы включения и графики модулирующего, несущего сигналов и напряжение на зажимах переменного тока преобразователя представлены на рисунке 4.

По результатам теоретических исследований получено выражение для определения напряжения на зажимах переменного тока преобразователя

$$u_{1,2}(t) = \mu U_d \sin \omega_M t + \sum_{\nu=0}^{\infty} U_{1,2}^{\nu} \sin(2\nu + 1)\omega_M t$$

где $U_{1,2}^{\nu}$ - амплитуда гармоники напряжения, соответствующая фиксированному значению индекса ν , определяется суммированием членов ряда:

$$U_{1,2}^{\nu} = \frac{2U_d}{\pi} \sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} \frac{J_{(2\nu+1-2m\varepsilon)}(\mu m \pi)}{jm} (-1)^m,$$

где $J_n \left[\mu m \frac{\pi}{2} \right]$ - функция Бесселя первого рода порядка n от вещественно-

го аргумента $\mu m \frac{\pi}{2}$.

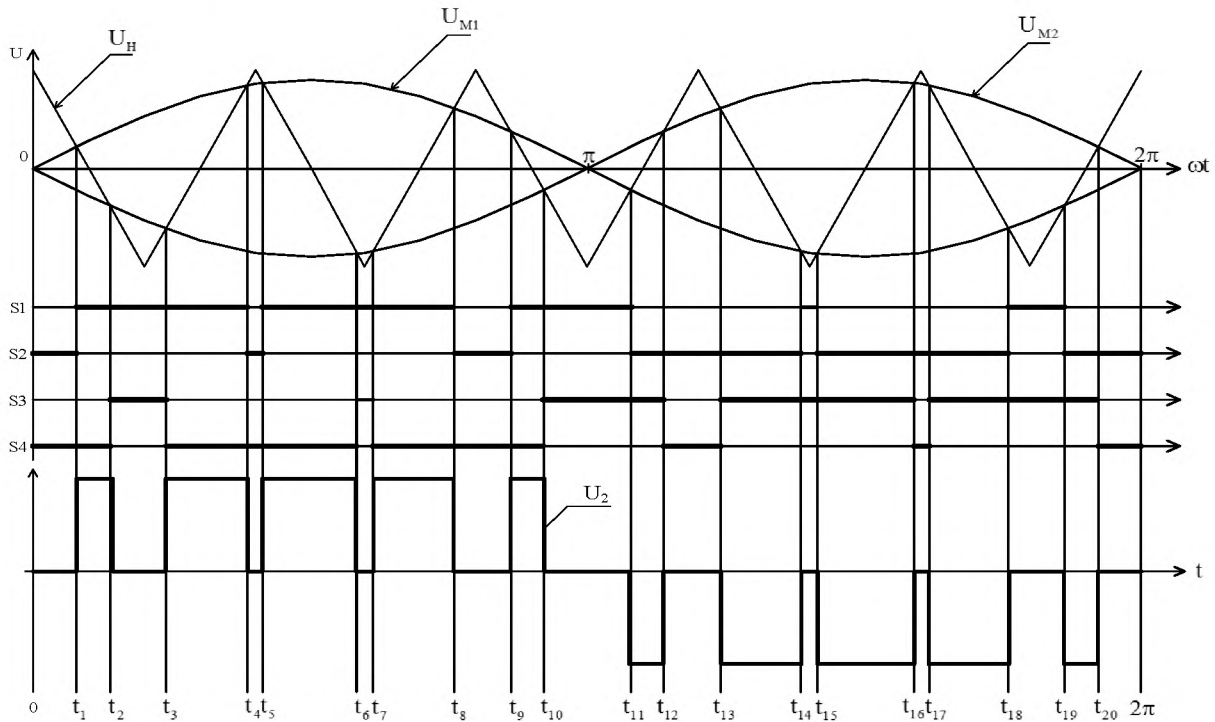


Рисунок 4 – Графики модулирующего напряжения и высокочастотного сигнала несущей частоты, напряжение на зажимах переменного тока (U_2) и диаграмма коммутации ключей S1-S4

По полученному выражению были построены зависимости амплитуд гармоник напряжения от глубины модуляции μ для $\varepsilon = 5$ (рисунок 5).

Входной ток преобразователя определен в виде

$$i = I_{1max} \sin(\omega t - \varphi) + \sum_{\nu=0}^{\infty} I_{1max}^{\nu} \sin(2\nu+1) \left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2} \right),$$

где $I_{1max} = \frac{1}{\omega L_1} \sqrt{U_{1max}^2 + (\mu U_d)^2 - 2U_{1max} \mu U_d \cos \psi}$ – амплитуда основной гармоники входного тока, а ее фазовый сдвиг определен выражением

$$\varphi = \arctg \left[\frac{U_{1max}}{\mu U_d \sin \psi} - \frac{1}{\operatorname{tg} \psi} \right],$$

где ψ - угол смещения модулирующего сигнала относительно сетевого напряжения.

$$I_{1max}^v = \frac{U_{2max}^v}{(2v+1)\omega L_1} - \text{амплитуды высших гармоник входного тока.}$$

