

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

ГЛЫЗИН Илья Игоревич

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

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Иньков Юрий Моисеевич

Москва – 2020

Оглавление

Введение	4
1 Энергетические показатели электроподвижного состава переменного тока	9
1.1 Энергетические показатели электроподвижного состава переменного тока.....	11
1.1.1 Коэффициент мощности электроподвижного состава переменного тока.....	12
1.1.2 Коэффициент полезного действия и энергетической эффективности электроподвижного состава переменного тока	13
1.2 Особенности системы электрической тяги переменного тока	15
1.2.1 Возможность повышения энергетической эффективности тягового трансформатора.....	15
1.2.2 Преобразовательные системы электроподвижного состава переменного тока	19
1.3 Электротехнические параметры преобразовательной системы электровозов переменного тока	23
1.4 Способы повышения энергетической эффективности электроподвижного состава переменного тока	27
2 Анализ электромагнитных процессов в тяговом трансформаторе электровоза переменного тока с входным четырехквadrантным преобразователем	33
2.1 Система управления четырехквadrантным преобразователем	33
2.2 Алгоритм формирования сигналов управления ключевых элементов преобразователя	42
2.3 Особенности электромагнитных процессов в тяговом трансформаторе	50
2.4 Электромагнитные процессы в системе «тяговая сеть –электровоз»	54
2.5 Работа тягового преобразователя в режиме компенсации реактивной мощности	60
3 Модель электротехнической системы «тяговая сеть – электровоз переменного тока с четырехквadrантным преобразователем»	65
3.1 Средства реализации математических моделей	65
3.2 Математическая модель электротехнической системы	67
3.2.1 Модель тяговой подстанции	67
3.2.2 Модель контактной сети	69

3.2.3 Модель тягового трансформатора	72
3.2.4 Модель тягового двигателя.....	77
3.2.5 Система управления 4q-S преобразователем.....	80
3.2.6 Система формирования опережающего угла сдвига фазы тока	84
3.2.7 Результаты моделирования электромагнитных процессов.....	92
4 Технико-экономическое обоснование внедрения перспективной системы управления тяговым преобразователем электровоза переменного тока.....	104
4.1 Обоснование установки дополнительного оборудования и измерительной системы	104
4.2 Расчет экономического эффекта от внедрения перспективной системы управления.....	105
Заключение	111
Приложение А	114
Приложение Б.....	115
Приложение В	116
Приложение Г.....	117
Список использованных источников информации	118

Введение

На современном электроподвижном составе (ЭПС) переменного тока применяют для регулирования выпрямленного напряжения, прикладываемого к обмоткам тяговых электрических машин применяют выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП). Принцип работы такой преобразовательной системы заключается в подключении разного количества тяговых обмоток трансформатора к ВИП и изменении угла коммутации управляемых вентилях. Такой способ регулирования напряжения получил название многозонное (зонно-фазовое) регулирование величины напряжения. Обмотки тягового трансформатора и тяговых двигателей пульсирующего тока обладают значительной индуктивностью. Подключение к контактной сети силовой цепи электровозов с ВИП и их работа на фидерной зоне обуславливает соответствующее снижение коэффициента мощности на токоприемнике, что приводит к увеличению тока и повышенному потреблению энергии на тягу поездов. При повышении коэффициента мощности электровозов снижается потребление энергии и появляется возможность уменьшить установленную мощность тягового трансформатора (ТТ) электровоза за счет уменьшения потерь энергии при сохранении номинальной мощности электровоза [1]. Повышение коэффициента мощности электровоза достигается за счет установки во входном звене преобразовательной системы четырехквadrантного (4qS-преобразователя) статического преобразователя [12], обеспечивающего практически нулевой сдвиг по фазе между напряжением на токоприемнике и током сетевой обмотки ТТ электровоза и высокое качество электрической энергии, потребляемой электровозом из контактной сети.

В данной работе проанализированы возможные способы преобразования электрической энергии, передаваемой из контактной сети переменного тока к тяговым двигателям электровоза. В результате анализа ранее выполненных работ [71–74] установлено, что современный электропривод подвижного состава оснащается тяговыми двигателями

переменного тока и наиболее рациональной является структура преобразователя электрической энергии, содержащая входной полупроводниковый преобразователь, к выходным зажимам которого, т.е. к звену выпрямленного напряжения через автономный инвертор напряжения (АИН) подключены асинхронные тяговые двигатели (АТД). При этом количество АТД определяется разработчиком локомотива, исходя из требуемой мощности электровоза. Электромагнитные процессы во входном звене преобразовательной системы ЭПС переменного тока исследованы в публикациях В.В. Литовченко, а также ученых института ВЭЛНИИ [13, 36, 51, 75–77].

В настоящее время выпущены и эксплуатируются на отечественных железных дорогах грузовые 2ЭС5С и 2ЭВ120 электровозы, а также пассажирские ЭП10 и ЭП20, в преобразовательной системе которых применен четырехквadrантный преобразователь. В диссертационном исследовании выполнен анализ электромагнитных процессов в тяговой сети при расположении на фидерной зоне двух электровозов переменного тока с разными преобразовательными системами.

Целью настоящей диссертационной 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. Предложен способ компенсации реактивной мощности и выполнен анализ структуры электрической части тягового электропривода с асинхронными тяговыми двигателями;
2. Выбран эффективный метод управления четырехквadrантным преобразователем в режиме компенсации реактивной мощности;
3. Построена комплексная компьютерная модель системы «тяговая сеть – электровоз переменного тока с 4qS-преобразователем»;

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена система автоматизированного управления тяговым преобразователем, позволяющая реализовать компенсацию реактивной мощности тяговой сети;
2. Уточнена комплексная математическая модель системы «тяговая сеть – электровоз переменного тока с 4qS-преобразователем»;
3. С использованием результатов анализа электромагнитных процессов в тяговом электроприводе и полученных на их основании рекомендаций по управлению тяговым преобразователем сформулированы технические требования [68] к электровозам переменного тока новых поколений.

Методы исследования. При выполнении исследований были использованы аналитические методы решения дифференциальных уравнений, методом теории электрических линейных и нелинейных электрических цепей, методы анализа и расчета полупроводниковых преобразователей электрической энергии.

Достоверность 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.

Практическая ценность работы заключается в том, что её рекомендации могут быть полезны при формировании алгоритмов работы для систем управления тяговых электроприводом электроподвижного состава нового поколения; кроме того, по результатам исследований, разработаны Технические требования для грузовых электровозов Восточного полигона[68]. Результаты диссертации использованы в учебном процессе в ВУЗах при подготовке специалистов для железнодорожного транспорта.

Апробация работы. 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 так же на научных семинарах кафедры «Электропоезда и локомотивы» МИИТа в 2016-2020 гг.

Основные положения диссертационного исследования достаточно полно отражены в изданиях, рекомендованных ВАК России:

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

2. 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.

Публикация основных положений диссертационного исследования в журнале «Электротехника», входящего в международную базу цитирования Scopus:

Глызин, И.И. Улучшение показателей энергетической эффективности тяговой сети и электроподвижного состава переменного тока с

четырёхквadrантным преобразователем / И.И. Глызин, Ю.М. Иньков, В.А. Кучумов, В.В. Литовченко // – Электротехника, – 2019, – №9, С.31-34.

1 Энергетические показатели электроподвижного состава переменного тока

Электрифицированные железные дороги получают электрическую энергию от энергосистемы, в которую входят первичные источники энергии. К таким источникам относятся генерирующие электростанции, которые преобразуют механическую энергию движущейся воды или внутреннюю энергию вещества в электрическую. В зависимости от расстояния между электростанциями и потребителями, а также от величины необходимой мощности определяются выходные параметры электростанций. Генераторами электростанций вырабатывается электроэнергия трехфазного переменного тока промышленной частоты 50 Гц напряжением 10 кВ которая через повышающий трансформатор поступает к потребителям по линии электропередач (ЛЭП) [1,38]. Увеличение мощности вырабатываемой энергии турбогенераторов достигается их параллельным включением на общую нагрузку. Номинальная мощность тяговых подстанций систем электроснабжения железных дорог может достигать нескольких тысяч МВт. Уровень напряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог существенно меньше, чем на ЛЭП.

Тяговые подстанции (ТП) получают электроэнергию от электроэнергетических систем общего назначения с высоким уровнем напряжения, чаще всего по воздушной линии (ВЛ) 110 и 220 кВ. Согласование уровней напряжения и передача энергии между ЛЭП и контактной сети осуществляется при помощи трансформатора тяговой подстанции. Структура тяговой сети представлена на рисунке 1.1.

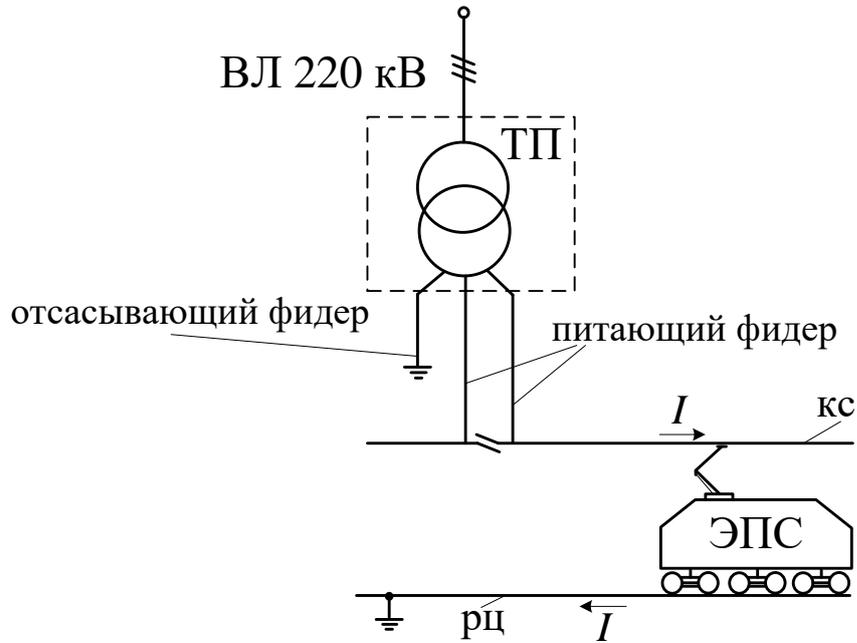


Рисунок 1.1 – Структурная схема тяговой сети и её подключение к ЛЭП
 кс – контактная сеть, рц – рельсы (рельсовые цепи), тп – тяговая подстанция.

На железных дорогах Российской Федерации применяют две системы тягового электроснабжения, а именно, систему тягового электроснабжения постоянного тока с напряжением в контактной сети 3 кВ и систему тягового электроснабжения переменного тока с напряжением в контактной сети 25 кВ. На тяговой подстанции постоянного тока для преобразования электроэнергии переменного напряжения в электроэнергию выпрямленного напряжения устанавливают выпрямитель.

На тяговых подстанциях переменного тока устанавливаются трансформаторы, чаще всего трехфазные, которые предназначены для понижения уровня напряжения до значения, установленного ГОСТ 6269-75 [2].

На тяговых подстанциях постоянного тока имеет место двойная трансформация напряжения. Промежуточный уровень напряжения (обычно 10 кВ) используется для питания нетяговых железнодорожных потребителей. Для преобразования электроэнергии переменного напряжения одной величины в электроэнергию переменного напряжения другой величины и обеспечения уровня напряжения контактной сети, соответствующего

номинальному напряжению на токоприемнике ЭПС постоянного тока, на тяговых подстанциях устанавливают трансформатор и выпрямитель. При этом происходит преобразование энергии переменного тока высокого напряжения в энергию выпрямленного тока с уровнем напряжения, необходимым для работы электроподвижного состава.

На существующих электрифицированных железных дорогах система тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ оказывается неэффективной при наметившейся в РФ тенденции увеличения скоростей движения пассажирских и массы грузовых поездов.

Существует несколько способов повышения энергетической эффективности системы электрической тяги постоянного тока. Один из них – это усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ с помощью фидера постоянного тока повышенного до 6, 12 и 24 кВ напряжения и установки пунктов питания контактной сети на перегоне. В работах отечественных [4-7] и зарубежных [9] ученых предложено обоснование системы электроснабжения железных дорог повышенного напряжения постоянного тока.

Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» предусматривает электрификацию переменным током неэлектрифицированных путей. Эффективность работы ЭПС переменного тока оценивают с помощью энергетических показателей.

1.1 Энергетические показатели электроподвижного состава переменного тока

На сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируются грузовые и пассажирские электровозы переменного тока. Во время работы электровоза на фидерной зоне изменяются режимы его движения, также изменяются величины сопротивлений тяговой сети и напряжение на токоприемнике электровоза. Вопросы изменяющихся параметров контактной сети при движении электровоза, электромагнитной совместимости систем тягового

электроснабжения переменного тока, а также электромагнитные процессы при работе на фидерной зоне электровозов с ВИП рассмотрены в [78]

По состоянию на начало 2019 г. в эксплуатируемом парке ОАО «РЖД» находится более 2500 электровозов серии ВЛ80, более 800 электровозов серии ЭП1 и около 1200 электровозов серии 2ЭС5К. В настоящее время электровозы серии ВЛ80 являются основными грузовыми электровозами переменного тока, при этом около 30% таких электровозов почти исчерпали свой ресурс. В соответствии с «Программой приобретения тягового подвижного состава ОАО «РЖД» [37] предусмотрена закупка многосекционных электровозов переменного тока новых поколений, а также исключение из инвентарного парка электровозов серии ВЛ80 с истекшим сроком службы. В соответствии с технической документацией на многосекционные электровозы их срок службы составляет 40 лет [10]. Таким образом, в ближайшей перспективе основными грузовыми электровозом переменного тока станут многосекционные электровозы с тяговыми электродвигателями пульсирующего тока.

На железных дорогах ОАО «РЖД» эксплуатируются грузовые и пассажирские электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями (ТЭД) пульсирующего тока. Питание ТЭД в режиме тяги на этих электровозах осуществляется через тяговый преобразователь [11].

Важнейшими показателями ЭПС с тиристорными преобразователями являются энергетические показатели, а именно коэффициент мощности λ и коэффициент полезного действия (КПД) η , а также коэффициент энергетической эффективности $K_{\text{эф}}$.

1.1.1 Коэффициент мощности электроподвижного состава переменного тока

Коэффициент мощности ЭПС равен отношению активной мощности к полной (установленной) мощности электровоза. При допущении о

синусоидальной форме напряжения на токоприемнике ЭПС значение коэффициента мощности можно найти по формуле:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \nu \cos \varphi \quad (1)$$

где P – активная мощность, Вт;

S – полная мощность, ВА;

ν – коэффициент несинусоидальности тока, $\nu = I_1/I$ (где I_1 – действующее значение основной гармоники тока, потребляемого ЭПС; I – действующее значение тока, потребляемого ЭПС);

φ – угол сдвига по фазе между напряжением и основной гармоникой тока первичной обмотки тягового трансформатора ЭПС.

Коэффициент мощности λ у ЭПС переменного тока $K_m \approx 0,85$ при значениях $\cos \varphi$ в пределах 0,88...0,9 и коэффициенте искажения формы тока ν , равном 0,95. Коэффициент полезного действия находится в пределах 0,84-0,86. Повышенные активное и реактивное сопротивления тяговой сети приводят к значительному искажению формы токов и напряжений тяговой сети [11], а также к снижению коэффициента мощности; при этом увеличиваются полная мощность ЭПС и потери энергии в тяговой сети из-за увеличения действующего значения тока I , потребляемого электроподвижным составом из тяговой сети. Снижение коэффициента полезного действия ЭПС увеличивает расход электроэнергии на тягу поездов.

1.1.2 Коэффициент полезного действия и энергетической эффективности электроподвижного состава переменного тока

Более 30 % от стоимости жизненного цикла ЭПС – это стоимость электроэнергии, расходуемой на тягу поезда. Расход электроэнергии, потребляемой ЭПС из контактной сети, зависит от КПД электроподвижного состава. КПД электровоза определяют по следующей формуле [11]:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{F_{\text{к}} V}{3,6 P}, \quad (2)$$

где F_k – касательная сила тяги, развиваемая электровозом, кН,

V – скорость движения электровоза, км/ч;

P – активная мощность электровоза, кВт.

Активная мощность P электровоза определяют по формуле [11]:

$$P = \frac{F_k v}{3,6 \eta_{\text{п}}} + \Delta P_{\delta} + \Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\text{с}}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{п}}$ – КПД привода, передающего вращающий момент от тягового двигателя на ось колесной пары электровоза;

ΔP_{δ} – потери мощности в тяговых двигателях;

$\Delta P_{\text{п}}$ – потери мощности в преобразователях, а также тяговых трансформаторах;

$\Delta P_{\text{с}}$ – мощность вспомогательных машин и других потребителей собственных нужд электровоза

Мощность потерь энергии в тяговых двигателях составляет не более 5%, при этом КПД ТЭД пульсирующего тока не превышает 0,95, а КПД тягового трансформатора преобразовательной системы электровоза находится на уровне 0,85...0,9 для преобразователей с высокой энергоэффективностью.

Возможности повышения энергетических показателей ЭПС переменного тока ещё не исчерпаны. Ощутимый эффект в снижении потерь энергии может дать повышение энергетических показателей тягового трансформатора, что особенно актуально для трансформаторов перспективных преобразовательных систем, важной составляющей частью которых является 4qS-преобразователь.

Для определения влияния значений коэффициента мощности и КПД на энергетические показатели системы, а также электротехнической системы «тяговая сеть – электровоз» применяют коэффициент энергетической эффективности $K_{\text{эф}}$, [11] который при неизменной активной составляющей тока электровоза равен

$$K_{\text{эфф}} = \frac{\lambda}{(\lambda_1^2 - \lambda^2)\eta_{\text{тп}} + \lambda^2}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{тп}}$ – КПД участка тяговой сети переменного тока от питающего до отсасывающего фидеров тяговой подстанции при работе электровоза на этом участке с коэффициентом мощности λ .

При работе на фидерной зоне электровозов переменного тока с различной преобразовательной системой, а также с изменяющимся коэффициентом мощности изменяется коэффициент энергетической эффективности электротехнической системы. В зависимости от угла коммутации тиристоров у электровозов с ВИП коэффициент мощности может изменяться от 0,55 до 0,8. У электровозов, оборудованных КРМ, коэффициент мощности достигает 0,85.

При увеличении коэффициента полезного действия электротехнической системы до значения $\eta_{\text{тп}} \geq 0,89$ и коэффициента мощности электровоза со значения $\lambda = 0,8$ до $\lambda_1 = 0,9$ коэффициент $K_{\text{эфф}}$ становится равным 1,011, повышается не более чем на 1%. Дополнительные потери мощности в тяговой сети при понижении коэффициента мощности можно уменьшить с помощью устройств компенсации реактивной мощности.

1.2 Особенности системы электрической тяги переменного тока

1.2.1 Возможность повышения энергетической эффективности тягового трансформатора

Основной задачей по развитию системы электрической тяги переменного тока является повышение энергетических показателей ЭПС. Низкие значения коэффициента мощности ЭПС являются следствием значительной величины реактивной мощности тяговой сети, которая приводит к уменьшению напряжения на токоприемнике и повышенному потреблению тока из контактной сети и, как следствие, недоиспользованию мощности

системы тягового электроснабжения. Применение выпрямительно-инверторных преобразователей на ЭПС, к которым подключаются тяговые двигатели через сглаживающие реакторы, являющиеся активно-индуктивной нагрузкой, приводит к искажению формы кривой напряжения и тока в тяговой сети, что ухудшает электромагнитную совместимость (ЭМС) электроподвижного состава с устройствами железнодорожной автоматики, использующими рельсовые цепи.

Развитие системы преобразования электрической энергии передаваемой из контактной сети к тяговым двигателям ЭПС направлено на повышение энергетических показателей, и соответственно, улучшение энергетической эффективности ЭПС и системы электроснабжения переменного тока в целом.

Величина потерь энергии преобразуемой в тяговом трансформаторе, существенно зависят от искажения формы переменного напряжения. Для уменьшения потерь необходимо обеспечить наименьшее искажение формы переменного напряжения.

Важной составной частью трансформатора является магнитопровод, который изготавливают либо из различных сталей, либо из других магнитных материалов.

Лучшими магнитными характеристиками обладают ферриты и пермаллои. Ферритами в общем случае называют двойные окислы, а также более сложные оксидные соединения, содержащие окись трехвалентного железа Fe_2O_3 . Пермаллои представляют собой сплавы железа Fe с никелем Ni или железа с никелем и кобальтом Co, обычно легированные молибденом Mo, хромом Cr и другими элементами. Основное преимущество пермаллоев – высокие значения магнитной проницаемости в слабых полях и малое значение коэрцитивной силы.

Недостатками пермаллоев являются большая чувствительность магнитных свойств к вибрационно-ударным нагрузкам, что характерно для ЭПС, пониженные значения индукции насыщения по сравнению с различными сталями и сравнительно высокая стоимость. При использовании

сердечника из пермаллоя конструкцией трансформатора должно предусматриваться пониженное воздействие вибрационно-ударных нагрузок, что в условиях эксплуатации тяговых трансформаторов реализовать невозможно.

У высокопроницаемых пермаллоев индукция насыщения не превышает 0,75 Тл. Насыщение магнитопровода из аморфной стали достигается при индукции 1,4 Тл и частоте питающего переменного напряжения 1 кГц. Отсюда следует, что при одинаковой мощности трансформатора, габаритные размеры магнитопровода, зависящие от индукции насыщения и выполненного из пермаллоя будут больше, чем у магнитопровода, выполненного из аморфной стали.

Следует отметить, что предельные мощности трансформаторов с магнитопроводами из аморфной стали или пермаллоя находятся на уровне единиц кВт, в то время как мощность тягового трансформатора, например перспективного электровоза с бесколлекторными ТЭД находится на уровне 4,5...5,0 МВт, а электропоезда – до 2,0...2,4 МВт.

Применение аморфной стали в качестве материала магнитопровода тягового трансформатора традиционного ЭПС переменного тока приведет к увеличению его массы и стоимости изготовления. Потери энергии на гистерезис и вихревые токи при работе трансформатора на промышленной частоте 50 Гц малы по сравнению с аналогичными потерями при работе трансформатора на повышенной частоте, поэтому применение аморфной стали при изготовлении тягового трансформатора традиционного ЭПС нецелесообразно.

В то же время необходимо отметить, что на ЭПС новых поколений, в том числе предназначенных для работы с разным родом тока и величиной напряжения на токоприемнике, тяговые электроприводы которых будут содержать многозвенные преобразовательные структуры с промежуточными звеньями переменного напряжения высокой частоты, применение в них трансформаторов с магнитопроводами из аморфной стали будет

целесообразным с точки зрения обеспечения высокой энергоэффективности такого ЭПС.

Перспективная система электроснабжения повышенного напряжения постоянного тока предполагает последовательное соединение АИН входного звена преобразовательной системы ЭПС [5]. Устройство преобразовательной системы без применения согласующего трансформатора не представляется возможным. Коммутационная способность современных силовых полупроводниковых приборов позволяет осуществить преобразование электроэнергии при повышенной частоте. Потери энергии в традиционном магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи при частоте 1 кГц значительно больше, чем при работе трансформатора на промышленной частоте. В связи с этим, целесообразно применение технических решений, направленных на уменьшение электромагнитных потерь в магнитопроводе тягового трансформатора.

Трансформаторы с магнитопроводами из аморфной стали выпускают в РФ для эксплуатации на распределительных подстанциях промышленного исполнения. Для уменьшения потерь мощности в тяговом трансформаторе ЭПС также целесообразно изготовить магнитопровод тягового трансформатора из аморфной электротехнической стали. Установка тягового трансформатора с сердечником из аморфной стали возможна, как на вновь разрабатываемом ЭПС, так и на существующем при проведении среднего и капитального ремонтов на локомотиворемонтном предприятии. Применение аморфной стали при изготовлении сердечника позволит снизить потери и при этом увеличить КПД трансформатора.

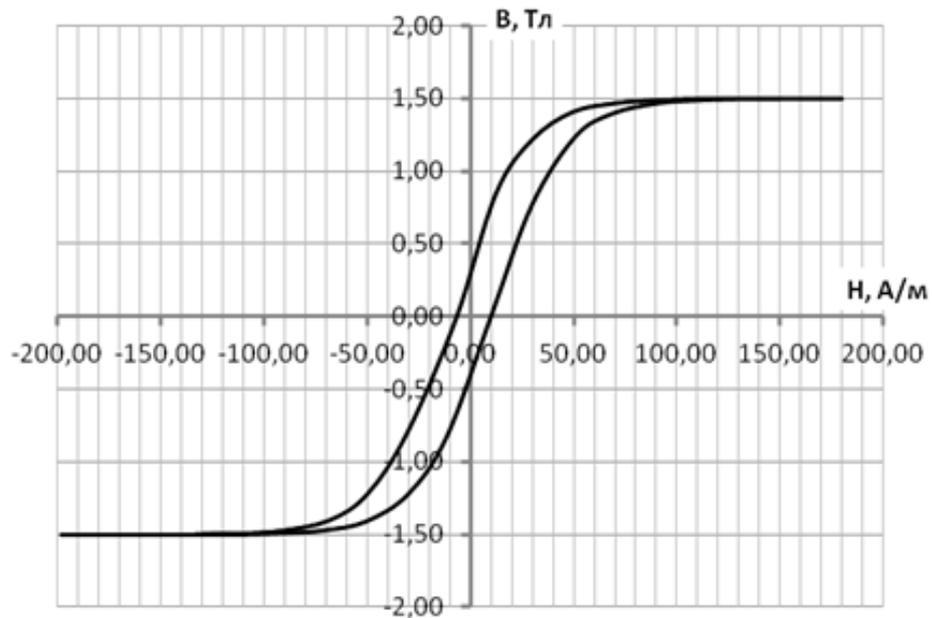


Рисунок 1.2 – Магнитная характеристика аморфной стали

Аморфную сталь, магнитная характеристика которой представлена на рисунке 1.2, применяют также при изготовлении магнитопроводов распределительных трансформаторов мощностью до 630 кВт в Японии, Китае, России, Франции и других странах. Аморфные стали представляют собой магнитомягкие материалы, для которых характерно неупорядоченное расположение атомов в пространстве.

1.2.2 Преобразовательные системы электроподвижного состава переменного тока

Как в отечественных разработках, так и за рубежом на электроподвижном составе переменного тока с АТД нашли применение двухзвенные преобразователи электроэнергии с промежуточным звеном выпрямленного напряжения или тока, обеспечивающие независимое регулирование величины и частоты напряжения, прикладываемого к АТД.

На традиционном ЭПС переменного тока входные преобразователи могут иметь различные структуры. Структура входного преобразователя определяется техническими требованиями, которые предъявляет заказчик в части обеспечения электромагнитной совместимости ЭПС с системой

тягового электроснабжения и устройствами железнодорожной автоматики, использующими рельсовые цепи. При этом должны быть обеспечены заданные массо-габаритные и энергетические показатели.

Одним из главных преимуществ многозвенных преобразователей по сравнению с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ) является относительная простота обеспечения устойчивости переходных процессов в электроприводе ЭПС с АТД, особенно при реализации предельных по условиям сцепления тяговых усилий [22].

Выходные преобразователи электропривода ЭПС с АТД осуществляют преобразование выпрямленного напряжения промежуточного звена в переменное трехфазное заданной величины и частоты.

На ЭПС переменного тока, эксплуатируемого на российских железных дорогах, наибольшее распространение в качестве входных звеньев преобразовательных систем получили выпрямители с зонно-фазовым управлением [23]. Входной преобразователь в этом случае представляет собой выпрямитель с естественной коммутацией тока и последовательным или параллельным соединением мостов. Рассмотрим примеры электрических схем силовой цепи ЭПС переменного тока. Схемы представлены на рисунке 1.3.

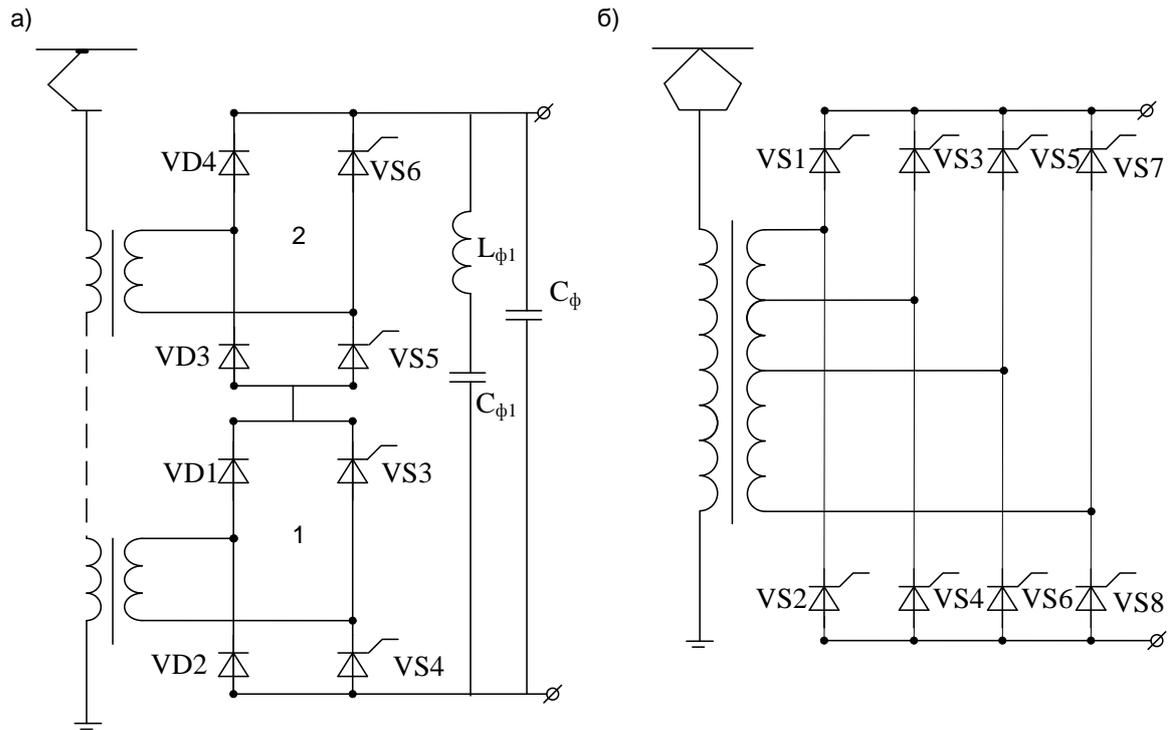


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема силовой цепи преобразователя опытного электровоза типа SV1(а) и электровоза серии ВЛ-80Р (б)

Входное звено преобразователя опытного электровоза SV1 фирмы Stromberg состоит из двух соединенных последовательно диодно-тиристорных мостов и LC- фильтра (рисунок 1.2, а). Первый мост, состоящий из вентилей VD1, VD2, VS3 и VS4 включен в работу постоянно, величина напряжения на конденсаторе фильтра C_{ϕ} поддерживается постоянной за счет фазового регулирования второго моста, состоящего из вентилей VD3, VD4, VS5 и VS6. Существуют технические решения, при которых первый мост выполняется неуправляемым (выпрямитель электровоза E-1200 фирмы «BBC»). В этом случае при выключении моста исключается возможность питания нагрузки от трансформатора при аварийных режимах [20]. При включении тиристоров второго выпрямительного моста для стабилизации напряжения в звене выпрямленного напряжения преобразователя электровоза SV1 тяговый электропривод, состоящий из выпрямителя с естественной коммутацией и АИН с ШИМ (на рисунке не показан), обеспечивает

средневзвешенный коэффициент мощности на уровне 0,8. Вместе с тем в преобразователе частоты такого электропривода потери энергии на коммутацию тока в АИН с ШИМ прямо пропорциональны количеству переключений за период и имеют более высокий уровень по сравнению с АИН с амплитудным регулированием выходного напряжения. Использование зонно-фазовых выпрямителей приводит к значительному уменьшению коэффициента мощности, снижению выпрямленного напряжения и значительному мешающему влиянию на линии связи и устройства СЦБ. Для устранения указанных недостатков входные преобразователи должны оснащаться устройствами компенсации реактивной мощности.