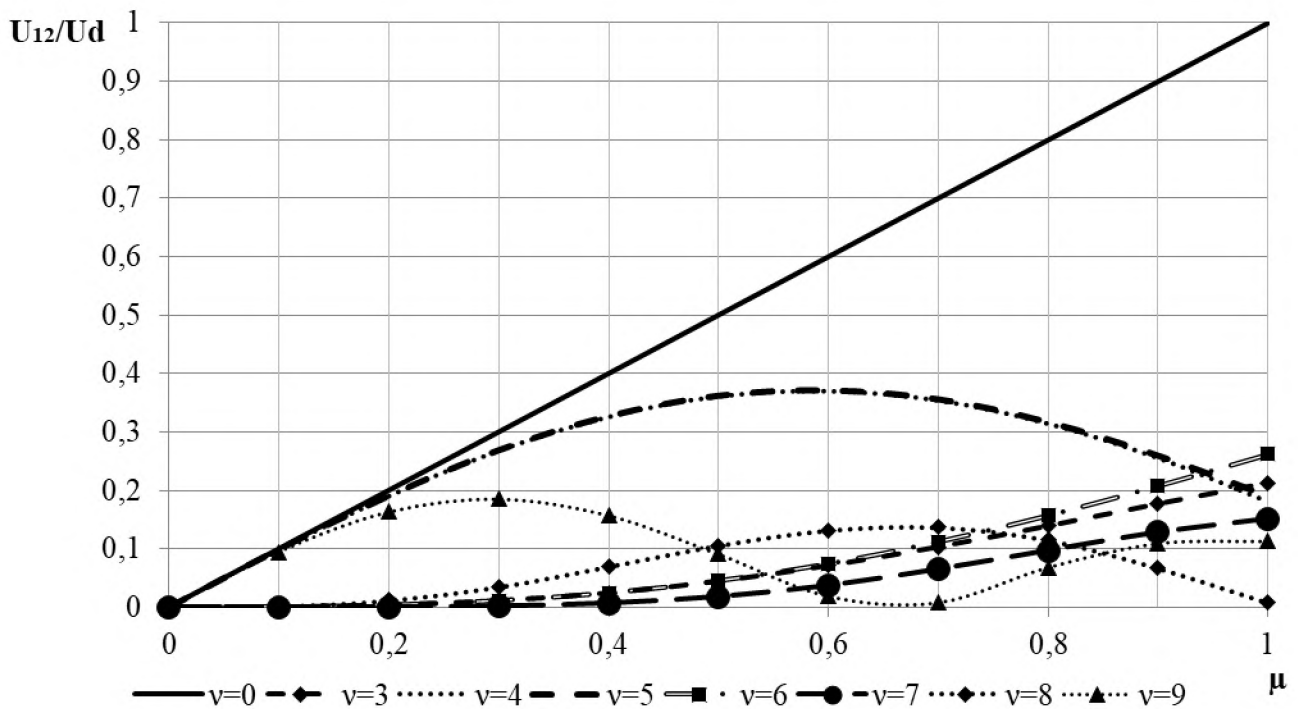


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды гармонических составляющих напряжения от глубины модуляции

Оценивая эффективность применения 4q-S преобразователя на ЭПС, следует учитывать и тот факт, что преобразователь позволяет работать не только с нулевым, но и с опережающим сдвигом по фазе. Для контактной сети переменного тока и всей системы электроснабжения это эквивалентно подключению в месте нахождения ЭПС компенсирующего устройства, что позволяет повысить коэффициент мощности не только на токоприемнике, но и всей системы электроснабжения. Увеличение коэффициента мощности системы электроснабжения снижает токовую нагрузку контактной сети и, как следствие, уменьшает потери мощности в ней.

Предложен способ управления 4q-S преобразователем в режимах тяги и в режиме горячего отстоя с компенсацией реактивной мощности контактной сети. Векторные диаграммы, поясняющие режимы работы 4q-S преобразователя электровоза, представлены на рисунке 6.

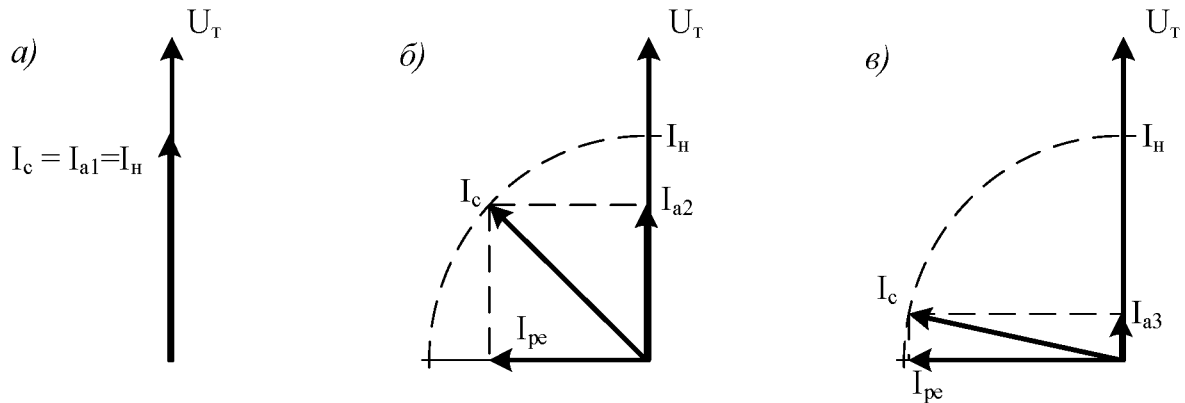


Рисунок 6 – Векторные диаграммы тока и напряжения в режимах тяги при номинальной (а), меньше номинальной мощности (б) и компенсации реактивной мощности (в)

На рисунке 6, а реактивная составляющая тока I_c электровоза равна нулю, поэтому полный ток равен активному. В этом режиме работы коэффициент мощности электровоза соответствует значению, близкому к 1. Векторная диаграмма рисунка 6, б соответствует режиму работы электровоза с частичной компенсацией реактивной мощности. На рисунке 6, в векторная диаграмма составляющих сетевого тока соответствует режиму максимальной компенсации реактивной мощности. Активная составляющая I_a сетевого тока I_c уменьшается при увеличении опережающего фазового сдвига тока относительно напряжения на токоприемнике электровоза, $I_{a1} > I_{a2} > I_{a3}$. Сетевым ток I_c не должен превышать номинального значения тока сетевой обмотки тягового трансформатора.

Третья глава посвящена разработке математической модели «тяговая сеть – электровоз переменного тока с четырехквadrантным преобразователем».

Исходя из задачи комплексного исследования энергетических показателей электровоза, при разработке математической модели необходимо было учесть

факторы, оказывающие влияние на электромагнитные процессы в силовых цепях электровоза с АТД. К таким факторам следует отнести:

- питание электровоза от контактной сети с реальными параметрами, которые проявляются в искажении формы напряжения на токоприемнике и оказывают влияние на коммутационные процессы во входном звене преобразовательной системы;

- наличие многообмоточного тягового трансформатора с реальной конфигурацией магнитной цепи и расположением концентрических дисковых обмоток на стержнях;

- наличие в цепи выпрямленного тока активно-индуктивной нагрузки.

Для устройств преобразовательной техники возникает необходимость использовать более сложную математическую модель, которая позволяет отобразить как непрерывные, так и дискретные свойства, полупроводникового преобразователя.

Исходя из задач исследования, математическая модель системы рассматриваемой электротехнической системы представлена моделями тяговой подстанции, контактной сети, тягового трансформатора, 4q-S преобразователя с предлагаемой системой управления, асинхронных тяговых двигателей.

Схема замещения контактной сети имеет вид двух Т-образных четырехполюсников, соединенных каскадно, элементы которых определяют индуктивность, активное сопротивление, емкость и поперечную проводимость контактной сети, а также учитывают изменение параметров контактной сети, вызванное поверхностным эффектом.

Тяговая подстанция представлена в виде источника переменного синусоидального напряжения, активного сопротивления и индуктивности, приведенных к напряжению контактной сети. Схема математической модели представлена на рисунке 7.

При моделировании 4q-S преобразователя полупроводниковые приборы-транзисторные ключи рассматриваются как идеальные ключи, состояние которых

описывается логической функцией, принимающей значение «1» при замкнутом и «0» при разомкнутом ключе.

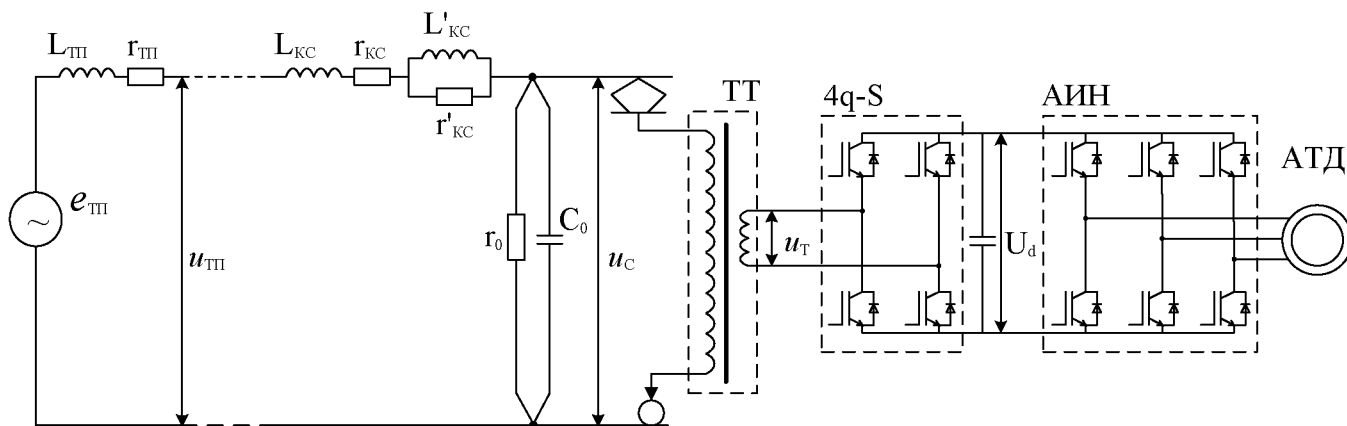


Рисунок 7 – Упрощенная схема электротехнической системы «тяговая сеть –электровоза с 4q-S преобразователем»