Как известно [11], на электровозах, оснащенных выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) режиме тяги при регулировании напряжения на ТЭД кривые тока и выпрямленного напряжения имеют следующую форму (рисунок 1.4)

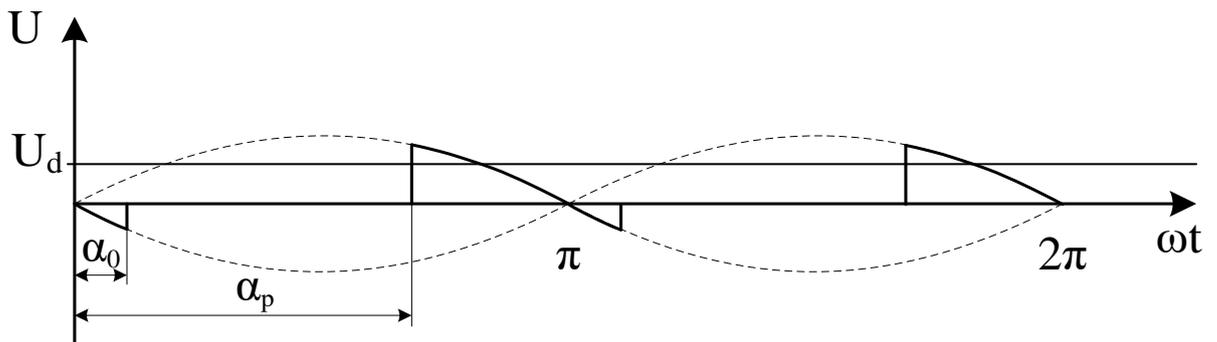


Рисунок 1.4 – Кривая выпрямленного напряжения U_d ТЭД

При разгоне электровоза система управления тяговым приводом уменьшает угол α_p от начального максимального значения до значения $\alpha_0 = 8...10$ эл. град., при этом изменяется форма напряжения и тока сетевой обмотки тягового трансформатора.

Коммутации ключевых элементов тягового преобразователя приводят к искажению формы кривых тока и напряжения и тем самым оказывают мешающее влияние на устройства СЦБ и железнодорожной автоматики, использующие рельсовые цепи.

1.3 Электротехнические параметры преобразовательной системы электровозов переменного тока

На всех грузовых и пассажирских электровозах переменного тока, выпускаемых серийно, установлены тяговые трансформатор и преобразователь электроэнергии, комплект тяговых электрических аппаратов и коллекторные тяговые электродвигатели (ТЭД) пульсирующего тока (исключением является шестиосный пассажирский электровоз ЭП20, оснащенный асинхронными ТЭД). В режиме тяги электрическая энергия, поступающая из контактной сети, расходуется на тягу поезда и питание вспомогательных агрегатов и установок. Наибольшая часть этой энергии преобразуется в тяговом преобразователе.

В качестве тягового преобразователя на электровозах 2ЭС5К применен управляемый выпрямитель [10]. Применение этого выпрямителя и подключение обмоток тяговых двигателей к выпрямителю через сглаживающий реактор приводит к ухудшению коэффициента мощности λ на токоприемнике электровоза, так как реактор и тяговые двигатели являются активно-индуктивной нагрузкой. Кривые тока и выпрямленного напряжения на ТЭД имеют следующий вид (рисунок 1.5).

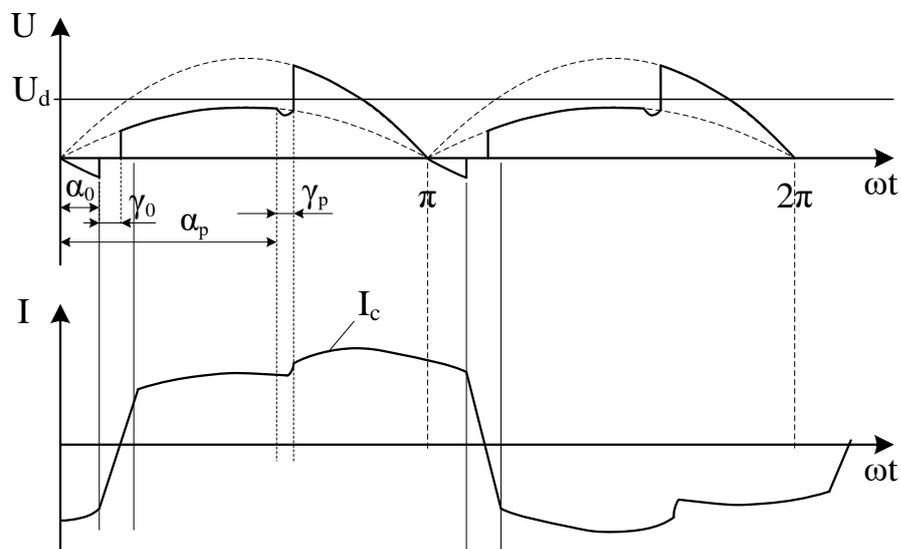


Рисунок 1.5 – Кривые напряжения на ТЭД и тока первичной обмотки тягового трансформатора в режиме тяги при работе на второй зоне регулирования напряжения

На отечественных электровозах с ВИП и тяговыми двигателями пульсирующего тока предусмотрено рекуперативное торможение [10]. В этом режиме происходит преобразование механической энергии движущегося поезда в электрическую энергию и возврат её в систему тягового электроснабжения (рисунок 1.6).

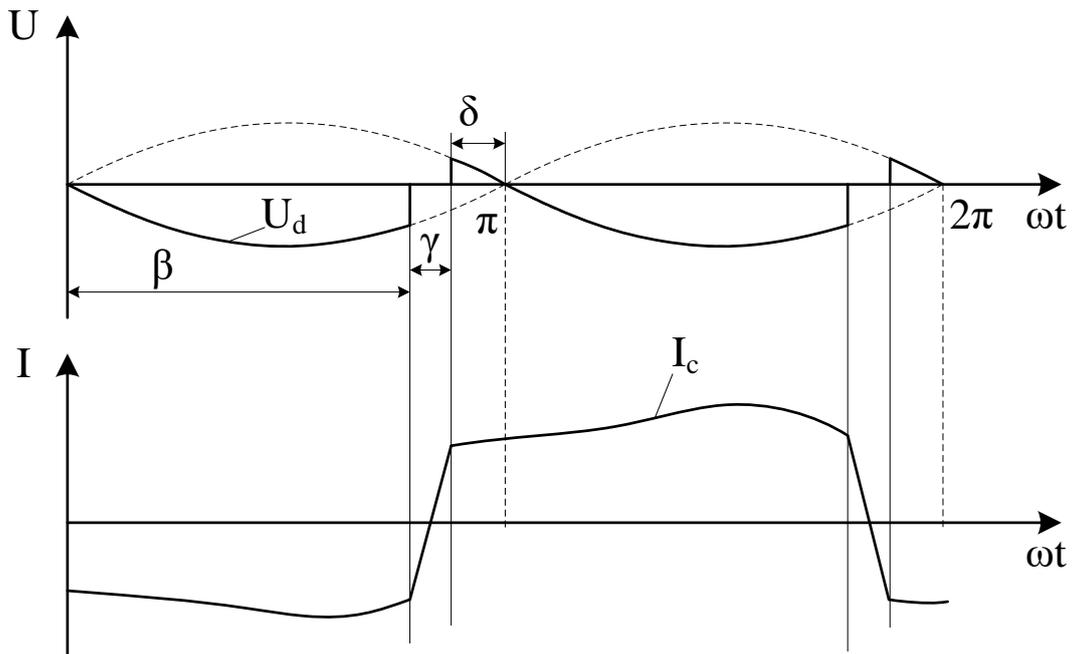


Рисунок 1.6 – Кривые выпрямленного напряжения ТЭД и тока первичной обмотки тягового трансформатора в режиме рекуперации

В качестве примера на рисунке 1.7 приведены осциллограммы тока I_c сетевой обмотки трансформатора и напряжения на токоприемнике U_c на токоприемнике электровоза переменного тока.

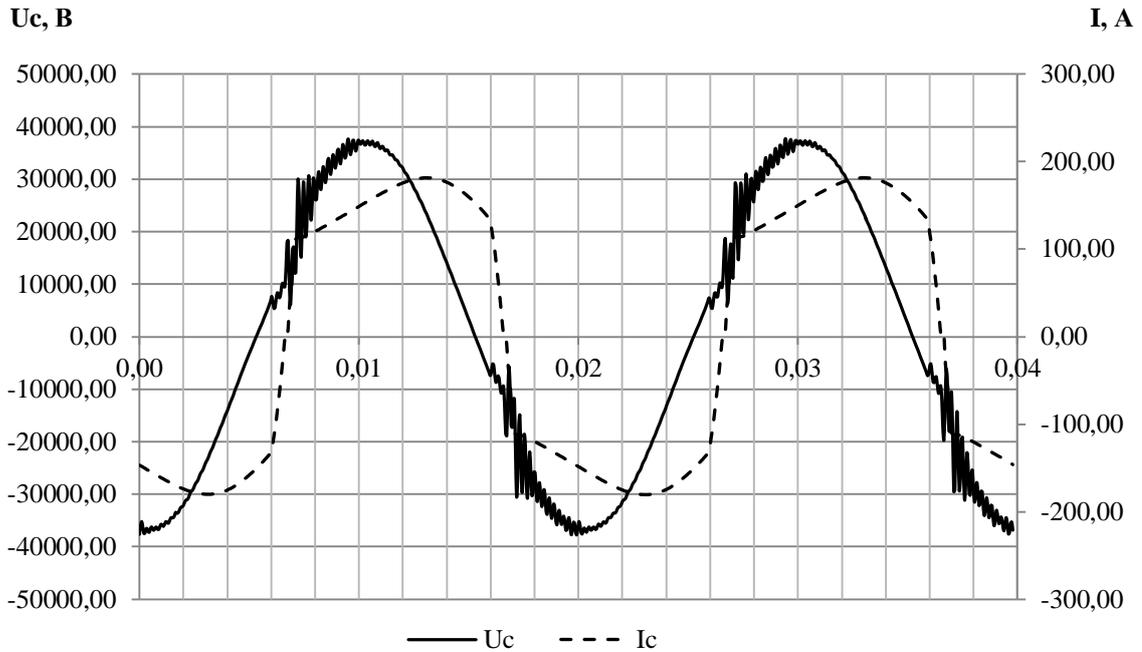


Рисунок 1.7 – Осциллограммы напряжения на токоприемнике электровоза и тока сетевой обмотки тягового трансформатора

В режиме тяги ток первичной обмотки тягового трансформатора отстает по фазе от напряжения контактной сети, что приводит к потреблению из контактной сети электровозом дополнительной реактивной энергии. При этом возникают дополнительные потери мощности в тяговой сети и, как следствие, понижается к.п.д. такой электротехнической системы.

Тяговый преобразователь электровозов нового поколения с асинхронными тяговыми двигателями состоит из четырехквadrантного (4qS-) преобразователя, звена выпрямленного напряжения и АИН. 4qS-преобразователь обеспечивает близкий к нулю сдвиг по фазе между током и напряжением сетевой обмотки тягового трансформатора, при этом $\cos \varphi \approx 1$ (рисунок 1.8).

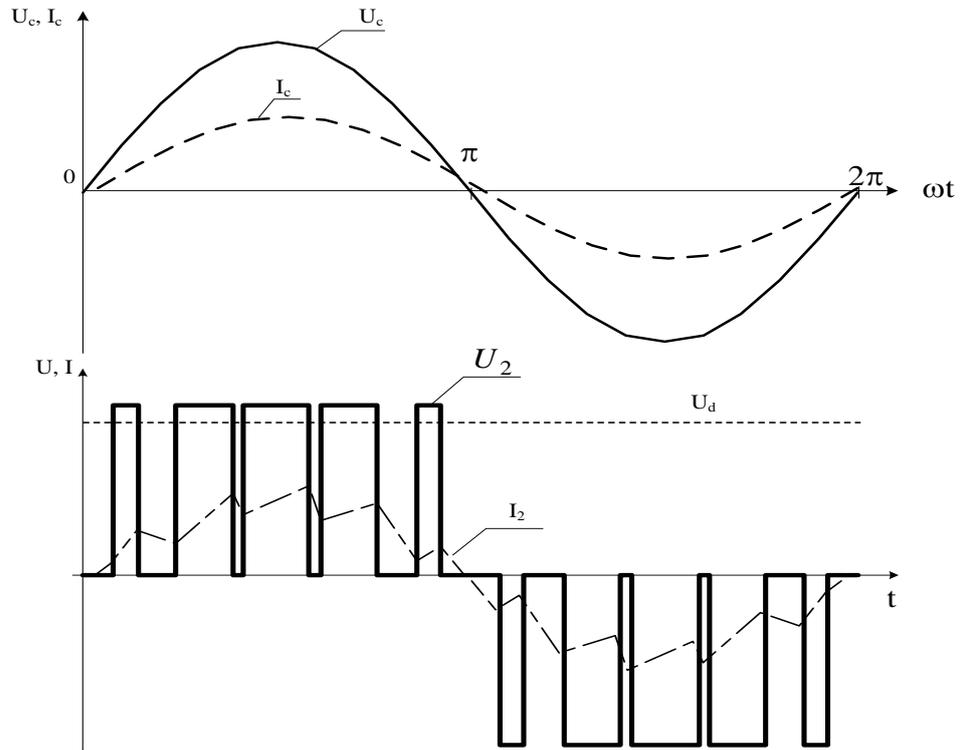


Рисунок 1.8 – Кривые токов и напряжений преобразовательной системы электровоза с четырехквadrантным преобразователем

На рисунке 1.8 напряжение на токоприемнике электровоза обозначено U_c , ток сетевой обмотки тягового трансформатора I_c . Напряжение и ток тяговой обмотки ТТ, к выходным зажимам которого подключается 4qS-преобразователь, обозначены U_2 и I_2 соответственно. На выходных зажимах 4qS-преобразователя формируется выпрямленное напряжение U_d , в результате приложения которого заряжаются конденсаторы звена выпрямленного напряжения, и это значение поддерживается неизменным для стабильной работы тягового преобразователя. Минимальный сдвиг по фазе между напряжением U_c и током I_c обеспечивается алгоритмом управления ключевыми элементами четырехквadrантного преобразователя.

Осциллограммы тока и напряжения на токоприемнике электровоза с 4qS-преобразователем, полученные при испытаниях, представлены на рисунке 1.9.

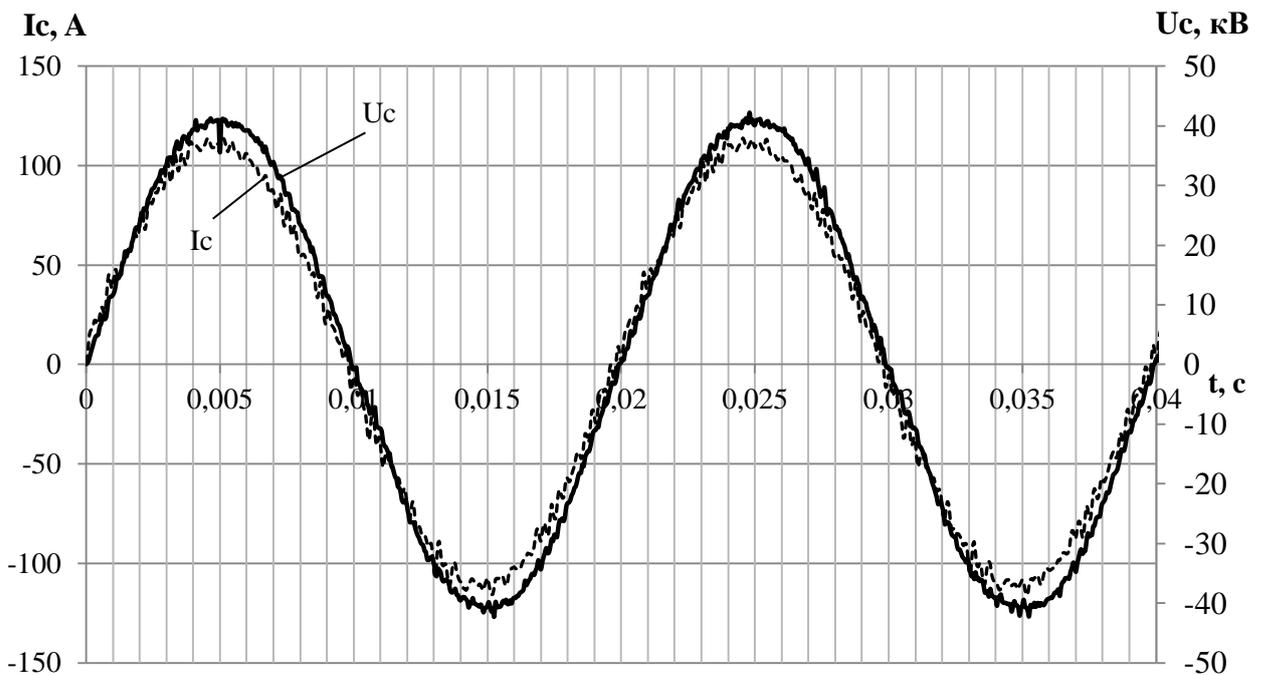


Рисунок 1.9 – Осциллограммы тока и напряжения первичной обмотки тягового трансформатора электровоза с четырехквadrантным преобразователем

При сравнении осциллограмм напряжений на токоприемнике и токов сетевых обмоток тяговых трансформаторов электровозов с ВИП (рисунок 1.7) и 4qS-преобразователем (рисунок 1.9) следует вывод о том, что электровоз с 4qS-преобразователем оказывает наименьшее электромагнитное искажающее воздействие на тяговую сеть и устройства железнодорожной автоматики, использующие рельсовые цепи.

1.4 Способы повышения энергетической эффективности электроподвижного состава переменного тока

Повышение энергетической эффективности системы электрической тяги переменного тока достигается несколькими способами. Для этого на тяговых подстанциях устанавливают стационарные установки компенсации реактивной мощности [11, 25-35]. Существующие установки отличаются по своей структуре и способу регулирования напряжения в контактной.

Наибольший эффект от применения стационарных устройств компенсации реактивной мощности достигается при подключении таких устройств непосредственно у потребителя реактивной энергии [11,16]. Применение статических преобразователей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) позволило компенсировать реактивную энергию, потребляемую электровозом из контактной сети с помощью компенсаторов реактивной мощности (КРМ), подключенных ко вторичной обмотке тягового трансформатора электровоза (рисунок 1.10).

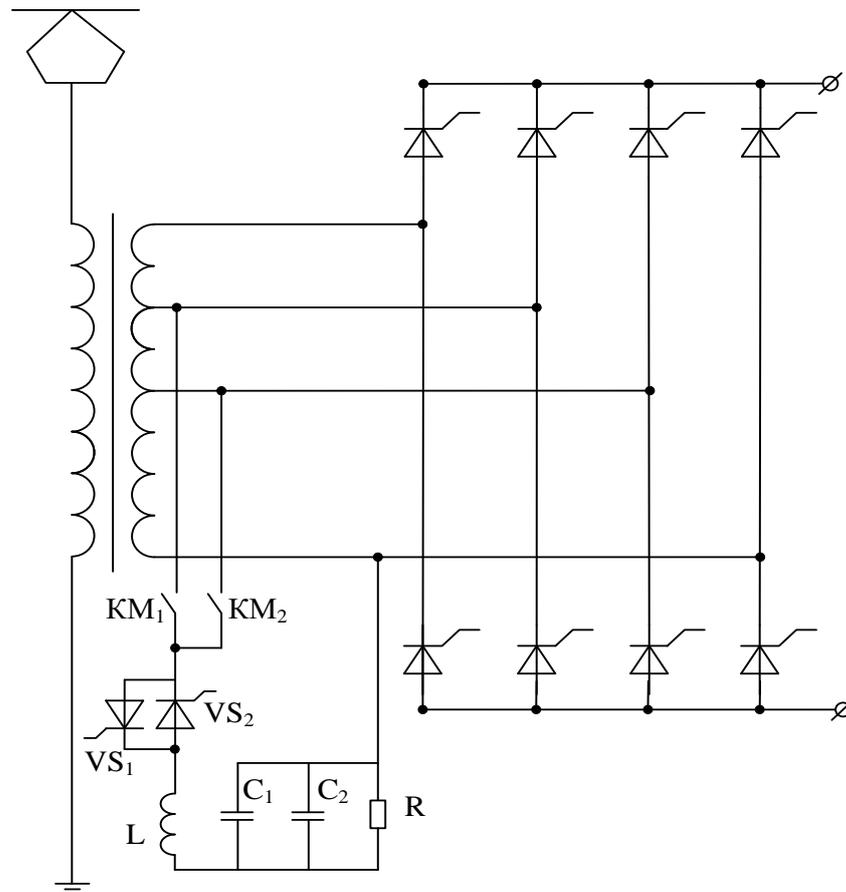


Рисунок 1.10 – Схема подключения регулируемого компенсатора реактивной мощности на электровозе ВЛ80Т

Степень компенсации реактивной мощности реализуется подключением компенсатора к разным секциям тяговой обмотки трансформатора при помощи контакторов $KM1$ и $KM2$ и изменение моментов времени подачи управляющих сигналов на вентили $VS1$ и $VS2$ от системы управления.

На электровозах типа 2ЭС5 преобразование переменного напряжения контактной сети в выпрямленное и его поддержание на заданном уровне на конденсаторах звена выпрямленного напряжения осуществляется 4qS-преобразователем. Уровень напряжения на конденсаторах звена выпрямленного напряжения поддерживается постоянным в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Впервые данный преобразователь был применен на электровозах Е120 и назван разработчиками четырехквандрантным (4qS-преобразователем)[12], так как может работать во всех четырех квадрантах комплексной плоскости.

Важное принципиальное отличие первых опытных электровозов Е-120 от их современных аналогов – это регулирование величины напряжения в звене выпрямленного напряжения по заданию от системы управления тяговым электроприводом.

На современных электровозах переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) во входном звене преобразовательной системы применяют 4qS-преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (рисунок 1.11).

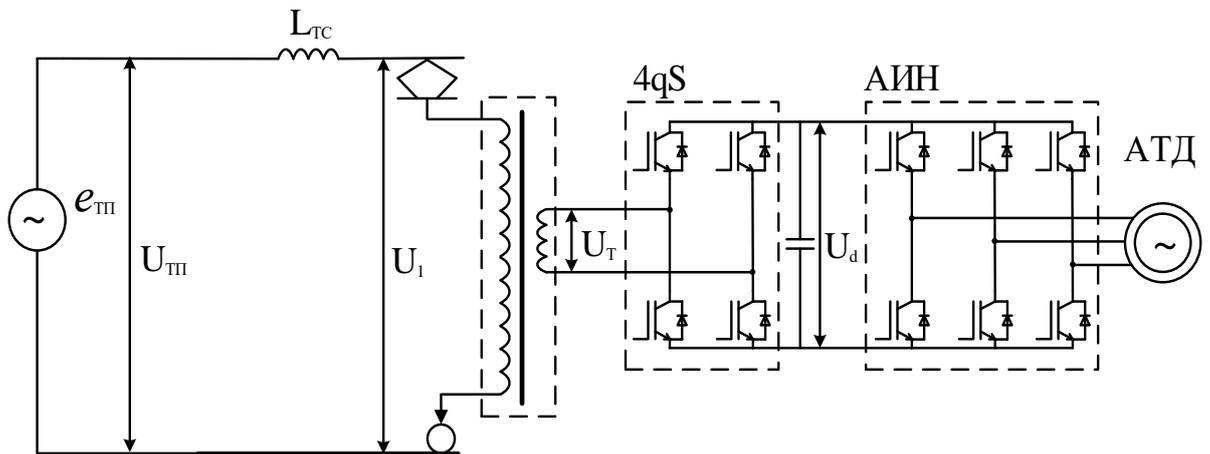


Рисунок 1.11 – Упрощенная принципиальная схема тяговой сети и силовой цепи электровоза с 4qS-преобразователем

Особенность работы 4qS-преобразователя заключается в алгоритме управления транзисторами по методу синусоидальной широтно-импульсной модуляции. В режимах тяги и рекуперативного торможения между основными

гармониками напряжения U_c и тока I_c , потребляемого электровозом из тяговой сети, поддерживается заданное минимальное значение угла сдвига φ .

В режимах тяги и рекуперативного торможения 4qS-преобразователь электровоза может обеспечивать как опережение, так и отставание тока \dot{I} от напряжения \dot{U}_c на угол φ (рисунок 1.12).

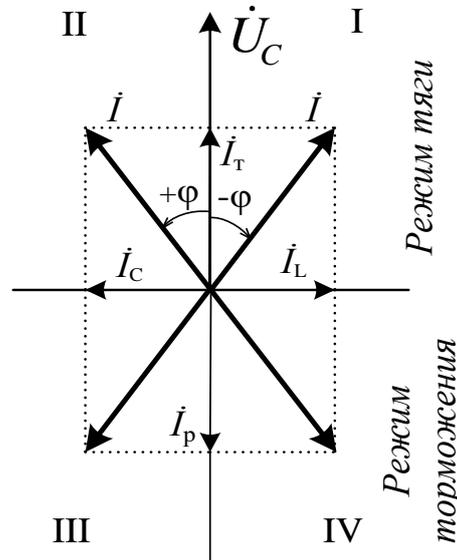


Рисунок 1.12 – Векторные диаграммы токов и напряжения

На ЭПС переменного тока электрическая энергия поступает к тяговым двигателям из контактной сети через коммутационные аппараты и преобразователи электровоза. Преобразование энергии, потребляемой из контактной сети на тягу поезда, осуществляется в преобразовательном устройстве электроподвижного состава (ЭПС), которое состоит из тягового трансформатора (ТТ), 4qS-преобразователя, звена выпрямленного напряжения с конденсатором фильтра, автономного инвертора напряжения (АИН), питающего асинхронный тяговый двигатель (АТД). При этом электровоз, оборудованный выпрямительно-инверторным преобразователем, будет потреблять из контактной сети реактивную энергию. Работе электровоза, оснащенного ВИП, соответствует расположение комплекса тока \dot{I} и комплекса напряжения \dot{U}_c на комплексной плоскости в квадрантах I (режим тяги) и IV (режим рекуперации) соответственно.

В отличие от этого на электровозах с 4qS-преобразователем можно обеспечить опережающий фазовый сдвиг тока по отношению к напряжению как в тяговом, так и в тормозном режимах. Это позволяет генерировать реактивную энергию электровоза в контактную сеть и тем самым обеспечить повышение величины напряжения на фидерной зоне.

Анализ электромагнитных процессов в системе «тяговая сеть – электровоз» выполнен по методу основной гармоники с учетом следующих допущений, применяемых для мощных электротехнических систем: высокочастотные процессы при реализации ШИМ не учитываются, активные потери энергии в системе и ток намагничивания тягового трансформатора равны нулю. Векторные диаграммы напряжений и тока при различных углах φ приведены на рисунке 1.13.

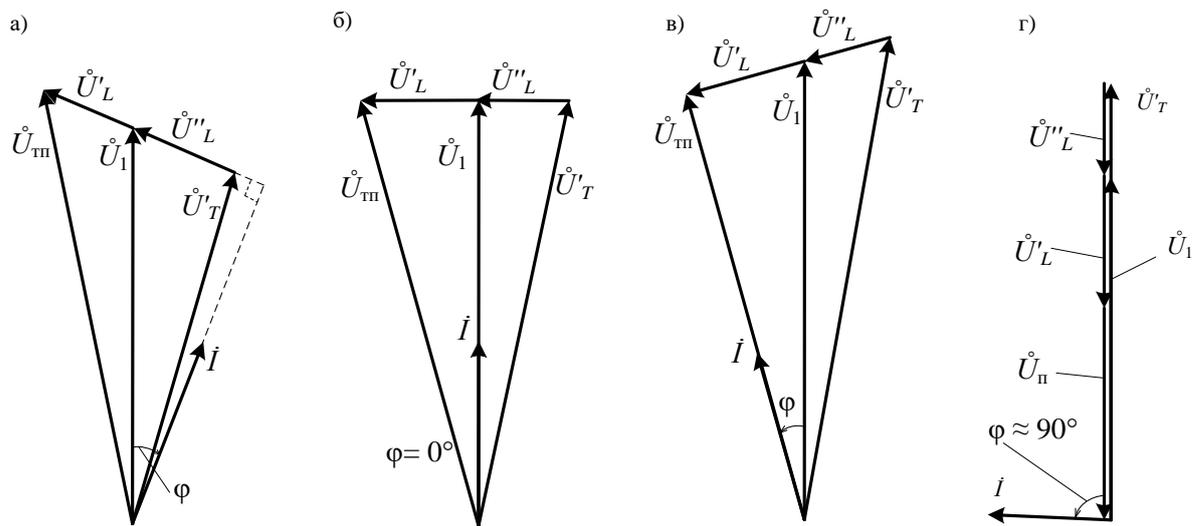


Рисунок 1.13 – Векторные диаграммы напряжений и тока для режима тяги электровозов, оснащенных ВИП и 4qS-преобразователем

Представленные векторные диаграммы соответствуют режиму тяги электровоза. В этом режиме угол φ изменяется в диапазоне от 0 до 180 эл. град. В зависимости от угла φ сдвига по фазе основных гармоник тока и напряжения пропорционально изменяются величины падения напряжений в тяговой сети и обмотках ТТ.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что на электровозах нового поколения, в структуре преобразовательной системы которых

применен 4qS-преобразователь, возможно реализовать режим работы, при котором будет компенсироваться реактивная энергия, потребляемая другими электровозами, находящимися на той же фидерной зоне.