Система управления 4q-S преобразователем (рисунок 8) выполнена в виде трёхконтурной системы автоматического регулирования (САР), поддерживающей заданные значения регулируемых величин. Основной величиной является напряжение звена выпрямленного напряжения U_{dc} . Регулирование напряжения осуществляет внешний контур, в который входят: датчик напряжения ДН2, задающий элемент ЗЭ, элемент сравнения, с выхода которого поступает разница ΔU_d между значением U_{d3} и действующим значением напряжения U_{dc} с датчика ДН2 и регулятор напряжения РН, который выдаёт сигнал I_{max} , амплитуду задаваемого тока. Далее I_{max} умножается на синусоидальный сигнал, поступающий из контура коррекции фазы, в который входят датчики фазы для сетевого напряжения ДФН и тока ДФТ, элементы сравнения, регулятор фазы РФ и блок, формирующий синусоидальный сигнал. Сигнал i_{max} , получаемый с блока умножения, является задающим для внутреннего контура регулирования. В него входят: датчик тока ДТ2, элемент сравнения, который выдаёт рассогласование Δi между i_{max} и фактическим током i_2 , измеряемым датчиком тока, регулятор тока РТ, который преобразует Δi в Δu_{4qs} и элемент сравнения, на вход которого поступают сигналы о напряжении u_2 и Δu_{4qs} , а на выходе - заданное напряжение u^*_{4qs} 4qS-преобразователя. Далее

u^*_{4qS} преобразуется в модулирующую функцию и поступает в блок, обеспечивающий управление транзисторами преобразователя методом ШИМ-модуляции.

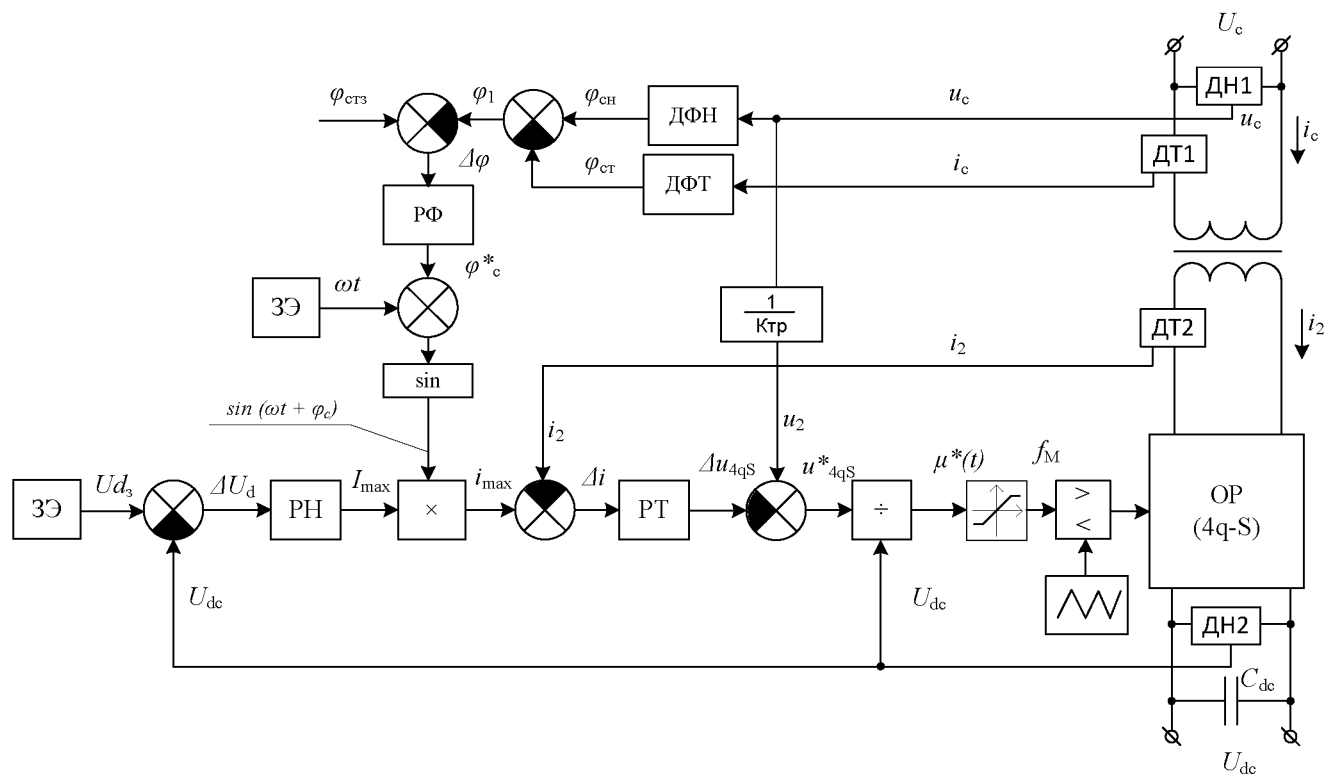


Рисунок 8 – функциональная схема системы управления 4q-S преобразователем

Применительно к исследуемым процессам на этапе проверки работоспособности системы управления нагрузка для 4q-S преобразователя моделируется в виде электрической цепи, содержащей эквивалентный источник ЭДС, активное сопротивление и индуктивность, затем модель дополнена АИН и АТД.

Также предложены способы формирования управляющего воздействия регулятора фазы системы управления 4q-S преобразователем (рисунок 9). Формирование заданного угла сдвига фазы тока $\varphi_{сгз}$ реализовано по заданному значению сигнала $U_{с31}$, по сигналу $U_{с32}$ от системы управления тяговым преобразователем, по условию максимального напряжения на токоприемнике ЭПС и по сигналу $\Delta U_{фз}$, определяемого по максимальному напряжению на фидерной зоне.

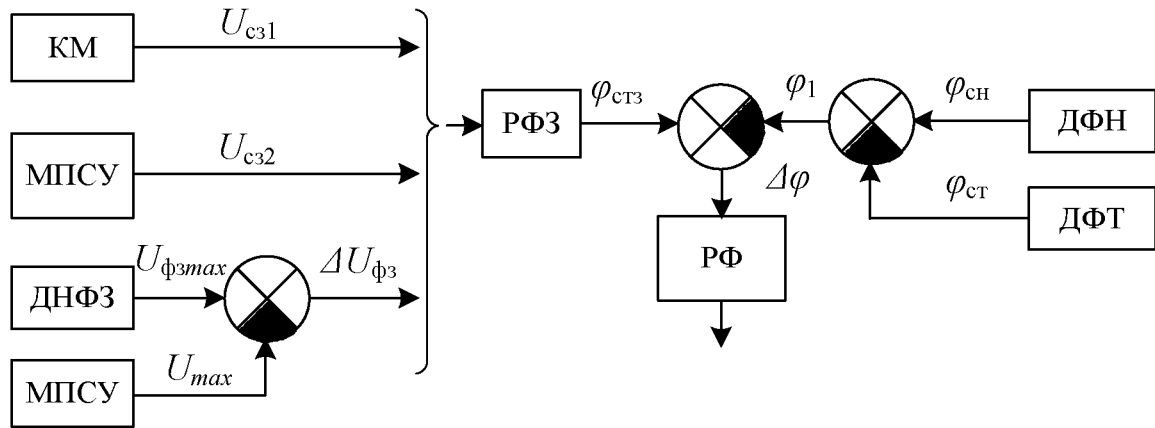


Рисунок 9 – Способы формирования опережающего фазового сдвига тока

Работа электровоза в режиме тяги с компенсацией реактивной мощности тяговой сети возможна при наличии устойчивого сигнала об уровне напряжения на разных участках фидерной зоны. Алгоритм работы системы регулирования реактивной составляющей I_p тока сетевой обмотки I_c построен на сравнении заданного значения напряжения контактной сети и максимального напряжения на фидерной зоне. Для измерения напряжения на фидерной зоне необходима установка не менее 5 датчиков напряжения, а также блока сбора и передачи данных (БСПД) для измерения и определения максимального значения напряжения на фидерной зоне и передачи радиосигнала на электровоз с 4q-S преобразователем о максимальном напряжении в контактной сети.

Стационарные трансформаторы напряжения ТН устанавливаются на тяговых подстанциях ТП(1,2), пунктах параллельного соединения ППС и на посту секционирования ПС. Для передачи данных по радиоканалу о фактическом измеренном значении напряжения $U_{фз}$ в контактной сети в точке подсоединения ТН устанавливается блок А. Информация с блоков А поступает на БСПД для последующей обработки. Статические вентильные компенсаторы (СВК), основанные на применении транзисторов или тиристоров при регулировании компенсации реактивной мощности, установленные на тяговых подстанциях, обозначены СВК(1,2). Компенсатор СВК, установленный на посту секционирования, обозначен СВКп (рисунок 10).