Основной задачей диссертационной работы является исследование режима работы 4qS-преобразователя электровозов переменного тока, при котором реализуется компенсация реактивной мощности тяговой сети.

2 Анализ электромагнитных процессов в тяговом трансформаторе электровоза переменного тока с входным четырехквadrантным преобразователем

2.1 Система управления четырехквadrантным преобразователем

Формирование управляющих сигналов ключевыми элементами входного звена преобразовательной системы – 4qS-преобразователя осуществляется системой управления тяговым электроприводом электровоза. 4qS-преобразователь состоит из четырех IGB-транзисторов VT1...VT4, встречно-параллельно которым подключены диоды VD1...VD4 (рисунок 2.1).

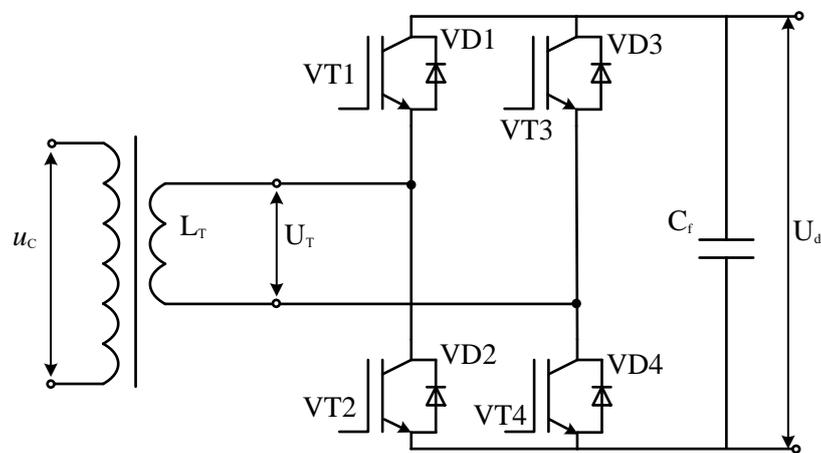


Рисунок 2.1 – Схема подключения ключевых элементов четырехквadrантного преобразователя

Зажимами переменного тока 4qS-преобразователь подключен к тяговой обмотке тягового трансформатора с напряжением U_T (рисунок 2.1), а к выходным зажимам подключены конденсатор C_f звена выпрямленного напряжения U_d и нагрузка – АИН с асинхронным тяговым двигателем (последние показаны на рисунке 1.10).

В результате анализа электромагнитных процессов в трансформаторе и входном преобразователе можно получить выражения, определяющие изменение параметров во времени.

Характер изменения входного тока i_1 в цепи на любом интервале времени определяется в результате решения следующего уравнения:

$$L_T \frac{di_1}{dt} + u_2 = u_1. \quad (2.1)$$

Для любого интервала времени от t_{n-1} до t_n , в пределах которого конфигурация схемы не меняется, ток определяется в виде:

$$i_1 = \frac{1}{\omega L_T} \int_{t_{n-1}}^{t_n} (u_1 - u_2) dt + i_{1(n-1)}. \quad (2.2)$$

В качестве примера, при кратности $\varepsilon = 5$ и глубине модуляции $\mu = U_{M\max}/U_{H\max} = 0,9$ на рисунке 2.2 показаны диаграммы токов и напряжений на входе и выходе преобразователя [13].

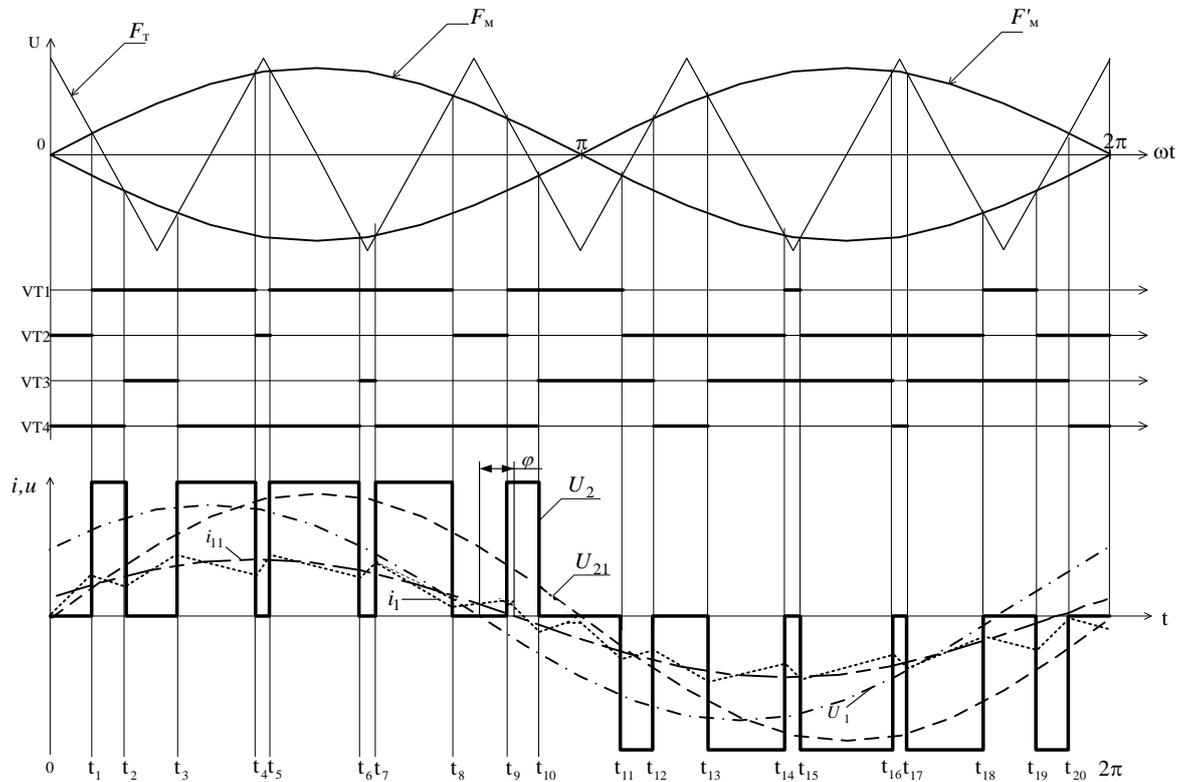


Рисунок 2.2 – Графики модулирующего высокочастотного сигнала, высокочастотного сигнала несущей частоты, коммутации транзисторов VT1-VT4

В кривой тока I_1 можно выделить основную гармонику I_{11} с частотой напряжения сети, которая смещена по отношению к напряжению U_1 на угол φ . Угол φ зависит от амплитудных значений напряжения $U_{1\max}$ и основной гармоники напряжения $U_{21\max}$, а также их взаимного сдвига ψ . Изменяя этот сдвиг и амплитуду основной гармоники путём изменения глубины модуляции μ , можно обеспечить получение любого фазового сдвига сетевого тока относительно напряжения на токоприемнике электровоза.

Значение угла в интервале $-90 < \varphi < 90$ соответствует работе преобразователя в режиме передачи электрической энергии от зажимов переменного тока к зажимам постоянного тока, т.е. потребления энергии из сети, а второй случай $90 < \varphi < 270$ - работе преобразователя в режиме рекуперативного торможения, возврата электрической энергии в контактную сеть. Как в режиме потребления энергии, так и в случае её возврата возможна работа с опережающим и отстающим сдвигом по фазе.

Для количественной оценки процессов в тяговом преобразователе, а также получения основных соотношений, устанавливающих связь между токами и напряжениями на элементах схемы, определим напряжение U_2 как разность потенциалов точек 1 и 2 (рисунок 2.3)

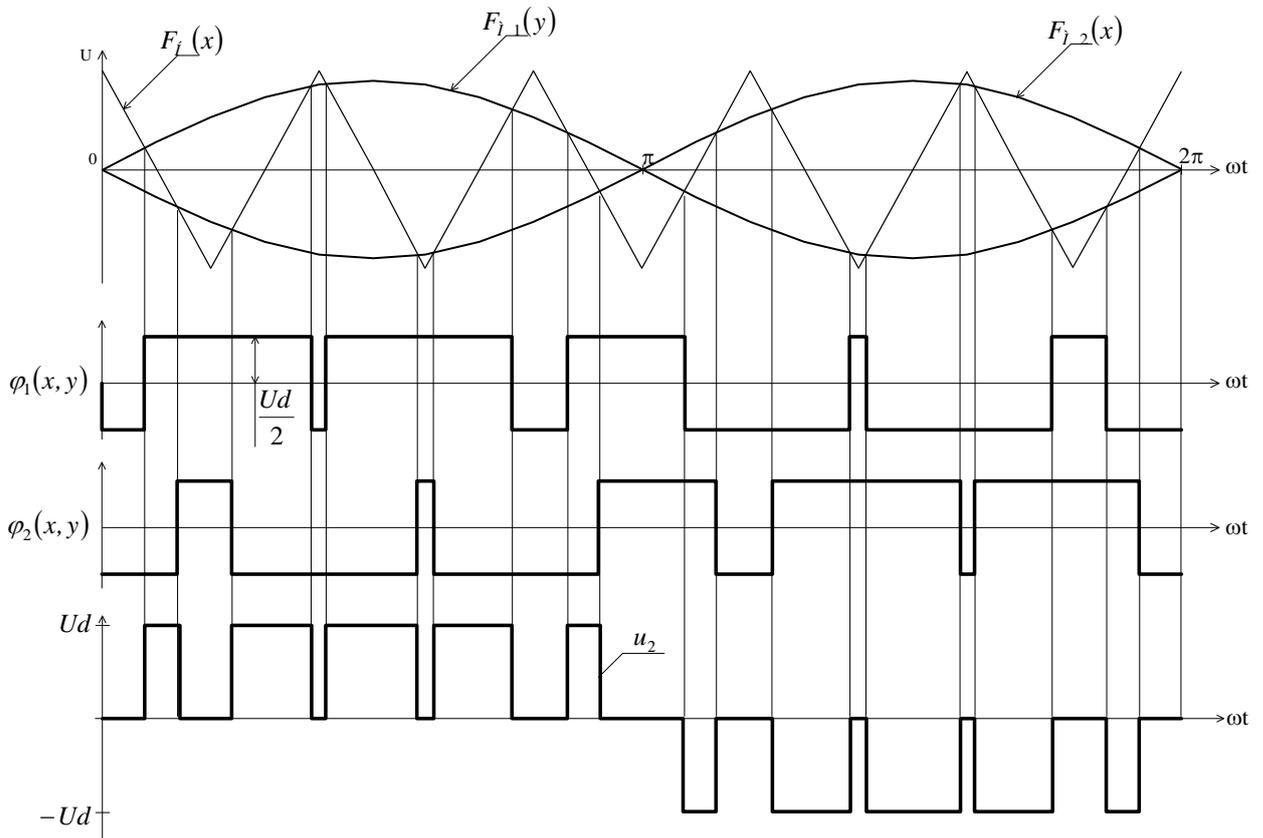


Рисунок 2.3 – Токи и напряжения преобразователя, графики модулирующих сигналов, высокочастотного сигнала, высокочастотного сигнала несущей частоты и формирования напряжения на входе преобразователя

В этом случае

$$u_2 = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2.3)$$

где φ_1 и φ_2 - потенциалы точек 1 и 2 относительно условного нулевого потенциала. Условным «нулём» может быть средняя точка соединения двух последовательно включенных конденсаторов, образующих конденсатор С1.

Характер изменения потенциалов φ_1 и φ_2 определяется состоянием транзисторов VT1-VT4, включение и выключение которых должно производиться таким образом, чтобы напряжение U_2 изменялось в соответствии с диаграммой рисунок 2.2, полученной в результате

двухсторонней двухполярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) по синусоидальному закону [13].

При ШИМ сравнивается модулирующий сигнал $F_M(y)$ с высокочастотным треугольным сигналом $F_T(x)$ и при $F_M > F_T$ включены транзисторы VT1 и VT3, а при $F_M < F_T$ - включены транзисторы VT2 и VT4. На рисунке 2.3 показаны графики высокочастотного сигнала $F_T(x)$ и модулирующих сигналов $F_{M1}(y)$ и $F_{M2}(y)$ для точек 1 и 2 схемы. Также приведены диаграммы потенциалов φ_1 и φ_2 , для которых можно записать:

$$\varphi_1(x, y) = \frac{U_d}{2} \text{sign}[F_{M1}(y) - F_T(x)]; \quad (2.4)$$

$$\varphi_2(x, y) = \frac{U_d}{2} \text{sign}[F_{M2}(y) - F_T(x)]; \quad (2.5)$$

а также диаграмма u_2 , полученная согласно (2.3).

Потенциалы $\varphi_1(x, y)$ и $\varphi_2(x, y)$ представляют совокупность импульсов положительной и отрицательной полярности амплитудой $\frac{U_d}{2}$ и длительностью, определяемой моментами пересечения графиков функций $F_M(y)$ и $F_T(x)$. При этом функции $\varphi_1(x, y)$ и $\varphi_2(x, y)$ можно рассматривать как функции двух переменных: одной $x = \omega_T t$ и другой $y = \omega_M t$, где $\omega_T = 2\pi f_T$ и $\omega_M = 2\pi f_M$ - частоты треугольного и модулирующего сигналов соответственно.

Уравнения модулирующих функций

$$F_{M1}(y) = A \cdot \sin y \text{ и } F_{M2}(y) = A \cdot \sin(y - \pi), \quad (2.6)$$

а амплитуда треугольного сигнала:

$$F_{T1}(x) = \frac{2B}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(x + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (2.7)$$

Совместное решение одного из уравнений (2.6) и уравнения (2.7) позволяет определить моменты изменения полярности потенциалов точек 1 и 2 на противоположные. Моменты изменения потенциалов точки 1 определяются в результате нахождения корней уравнения:

$$A \sin y = \frac{2B}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(x + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (2.8)$$

Эти корни равны:

$$x_1 = \frac{\pi}{2} (1 - \mu \sin y) + 2k\pi; \quad (2.9)$$

$$x_2 = \frac{\pi}{2} (3 + \mu \sin y) + 2k\pi; \quad (2.10)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$; $\mu = \frac{A}{B}$ - глубина модуляции.

Для потенциала точки 2 соответствующие длительности определяются аналогично подстановкой $F_{M2}(y) = -A \sin y$.

Модулированный сигнал $\varphi_1(x, y)$, как функцию двух переменных можно представить в виде суммы двойного ряда Фурье:

$$\varphi_1(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_{1mn} e^{j(mx+ny)} \quad (2.11)$$

где φ_{1mn} - коэффициенты ряда, определяемые из выражения:

$$\varphi_{1mn} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi_1(x, y) e^{-j(mx+ny)} dx dy \quad (2.12)$$

Подынтегральная функция является кусочно-непрерывной, определяется из выражения (2.4) и принимает на периоде $0 < x < 2\pi$ значения:

$$\varphi_1(x, y) = \begin{cases} -\frac{U_d}{2} & \text{при } 0 < x < x_1 \\ \frac{U_d}{2} & \text{при } x_1 < x < x_2 \\ -\frac{U_d}{2} & \text{при } x_2 < x < 2\pi \end{cases} \quad (2.13)$$

После интегрирования (2.12) [64] с учётом (2.9), (2.10) и (2.13) получим:

$$\varphi_{1mn} = \mu \frac{U_d}{2} \sin y + \frac{U_d}{2\pi} \sum_{\substack{m, n=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} \frac{J_n \left[\mu m \frac{\pi}{2} \right]}{jm} (-j)^m [1 - (-1)^{m+n}] e^{j(mx+ny)} \quad (2.14)$$

где $J_n \left[\mu m \frac{\pi}{2} \right]$ - функция Бесселя первого рода порядка n от вещественного аргумента $\mu m \frac{\pi}{2}$. [65,66]

Аналогичным образом можно определить выражение для $\varphi_2(x, y)$. Однако выполнение интегрирования можно избежать, если учесть, что $F_{M2}(y) = F_{M1}(y - \pi)$. Тогда, подставив (2.14) $y = y - \pi$, получим:

$$\varphi_{2mn} = -\mu \frac{U_d}{2} \sin y + \frac{U_d}{2\pi} \sum_{\substack{m, n=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} \frac{J_n \left[\mu m \frac{\pi}{2} \right]}{jm} (-j)^m [1 - (-1)^{m+n}] e^{j(mx+ny-\pi)} \quad (2.15)$$

По найденным выражениям [21] для потенциалов точек 1 и 2 определяют напряжение на зажимах переменного тока преобразователя:

$$u_{1,2} = \mu U_d \sin \omega_M t + \frac{U_d}{\pi} \times \sum_{\substack{m,n=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} \frac{J_{2n+1}(\mu m \pi)}{jm} (-1)^m e^{j[2m\omega_H + (2n+1)\omega_M]t}. \quad (2.16)$$

Таким образом, в спектре напряжения на зажимах переменного тока преобразователя при ДДШИМ по синусоидальному закону, наряду с основной гармоникой с частотой модулирующего сигнала ω_M , содержатся дополнительные гармоники с частотами, определяемыми суммой и разностью частот, кратных частотам модулирующего и несущего сигналов. При произвольном соотношении частот $\varepsilon = \omega_H/\omega_M$ в спектре напряжения могут появиться четные гармоники и постоянная составляющая, амплитуды которых будут определяться значениями функции $J_{2n+1}(\mu m \pi)$ при фиксированных индексах m и n .

Так же следует отметить, что определение спектрального состава напряжения при целочисленном соотношении частот ε . В этом случае частоты комбинационных гармоник определяются выражением:

$$\omega_{m,n} = (2m\varepsilon + 2n + 1)\omega_M \quad (2.17)$$

и являются нечетно-кратными частоте модулирующего напряжения.

Произведя замену в (2.17) получим

$$2m\varepsilon + 2n + 1 = 2\nu + 1, \quad (2.18)$$

где $\nu = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty$, после подстановки (2.18) и (2.16) и объединения слагаемых с одинаковыми индексами получаем выражение для напряжения:

$$u_{1,2}(t) = \mu U_d \sin \omega_M t + \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \left[\frac{U_d}{\pi} \sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} \frac{J_{2\nu+1-2m\varepsilon}(\mu m \pi)}{jm} (-1)^m \right] e^{j(2\nu+1)\omega_M t} \quad (2.19)$$

Учитывая, что слагаемые в квадратных скобках для значений индексов ν и $(-\nu-1)$ являются попарно комплексно – сопряженными числами, и переходя от бесконечных пределов суммирования по ν к полубесконечному, (2.19) перепишем в виде:

$$u_{1,2}(t) = \mu U_d \sin \omega_M t + \sum_{\nu=0}^{\infty} U_{1,2}^{\nu} \sin(2\nu+1)\omega_M t, \quad (2.20)$$

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

$$U_{1,2}^{\nu} = \frac{2U_d}{\pi} \sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} \frac{J_{(2\nu+1-2m\varepsilon)}(\mu m \pi)}{jm} (-1)^m \quad (2.21)$$

Из выражения (2.21) следует, что наибольшие значения имеют гармоники напряжения, для которых $\nu \approx m\varepsilon$ [13]. Кроме того, если учесть свойства бесселевой функции, заключающиеся в том, что при больших значениях индекса она начинает существенно отличаться от нуля лишь при значениях аргумента, близких к значению индекса, то при вычислении суммы (2.21) можно ограничиться одним или двумя членами ряда. С учетом сказанного на рисунке 2.4 приведены зависимости амплитуд гармоник напряжения от глубины модуляции μ [69]. При этом прямая линия

соответствует значениям основной гармоники $U_{1,2}^0 = \mu U_d$. Кривые с индексами $\nu \neq 0$ соответствуют гармоникам кратности $2\nu + 1$.

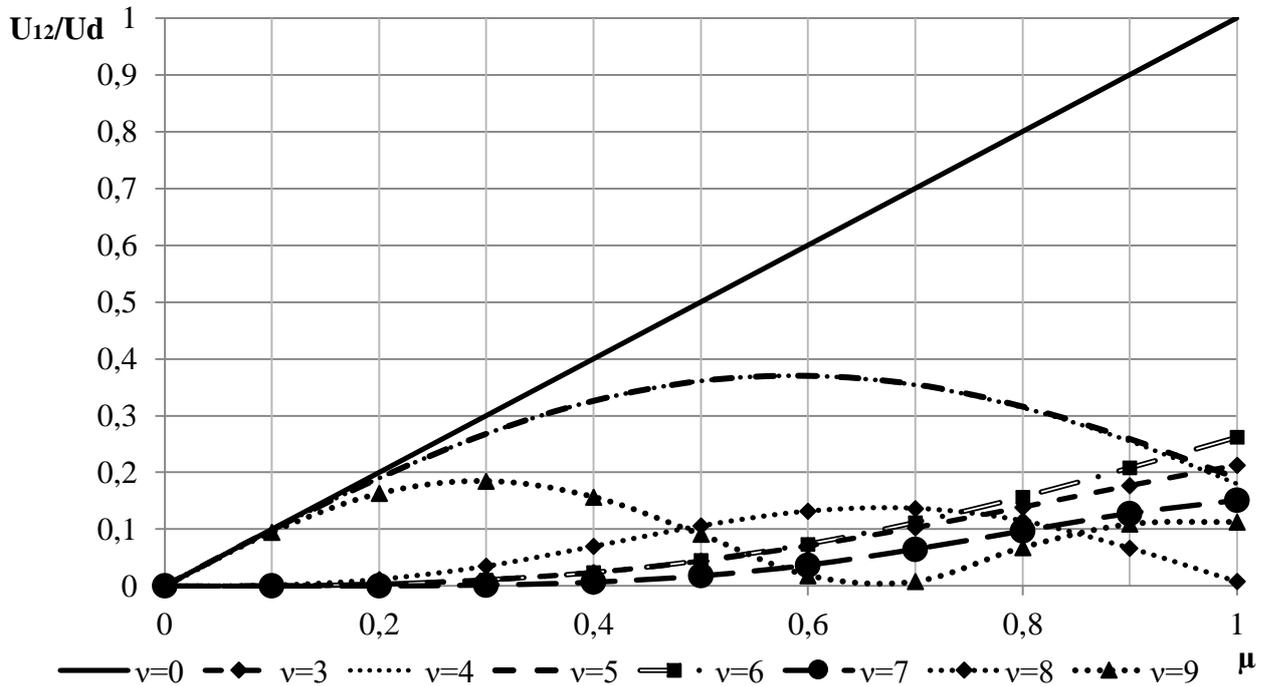


Рисунок 2.4 – Зависимость амплитуды гармонических составляющих напряжения от глубины модуляции

2.2 Алгоритм формирования сигналов управления ключевых элементов преобразователя

Регулируемое по величине и фазе переменное напряжение тяговой обмотки U_T получают способом ШИМ, создаваемой последовательностью управляющих импульсов. Последовательность включения и выключения транзисторов 4qS-преобразователем определяется знаком, шириной и положением управляющих импульсов на оси времени (рисунок 2.5).

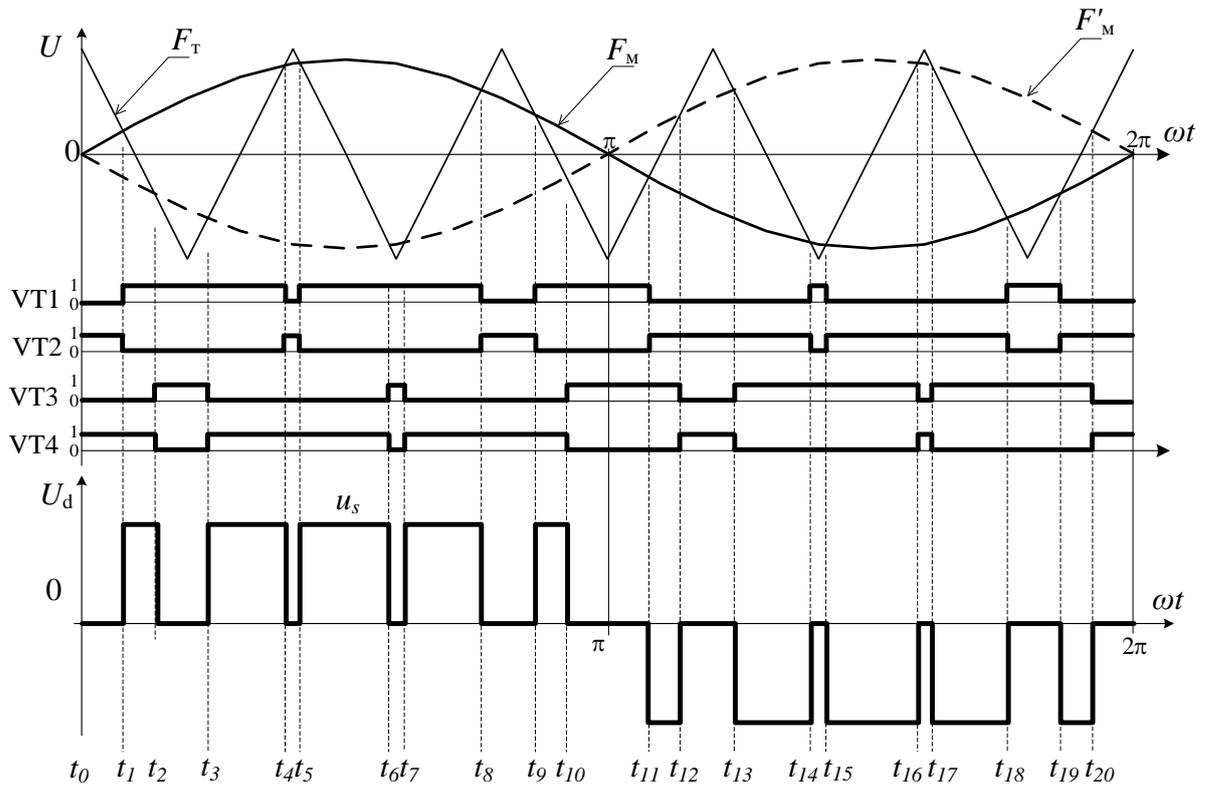


Рисунок 2.5 – Формирование сигналов управления транзисторами четырехквadrантного преобразователя

Алгоритм управления транзисторами формируется в результате сравнения модулирующего сигнала $F_M(t)$, определяющего желаемый вид выходного напряжения инвертора, и тактового – $F_T(t)$, определяющего частоту переключения транзисторов. Моделирование электромагнитных процессов в системе «тяговая сеть – электровоз с четырехквadrантным преобразователем» выполнено в программном пакете SimPower System программной среды Matlab Simulink. Модель создана на основе следующих изложенных принципов.

Сравнение синусоидального модулирующего сигнала

$$F_M(t) = A \sin \omega_N t \quad (2.22)$$

и треугольного тактового сигнала

$$F_T(t) = B \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(\omega_T t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.23)$$

В системе управления тяговым преобразователем формируются сигналы управления поступают на клеммы управления транзисторов. Математическое описание формирования сигналов управления транзистором VT1 следующее [21]

$$S_1 = f_S [F_M(t) - F_T(t)], \quad (2.24)$$

где A , $\omega_N = 2\pi f_N$ – амплитуда и частота модулирующего сигнала;
 B , $\omega_T = 2\pi f_T$ – амплитуда и частота тактового сигнала треугольной формы;

$f_S(X)$ – функция сравнения (компаратор в среде Matlab);

S_1 – логическая переменная, присвоенная параметру для определения состояния транзистора VT1 (значение $S_1 = 1$ соответствует включенному состоянию транзистора, $S_1 = 0$ – выключенному состоянию транзистора).

Функция сравнения имеет вид

$$f_S(X) = \begin{cases} 1 & \text{при } X > 0; \\ 0 & \text{при } X \leq 0. \end{cases} \quad (2.25)$$

Логическая переменная S_2 , определяющая состояние транзистора VT2, определяется как инверсия логической переменной S_1 следующим выражением

$$S_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } S_1 = 1; \\ 1 & \text{при } S_1 = 0. \end{cases} \quad (2.26)$$

Управляющие сигналы S_3 и S_4 , поступающие на транзисторы VT3 и VT4, формируются на основании сравнения модулирующего сигнала функции $F'_M(t)$ и тактового функции $F_T(t)$

$$F'_M(t) = -F_M(t) = A \sin(\omega_N t - \pi), \quad (2.27)$$

$$S_3 = f_S [F'_M(t) - F_T(t)] \quad (2.28)$$

Сигналы управления транзистором VT4 представляют собой инверсию функции управления транзистором VT3 и определяются следующим выражением

$$S_4 = \begin{cases} 0 & \text{при } S_3 = 1; \\ 1 & \text{при } S_3 = 0. \end{cases} \quad (2.29)$$

Функция напряжения $U_s(t)$ представляет собой кривую, состоящую из импульсов напряжения, ширина которых изменяется в соответствии с модулирующим сигналом $F_m(t)$, а частота следования определяется частотой тактового сигнала $F_T(t)$. Уровень выпрямленного напряжения U_d поддерживается на выходных зажимах 4qS-преобразователя и конденсаторе звена выпрямленного напряжения соотношением модулирующего и тактового сигнала.