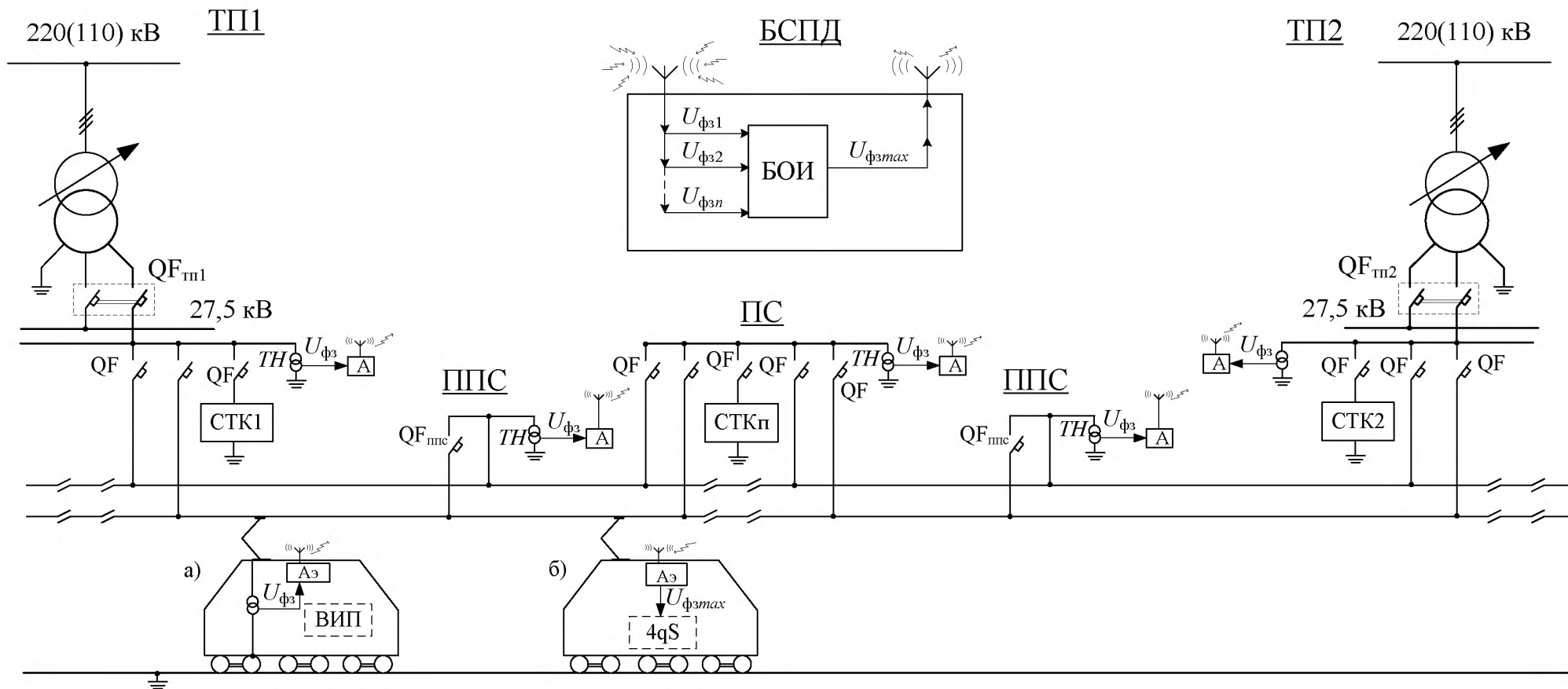


Рисунок 10 – Работа электровозов с ВИП (а) и 4qS-преобразователями (б) на межподстанционной зоне

Модель электротехнической системы «тяговая сеть – электровоз с 4q-S преобразователем» выполнена в приложении Simulink программного пакета Matlab. Модель системы состоит из моделей тяговой подстанции, контактной сети, тягового трансформатора, силовой части и системы управления 4q-S преобразователя, а также модели тяговых двигателей.

Результаты моделирования мгновенных значений тока электровоза и напряжения на токоприемнике, полученные в программном пакете Matlab Simulink, совпадают с осциллограммами сетевого тока и напряжения на токоприемнике электровоза, полученные при испытаниях.

В установившемся режиме работы в систему управления 4q-S преобразователем поступает задание на опережающий фазовый сдвиг сетевого тока I_c электровоза на 5 эл. град (рисунок 11). Система управления реализует опережающий сдвиг сетевого тока. Среднее значение переменного напряжения на токоприемнике электровоза увеличилось на 190 В. Коэффициент мощности уменьшился до значения 0,985.

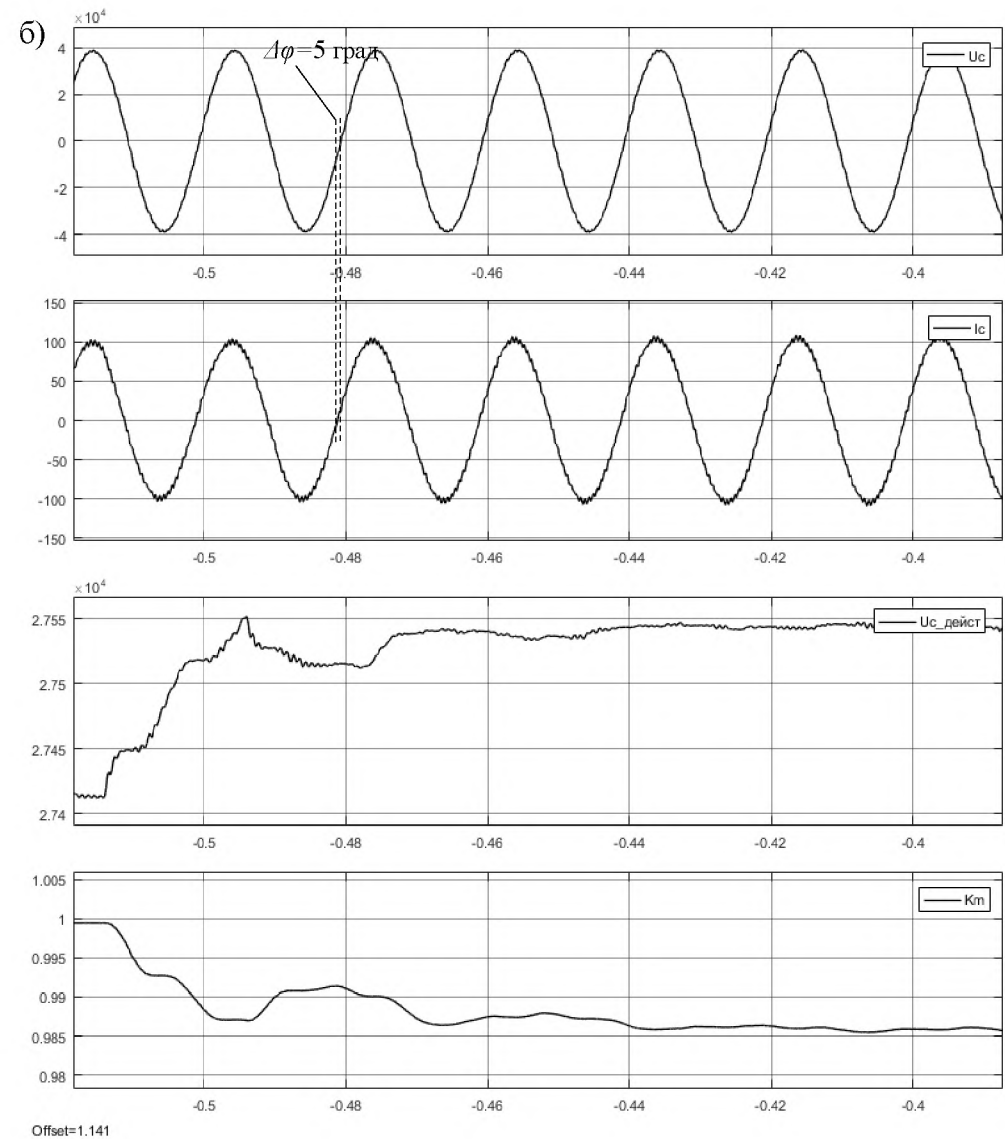
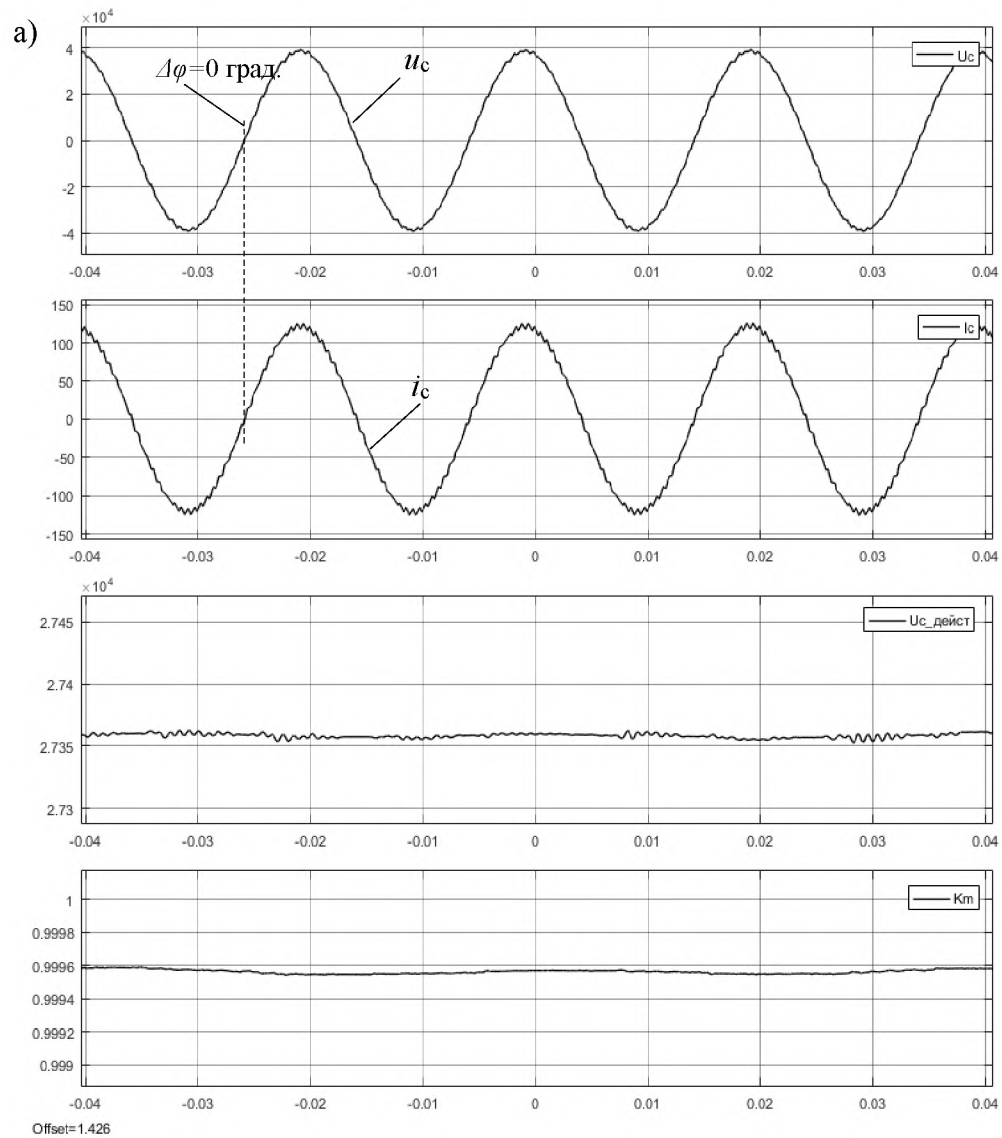