Коммутация ключевых элементов 4qS-преобразователя формирует кривую мгновенных значений тока тяговой обмотки трансформатора. Общий магнитный поток тягового трансформатора включает в себя сумму магнитных потоков тяговых обмоток. Направление тока по ключевым элементам тягового преобразователя целесообразно рассматривать, используя мгновенные схемы на которых пунктирной линией обозначен путь тока силовой цепи.

В режиме тяги ток, потребляемый из сети, формируется чередованием двух режимов: режима нарастания сетевого тока при замыкании вторичной обмотки силового трансформатора на сетевой дроссель, при котором происходит накопление энергии в индуктивностях трансформатора и сетевого дросселя; и режима уменьшения сетевого тока при разряде накопленной энергии на фильтровые конденсаторы звена выпрямленного напряжения и подключенную нагрузку, состоящую из АИН и АТД.

На интервале времени $t_0 - t_1$ (включены транзисторы VT2 и VT4) тяговая обмотка трансформатора замкнута через транзистор VT2 и диод VD4 (рисунок 2.6)

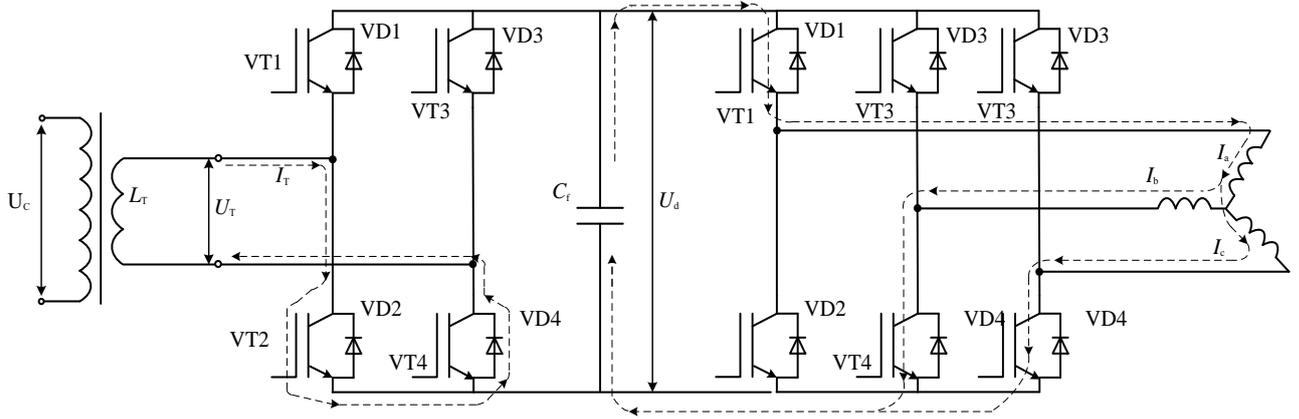


Рисунок 2.6 – Ток через включенные транзисторы VT2 и VD4 тягового преобразователя

На интервале времени $t_1 - t_2$ образуется следующий контур тока: диод VD1 – транзистор VT1 – обмотки АД – транзисторы VT8 и VT10 – диод VD4 (рисунок 2.7)

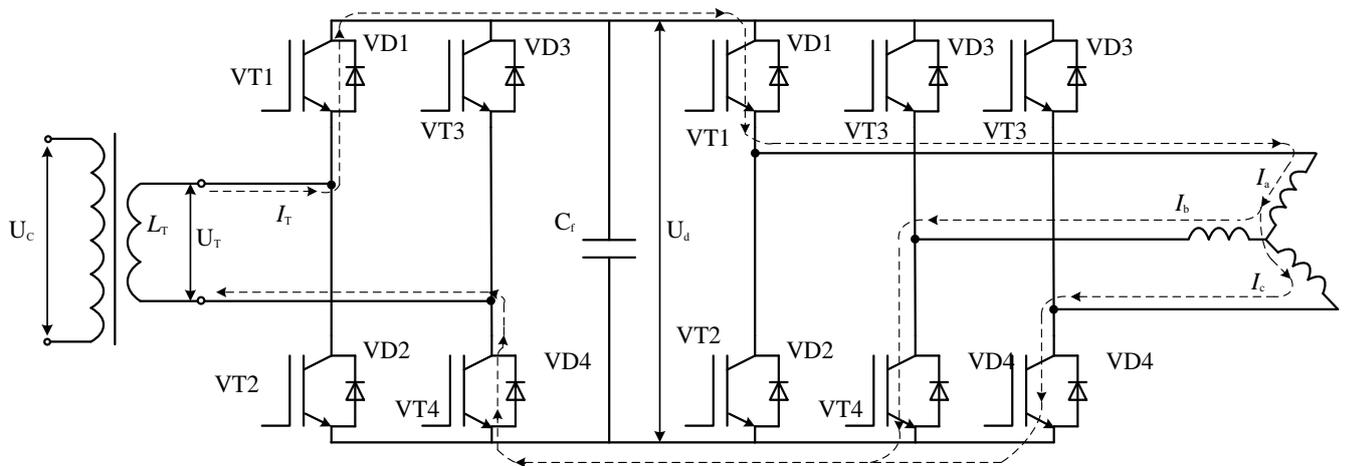


Рисунок 2.7 – Ток через включенные транзисторы VT1 и VT4 и нагрузку тягового преобразователя

Четырехквadrанный преобразователь осуществляет преобразование однофазного переменного напряжения в выпрямленное напряжение заданного значения, поэтому такой преобразователь целесообразно рассматривать как однофазный инвертор напряжения, включенный между цепями постоянного и переменного тока. Для этого тяговую источник переменного напряжения

представим соединенными последовательно источника напряжения e_T , активного сопротивления R_T и индуктивности L_T .

К выходным зажимам преобразователя подключается накопитель энергии, состоящий из батареи конденсаторов C_{dc} , а также автономный инвертор напряжения и АТД. Последние на схеме не показаны. (рисунок 2.8).

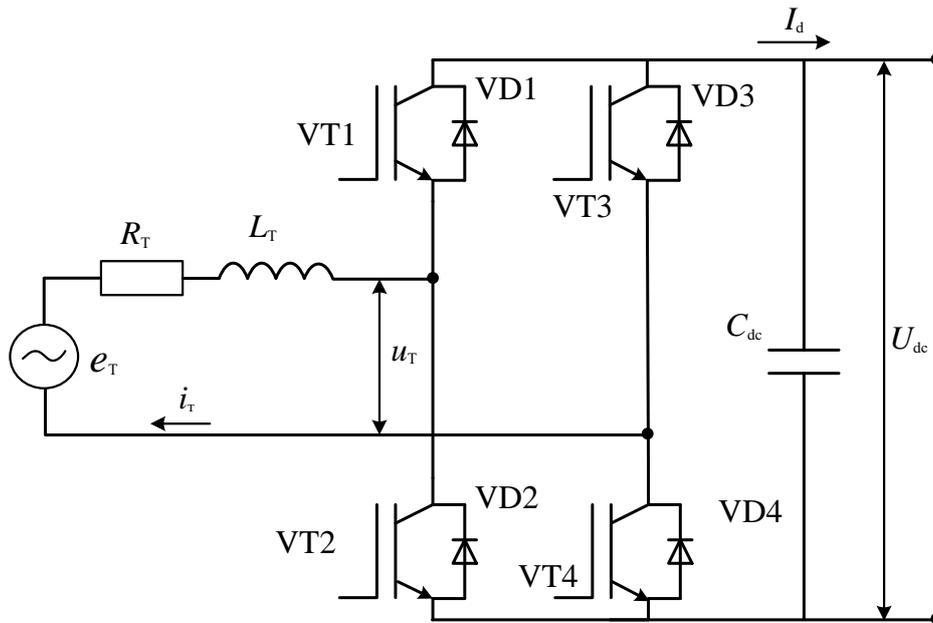


Рисунок 2.8 – Расчетная схема четырехквadrантного преобразователя

Ко входным зажимам четырехквadrантного преобразователя подключается тяговая обмотка ТТ. К выходным зажимам подключается цепь выпрямленного напряжения, состоящая из конденсаторов звена выпрямленного напряжения и фильтровых конденсаторов (последние на схеме не показаны).

В цепи переменного тока индуктивность L_T зависит от параметров тяговой обмотки тягового трансформатора, сопротивление R_T характеризует потери мощности, а источник e_T может потреблять либо генерировать электрическую энергию.

Мгновенное значение выпрямленного напряжения U_s (см. рисунок 2.5) на конденсаторах фильтра C_{dc} определено по следующему выражению:

$$U_s(t) = U_d(t) \cdot f_U(t), \quad (2.30)$$

где $f_U(t)$ – коммутационная функция инвертора, которая определяется:

$$f_u(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } S_1 = 1 \text{ и } S_4 = 1; \\ 0 & \text{при } S_1 = 1 \text{ и } S_3 = 1; \\ 0 & \text{при } S_2 = 1 \text{ и } S_4 = 1; \\ -1 & \text{при } S_2 = 1 \text{ и } S_3 = 1. \end{cases} \quad (2.31)$$

Электромагнитные процессы в цепи постоянного и переменного напряжения четырехквadrантного преобразователя взаимосвязаны следующими уравнениями:

$$C \frac{du_d}{dt} = i_d - f_u(t)i_N; \quad (2.32)$$

$$L_T \frac{di_T}{dt} + R_T i_T = f_u(t)u_d - e_N. \quad (2.33)$$

При коммутации транзисторов в соответствии с диаграммой, представленной в верхней части рисунка 2.9, зависимости и напряжений $u_L(t)$ и тока $i_T(t)$ примут следующий вид

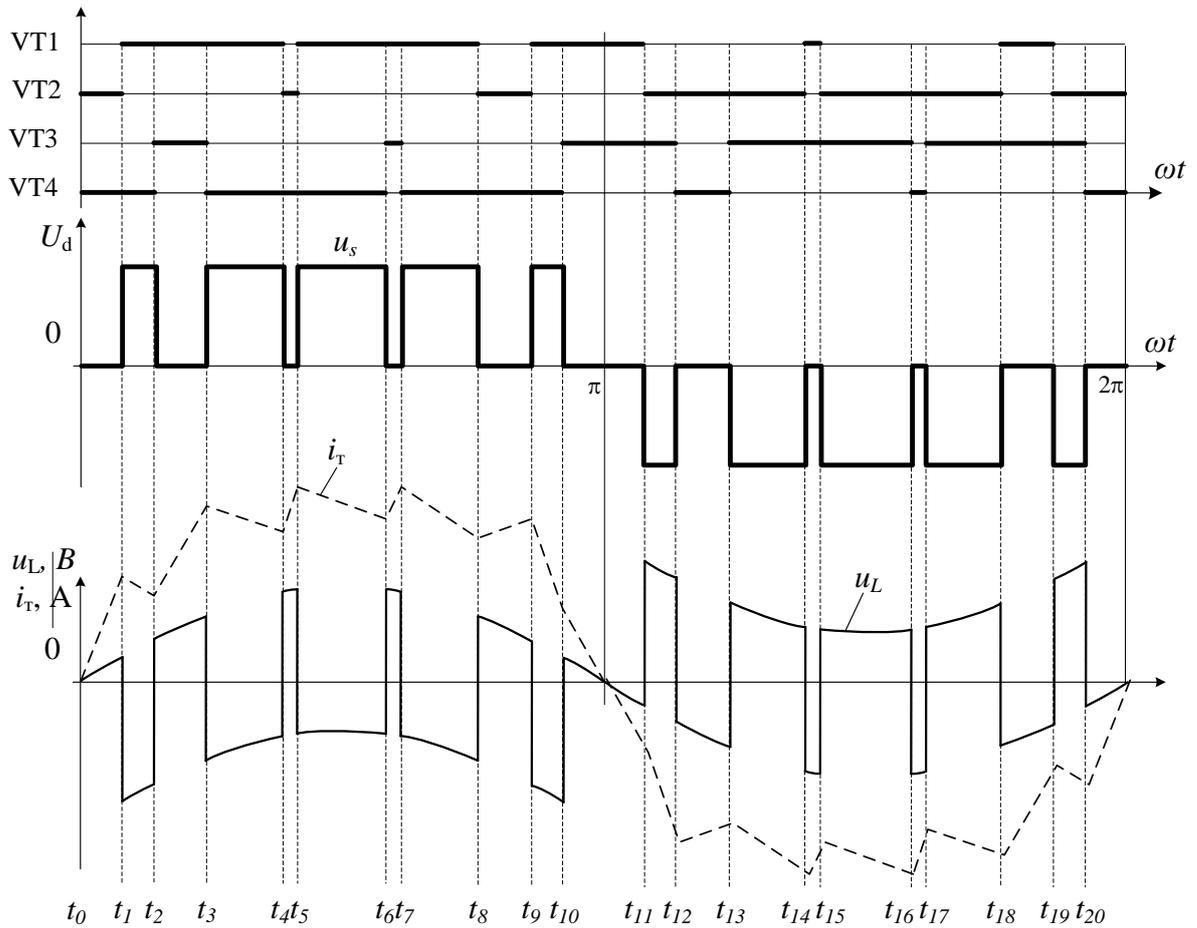


Рисунок 2.9 – Диаграмма включения транзисторов VT1–VT4 и графики напряжения и тока тяговой обмотки ТТ

На временной диаграмме (рисунок 2.9) представлен алгоритм формирования сигналов управления ключевыми элементами транзисторов VT1...VT4 четырехквadrантного преобразователя. Жирная линия соответствует включенному состоянию IGB-транзистора.

Мгновенные значения тока i_T и напряжения u_L , получаемые на индуктивности, соответствуют кривым рисунка 2.9.

Тяговые преобразователи ранее выпущенных электровозов основаны на импортных комплектующих. В соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 21.04.2016 г. № 721р «Об утверждении типовой методики определения уровня локализации производства продукции, закупаемой для нужд холдинга «РЖД» производственным предприятиям при производстве подвижного состава и его

составных частей рекомендовано использовать элементную базу отечественных предприятий. При моделировании электромагнитных процессов использованы характеристики IGBT модулей отечественного производства. Параметры IGBT модулей указаны в таблице А.2.

2.3 Особенности электромагнитных процессов в тяговом трансформаторе

Тяговые трансформаторы являются частью преобразовательной системы электровоза и предназначены для согласования уровней напряжения контактной сети и входного напряжения 4qS-преобразователя. Согласование уровней напряжения осуществляется за счет ШИМ кривой выходного напряжения в ТТ.

Общий магнитный поток, создаваемый магнитным полем, равномерно распределен по всей площади поперечного сечения магнитопровода ТТ и сцеплен со всеми его обмотками. Магнитный ток, образуемый сетевой обмоткой, пересекает витки тяговых, фильтровой обмоток и обмотки отопления.

ТТ на различных электровозах отличается по типу и конструкции. На электровозах с ВИП установлен тяговый трансформатор с цилиндрическими концентрическими обмотками [39], имеющими уменьшенное напряжение короткого замыкания U_k , у грузовых электровозов с коллекторными тяговыми двигателями и ВИП трансформаторы выполнены с $U_k = 9,3...11,5$ % [40].

Тяговый трансформатор электровозов нового поколения, преобразовательная система которого содержит четырехквadrантный преобразователь, имеет конструктивное отличие от ТТ электровозов с ВИП. Первичная обмотка такого ТТ состоит из чередующихся секций (дисков), которые соединены последовательно (рисунок 2.10).

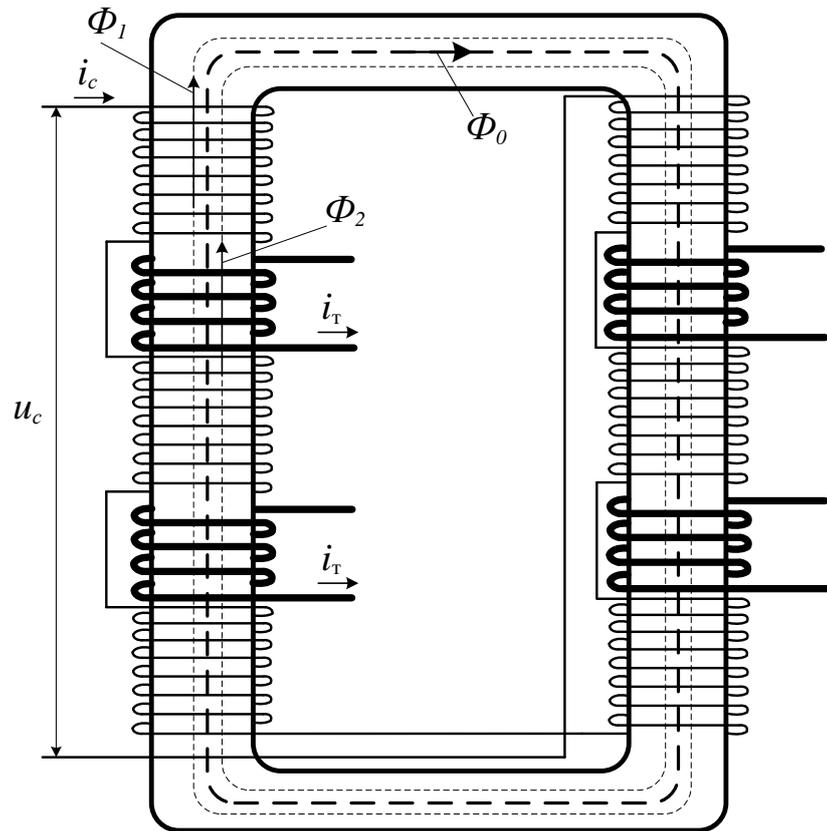


Рисунок 2.10 – Упрощенный эскиз магнитной цепи магнитопровода тягового трансформатора электровоза с четырехквadrантным преобразователем

При подключении сетевой обмотки к контактной сети с напряжением u_c в сетевой обмотке появляется ток i_c . Ток первичной обмотки образует в магнитопровode ТТ магнитный поток Φ_1 , под действием которого во вторичных (тяговых, фильтровой и обмотке отопления) обмотках возникает переменная э.д.с. При подключении нагрузки во вторичной обмотке возникает ток, который образует магнитный поток Φ_2 . Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 образуют основной поток Φ_0 . Основной поток создает в первичной и вторичной обмотках ТТ э.д.с [41]:

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad (2.34)$$

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad (2.35)$$

$$e_n = -\omega_n \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (2.36)$$

где, 1 – параметры переменных, соответствующие сетевой обмотке;

2...n – параметры переменных, соответствующие вторичным (тяговым, фильтровой и обмотке отопления) обмоткам.

Технические характеристики ТТ определяются напряжением короткого замыкания U_k и магнитными потоками рассеяния, которые зависят от взаимного расположения на магнитопроводе секций первичной и вторичных обмоток трансформатора с дисковыми обмотками. Изменение общего магнитного потока Φ_0 пропорционально изменяет ток сетевой обмотки i_c и контактной сети, от которой поступает энергия на электровоз.

Нагрузкой для тягового трансформатора на электровозах нового поколения являются полупроводниковые преобразователи. К зажимам тяговой обмотки подключается четырехквadrантный преобразователь, назначением которого является преобразование однофазного переменного напряжения одной величины в выпрямленное заданного значения.

Четырехквadrантный преобразователь состоит из четырех IGBT-модулей, соединенных по схеме двухфазного моста, причем каждый диод подключен встречно-параллельно транзистору (рисунок 1.10). В отличие от тяговых трансформаторов, установленных на электровозах предыдущего поколения с коллекторными ТЭД и (ВИП) и имеющих цилиндрические концентрические обмотки с уменьшенным напряжением короткого замыкания U_k , тяговый трансформатор для питания преобразователь выполнен с чередующимися дисковыми обмотками с увеличенным U_k %. Напряжение короткого замыкания U_k тягового трансформатора современных электровозов существенно превышает значение этого показателя у электровозов с ВИП и находится на уровне 35...40%.

Обеспечение электромагнитной совместимости, а также уменьшение потерь энергии в тяговой сети достигается уменьшением искажения синусоидальности кривой входного напряжения u_c (рисунок 2.11).

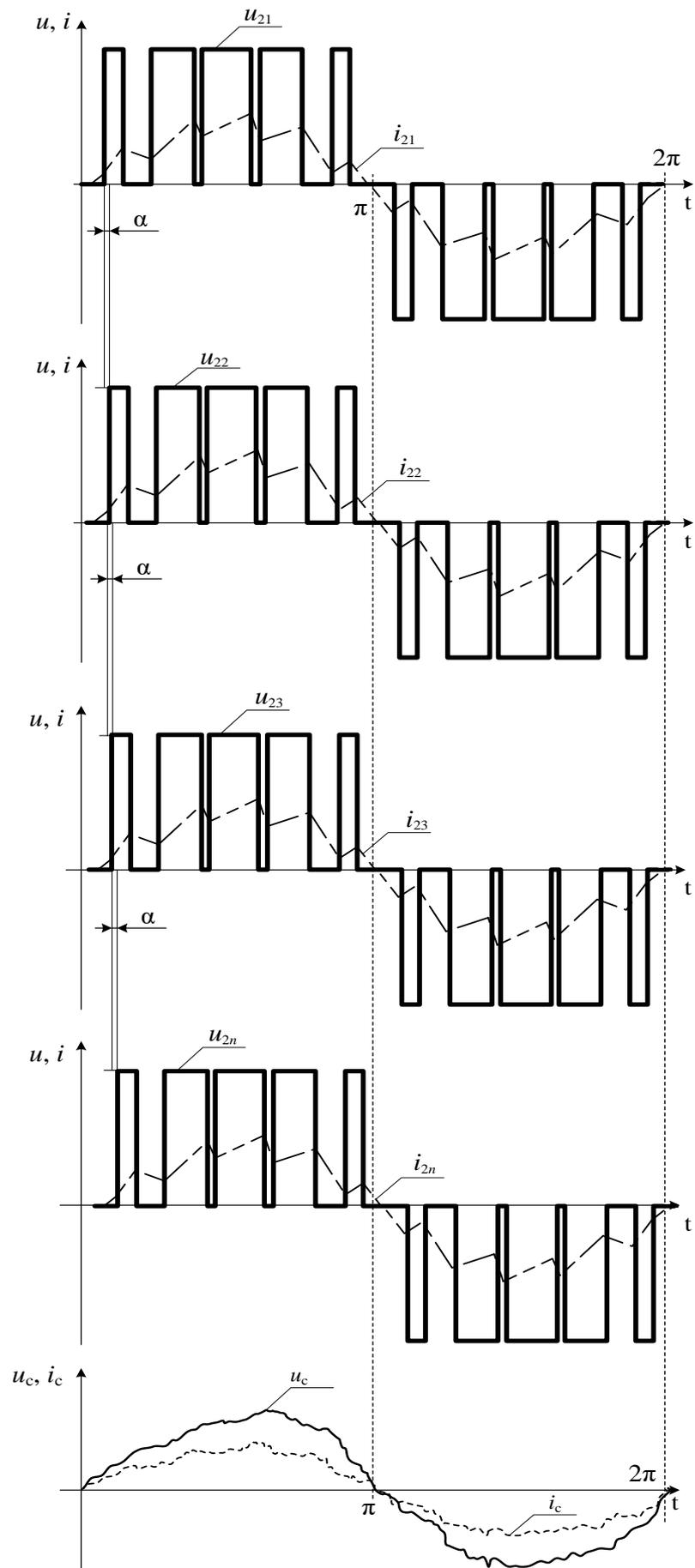


Рисунок 2.11 – Кривые мгновенных значений токов и напряжений обмоток ТТ

Системой управления тягового преобразователя предусмотрена коммутация ключевых элементов четырехквadrантных преобразователей, осуществляемая с задержкой на некоторый угол α . Это позволяет сдвинуть по фазе токи $I_{21}, I_{22}, \dots, I_{2n}$ и напряжения $U_{21}, U_{22}, \dots, U_{2n}$ вторичных обмоток. Наложение магнитных потоков вторичных обмоток $\Phi_{21}, \Phi_{22}, \dots, \Phi_{2n}$, образованных соответствующими токами, сдвинутыми по фазе, приводит к уменьшению пульсации общего потока Φ_0 и тока сетевой обмотки i_c .

2.4 Электромагнитные процессы в системе «тяговая сеть –электровоз»

Силовая цепь электровоза переменного тока и технические характеристики электрических аппаратов, их количество и расположение в кузове определены техническими требованиями на электровоз. Так, например, выбор мощности тягового трансформатора влияет на его массо-габаритные показатели, а значит и возможность его расположения в определенной части ЭПС. На электровозе чаще всего тяговый трансформатор располагают под кузовом. Такое расположение позволяет обеспечить наилучшее охлаждение ТТ и более низкое расположение центра тяжести электровоза. Номинальная мощность ТТ электропоезда меньше в несколько раз, поэтому его массо-габаритные показатели уменьшены пропорционально. Расположение ТТ возможно под кузовом в подвагонном ящике, либо на крыше ЭПС.

Подключение тягового трансформатора к силовой цепи ЭПС нового поколения повлияло на его конструкцию. ТТ выполняют с чередующимися дисковыми обмотками с повышенным напряжением короткого замыкания U_k . Значение данной величины характеризует изменение напряжения вторичной обмотки трансформатора. Исследование электромагнитных процессов в сетевой обмотке ТТ и в тяговой сети выполнено для одиночного пассажирского электровозе ЭП20, находящимся на фидерной зоне при одностороннем питании, на котором установлен тяговый трансформатор,

напряжение короткого замыкания которого равно $U_k = 38 \%$. На указанном электровозе тяговый трансформатор состоит из сетевой, шести тяговых и одной обмотки отопления. Индуктивность короткого замыкания «сетевая обмотка–тяговая обмотка» $L_T = 2,45$ мГн. В качестве исходных данных при расчетах определено номинальное реактивное сопротивление x трансформатора в режиме тяги:

$$x = \omega L_T = 2\pi f L_T = 0,77 \text{ Ом.} \quad (2.37)$$

Анализ электромагнитных процессов в системе «тяговая сеть – электровоз» в установившемся режиме значительно упрощается при рассмотрении схемы замещения (рисунок 2.2).

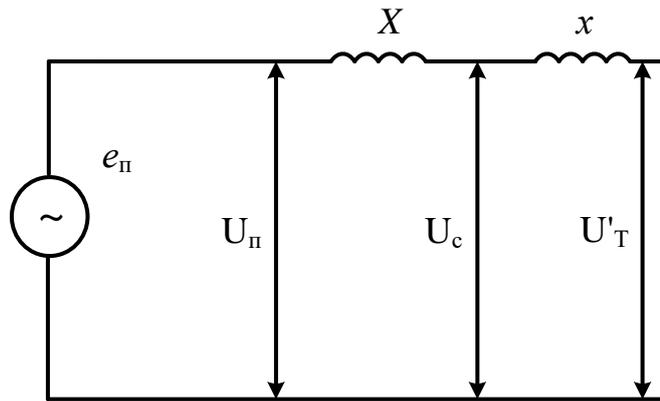


Рисунок 2.12 – Схема замещения системы «тяговая сеть – электровоз с 4qS-преобразователем»

В соответствии со стандартом ГОСТ 6962-75 [2] номинальное напряжение на шинах тяговой подстанции переменного напряжения установлено $U_{\text{п}} = 27,5$ кВ. Напряжение на токоприемнике электроподвижного состава переменного тока должно быть обеспечено в установленных пределах от 19 до 29 кВ, причем сопротивление тяговой сети X может изменяться от нуля до 30 Ом.

Анализ электромагнитных процессов выполнен по методу основной гармоники с учетом допущений, обычно принимаемых для мощных

электротехнических систем: высокочастотные гармоники широтно-импульсной модуляции (ШИМ) не учитываются, активные потери энергии в системе и ток намагничивания тягового трансформатора равны нулю. Векторные диаграммы напряжений и тока при различных углах φ приведены на рисунке 2.13.

Напряжение тяговой обмотки \dot{U}'_T приведено к сетевой обмотке с напряжением \dot{U}_c . Напряжения на отдельных элементах схемы замещения на различных участках протекания переменного тока I по фазе не совпадают.

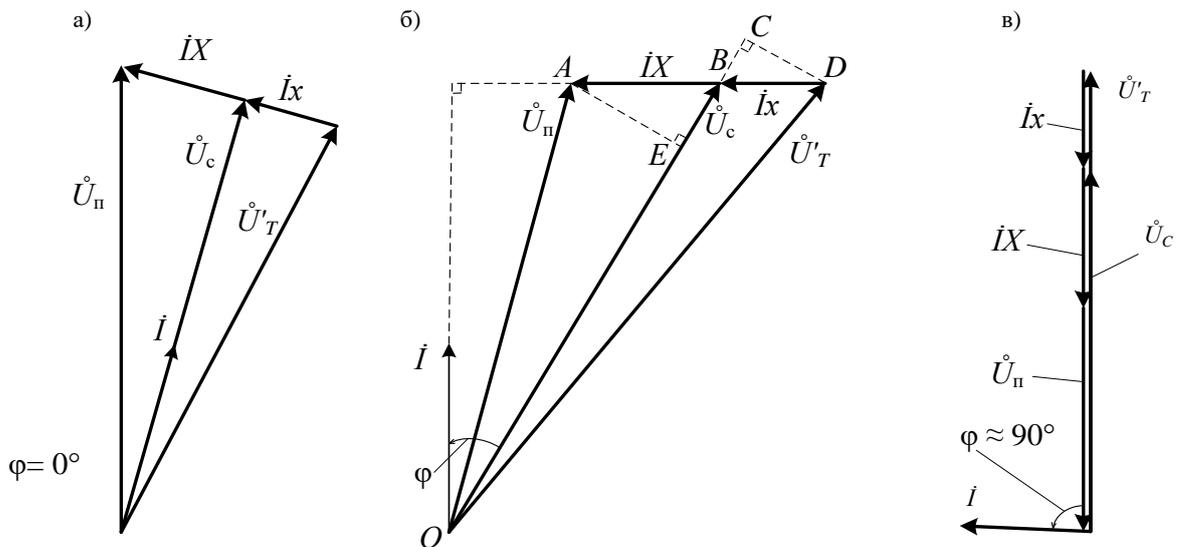


Рисунок 2.13 – Векторные диаграммы напряжений и тока во 2-ом квадранте комплексной плоскости для режимов тяги при $\varphi = 0$ (а), $0 < \varphi \leq 90^\circ$ (б) и компенсации реактивной мощности тяговой сети при отстое электровоза $\varphi \approx 90^\circ$ (в).

Для анализа электромагнитных процессов в первичной обмотке тягового трансформатора и в четырехквadrантном преобразователе целесообразно провести на векторной диаграмме рисунке 2.13, б дополнительные линии:

- из точки А опустить перпендикуляр к линии ОВ;
- линию ОВ продлить до точки С, причем $CD \perp OC$;
- продолжить линию АД до пересечения под прямым углом с направлением вектора тока \bar{I} .

После перечисленных построений видно, что треугольник ΔOAB состоит из двух прямоугольных треугольников.

В прямоугольном ΔABE катеты $AE = \dot{I}X \cos \varphi = I_a X$ и $BE = \dot{I}X \sin \varphi = I_p X$, где I_a, I_p – соответственно активная и реактивная (емкостная) составляющие тока I . Из прямоугольного треугольника ΔOAE находится $(U_c - I_p X)^2 + (I_a X)^2 = (U_n)^2$ и следовательно

$$\dot{U}_c = I X \sin \varphi + \sqrt{(U_n)^2 - (I X \cos \varphi)^2}, \quad (2.38)$$

$$\dot{U}_c = I_p X + \sqrt{(U_n)^2 - (I_a X)^2}. \quad (2.39)$$

Эти расчетные уравнения позволяют по известным величинам U_n, I, X и угла φ найти величину сетевого напряжения U_c , т.е. напряжения на токоприемнике ЭПС.

В прямоугольном ΔOCD катеты $CD = \dot{I}x \cos \varphi = I_a x$ и $BC = \dot{I}x \sin \varphi = I_p x$. Из прямоугольного ΔOCD находим

$$\dot{U}'_T = \sqrt{(U_c + \dot{I}x \sin \varphi)^2 + (I x \cos \varphi)^2}, \quad (2.40)$$

$$\dot{U}'_T = \sqrt{(U_c + I_p x)^2 + (I_a x)^2}, \quad (2.41)$$

Эти расчетные уравнения позволяют по известным величинам U_c, I, x и угла φ найти величину напряжения на сетевой обмотке трансформатора ЭПС

$$U_T = U'_T \frac{\omega_T}{\omega_c} \quad (2.42)$$

В некоторых случаях может потребоваться также нахождение величины U_T , непосредственно по величинам U_n, I, X и угла φ . Необходимое для этого

уравнение получается после подстановки U_c по уравнению (2.39) в уравнение (2.41)

$$U_T = \sqrt{\left[\sqrt{(U_{\Pi})^2 - (I_a x)^2} + I_p(X + x) \right]^2 + (I_a X)^2} \quad (2.43)$$

Зависимости отношений U_c/U_{Π} и U'_T/U_{Π} от угла φ между векторами тока тяговой сети и напряжения на токоприемнике электровоза и шинах тяговой подстанции представлены на рисунке 2.14 для одиночного 6-осного электровоза с разными токами сетевой обмотки ТТ и одностороннем питании тяговой сети. При удалении электровоза от тяговой подстанции пропорционально увеличивается полное сопротивление тяговой сети X . В скобках указаны значения тока I_c сетевой обмотки тягового трансформатора, при котором получены расчетные значения отношений перечисленных напряжений.

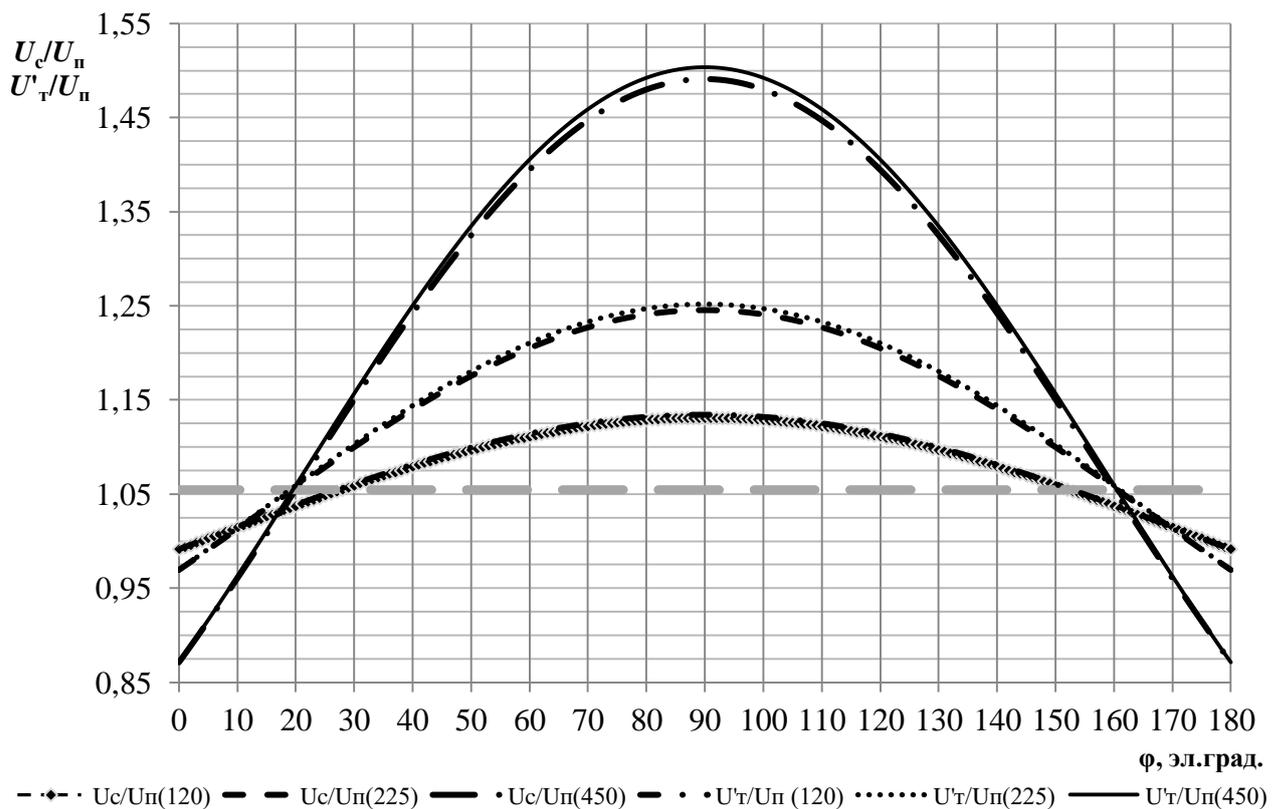


Рисунок 2.14. – Зависимость соотношений напряжений U_{Π} , U_c и U'_T от угла фазового сдвига тока I_c при различных его значениях

Кривые построены для трех значений тока сетевой обмотки тягового трансформатора и максимально допустимого сопротивления тяговой сети по ГОСТ 6962[2]. Горизонтальной штриховой линией отмечено максимально допустимое переменное напряжение в контактной сети. Полученные кривые подтверждают возможность компенсации реактивной мощности при совместной работе электровозов с различными преобразовательными системами, находящимися на одной фидерной зоне. При этом увеличение тока тяговой сети приведет у электровоза с 4qS-преобразователем к уменьшению диапазона регулирования угла φ между током и напряжением контактной сети, при котором сохраняется устойчивая работа.

Возможна также работа электровоза «при горячем отстое» в режиме компенсации реактивной мощности (КРМ) характеризуемая векторной диаграммой, представленной на рисунке 2.13, в. Для максимальной компенсации реактивной мощности тяговой сети, необходимой по условиям эксплуатационной обстановки, и устойчивой работы 4qS-преобразователя необходимо установить режим, при котором вектор емкостной составляющей тока опережает вектор напряжения на угол φ , близкий к 90° , с минимально возможной величиной активной составляющей тока. Активная составляющая сетевого тока будет определяться расходом энергии на работу вспомогательных машин электровоза и поддержание заряда конденсаторов звена выпрямленного напряжения.

Полученные при общепринятых для мощных электротехнических систем допущениях позволили рассчитать необходимые параметры анализируемой системы. Энергетическая эффективность системы обеспечивается уменьшением индуктивной составляющей тока и увеличением напряжения в тяговой сети до максимально возможного уровня 29 кВ.

Анализ электромагнитных процессов в системе «тяговая подстанция – тяговая сеть переменной длины – электровоз с четырехквadrантным преобразователем» подтверждает работоспособность в режиме тяги с опережающим углом фазового сдвига вектора основной гармоники тока

относительно вектора основной гармоники напряжения, изменяющимся в пределах от нуля до 90° .

2.5 Работа тягового преобразователя в режиме компенсации реактивной мощности

Алгоритм работы тягового преобразователя в режимах тяги и рекуперативного торможения обеспечивает близкий единице коэффициент мощности электровоза в широком диапазоне изменения нагрузки. Реактивная составляющая потребляемого тока равна нулю, поэтому полный ток равен активному (рисунок 2.15, а).

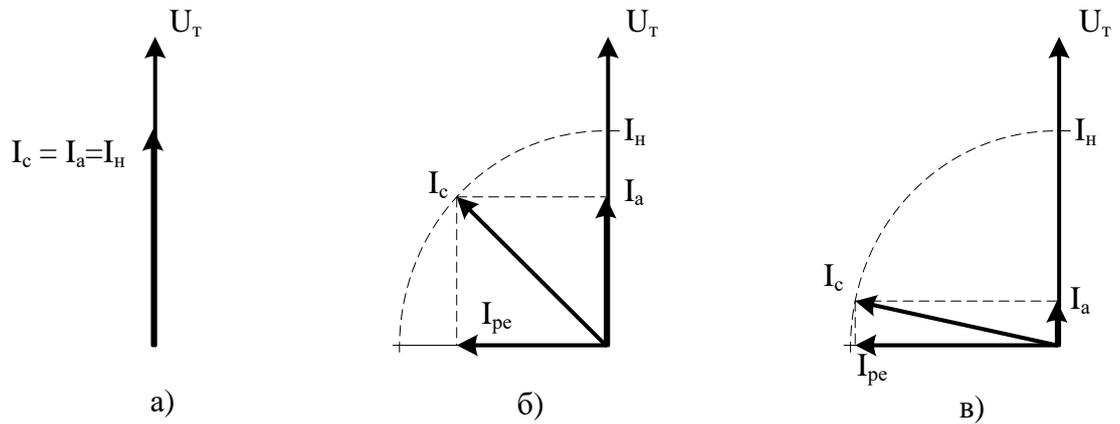


Рисунок 2.15 – Векторные диаграммы тока и напряжения в режимах тяги при номинальной мощности (а), меньше номинальной мощности (б) и компенсации реактивной мощности (в)

В результате анализа эксплуатационных показателей пассажирского электровоза установлено, что максимальная сила тяги реализуется не более чем в 10% времени от всего времени работы электровоза. Для поддержания требуемой скорости движения машинист электровоза задает силу тяги. При этом ток сетевой обмотки I_c тягового трансформатора меньше номинального значения I_n . Алгоритм управления тяговым преобразователем в режиме тяги, а также в режиме выбега и горячего отстоя на подъездных путях депо

обеспечит опережающий сдвиг по фазе сетевого тока I_c относительно напряжения U_c на токоприемнике электровоза (рисунок 2.15, б).

При движении электровоза по фидерной зоне изменяются параметры тяговой сети. Коммутационные процессы преобразовательной системы электровоза, оборудованного ВИП, оказывают влияние на параметры участка тяговой сети – токи и напряжения первичной обмотки ТТ электровозов, находящихся на данной фидерной зоне. При этом ЭПС оборудованный ВИП может потреблять из контактной сети реактивную энергию. Электровоз, оснащенный 4qS-преобразователем, в определенном режиме работы может являться источником реактивной энергии. Работа электровоза с ВИП в режиме тяги приводит к уменьшению напряжения в контактной сети. Для компенсации реактивной энергии на необходимую величину система управления электровоза с 4qS-преобразователем должна обеспечивать необходимую величину опережающего фазового сдвига тока от напряжения на токоприемнике электровоза. Необходимая величина генерируемой 4qS-преобразователем реактивной энергии может быть определена из количества энергии потребляемой электровозами с ВИП, и должна по возможности максимально компенсировать уменьшение напряжения на фидерной зоне.

Система управления тяговым приводом электровоза с 4qS-преобразователем будет обеспечивать устойчивый режим работы четырехквadrантным преобразователем с максимальной компенсацией реактивной мощности при постоянно изменяющихся параметрах тяговой сети и разной загруженности фидерной зоны (совокупности электровозов с ВИП, работающих в режимах тяги и рекуперативного торможения).

Известное техническое решение позволяет осуществлять непрерывное поддержание заданного тягового усилия при наличии на токоприемнике напряжения, величина которого находится внутри пределов по ГОСТ 6962, и близкого к единице коэффициента мощности в (рисунок 2.15, а).

При изменении угла опережения основной гармоники тока ЭПС от основной гармоники напряжения на токоприемнике в пределах от нуля и почти до 90 град. ЭПС работает в тяговом режиме (рисунок 2.15, б).

Величина активного тока в режиме выбега и отстоя определяется расходом на собственные нужды электровоза, в том числе для охлаждения 4-квadrантных преобразователей, и поддержанием постоянного заряда их фильтровых конденсаторов (рисунок 2.15, в).

У такой электротехнической системы существует недостаток, который заключается в том, что напряжение на токоприемнике ЭПС с входным 4qS-преобразователем напряжения может быть пониженным из-за находящихся на одной фидерной зоне электровозов и электропоездов предшествующих поколений. На железных дорогах России на начало 2018 г. работает 5,5 тыс. таких электровозов [10]; выпуск их продолжается. Следовательно, они сохранятся в действующем парке ещё, как минимум 30-40 лет. Эти электровозы работают в режиме тяги с отстающим от напряжения током и коэффициент мощности на шинах тяговых подстанций, существенно меньшим единицы.

Техническим результатом предложенного алгоритма работы системы является уменьшение потерь напряжения за счет компенсации индуктивной составляющей тока в тяговой сети.

Указанный технический результат достигается за счет того, что в способе управления режимом тяги, а также режимами выбега и горячего отстоя на стоянке железнодорожного ЭПС с входным 4qS-преобразователем, когда ток ЭПС становится меньше его номинального значения увеличивают величину реактивной (емкостной) составляющей потребляемого тока до тех пор, пока величина полного тока I не станет равной её номинальному значению I_n .

При этом известно, что полный ток I вычисляют по формуле:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} \leq I_n, \quad (2.44)$$

где I_a – активная составляющая тока,

I_p – реактивная составляющая тока;

I_n – номинальный ток.

Уравнение (2.44) должно выполняться для того, чтобы основное электрооборудование; а именно обмотки тягового трансформатора и силовые полупроводниковые модули не перегревались выше допустимой температуры.

Из уравнения (2.44) получается, что

$$I_p \leq \sqrt{I_n^2 - I_a^2}, \quad (2.45)$$

Система управления режимом тяги в соответствии с векторной диаграммой (рисунок 2.15, б) должна выполнять это условие (2.45).

Система управления тяговым приводом с обратной связью автоматически останавливает процесс увеличения реактивной емкостной составляющей тока I_{pe} следует прекратить после того, как напряжение на токоприемнике электровоза с 4qS-преобразователем достигнет наибольшего допустимого напряжения на токоприемнике при любых эксплуатационных условиях, за исключением коммутационных режимов. Это требование ГОСТ 6962 [2], в котором определено наибольшее допустимое значение напряжения, равное 29 кВ.

В режимах тяги и выбега токоприемник электровоза перемещается вдоль контактной сети и опасность превышения температуры и последующего пережога контактного провода отсутствует. Но в режиме горячего отстоя ЭПС его токоприемники не подвижен и возникает опасность пережога контактного провода в точке касания с токоприемником. Поэтому следует поднять все токоприемники электровоза, что уменьшит токовую нагрузку электровоза на контактный провод

В общем случае это техническое решение может оказаться недостаточным. Поэтому необходимо заранее оборудовать место горячего отстоя ЭПС дополнительными электрическими соединителями, которые поднимают параллельно контактам токоприемников электровоза с

контактным проводом или двумя (при их наличии) контактными проводами. Данное техническое решение обеспечит высокую надежность и энергетическую эффективность компенсации реактивной индуктивной мощности в контактной сети.

Предложенный новый способ управления режимом тяги, а также режимами выбега и горячего отстоя электровоза с 4qS-преобразователем возможно реализовать, например, на базе известной системы автоматического регулирования, поддерживающей заданное значение регулируемой величины, в данном случае напряжения на токоприемнике ЭПС[42,43].

Таким образом, при управлении режимом тяги, а также режимами выбега и горячего отстоя на стоянке увеличивают величину реактивной (емкостной) составляющей потребляемого тока таким образом, чтобы величина полного тока стала равной номинальному её значению, а напряжение на токоприемнике электровоза не превысило наибольшего допустимого напряжения на токоприемнике ЭПС.

Математическое моделирование электромагнитных процессов электротехнической системы «тяговая сеть – электровоз переменного тока с четырехквadrантным преобразователем» позволит определить техническую возможность реализации компенсации реактивной мощности на электровозе переменного тока.

3 Модель электротехнической системы «тяговая сеть – электровоз переменного тока с четырехквadrантным преобразователем»

3.1 Средства реализации математических моделей

Исследование электромагнитных процессов в электротехнических системах, анализ полученных результатов и предложение на их основе технических решений является приоритетной задачей многих работников науки и техники. Исследование процессов и явлений существенно упрощается с использованием математических моделей. Математическая модель – способ описания процессов и явлений с помощью совокупности математических функций.

Моделирование электромагнитных процессов в электротехнической системы или отдельных процессов в ней используют для определения мгновенных значений токов и напряжений как на каждом элементе системы, так и отдельных её участках.

Структуру модели, реализуемые принципы моделирования, алгоритмы воспроизведения явлений и точность получаемых при моделировании результатов определяют на этапе разработки модели при задании начальных условий.

Современные математические модели реализованы при помощи символов и формул с помощью компьютерных программ, описывающих электромагнитные процессы в системе.

Основные решения, направленные на выбор математических функций, определяющих мгновенные значения анализируемых параметров, принимает исследователь. Основные операции, алгоритм расчета численных значений параметров модели определены средой программирования ЭВМ.

Существует достаточно большое количество программ, позволяющих моделировать устройства электротехнических систем. Наибольшее распространение получили следующие: MathCad, Caspoc, Pspice, OrCad и Electronics Workbench [48,44–46].

MathCad имеет символьный язык общения с пользователем, удобный в том случае, если удалось каким-либо образом получить математическое описание системы в виде набора формул[43]. При достаточной сложности система должна быть разбита на несколько более простых подсистем. MathCad позволяет моделировать непрерывные и импульсные (дискретные) системы и обычно используется для анализа режимов работы вентильных преобразователей. Моделирование электромагнитных процессов в системе MathCad целесообразно для отдельных узлов электротехнической системы, для которых легко могут быть получены выражения в аналитической форме через некоторое количество известных переменных.

Пакет Caspro разработан специально для моделирования преобразовательных установок. В основном, это те устройства, в которых применимы системы импульсно-фазового управления тиристорами. К недостаткам пакета следует отнести невозможность моделирования преобразовательных установок с импульсной модуляцией различного рода.

Система моделирования Pspice дает возможность изучать процессы в формате электрической принципиальной схемы, рассчитывать токи и напряжения во всех контурах и узлах схемы. Система позволяет моделировать устройства, использующие реальные элементы, выпускаемые серийно (в программном пакете имеется библиотека с параметрами полупроводниковых приборов). Серьезным ограничением следует считать невозможность моделирования устройств с переменной структурой, а также моделирование устройств, которые работают в импульсном режиме. Область применения ограничена моделями аналоговых цепей, работающих в непрерывном режиме, а также импульсными регуляторами в условиях полной определенности параметров цепи в каждый момент времени.

Системы моделирования OrCad и Electronics Workbench созданы на одной и той же математической платформе, что и Pspice, но предоставляют более удобный пользовательский интерфейс и некоторые дополнительные возможности.

Моделирование в Pspice, OrCad и Electronics Workbench позволяет выполнить анализ электромагнитных процессов в различных электротехнических устройствах [44,46]. Однако эти программы не позволяют достаточно полно реализовать модель тягового преобразователя, состоящего из силовых полупроводниковых модулей и блока управления ими.

По этим причинам программы, направленные на аналитическое (MathCad) и схемотехническое моделирование (Pspice, OrCad, Electronics Workbench) не могут полностью отвечать требованиям, которые предъявляют к модели силовой электрической цепи электровоза переменного тока с четырехквadrантным преобразователем, при движении электровоза по фидерной зоне.

В диссертации разработана математическая модель «тяговая сеть – электровоз с четырехквadrантным преобразователем» в системе MatLab Simulink. Модель состоит из тяговой подстанции электрифицированной железной дороги переменного тока, тяговой сети, тягового трансформатора и тягового электропривода электровоза.

3.2 Математическая модель электротехнической системы

Тяговая сеть переменного тока состоит из тяговой подстанции, элементов контактной сети, питающих и отсасывающих линий (фидеров), а также других устройств, присоединенных к контактной сети и рельсам по длине участка фидерной зоны железной дороги и потребляющих электроэнергию [17, 18]. Рассмотрим схемы замещения подсистем рассматриваемой электротехнической системы.

3.2.1 Модель тяговой подстанции

Схема замещения тяговой подстанции (см. рисунок 3.1) с выходным напряжением $U_{тп}$ на фидере тяговой подстанции представлена в виде

источника переменной синусоидальной ЭДС $e_{\text{ТП}}$, активного сопротивления $r_{\text{ТП}}$ и индуктивности $L_{\text{ТП}}$, приведенных к напряжению контактной сети.

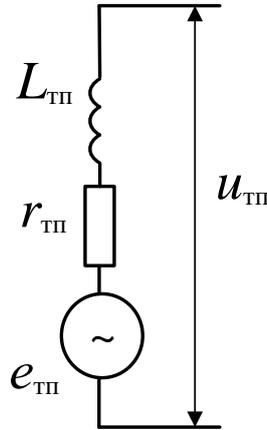


Рисунок 3.1 – Схема замещения тяговой подстанции

Мощность трансформатора принята равной 40 МВА со следующими параметрами элементов тяговой подстанции: активное сопротивление $r_{\text{ТП}} = 0,2$ Ом, индуктивность $L_{\text{ТП}} = 0,0123$ Гн, значение ЭДС тяговой подстанции, равное:

$$e_{\text{ТП}} = E_m \sin(\omega t + \psi), \quad (3.1)$$

где, E_m – амплитудное (максимальное) значение ЭДС тяговой подстанции; $E_m = 38,8$ кВ.

ψ – начальная фаза ЭДС.

При расчете и анализе электромагнитных процессов принято, что напряжение на шинах тяговой подстанции $U_{\text{ТП}}$ и ЭДС $e_{\text{ТП}}$ совпадают по фазе, поэтому угол $\psi = 0$ эл. град; действующее значение ЭДС тяговой подстанции $E_{\text{ТП}}$ принято равным 27,5 кВ.

Напряжение на выходных шинах тяговой подстанции определено по следующему выражению

$$U_{\text{ТП}} = e_{\text{ТП}} - r_{\text{ТП}} I - 2\pi f L_{\text{ТП}} \quad (3.2)$$

Падения напряжения на активных U_R и индуктивных U_L сопротивлениях тяговой подстанции равны:

$$U_R = r_{\text{ТП}} I \quad (3.3)$$

$$U_L = 2\pi f L_{\text{ТП}} I \quad (3.4)$$

После подстановки выражений (3.3) и (3.4) в (3.2) последнее примет вид:

$$U_{\text{ТП}} = e_{\text{ТП}} - U_R - U_L \quad (3.5)$$

В математической модели для анализа электромагнитных процессов предусмотрена возможность изменения ЭДС $e_{\text{ТП}}$ от минимального до максимального значений с учетом требований ГОСТ 6962-75. Изменение параметров элементов схемы замещения тяговой сети, обусловленное движением электровозов по фидерной зоне, оказывает влияние на электромагнитные процессы в системе.

3.2.2 Модель контактной сети

Питание электрооборудования ЭПС на участках электрифицированных железных дорог переменного тока осуществляется от трансформатора, расположенного на тяговой подстанции, через контактную сеть.

Как трансформатор подстанции, так и контактная сеть обладают определенными параметрами, которые оказывают влияние на электромагнитные процессы при передаче электрической энергии от тяговой подстанции к ЭПС. При этом параметры участка контактной сети от подстанции до точки присоединения электровоза изменяются при его движении по фидерной зоне.

В общем случае контактную сеть следует рассматривать как электрическую цепь с распределенными параметрами [67], которую представляют конечно-элементной моделью, основанной на последовательном включении Т-образных 4х-полюсников, соответствующих участку линии длиной Δx (см. рисунок 3.2).

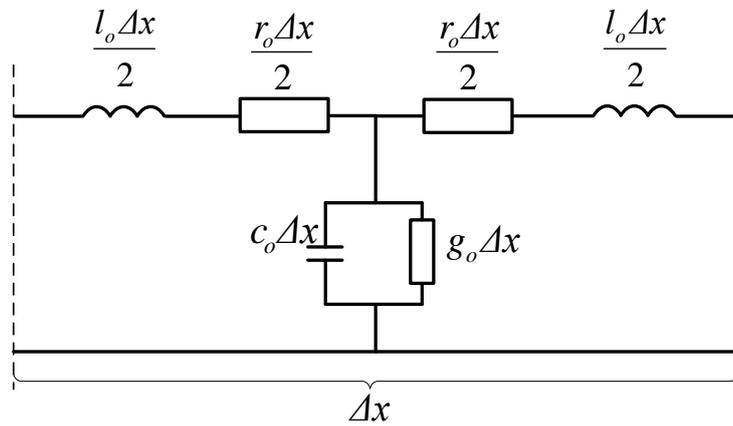


Рисунок 3.2. Схема замещения участка контактной сети длиной Δx .

В [52] предложена модель участка контактной сети длиной 20 км с разбивкой на 20, 50 или 100 элементов. Результаты анализа показали, что чрезмерное дробление длиной линии на элементы незначительно влияет на переходные процессы, а время расчета существенно возрастает.

Экспериментальные исследования [17] показывают, что в зависимости от расположения электровоза на фидерной зоне коммутационные процессы в преобразователе сопровождаются высокочастотными колебаниями с частотами от сотен до тысяч герц. Длина электромагнитной волны при скорости её распространения $V_{\phi} \approx 3 \cdot 10^8$ м/с соизмерима с расстоянием между тяговыми подстанциями, поэтому при таких условия контактную сеть целесообразно рассматривать как длинную линию. Учитывая, что расстояние между тяговыми подстанциями составляет 45-50 км (при системе тягового электроснабжения 25 кВ) или 70-90 км (при системе тягового электроснабжения 2 x 25кВ), модель контактной сети допустимо представлять в виде одного Т-образного 4-х полюсника или двух, соединенных последовательно. Модель контактной сети с учетом полученных параметров индуктивного и активного сопротивлений для конечно-элементной длиной линии представлена на рисунке 3.3[52].

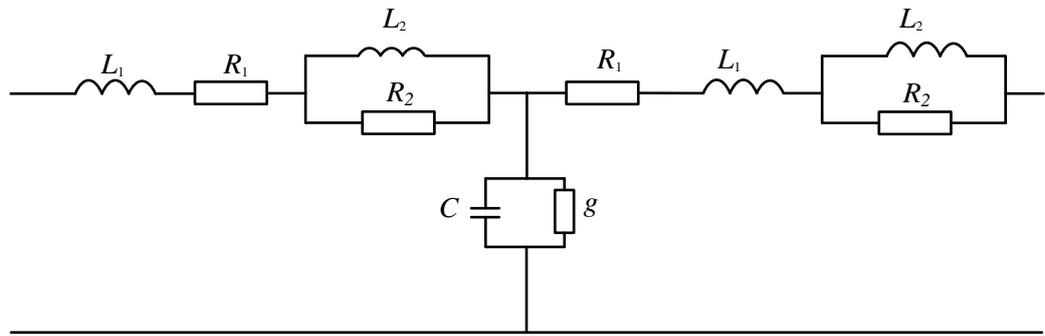


Рисунок 3.3. Схема замещения участка контактной сети длиной l .

На представленной схеме замещения параметры участка контактной сети определяют индуктивность L_1 , активное сопротивление R_1 , емкость C и поперечную проводимость g . Поверхностные эффекты, рассмотренные в работе [81], возникают в контактной сети, которые обусловили появление в схеме замещения (рисунок 3.1) сопротивления R_2 и индуктивности L_2 . Выбранная схема конечно-элементной модели длиной линии хорошо коррелируется с предложенной в [52,70] и будет использована для построения модели исследуемой электротехнической системы в программном пакете Matlab Simulink (Приложение Г).

Для расчета параметров элементов продольной составляющей контактной сети была отдельно изображена схема её замещения (см. рисунок 3.4)

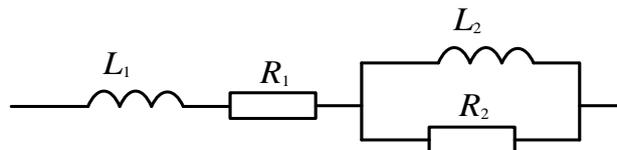


Рисунок 3.4 – Схема замещения продольной составляющей длиной линии

Расчетные значения активного и реактивного сопротивлений элементов схемы замещения определены по следующим выражениям [52]

$$\begin{aligned}
 R_{к.с.} &= R_1 + R_2 \frac{\omega^2 L_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}; \\
 X_{к.с.} &= \omega \left[L_1 + L_2 \frac{R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right],
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Активное и индуктивное сопротивления участка контактной сети длиной l определяют по следующим выражениям

$$R_{\text{к.с.}} = r_0 \cdot l; \quad (3.7)$$

$$X_{\text{к.с.}} = x_0 \cdot l. \quad (3.8)$$

где r_0 , x_0 - соответственно активное и реактивное сопротивления 1 км тяговой сети, Ом.

Согласно исследованиям [17] оптимизированные соотношения между параметрами следует принять равными $L_1/L_2=5,64/1$ и $R_1/R_2=1/8,8$.

Для выполнения расчетов и в качестве исходных данных для математической модели приняты следующие условия: двустороннее питание от тяговых подстанций, 2-х путный участок при параллельном соединении контактных подвесок, марка троса ПБСМ1-95, контактный провод 2МФ-100, тип рельса Р75.

Для указанных параметров контактной сети средние значения сопротивлений составляют: $r_0=0,124$ Ом/км, $x_0=0,3$ Ом/км (0,955 мГн/км), емкость $C_0=29 \cdot 10^{-9}$ Ф/км и проводимость $g_0=10^{-6}$ 1/Ом·км.