Рисунок 11 – Электромагнитные процессы в электротехнической системе «тяговая сеть – электровоз» при реализации КРМ в режиме тяги

В четвёртой главе выполнено технико-экономическое обоснование внедрения перспективной системы управления тяговым преобразователем электровоза переменного тока. Выполнено обоснование экономического эффекта от внедрения разработанной в диссертации усовершенствованной системы управления четырехквadrантным преобразователем электровоза переменного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы исследования состоят в следующем:

1. На основании результатов анализа электромагнитных процессов в системе «тяговая сеть – электровоз» предложен алгоритм управления четырехквadrантным преобразователем электровоза, работающего в режиме тяги.

2. Установлено, что при нахождении на одной фидерной зоне работающего в тяговом режиме электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем и электровоза с четырехквadrантным преобразователем возможно реализовать поддержание на требуемом уровне напряжения на фидерной зоне за счет перевода электровоза с четырехквadrантным преобразователем в режим генерирования реактивной энергии в контактную сеть, для чего предложена разработанная в диссертации адаптированная к изменяющимся параметрам тяговой сети система автоматизированного управления четырехквadrантным преобразователем.

3. При анализе отечественных и зарубежных источников информации по вопросам взаимодействия электроподвижного состава переменного тока и тяговой сети сформулированы задачи и предложены концепции повышения энергетической эффективности электротехнической системы «тяговая сеть – электровоз».

4. Перспективы дальнейшего развития темы:

– рассмотреть вопрос о возможности совершенствования предложенных алгоритмов управления четырехквadrантным преобразователем по сигналам от датчиков напряжения контактной сети, установленных на эксплуатируемых электровозах переменного тока;

– исследовать чувствительность системы управления четырехквadrантного преобразователя к броскам сетевого тока и напряжения в контактной сети при аварийных режимах работы системы тягового электроснабжения;

– рассмотреть вопрос о возможности совершенствования системы в части автоматического управления четырехквadrантными преобразователями нескольких электровозов при их параллельной работе на одной фидерной зоне.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

а) научные статьи, опубликованные в изданиях, входящих в перечень ВАК России

1. Иньков Ю.М. Электрооборудование для высокоскоростных электропоездов перспективной системы электрической тяги. Электроника и электрооборудование транспорта. / Ю.М. Иньков, И.И. Глызин // – 2017. – №6. – С.17-20;

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования SCOPUS

2. Глызин, И.И. Улучшение показателей энергетической эффективности тяговой сети и электроподвижного состава переменного тока с четырехквadrантным преобразователем / И.И. Глызин, Ю.М. Иньков, В.А. Кучумов, В.В. Литовченко // – Электротехника, – 2019, – №9, С.31-34.

в) научные работы, опубликованные в материалах конференций

3. Глызин, И.И. Повышение энергетической эффективности тяговой сети и электроподвижного состава переменного тока с четырехквadrантным преобразователем в режиме тяги. Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Часть 2 / И.И. Глызин, В.А. Кучумов // под ред. А.Б. Косарева, Г.В. Гогричани. – М.: РАС, 2019. – С.167–174.

д) зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности

4. Пат. № 2729500 РФ. Способ управления режимами тяги, выбега и горячего отстоя железнодорожного электроподвижного состава с входным однофазным широтно-импульсным преобразователем напряжения на стоянке / И.И. Глызин, В.А. Кучумов, Р.В. Мурзин, О.Н. Назаров, М.В. Худорожко; АО «ВНИИЖТ». – № 2019112147/22; заявл. 22.04.2019; опубл. 07.08.2020, Бюл. № 27. – 6 с.

Глызин Илья Игоревич

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СО СТАТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать «__» _____ 2022 г. Изд. № _____ Формат бумаги 60x90/16

Заказ № _____ Объем _____ усл. печ. л. Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9.
ЦСО Отдел дизайна, вёрстки и печати РУТ (МИИТ),