Принимая расположение электровоза в середине фидерной зоны ($l_\phi \cong 50$ км) и представляя контактную сеть в виде двух Т-образных 4х - полюсников получим следующие параметры элементов схемы (рисунок 3.4):

$$L_1=7,16 \text{ мГн}, \quad R_1=0,93 \text{ Ом};$$

$$L_2=1,26 \text{ мГн}, \quad R_2=8,18 \text{ Ом};$$

$$C_1=0,435 \text{ мкФ}; \quad g_1=15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}.$$

3.2.3 Модель тягового трансформатора

В данной работе выполнен расчет модели тягового трансформатора ХСН199039-ВКУ пассажирского электровоза ЭП20[53], схема соединения обмоток которого представлена на рисунке 3.5.

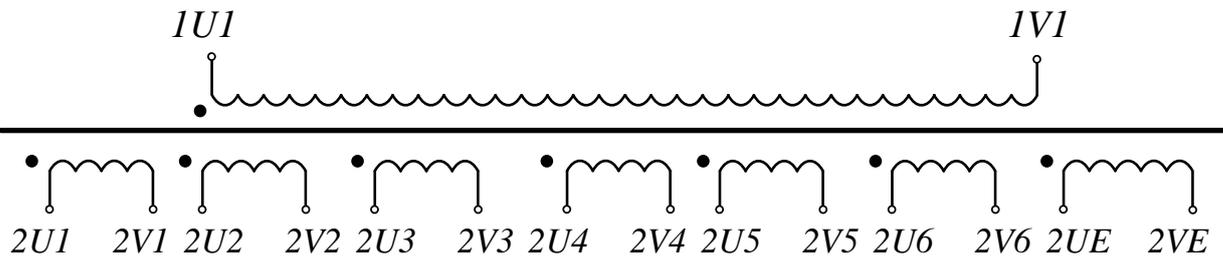


Рисунок 3.5 – Схема и обозначение обмоток тягового трансформатора

Тяговый трансформатор состоит из сетевой обмотки (обозначение зажимов 1U1-1V1), шести тяговых обмоток (обозначение зажимов 2U1-2V1...2U6-2V6) и обмотки отопления (зажимы обозначены 2UE-2VE). Четырехквadrантный преобразователь подключен к каждой тяговой обмотке ТТ и оказывает непосредственное влияние на происходящие в трансформаторе электромагнитные процессы, поэтому его параметры должны быть учтены в математической модели.

Методика расчета двухобмоточного трансформатора промышленного исполнения не имеет принципиальных отличий от методики расчета тягового трансформатора электровоза. Тяговый трансформатор является многообмоточным. Запишем уравнение магнитодвижущей силы (МДС) для многообмоточного трансформатора:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_3 w_3 + \dots + \dot{I}_n w_n = \dot{I}_m w_1, \quad (3.9)$$

где $\dot{I}_1, \dot{I}_2 \dots \dot{I}_n$ – действующие значения токов в обмотках;

\dot{I}_m – ток возбуждения трансформатора.

Как известно [39], магнитные потоки многообмоточного трансформатора образуют общий магнитный поток и уравнения ЭДС имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= ji_1\omega L_1 + ji_2\omega M_{12} + ji_3\omega M_{13} + \dots + ji_n\omega M_{1n} + i_1 r_1; \\ u_2 &= ji_1\omega M_{21} + ji_2\omega L_2 + ji_3\omega M_{23} + \dots + ji_n\omega M_{2n} + i_2 r_2; \\ u_3 &= ji_1\omega M_{31} + ji_2\omega M_{32} + ji_3\omega L_3 + \dots + ji_n\omega M_{3n} + i_3 r_3; \\ &\dots \\ u_n &= ji_1\omega M_{n1} + ji_2\omega M_{n2} + ji_3\omega M_{n3} + \dots + ji_{n-1}\omega M_{n(n-1)} + i_n r_n, \end{aligned} \right\} (3.10)$$

где r_n – активное сопротивление обмотки,

L_n – индуктивность обмотки;

M_{mn} – взаимная индуктивность пары обмоток, причем $M_{mn} = M_{nm}$.

Полученная система дифференциальных уравнений (3.10) приводится к более удобному виду для моделирования силовых цепей электровоза. Преобразование будет производиться на примере модели трансформатора, состоящего из трех обмоток, схема замещения которого представлена на рисунке 3.6.

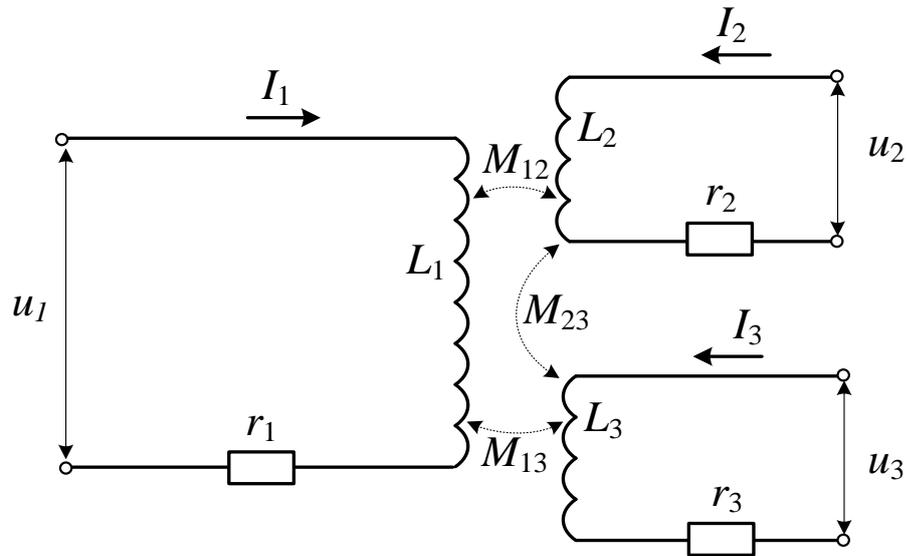


Рисунок 3.6 – Схема замещения тягового трансформатора электровоза для режима холостого хода

Напряжение на токоприемнике электровоза U_c (для удобства записи уравнений сетевому напряжению присвоено обозначение U_1) прикладывается к первичной обмотке, полное сопротивление которой состоит из активного r_1 и индуктивного X_1 сопротивлений. Напряжение на тяговых обмотках трансформатора равно U_2 и U_3 соответственно. Полные сопротивления

тяговых обмоток состоят из активных r_2 и r_3 и индуктивных X_2 и X_3 сопротивлений соответственно.

В общем случае электромагнитные процессы в многообмоточном трансформаторе описываются следующей системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ u_2 &= i_2 r_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \\ u_3 &= i_3 r_3 + \frac{d\Psi_3}{dt} \\ &\dots \\ u_n &= i_n r_n + \frac{d\Psi_n}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

где U_n – мгновенное значение напряжения на I -ой обмотке, В;

I_n – мгновенное значение тока на n -ой обмотке, А;

r_n – активное сопротивление n -ой обмотки, Ом;

Ψ_n – потокосцепление n -ой обмотки, Вб.

Полученная система дифференциальных уравнений (3.11) приводится к виду удобному для моделирования электрических цепей. Моделирование электромагнитных процессов будет выполнено на примере модели трансформатора, состоящего из трех обмоток. Для трехобмоточного трансформатора система уравнений (3.11) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ u_2 &= i_2 r_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \\ u_3 &= i_3 r_3 + \frac{d\Psi_3}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Магнитный поток n -ой обмотки тягового трансформатора состоит из основного магнитного потока (пересекает витки всех обмоток трансформатора) и потока рассеяния (пересекает витки только обмотки, которая его порождает). Этот электромагнитный процесс можно описать следующим выражением

$$\Psi_n = w_n (\Phi_o + \Phi_{тн}), \quad (3.13)$$

где w_n – число витков n -ой обмотки;

Φ_o – основной магнитный поток трансформатора, Вб;

$\Phi_{\tau n}$ – поток рассеяния n -ой обмотки трансформатора, Вб.

При этом основной магнитный поток и потоки рассеяния I -ой обмотки определяются следующими выражениями

$$\Phi_o = \lambda_o(I_1 w_1 + I_2 w_2 + I_3 w_3); \quad (3.14)$$

$$\Phi_{\tau n} = \lambda_{\tau n} I_n w_n. \quad (3.15)$$

где λ_o – магнитная проводимость магнитопровода по контуру замыкания основного магнитного потока, Гн;

$\lambda_{\tau n}$ – магнитная проводимость контура замыкания магнитного потока рассеяния n -ой обмотки, Гн.

После подстановки выражений (3.14) и (3.15) в (3.13) система уравнений (3.12) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + \frac{w_1 \lambda_o d(i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3)}{dt} + \frac{w_1 d(\lambda_{\tau 1} i_1 w_1)}{dt} \\ u_2 &= i_2 r_2 + \frac{w_2 \lambda_o d(i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3)}{dt} + \frac{w_2 d(\lambda_{\tau 2} i_2 w_2)}{dt} \\ u_3 &= i_3 r_3 + \frac{w_3 \lambda_o d(i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3)}{dt} + \frac{w_3 d(\lambda_{\tau 3} i_3 w_3)}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

После раскрытия скобок и группировки получим следующее выражение

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + w_1^2 (\lambda_o + \lambda_{\tau 1}) \frac{di_1}{dt} + w_1 w_2 \lambda_o \frac{di_1}{dt} + w_1 w_3 \lambda_o \frac{di_1}{dt} \\ u_2 &= i_2 r_2 + w_2 w_1 \lambda_o \frac{di_1}{dt} + w_2^2 (\lambda_o + \lambda_{\tau 2}) \frac{di_2}{dt} + w_2 w_3 \lambda_o \frac{di_2}{dt} \\ u_3 &= i_3 r_3 + w_3 w_1 \lambda_o \frac{di_1}{dt} + w_3 w_2 \lambda_o \frac{di_2}{dt} + w_3^2 (\lambda_o + \lambda_{\tau 3}) \frac{di_3}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Учитывая, что коэффициенты перед дифференциальными составляющими системы уравнений (5.17) являются индуктивностями, то справедливы следующие выражения

$$L_{ii} = w_i^2 (\lambda_o + \lambda_{\tau i}), \quad (3.18)$$

где L_{ii} – собственная индуктивность I -ой обмотки, Гн;

w_I – число витков I -ой обмотки.

$$L_{ij} = w_i w_j \lambda_0, \quad (3.19)$$

где L_{ij} – взаимоиндуктивность i -ой и j -ой обмоток, Гн;
 w_j – число витков j -ой обмотки.

В итоге система дифференциальных уравнений модели трехобмоточного трансформатора имеет вид

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} + L_{13} \frac{di_3}{dt} \\ u_2 &= i_2 r_2 + L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} + L_{23} \frac{di_3}{dt} \\ u_3 &= i_3 r_3 + L_{31} \frac{di_1}{dt} + L_{32} \frac{di_2}{dt} + L_{33} \frac{di_3}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Полученная система уравнений описывает электромагнитные процессы в трехобмоточном трансформаторе. После подстановки значений активных и индуктивных сопротивлений обмоток тягового трансформатора при построении модели программном пакете Matlab Simulink возможно определение мгновенных значений токов и напряжений для оценки результатов моделирования.

3.2.4 Модель тягового двигателя

Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором исследована в [55-59] и может быть применена при моделировании электромагнитных процессов электротехнической системы. За основу для разрабатываемой модели двигателя принята схема замещения для неподвижной асинхронной машины (рисунок 3.7).

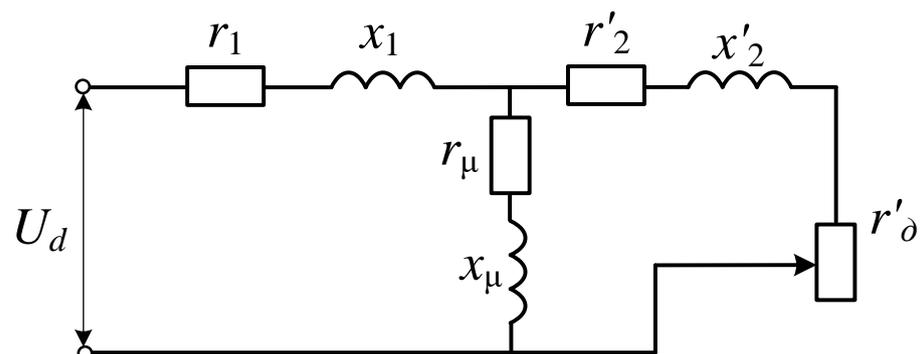


Рисунок 3.7 – Схема замещения асинхронного тягового двигателя

Схема замещения тягового двигателя аналогична схеме замещения трансформатора и состоит из активного r_1 и реактивного сопротивлений x_1 обмотки статора, активного r'_2 и реактивного сопротивлений x'_2 обмотки ротора. В цепь ротора асинхронной машины введено только активное сопротивление r'_∂ , как это обычно бывает в асинхронных двигателях, и сопротивления x_m и r_m цепи намагничивания двигателей.

В режиме тяги в тяговом электроприводе электровоза происходит преобразование электрической энергии контактной сети в кинетическую энергию движущегося электровоза. В режиме электродинамического торможения происходит обратное преобразование. Для наладки модели электрической передачи в цепи нагрузки были установлены параметры сопротивлений $R_{дэкв.}$, $X_{дэкв.}$, E_d , эквивалентные значениям соответствующих параметров АД (рисунок 3.8).

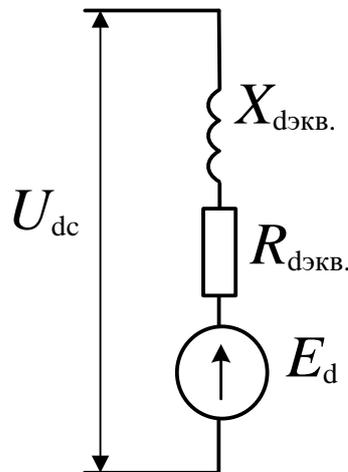


Рисунок 3.8 – Эквивалентная схема замещения нагрузки

Источник ЭДС E_d применен для возможности моделирования режима тяги и рекуперативного торможения. Разность значений напряжений, заданного на источнике ЭДС E_d и выбранного в системе управления 4q-S преобразователем U_{dc} , пропорциональна количеству потребляемой (генерируемой) энергии тяговым электроприводом электровоза.

Нагрузка подключена к конденсаторам звена постоянного напряжения и выходным зажимам 4q-S преобразователя. В режиме тяги тяговые двигатели потребляют электрическую энергию, что приводит к уменьшению напряжения U_{dc} на конденсаторах звена выпрямленного напряжения. Уменьшение напряжения компенсируется четырехквadrантным преобразователем, который осуществляет преобразование и передачу энергии от тягового трансформатора на конденсаторы постоянного напряжения. В режиме рекуперативного торможения тяговый двигатели генерируют электрическую энергию, что приводит к повышению напряжения U_{dc} на конденсаторах звена постоянного напряжения. При повышении напряжения происходит обратный процесс передачи электрической энергии от конденсаторов постоянного напряжения через 4q-S преобразователь и тяговый трансформатор в контактную сеть.

Модель тягового привода реализована в программном пакете Matlab Simulink и состоит из двух автономных инверторов напряжения и двух АД. Из библиотеки элементов выбраны соответствующие элементы и подключены к конденсаторам постоянного напряжения (рисунок 3.9).

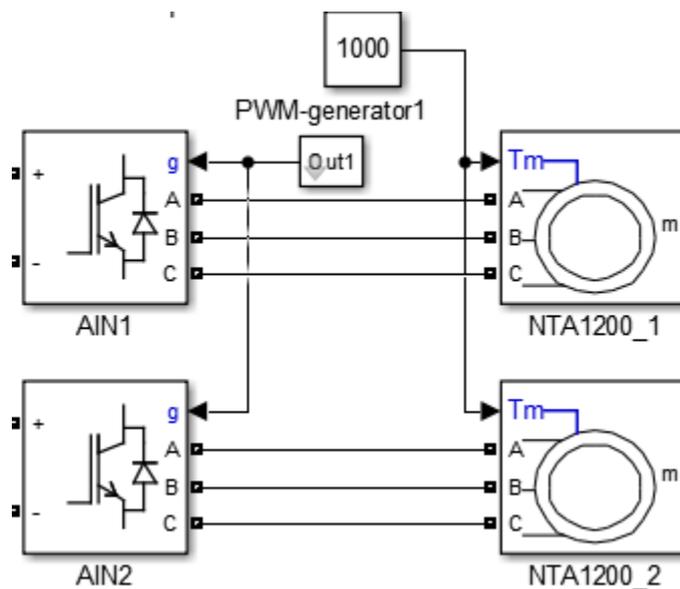


Рисунок 3.9 – Блок нагрузки

3.2.5 Система управления 4q-S преобразователем

При ведении поезда изменяются режимы работы электровоза. Для стабильной работы тяговой передачи должно быть обеспечено постоянное значение напряжения на конденсаторах звена постоянного напряжения. В тяговом приводе современных электровозов поддержание величины этого напряжения обеспечивается автоматизированной системой управления тяговым приводом. Эта система состоит из подсистем, которые в совокупности представляют единую систему управления электровозом.

В этом разделе рассмотрим работу системы управления 4q-S преобразователем. Для этого рассмотрим следующую функциональную схему системы автоматического регулирования (см. рисунок 3.10).

Система управления 4q-S преобразователем выполнена на основе трёхконтурной системы автоматического регулирования, поддерживающей заданные значения регулируемых величин [61,62]. Основной величиной является заданное значение напряжение U_{dc} .

Регулирование уровня напряжения звена постоянного тока U_{dc} осуществляет контур, состоящий из следующих элементов системы:

- чувствительного элемента (датчик напряжения ДН2);
- задающего элемента ЗЭ (заданной величины напряжения на конденсаторах звена постоянного напряжения);
- элемента сравнения, выполняющего сравнение сигналов, пропорциональных заданному $U_{dз}$ и фактическому мгновенному U_{dc} значениям, для выявления рассогласования ΔU_d ;
- регулятора напряжения РН, предназначенного для формирования амплитуды сигнала задаваемого тока I_{max} .

Контур коррекции фазового сдвига тока относительно входного напряжения сетевой обмотки ТТ состоит из следующих элементов системы:

- чувствительных элементов (датчика фазы напряжения (ДФН) и датчика фазы тока (ДФТ));
- элемента сравнения, выполняющего сравнение сигналов, пропорциональных углу сдвига фазы напряжения $\varphi_{сн}$ и углу сдвига фазы тока $\varphi_{ст}$, для выявления рассогласования φ_1 ;
- элемента сравнения, выполняющего сравнение сигналов, пропорциональных разности $\Delta\varphi$ углов сдвига фаз φ_1 между напряжением и током и заданным значением угла сдвига фазы тока $\varphi_{стз}$, для выявления рассогласования $\Delta\varphi$;
- регулятора фазы РФ;
- промежуточного элемента, выполняющего сложение заданной частоты ωt и угла сдвига фазы φ_c ;
- промежуточного элемента \sin , формирующего синусоидальный сигнал.

Внутренний контур системы регулирования состоит из:

- регулятора тока РТ;
- элемента сравнения, выполняющего сравнение сигналов, пропорциональных разности значений, полученных от датчика тока I_2 и промежуточного звена (сигнал U_2);
- элемента сравнения, выполняющего сравнение сигналов, пропорциональных разности несущей и моделирующей частот для формирования управляющих сигналов на переключение IGB-транзисторов.

После сравнения заданной величины напряжения U_{d3} и фактической величины напряжения U_{dc} мгновенного значения звена постоянного напряжения U_{dc} в регуляторе напряжения РН формируется управляющий сигнал. Значение угла сдвига фазы тока $\Delta\varphi$ поступает на вход регулятора фазы РФ и затем в блок, формирующий синусоидальный сигнал. Затем осуществляется умножение мгновенных значений синусоидального сигнала и сигнала с выхода РН. Дальше I_2^* умножается на синусоидальный сигнал, поступающий с контура коррекции фазы, в который входят датчики фазы для сетевого напряжения и тока, сумматоры, регулятор фазы и блок, формирующий синусоидальный сигнал. Сигнал I_2^* , получаемый с блока умножения, является задающим для внутреннего контура регулирования. В него входят: датчик тока, сумматор, который выдаёт рассогласование ΔI между I_2^* и фактическим током I_2 измеряемым датчиком тока, регулятор тока РТ, который преобразует ΔI в ΔU_{4qs} и сумматор, на входах которого напряжение U_2 и ΔU_{4qs} , а на выходе заданное напряжение 4qs-преобразователя U_{4qs}^* . Дальше U_{4qs}^* преобразуется в модулирующую функцию и поступает в блок, обеспечивающий управление ключами преобразователя методом ШИМ-модуляции.

В качестве регуляторов напряжения и тока используются пропорционально-интегрирующие регуляторы (ПИ-регуляторы). Критерием качества регулирования является отсутствие недопустимых переходных процессов при реализации системой управления четырехквadrантным

преобразователем опережающего фазового сдвига сетевого тока, появление недопустимых значений напряжения на токоприемнике электровоза при переходных процессах, превышение допустимого напряжения на токоприемнике в режиме компенсации реактивной мощности, а также недопустимых бросков тока при переходных процессах, приводящих к срабатыванию защиты по максимальному току. Синтез регуляторов тока и напряжения проводился по методу покоординатного спуска (метод Гаусса-Зайделя) [84].

Коэффициент модуляции для обеспечения устойчивой работы ограничивается величиной $\mu \leq 0,9$.

Выходным сигналом системы управления является модулирующий сигнал $f_m(t)$, на основании сравнения которого с тактовым сигналом $F_T(t)$ формируются сигналы управления транзисторами IGBT-модулей.

4qS-преобразователь состоит из четырех IGBT-модулей, соединённых по схеме моста и смоделированных элементов, взятых из библиотеки Matlab с параметрами, приведенными в таблице А.2.

3.2.6 Система формирования опережающего угла сдвига фазы тока

В настоящее время серийно выпускаются производственными предприятиями и эксплуатируются на сети железных дорог ОАО «РЖД» грузовые и пассажирские электровозы переменного тока, на которых установлен ВИП в качестве тягового преобразователя. При анализе электромагнитных процессов установлено, что ток тяговой сети в электротехнической системе «тяговая сеть – электровоз с ВИП» отстает по фазе от напряжения.

Электровоз с ВИП являющийся для тяговой подстанции линейной активно-индуктивной нагрузкой, в режиме тяги всегда потребляет из тяговой сети реактивную энергию, величина которой определяется углом регулирования тиристорov ВИП. При этом имеет место снижение напряжения

на токоприемнике электровоза с ВИП за счет падения напряжения на участке контактной сети, обусловленного потреблением электровоза с ВИП реактивной энергии.

При наличии на этом участке фидерной зоны электровоза с 4qS-преобразователем возможно скомпенсировать это уменьшение напряжения в контактной сети за счет перевода 4qS-преобразователя в режим компенсации реактивной энергии.

Как отмечено ранее, особенностью работы 4qS-преобразователя является возможность работы с минимальным значением угла сдвига фазы напряжения от тока сетевой обмотки тягового трансформатора в режимах тяги и рекуперативного торможения. При работе на одной фидерной зоне электровоз с 4qS-преобразователем в режиме компенсации реактивной мощности может стать источником реактивной энергии, потребляемой электровозом с ВИП. Совместная работа электровозов позволит уменьшить угол отстающего тока в питающем фидере тяговой подстанции и повысить энергетическую эффективность системы «тяговая сеть – электровоз».

Существующие электровозы 2ЭС5, 2ЭС5С, 2ЭС7, ЭП10, ЭП20 и 2ЭВ120 с 4qS-преобразователем в режимах тяги и рекуперативного торможения работают с коэффициентом мощности, близким к единице. Максимальная мощность электровоза при его эксплуатации реализуется не более, чем в 10% времени от всего времени работы. В зависимости от эксплуатационных условий на фидерной зоне и нагрузки электровоза с 4qS-преобразователем появляется возможность компенсации реактивной мощности.

Максимально допустимое значение напряжения по ГОСТ 6962-75 на участке контактной сети фидерной зоны не совпадает со значением напряжения на токоприемнике электровоза с 4qS-преобразователем, работающим в режиме компенсации реактивной мощности.

Существует несколько алгоритмов управления тяговым преобразователем в режиме компенсации реактивной мощности. Внедрение

алгоритма работы в систему управления четырехквadrантного преобразователя ЭПС переменного тока целесообразно при условии обеспечения устойчивой работы тягового преобразователя и поддержания напряжения на фидерной зоне в допустимых пределах по ГОСТ 6962-75.

Рассмотрим способы формирования управляющего воздействия регулятора фазы системы управления 4qS-преобразователя. Формирование заданного угла сдвига фазы тока $\varphi_{стз}$ (см. рисунок 3.11) возможно по сигналу $U_{сз1}$ от контроллера машиниста, по сигналу $U_{сз2}$ от системы управления тяговым преобразователем по условию статической уставки максимального напряжения на токоприемнике ЭПС и по сигналу $\Delta U_{фз}$, определяемого по максимальному напряжению на фидерной зоне [63].

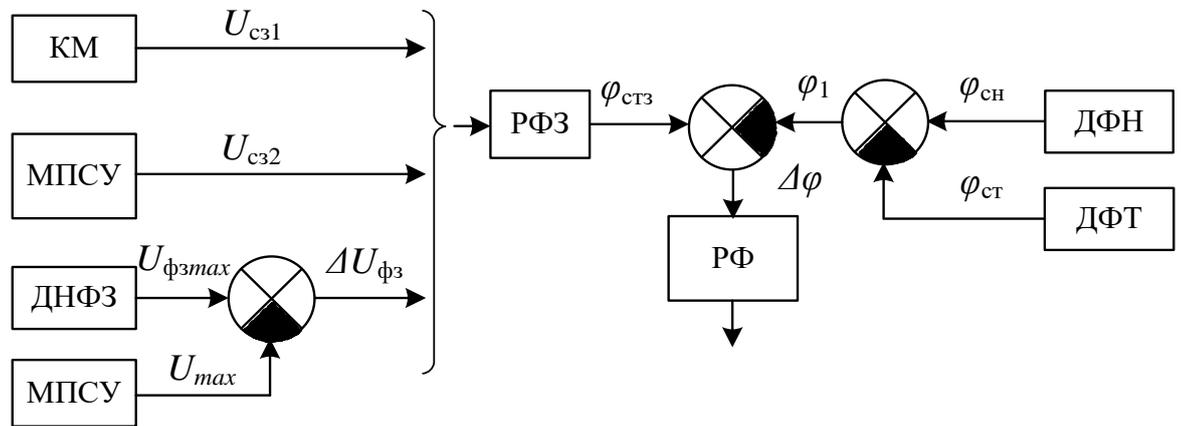


Рисунок 3.11 – Алгоритм формирования угла опережения напряжения током

Сигнал $\Delta U_{фз}$ формируется на выходе элемента, выполняющего сравнение сигналов, пропорциональных максимальному значению напряжения на фидерной зоне $U_{фзmax}$, который поступает от датчиков напряжения фидерной зоны (ДНФЗ) и напряжению уставки максимального значения на токоприемнике электровоза U_{max} . Далее этот сигнал поступает на вход задающего регулятора фазы (РФЗ). На выходе РФЗ формируется сигнал, пропорциональный опережающему заданному углу $\varphi_{стз}$ сдвига фазы тока первичной обмотки ТТ.

Формирование сигнала о максимальном напряжении $U_{фзmax}$ на фидерной зоне осуществляется измерением напряжения в нескольких точках между контактным проводом и рельсами. Сигналы о фактическом значении напряжения в контактной сети в точке измерения поступают на блок сбора и передачи данных (БСПД) для последующей обработки. В данной работе предлагается следующий алгоритм обработки информации:

$$U'_{ср.фз} = \frac{(\sum_{i=1}^n U_{фзn}) - U_{фзmin} - U_{фзmax}}{n-2}, \quad (3.19)$$

где n – количество точек измерения напряжения на фидерной зоне.

БСПД вычисляет максимальное напряжение на фидерной зоне с заданной частотой дискретизации, значение которой может быть выбрано исходя из необходимой скорости регулирования напряжения. Вычисленное значение по радиоканалу передается на электровоз с 4qS-преобразователем. МПСУ электровоза использует полученное от БСПД значение для управления тяговым приводом электровоза в режиме тяги и КРМ. При штатной работе тягового преобразователя и значении напряжения $U'_{ср.фз}$ внутри допустимого диапазона значений напряжения контактной сети по ГОСТ 6962-75 система управления 4qS-преобразователем обеспечивает опережающий угол сдвига фазы тока относительно напряжения. Максимальный опережающий угол сдвига фазы тока определяется исходя из максимально допустимого напряжения на фидерной зоне и значения активной составляющей тока I_a тока I_c сетевой обмотки ТТ необходимой для реализации заданной силы тяги электровоза. При приближении напряжения $U'_{ср.фз}$ к U_{max} МПСУ уменьшает реактивную составляющую I_a тока I_c сетевой обмотки ТТ.

В случае неисправности системы формирования и передачи на электровоз сигнала о максимальном напряжении на фидерной зоне $U_{фзmax}$ система управления электровоза МПСУ предусматривает управление компенсацией реактивной мощности в автоматизированном режиме двумя способами: по заданному машинистом электровоза фиксированному

значению реактивного тока и пропорциональными активной I_a и реактивной I_p составляющими вектора тока сетевого тока I_c , определяемыми МПСУ.

Существует способ регулирования напряжения тяговой сети переменного тока стационарными установками КРМ [63]. Этот способ основан на измерении напряжения в нескольких точках системы тягового электроснабжения.

Представляется более рациональным использование другого способа векторного управления 4qS-преобразователем в режиме КРМ, предлагаемого в работе.

В автоматизированном режиме КРМ системой управления 4qS-преобразователем предложено реализовать векторное управление током I_c сетевой обмотки ТТ. Векторные диаграммы для перечисленных режимов работы представлены на рисунке 3.12.

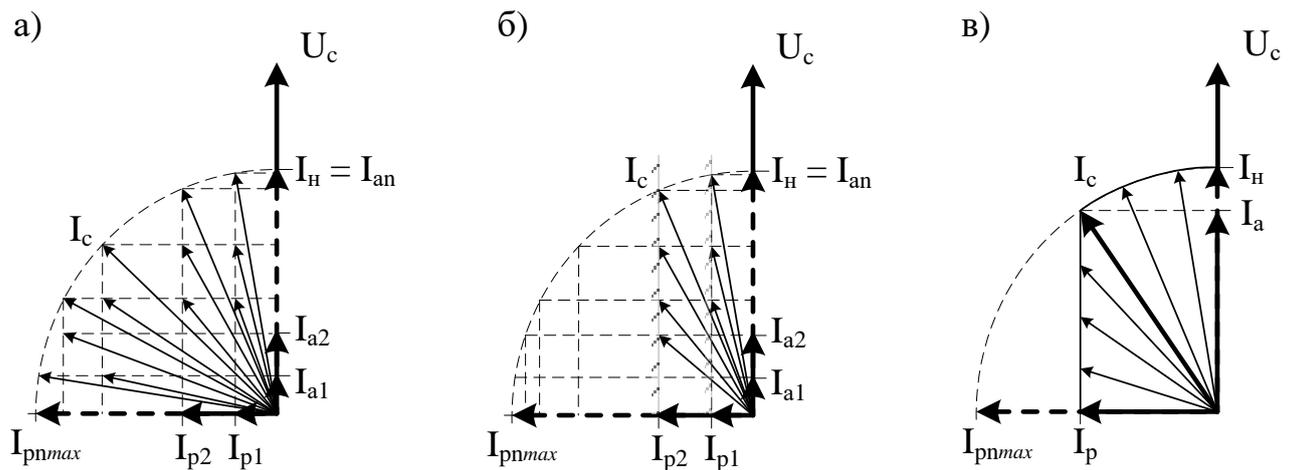


Рисунок 3.12 – Диаграммы напряжения и токов при векторном управлении 4qS-преобразователем в режиме КРМ

При векторном управлении 4qS-преобразователем наиболее эффективное значение реактивного тока по условиям эксплуатационной обстановки будет достигнуто при векторном управлении. Такое управление подразумевает поле характеристик, ограниченное площадью круга радиусом I_c (рисунок 3.12, а). В режиме тяги при штатной работе системы формирования и передачи на электровоз сигнала о максимальном напряжении на фидерной

зоне $U_{фzmax}$ вектор сетевого тока I_c будет расположен во II квадранте комплексной плоскости и характеристика работы 4qS-преобразователя будет представлять площадь равную четверти круга радиусом I_c . По сигналу о максимальном значении напряжения на фидерной зоне система управления 4qS-преобразователя определяет и устанавливает максимальное допустимое значение реактивного тока I_p для КРМ и поддержания напряжения контактной сети не превышающем максимального значения по ГОСТ 6962-75. Активную составляющую I_a тока I_c система управления определяет из условий реализации необходимой силой тяги электровозом в определенный момент времени с учетом перегонного времени хода и графика движения поезда. Длина результирующего вектора не должна превышать максимального значения тока I_c .

Работа электровоза в режиме тяги с компенсацией реактивной мощности тяговой сети возможна при условии 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 [49], а также БСПД для измерения и определения максимального значения напряжения на фидерной зоне и передачи радиосигнала на электровоз о максимальном напряжении напряжения (рисунок 3.13).

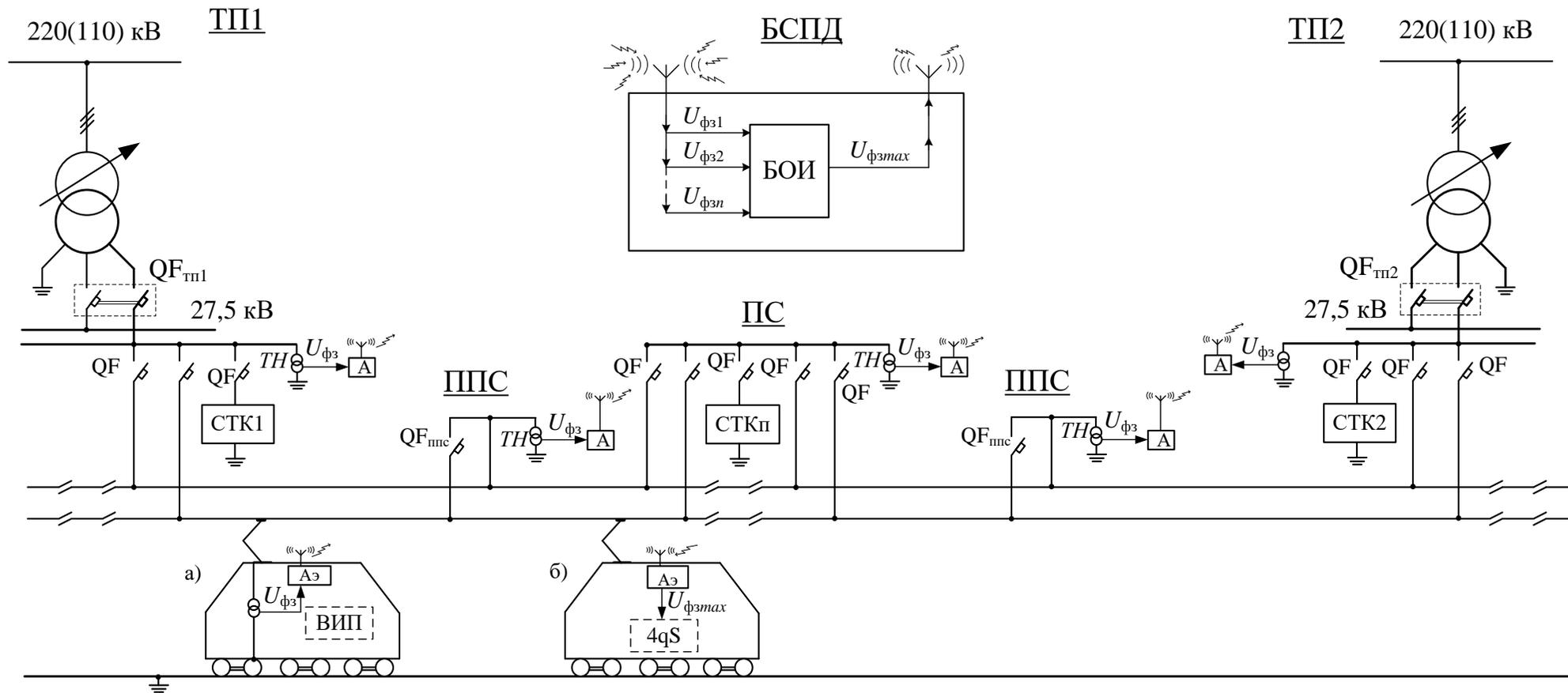


Рисунок 3.13 – Работа электровозов с ВИП (а) и 4qS-преобразователями (б) на межподстанционной зоне

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 передается 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.

Установка дополнительных передающих устройств информации Аэ на электровозы, оборудованные ВИП, находящиеся на одной фидерной зоне с электровозом нового поколения с четырехквadrантным преобразователем целесообразна для поддержания напряжения в контактной сети на более высоком уровне, не превышающем допустимых значений по ГОСТ6962-75. Первые будут являться дополнительным мобильным измерительным устройством измерения напряжения в контактной сети.

Блок БСПД принимает по радиоканалу сигналы о напряжении $U_{фз}$ со всех передающих устройств и передает на электровоз с 4qS-преобразователем. С учетом полученного сигнала электровоз работает в режиме источника реактивной мощности необходимой величины для повышения энергетической эффективности, рассматриваемой электротехнической системы.

В случае неисправности системы формирования и передачи на электровоз сигнала о максимальном напряжении на фидерной зоне управление работой 4qS-преобразователя в режиме КРМ может быть реализовано от МПСУ электровоза. При таком алгоритме работы поле характеристик становится равным части четверти круга, ограниченной вертикальной линией со значением ординаты (например, $I_{р2}$), равном величине реактивного тока I_p (рисунок 3.12, б).

Также возможна работа в режиме КРМ по заданию значения реактивного тока I_p от контроллера машиниста (рисунок 3.12, в), например,

при отсутствии сигнала или неисправности БСПД. По условиям эксплуатационной обстановки машинист электровоза задает уставку реактивного тока компенсации реактивной мощности и МПСУ электровоза определяет вектор сетевого тока I_c с учетом необходимого вектора тока I_a для реализации заданной силы тяги электровозом.

Во всех режимах работы при КРМ величина вектора сетевого тока I_c не должна превышать номинального значения тока I_n сетевой обмотки тягового трансформатора. Анализ электромагнитных процессов выполним на модели, реализованной в программе Matlab.

3.2.7 Результаты моделирования электромагнитных процессов

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

Как известно [52], контактная сеть в модели представляет собой цепь с распределенными параметрами или длинную линию. По мере удаления электровоза от тяговой подстанции происходит искажение кривых токов и напряжений. На электрифицированных железных дорогах переменного тока расстояние между тяговыми подстанциями может достигать 45-50 км (при системе тягового электроснабжения 25 кВ) и 70-90 км (при системе тягового электроснабжения 2x25 кВ).

В данной работе в математической модели контактная сеть представлена в виде Т-образного четырехполюсника. Элементы L_1 , R_1 , C и g определяют соответственно индуктивность, активное сопротивление, емкость и поперечную проводимость контактной сети. Сопротивления R_2 и индуктивность L_2 позволяют учитывать изменение параметров контактной сети, вызванное поверхностными эффектами.

Модель тягового трансформатора представлена блоком многообмоточного трансформатора из библиотеки стандартных элементов. Параметры модели трансформатора представлены в таблице А.1. Сетевая обмотка ТТ электровоза подключена к контактной сети и обратному проводу (рельсам). Ко вторичной обмотке тягового трансформатора подключен 4qS-преобразователь (блок «4QS-converter»). Звено выпрямленного напряжения, состоящее из фильтровых конденсаторов и потребителя электроэнергии, эквивалентного одному тяговому двигателю, подключены к выходным клеммам четырехквadrантного преобразователя.

Система управления преобразователем (блок «CNTR-4QS») с учетом величин контролируемых токов и напряжений формирует управляющие сигналы для силовых ключей. Алгоритм формирования управляющих сигналов изложен во втором разделе.

При нахождении одиночного электровоза с четырехквadrантным преобразователем и отсутствии других потребителей реактивной энергии падение напряжения происходит только на реактивных элементах тяговой сети. Электровозы с ВИП являются активно-индуктивной нагрузкой и при работе на одной фидерной зоне с первыми будут являться потребителями реактивной энергии в большей степени. Модель электротехнической системы дополнена электровозом с ВИП (Приложение В). Работа одиночного электровоза с ВИП на фидерной зоне при двустороннем питании подробно рассмотрена в [70].

На рисунках 3.14 – 3.19 представлены следующие кривые:

- U_{c_4qS} - напряжением на токоприемнике электровоза с четырехквadrантным преобразователем;
- U_{c_vip} - напряжением на токоприемнике электровоза с ВИП;
- $U_{тп1}$ - напряжением на шинах тяговой подстанции 1;
- $U_{тп2}$ - напряжением на шинах тяговой подстанции 2;
- I_{c_4qS} - ток электровоза с четырехквadrантным преобразователем;
- I_{c_vip} - ток электровоза с ВИП;

- $I_{c_тп1}$ - ток тяговой подстанции 1;
- $I_{c_тп2}$ - ток тяговой подстанции 2;
- K_{m_4qS} – коэффициент мощности электровоза с четырехквadrантным преобразователем;
- K_{m_vip} - коэффициент мощности электровоза с ВИП;
- $K_{m_тп1}$ - коэффициент мощности тяговой подстанции 1;
- $K_{m_тп2}$ - коэффициент мощности тяговой подстанции 2;

Результаты моделирования мгновенных значений тока и напряжения на токоприемнике электровоза с четырехквadrантным преобразователем при нулевом фазовом сдвиге тока, полученные в программном пакете Matlab Simulink, совпадают с допустимой точностью с осциллограммами сетевого тока и напряжения на токоприемнике электровоза (рисунок 1.9), полученные при испытаниях такого электровоза.

На рисунке 3.14 представлены результаты моделирования электромагнитных процессов в рассматриваемой электротехнической системе получены при нулевом фазовом сдвиге тока I_{c_4qS} относительно напряжения U_{c_4qS} на токоприемнике электровоза с четырехквadrантным преобразователем. Полученные кривые соответствуют номинальному режиму работы электровозов, при этом средние установившиеся значения коэффициентов мощности равны следующим значениям $K_{m2_4qS} = 0,993$; $K_{m_vip} = 0,719$; $K_{m_тп1} = 0,867$; $K_{m_тп2} = 0,91$. При двустороннем питании контактной сети и нахождении на фидерной зоне только одного электровоза с четырехквadrантным преобразователем, при таких условиях коэффициент мощности этого электровоза равен $K_{m1_4qS} = 0,9996$.

В установившемся режиме работы в систему управления четырехквadrантным преобразователем задавались значения опережающего фазового сдвига сетевого тока электровоза I_{c_4qS} . По заданному значению система управления четырехквadrантным преобразователем реализует опережающий сдвиг сетевого тока I_{c_4qS} . При увеличении опережающего фазового сдвига тока I_{c_4qS} уменьшается коэффициент мощности K_{m_4qS}

электровоза с четырехквadrантным преобразователем. При этом увеличиваются коэффициенты мощности электровоза с ВИП K_{m_vip} и тяговых подстанций $K_{m_тп1}$ и $K_{m_тп2}$. Результаты моделирования электромагнитных процессов представлены на рисунках 3.15 – 3.19.

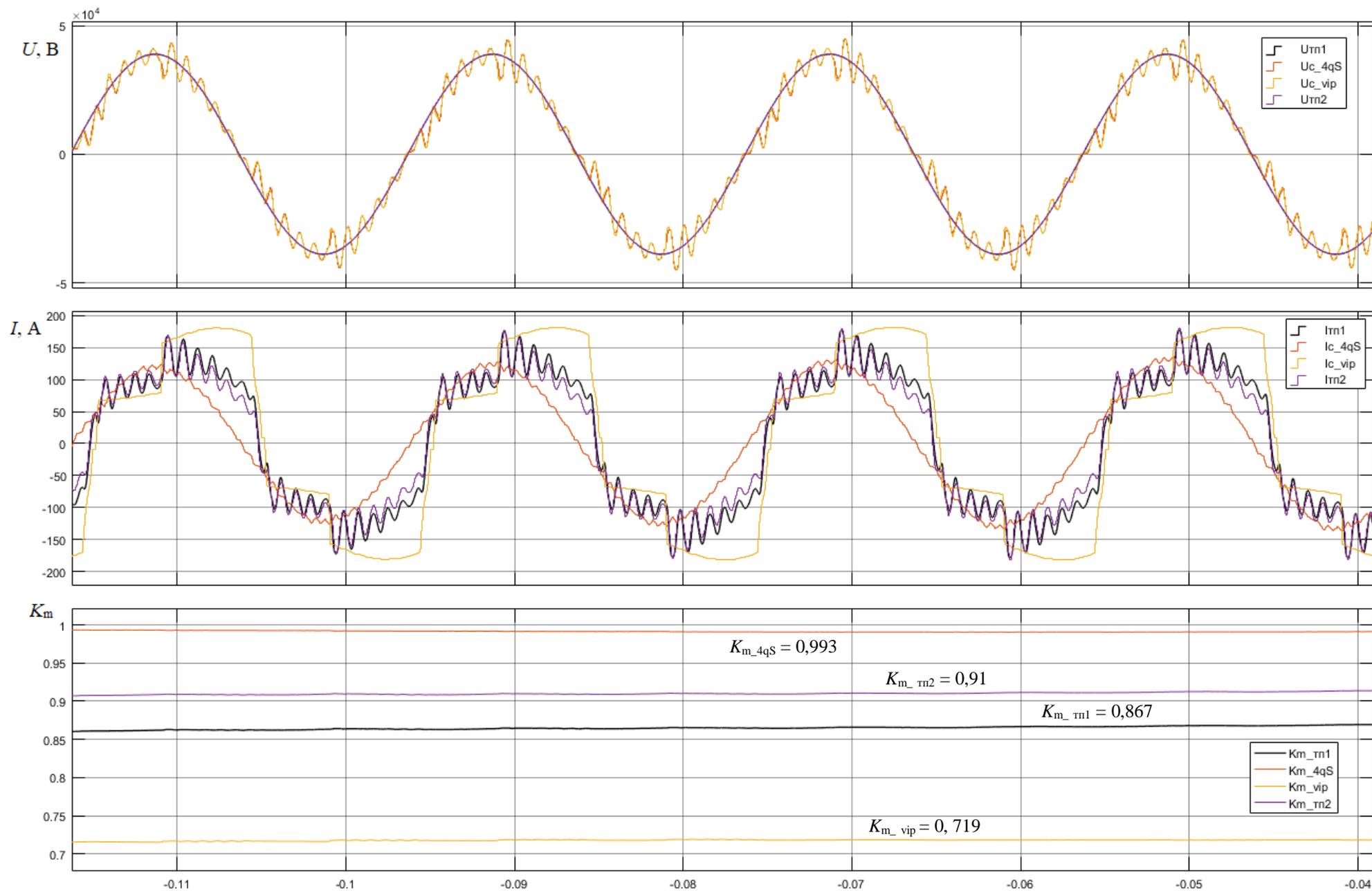


Рисунок 3.14 – Электромагнитные процессы в электротехнической системе при нулевом фазовом сдвиге сетевого тока электровоза с четырехквadrантным преобразователем в режиме тяги

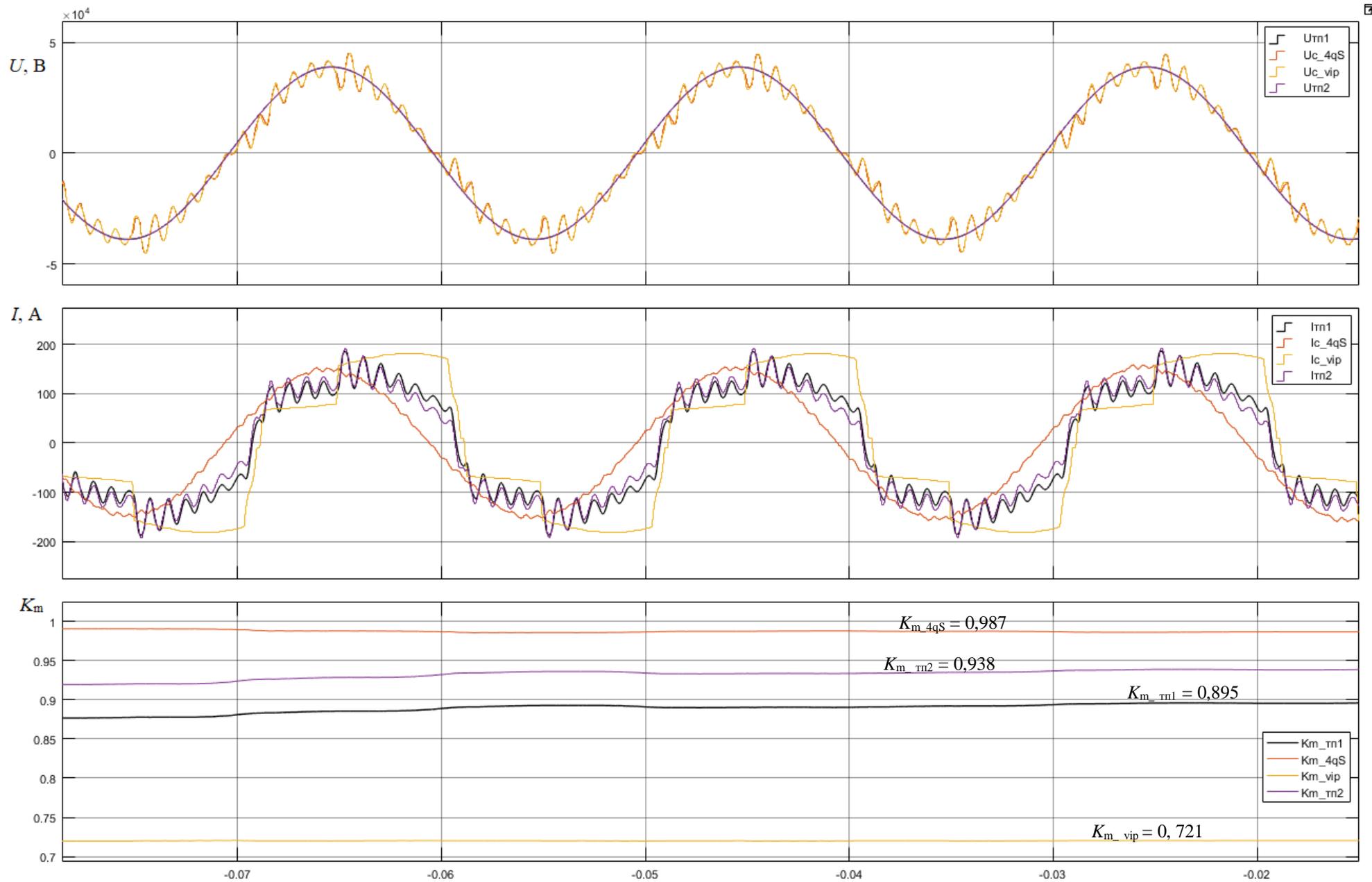


Рисунок 3.15 – Электромагнитные процессы в электротехнической системе при опережающем на 3 эл. град фазовом сдвиге сетевого тока электровоза с четырехквadrантным преобразователем в режиме тяги

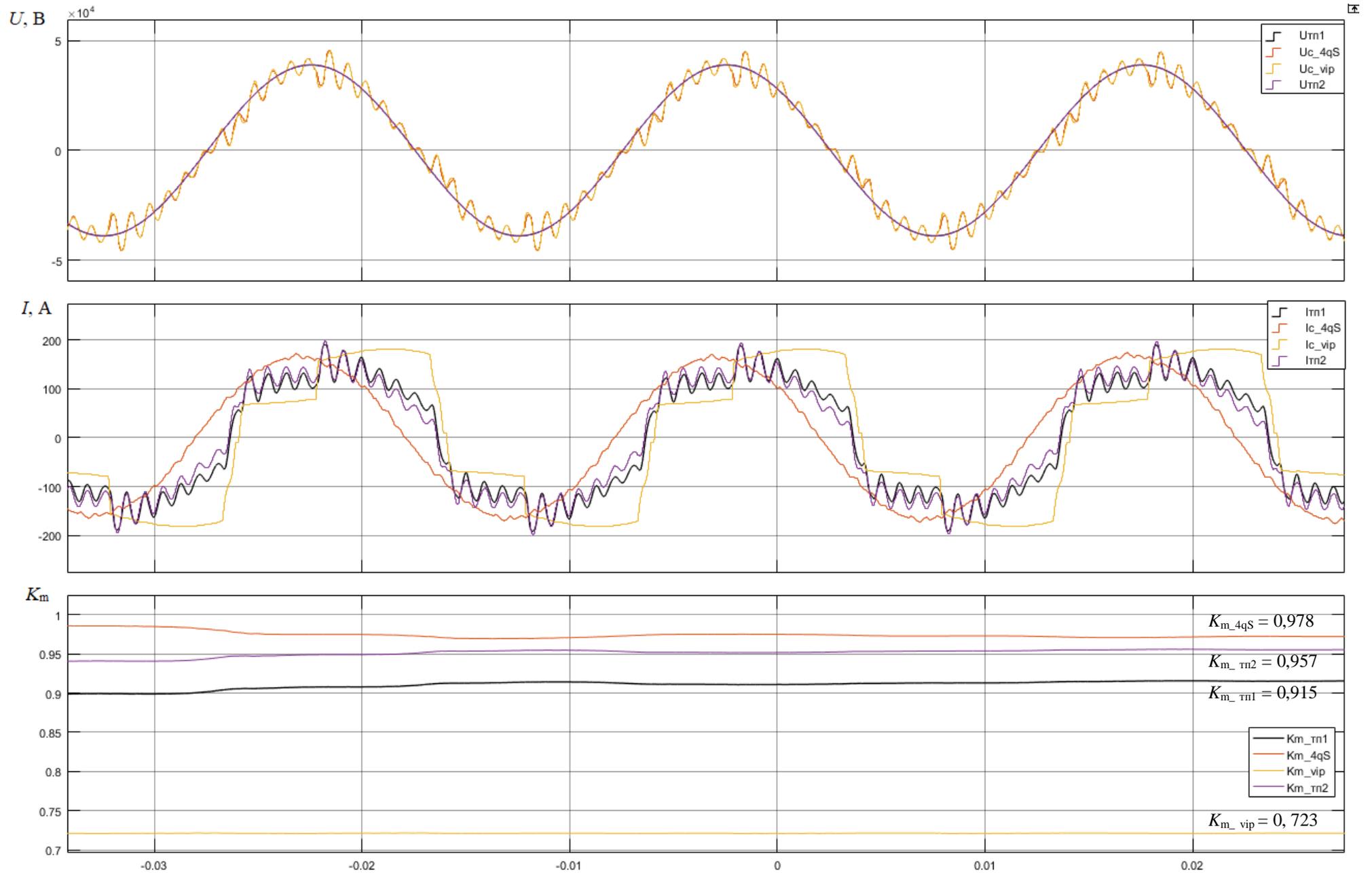


Рисунок 3.16 – Электромагнитные процессы в электротехнической системе при опережающем на 6 эл. град фазовом сдвиге сетевого тока электровоза с четырехквadrантным преобразователем в режиме тяги

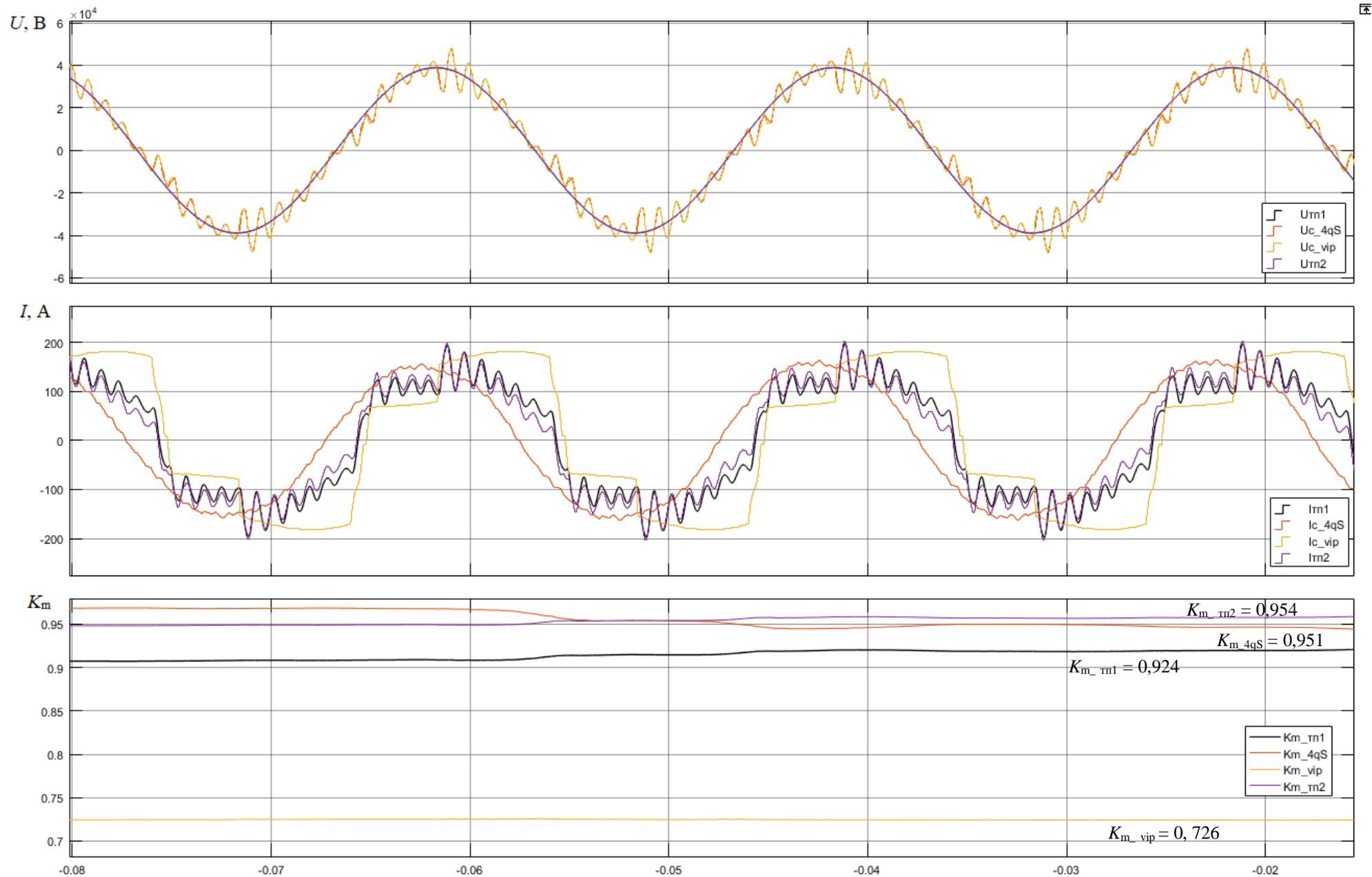


Рисунок 3.17 – Электромагнитные процессы в электротехнической системе при опережающем на 9 эл. град фазовом сдвиге сетевого тока электровоза с четырехквadrантным преобразователем в режиме тяги

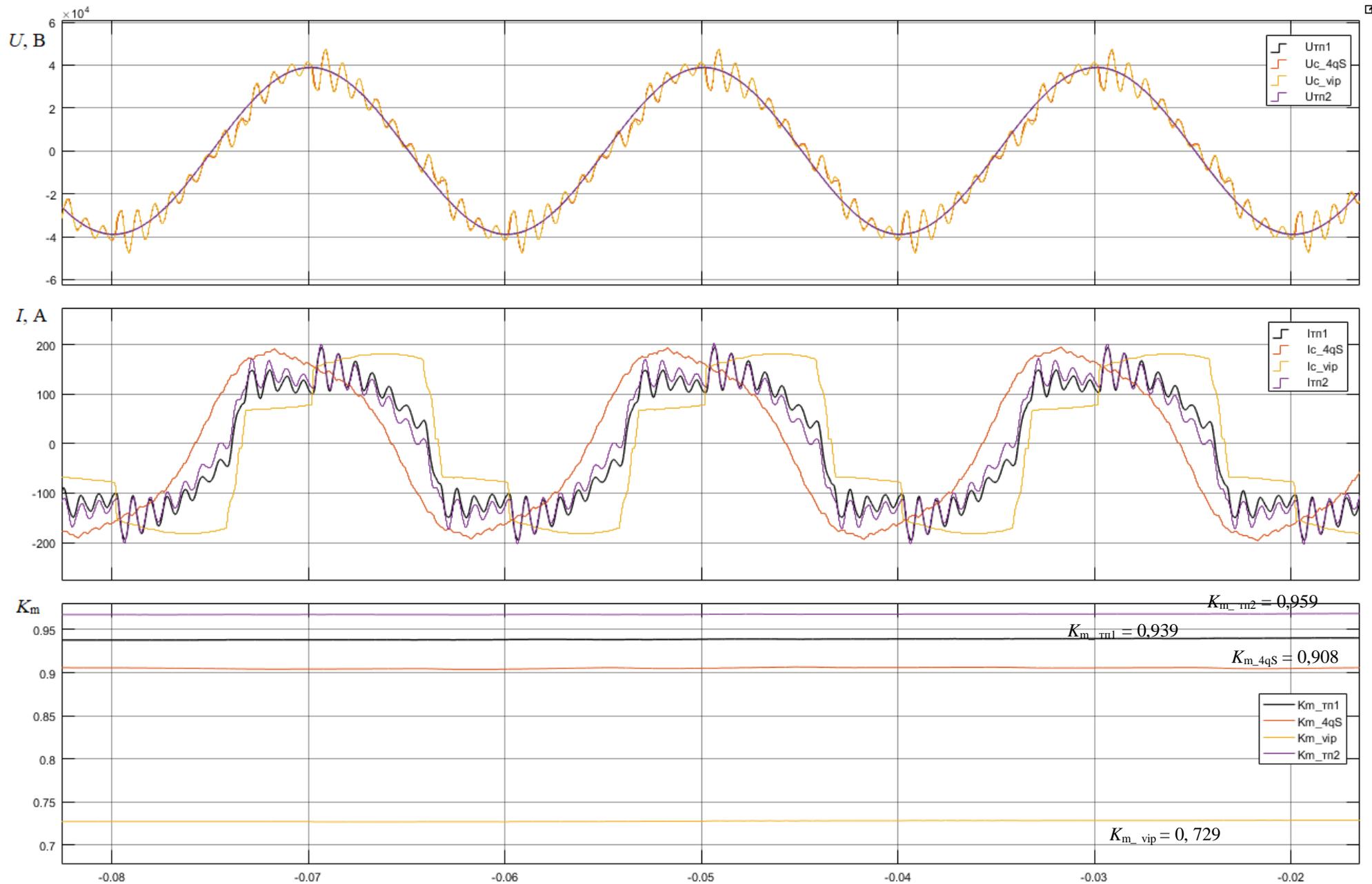


Рисунок 3.18 – Электромагнитные процессы в электротехнической системе при опережающем на 12 эл. град фазовом сдвиге сетевого тока электровоза с четырехквadrантным преобразователем в режиме тяги

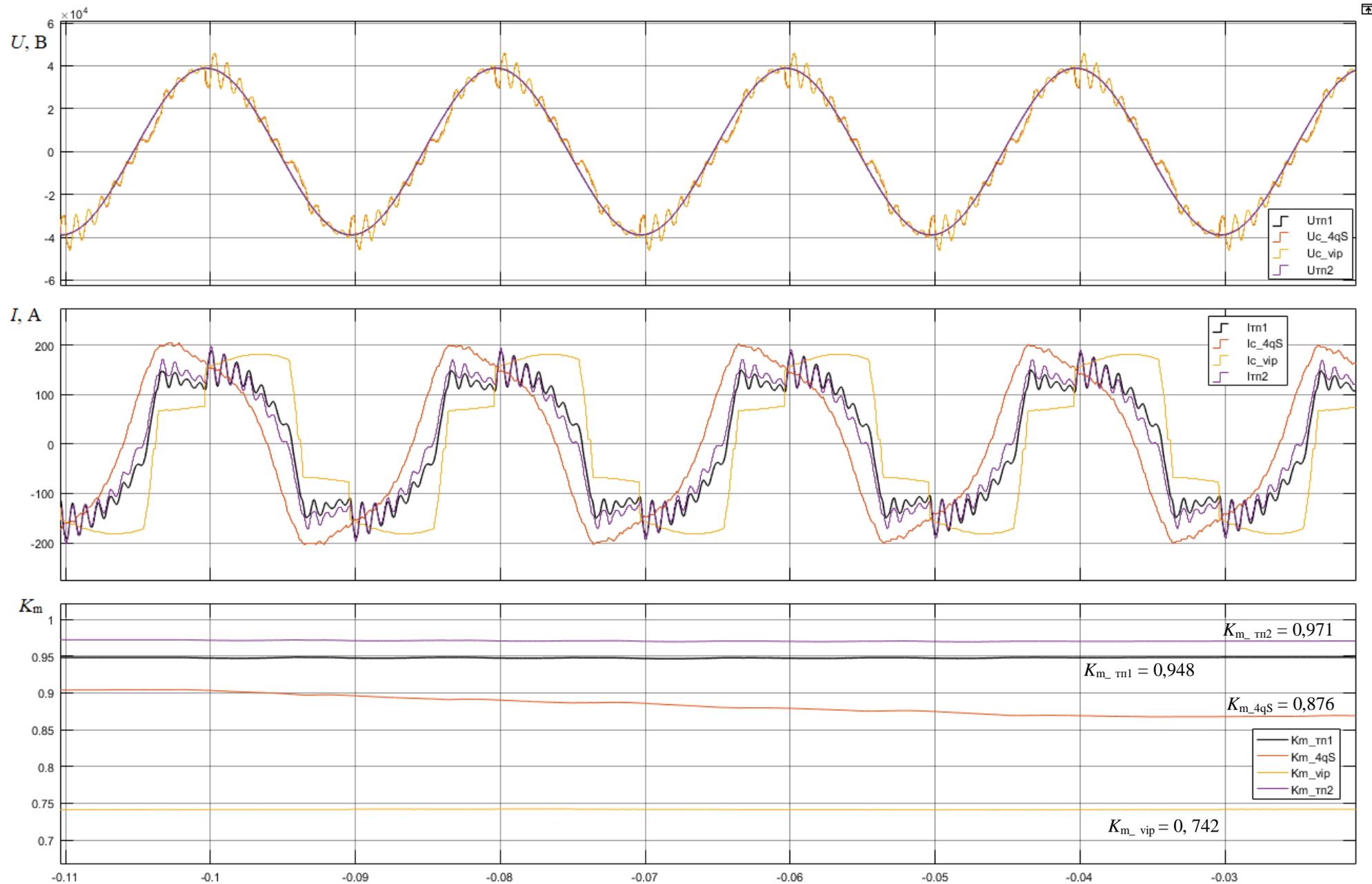


Рисунок 3.19 – Электромагнитные процессы в электротехнической системе при опережающем на 15 эл. град фазовом сдвиге сетевого тока электровоза с четырехквadrантным преобразователем в режиме тяги

При реализации опережающего фазового сдвига сетевого тока I_{c_4qS} электровоз с 4qS-преобразователем работает в режиме компенсации реактивной мощности тяговой сети. При этом данный электровоз становится генератором реактивной энергии, потребляемой электровозом с ВИП, находящимся на этой же фидерной зоне, что подтверждается увеличением коэффициента мощности K_{m_vip} электровоза с ВИП.

Проведенное теоретическое исследование электромагнитных процессов показало, что при нахождении на фидерной зоне одиночного электровоза с четырехквadrантным преобразователем и увеличении опережающего фазового сдвига сетевого тока I_{c_4qS} увеличивается действующее значение напряжения u_c на токоприемнике этого электровоза. При увеличении опережающего фазового сдвига тока на один эл. град. напряжения на токоприемнике увеличивается и при фазовом сдвиге тока равном 10 эл. град. напряжение на токоприемнике электровоза увеличивается до 27680 В, а при опережающем фазовом сдвиге сетевого тока на 15 град. напряжение на токоприемнике увеличивается до 27950 В.

На основании полученных результатов построены зависимости отношения напряжений U_{c_4qS} и U_{c_vip} на токоприемнике электровозов от напряжения на шинах тяговой подстанции U_p при различных значениях $\Delta\varphi$ опережающего фазового сдвига сетевого тока I_{c_4qS} (рисунок 3.20). При моделировании заданы одинаковые номинальные значения напряжений $U_{тп1}$ и $U_{тп2}$ на шинах тяговых подстанций.

Кривая 1 соответствует увеличению напряжения U_{c1_4qS} на токоприемнике электровоза с четырехквadrантным преобразователем, одиночно расположенному на фидерной зоне. Кривая 2 и 3 при совместном расположении двух электровозов на фидерной зоне. Кривая 3 – увеличение напряжения U_{c_vip} на токоприемнике электровоза с ВИП, кривая 2 – увеличение напряжения U_{c2_4qS} на токоприемнике электровоза с четырехквadrантным преобразователем при увеличении опережающего фазового сдвига сетевого тока I_{c_4qS} .

В режиме компенсации реактивной мощности при увеличении опережающего фазового сдвига $\Delta\varphi$ тока I_{c_4qS} происходит увеличение этого тока при постоянном значении тока нагрузки I_{dc} .

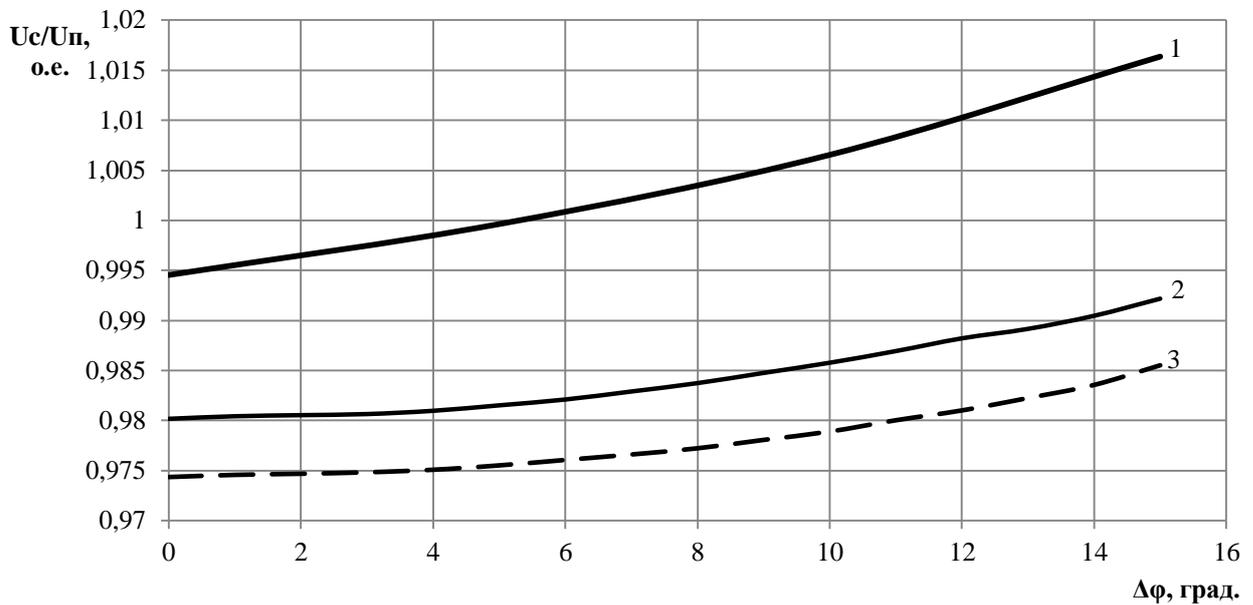


Рисунок 3.20 – Зависимость увеличения напряжения U_c от угла $\Delta\varphi$ опережающего фазового сдвига тока.

Полученные кривые свидетельствуют о нелинейном увеличении напряжения в контактной сети при увеличении угла фазового сдвига сетевого тока I_{c_4qS} в режиме компенсации реактивной мощности.

Математическая модель позволила визуализировать изменение параметров тягового привода электровоза с четырехквadrантным преобразователем при реализации режима КРМ. Оценка экономической эффективности и целесообразности внедрения алгоритмов работы тягового преобразователя электровоза для реализации режима КРМ представлена в следующем разделе.

4 Технико-экономическое обоснование внедрения перспективной системы управления тяговым преобразователем электровоза переменного тока

4.1 Обоснование установки дополнительного оборудования и измерительной системы

В соответствии с «Методикой определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем ОАО «РЖД» и Поручением первого вице-президента ОАО «РЖД» А.А.Краснощека от 16.10.2017 г. № АК-66/пр., а также «Методическими подходами при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД», утвержденными распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2016 г. №2666/р. составляющая стоимости жизненного цикла подвижного состава является эксплуатационным показателем, включающим в себя в качестве основного компонента расход электроэнергии на тягу поездов.

Расход электроэнергии в системе электроснабжения железных дорог переменного тока зависит от фазового сдвига тока относительно напряжения в тяговой сети. Работа электровозов с ВИП в режиме тяги приводит к указанному фазовому сдвигу и к ухудшению энергетической эффективности рассмотренной электротехнической системы. Применение предлагаемого алгоритма управления 4-квadrантного преобразователя электровоза позволит повысить энергетическую эффективность системы сокращением расходов на электроэнергию.

Кроме того, необходимы средства регистрации и передачи информации от блока БСПД до электровоза с 4-квadrантным преобразователем, находящимся на фидерной зоне, о максимальном напряжении в контактной сети. Для комплексной оценки проведем сравнительный расчет регулируемого режима работы КРМ электровоза с 4-квadrантным преобразователем в электротехнической системе.

Выполнено сравнение эффективности предлагаемого способа КРМ и существующих стационарных установок компенсации реактивной мощности, устанавливаемых на тяговых подстанциях, пунктах параллельного соединения и постах секционирования участка системы 2 x 25 кВ при одностороннем питании контактной сети.

4.2 Расчет экономического эффекта от внедрения перспективной системы управления

Представленные результаты расчета являются предварительными и будут уточнены при внедрении предложенного способа управления тяговым преобразователем с учетом расходных ставок, утвержденными ОАО «РЖД».

Для расчёта используются следующие исходные данные:

- Оценка суммарной протяжённости участков, на которых предполагается увеличение скорости движения поездов.
- Текущая скорость движения поездов на участках, на которых предполагается увеличение скорости движения поездов.
- Предполагаемая скорость движения поездов на участках, на которых предполагается увеличение скорости движения поездов результате повышения напряжения в контактной сети.
- Укрупнённая расходная ставка 1 поезд-часа в грузовом движении (электротяга) (для оценки изменения скорости движения) (Расходные ставки, определяемые на основе зависящих от объемов работы расходов ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности).
- Оценка объёма перевозок на рассматриваемом маршруте (на основе данных статистической отчетности формы ЦО-12).
- Коэффициент брутто грузовых поездов (экспертная оценка)
- Средняя масса брутто грузового поезда (данные сайта ОАО «РЖД»)

Значения исходных данных для расчёта приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Исходные данные для расчета

Показатель	Обозначение	Значение
Протяжённость участка, на котором предполагается увеличение скорости движения, км	L	368,0
Скорость грузового поезда на рассматриваемом участке, км/ч	V	57,0
Скорость грузового поезда с учетом режима КРМ, км/ч	V [^]	64,0
1 Поездо-час в грузовом движении (электротяга) (для оценки изменения скорости движения), тыс. руб.	E _с	9,44
1 Поездо-час простоя на станции (электротяга), тыс. руб.	E _п	2,21
Оценка объёмов перевозок на анализируемом маршруте, тыс.т.	P	466,71
Коэффициент брутто	k	1,34
Средняя масса поезда брутто, т	Q	4047,00

Потребные инвестиционные затраты для осуществления проекта приведены в таблице. 2. В таблице 3 приведены эффекты от реализации разрабатываемых мероприятий и эффектообразующие факторы.

Таблица 4.2 – Инвестиционные затраты

Год	Наименование этапов Работ	Цена этапов Работ без НДС, в тыс.руб.
2021	Актуализация технических требований на электровозы в части оснащения тягового привода функцией КРМ; Установка дополнительного оборудования регистрации и передачи данных о фактическом напряжении в контактной сети на фидерной зоне; Установка, проверка и наладка работы системы «тяговая сеть – электровоз» в максимально эффективных режимах работы	7 500,00

Таблица 4.3 – Эффекты и эффектообразующие факторы работ

Наименование эффекта работы	Эффектообразующие факторы
Положительные эффекты	
Экономия эксплуатационных расходов: - экономия затрат на оплату труда - экономия электроэнергии на тягу поездов	сокращение трудозатрат локомотивных бригад сокращение простоев на станциях

После выявления эффекта и эффектообразующего фактора определялись притоки денежных средств работ с управленческим эффектом, которые согласно документа "Методические подходы при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД», утвержденные распоряжением ОАО "РЖД" от 26.12.2016 г. №2666/р состоят из экономии эксплуатационных расходов и инвестиционных затрат.

Годовые экономические эффекты являются равноразмерными и определяются по следующим формулам (исходные данные приведены в таблице 1):

$$\text{ЭФ}_Г = (\text{ЭФ}_П + \text{ЭФ}_С) * \frac{P * k}{Q} \quad (4.1)$$

$$\text{ЭФ}_П = E_P * N * T \quad (4.2)$$

$$\text{ЭФ}_С = \left(\frac{L}{V} - \frac{L}{V'} \right) * E_C \quad (4.3)$$

где: $\text{ЭФ}_Г$ – годовой экономический эффект, тыс. руб.;

$\text{ЭФ}_П$ – экономический эффект от устранения простоев на станции – пункте смены рода тока в ожидании смены локомотива, тыс. руб.;

$\text{ЭФ}_С$ – экономический эффект от увеличения скорости движения, тыс. руб..

В таблице 4 представлены результаты расчета притоков денежных средств работы с ресурсным эффектом.

Таблица 4.4 – Результаты расчета притоков денежных средств работ с ресурсным эффектом, тыс. руб.

Притоки денежных средств/годы горизонта планирования	2021 (1)	2022 (2)	2023 (3)	2024 (4)	2025 (5)	Всего
Операционная деятельность						
Экономия расходов на оплату труда	0,0	4323,7	4323,7	4323,7	4323,7	17 294,6
Экономия электроэнергии на тягу поездов	0,0	7054,4	7054,4	7054,4	7054,4	28 217,5

Итого притоков от операционной деятельности	0,0	11 378,0	11 378,0	11 378,0	11 378,0	45 512,1
---	-----	----------	----------	----------	----------	----------

Отток денежных средств работ с ресурсным эффектом с учетом инвестиционных затрат представлен в таблице 5.

Таблица 4.5 – Расчет оттоков денежных средств работ с ресурсным эффектом, тыс.руб.

Оттоки денежных средств/годы горизонта планирования	2019 (1)	2020 (2)	2021 (3)	2022 (4)	2023 (5)	Всего
Инвестиционная деятельность						
Затраты на выполнение работы	7 500,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7 500,0
Итого оттоков по инвестиционной деятельности	7 500,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7 500,0

В качестве показателей экономической эффективности работ с ресурсным эффектом использовались:

- чистый дисконтированный доход;
- срок окупаемости.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД), определялся по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T (\Pi_t - O_t)(1+r)^{-t}, \text{ тыс. руб.} \quad (4.4)$$

где Π_t – притоки денежных средств работы в году t (таблица 4);

O_t – оттоки денежных средств работы в году t (таблица 5);

t – любой (текущий) год горизонта планирования;

T – число лет горизонта планирования;

r – ставка дисконтирования (принимается равной ключевой ставке Банка России).

Интерпретация чистого дисконтирования дохода работы производится следующим образом. Если $\text{ЧДД} > 0$ за период горизонта планирования, то

работа признается экономически эффективным; если ЧДД < 0 за период горизонта планирования, то работа признается экономически неэффективной.

В качестве горизонта планирования в данной работе принимается период 5 лет, т.к. по истечению данного срока прогнозируется появление более совершенных локомотивов для организации контейнерных перевозок.

Срок окупаемости ($T_{ок}$) определялся по формуле:

$$T_{ок} = t + \frac{ЧДД_t}{ЧДД_{t+1} - ЧДД_t} \text{ год} \quad (4.5)$$

где t – год, для которого сумма дисконтированного денежного потока, рассчитанная нарастающим итогом, еще отрицательна;

$(t+1)$ – год, для которого сумма дисконтированного денежного потока, рассчитанная нарастающим итогом, становится положительной.

Результаты расчета чистого дисконтированного дохода работ с управленческим эффектом представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Расчет чистого дисконтированного дохода работ с ресурсным эффектом

№ п/п	Показатели	Годы горизонта планирования				
		2019 (1)	2020 (2)	2021 (3)	2022 (4)	2023 (5)
Операционная деятельность						
1	Притоки от операционной деятельности (тыс. руб.) (таблица 4)	0,0	11 378,0	11 378,0	11 378,0	11 378,0
2	Оттоки от операционной деятельности (тыс. руб.) (таблица 5)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	База по налогу на прибыль организаций (тыс. руб.) (стр. 1 - стр.2)	0,0	11 378,0	11 378,0	11 378,0	11 378,0
4	Увеличение/уменьшение налога на прибыль организаций (тыс. руб.) (стр.3 * ставка налога на прибыль организаций)	0,0	2 275,6	2 275,6	2 275,6	2 275,6
5	Денежный поток от операционной деятельности (тыс. руб.) (стр.1 - стр. 2 - стр. 4)	0,0	9 102,4	9 102,4	9 102,4	9 102,4
Инвестиционная деятельность						
6	Оттоки от инвестиционной деятельности (тыс. руб.)	7 500,0	0,0	0,0	0,0	0,0

№ п/п	Показатели	Годы горизонта планирования				
		2019 (1)	2020 (2)	2021 (3)	2022 (4)	2023 (5)
7	Денежный поток от инвестиционной деятельности (тыс. руб.) (стр.2-стр.7)	-7 500,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	Денежный поток по работе (стр. 5+стр.7)	-7 500,0	9 102,4	9 102,4	9 102,4	9 102,4
9	Ставка дисконтирования (r)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10	Дисконтный множитель $(1+r)^{-t}$	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
11	Дисконтированный денежный поток (тыс. руб.) (стр. 8*стр.10)	-6 818,2	7 522,7	6 838,8	6 217,1	5 651,9
12	Чистый дисконтированный доход нарастающим итогом (тыс. руб.)	-6 818,2	704,5	7 543,3	13 760,4	19 412,2

Таким образом, срок окупаемости работы с учетом выражения 5 составит 1,91 года. Чистый дисконтируемый доход за 5 лет (горизонт планирования) составляет: 19 412,24 тыс. руб.

Работа является эффективной, поскольку срок окупаемости достигнут в течение периода горизонта планирования. Использование результатов позволит обеспечить службу энергоснабжения ОАО «РЖД» аналитической информацией, необходимой для принятия оптимальных управленческих решений по количеству и типам закупаемых устройств компенсации реактивной мощности.

За счет применения КРМ снижается время движения тяжеловесного поезда по межподстанционной зоне. В расчете приняты только тяжеловесные поезда этого участка, количество поездов

Заключение

На основании результатов анализа электромагнитных процессов в электротехнической системе предложен алгоритм управления четырехквadrантным преобразователем электровоза, работающего в режиме тяги.

Установлено, что при нахождении на одной фидерной зоне работающего в тяговом режиме электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем и электровоза с четырехквadrантным преобразователем возможна компенсация уменьшения 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.

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».

Основными показателями энергоэффективности системы электроснабжения железнодорожного транспорта являются потери электроэнергии на активных и реактивных сопротивлениях в этой системе. Разнообразие структур статических компенсаторов реактивной мощности, устанавливаемых в различных точках системы тягового электроснабжения и широко применяемых в этих системах, направлено на усовершенствование принципов функционирования существующих устройств. Предложенный способ компенсации реактивной мощности в отечественной и зарубежной литературе, опубликованной ранее, не встречался.

Разработанная математическая модель «тяговая сеть – электровоз» в приложении Simulink системы компьютерного моделирования Matlab, позволяет определить и проанализировать характеристики и параметры четырехквadrантного преобразователя и оценить влияние на тяговую сеть изменения параметров тягового преобразователя в режиме компенсации реактивной мощности при движении электровоза с четырехквadrантным преобразователем по фидерной зоне.

Анализ отечественных и зарубежных научно-технических публикаций, посвященных проблеме энергоэффективности промышленных устройств и электротехнических систем и транспортных средств позволил сформулировать основные показатели, определяющие энергоэффективность этих устройств и систем.

Этими показателями являются – коэффициент полезного действия η , коэффициент мощности λ , а также коэффициент энергетической эффективности $K_{эфф}$, определяемый учитывать в следующем виде:

$$K_{эфф} = \frac{\lambda}{(\lambda_1^2 - \lambda^2)\eta_1 + \lambda^2}$$

Целью данной работы является конкретизация показателей энергоэффективности для электроприводов транспортных средств, состоящих из исполнительных тяговых двигателей переменного тока и систем передачи, преобразования и регулирования электроэнергии, циркулирующей между источником и потребителем электроэнергии. Такими показателями, по мнению автора, характеризующими процесс потребления электроэнергии в электроприводах транспортных средств, являются активная, реактивная и полная мощности, максимальные значения которых поддерживают, исходя из требуемых значений силы тяги (торможения) и скорости транспортных средств и стабилизации параметров электротехнической системы.

Дальнейшее развитие темы исследования электромагнитных процессов в электротехнической системе «тяговая сеть – электровоз» возможно при исследовании алгоритма управления четырехквadrантного преобразователя электровоза по сигналам от датчиков напряжения дополнительно

установленных на ранее выпущенных электровозах, чувствительности системы управления четырехквadrантным преобразователем при аварийных режимах работы системы тягового электроснабжения. Также целесообразно рассмотреть вопрос о возможности совершенствования системы в части автоматического управления четырехквadrантными преобразователями нескольких электровозов при их параллельной работе на одной фидерной зоне

Приложение А (справочное)

Параметры элементов модели электротехнической системы «тяговая сеть – электровоз с четырехквadrантным преобразователем»

Таблица А.1 – Параметры тягового трансформатора

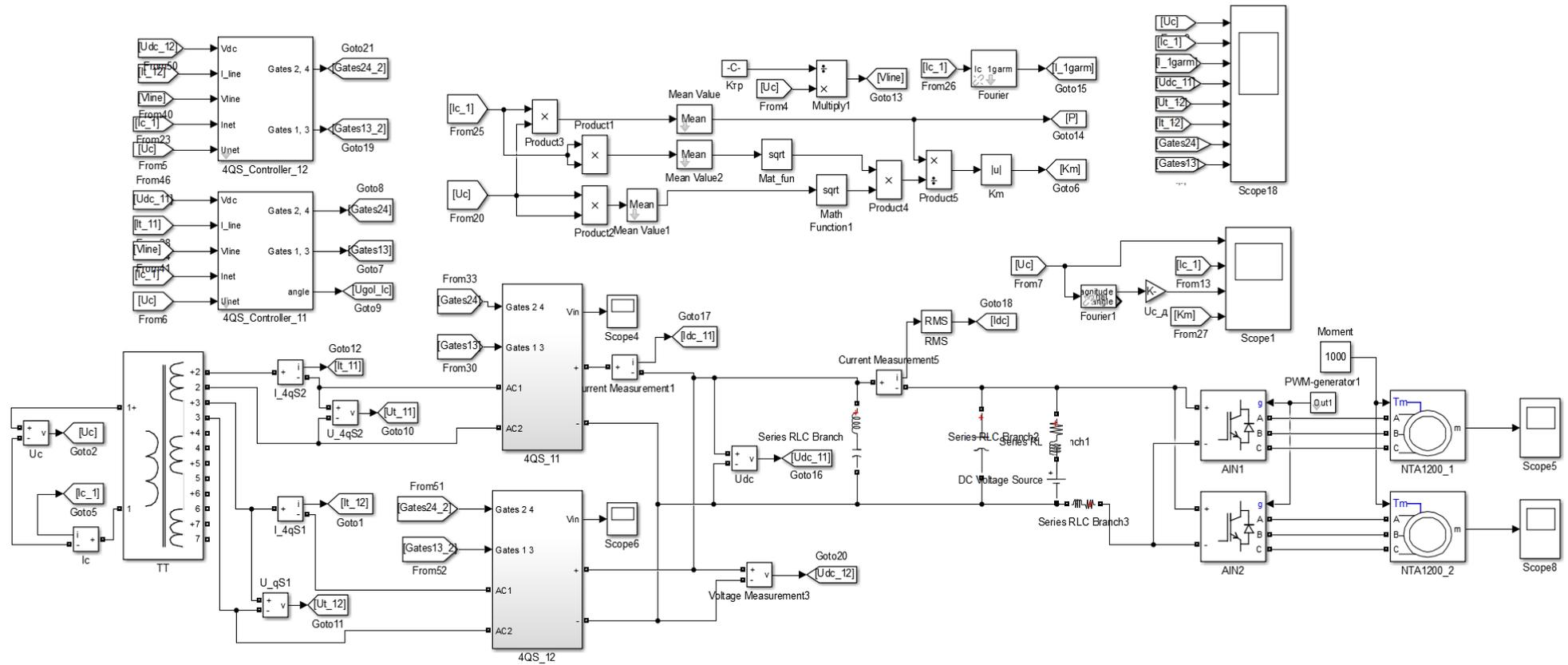
№ п/п	Параметр тягового трансформатора		
	Наименование	Значение	Обозначение
1	Номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ	25	U_{co}
2	Номинальная мощность сетевой обмотки, кВ·А	9300	S_{co}
3	Номинальный ток сетевой обмотки, А	372	I_{co}
4	Номинальное напряжение тяговой обмотки, В	1659	$U_{то}$
5	Номинальный ток тяговых обмоток, А	814	$I_{п}$
7	Коэффициент трансформации: сетевая обмотка/ тяговая обмотка (каждая отдельно)	15,06	$U_{co}/ U_{то}$
8	Сопротивление сетевой обмотки пост. тока, Ом	1,112	R_{co}
9	Сопротивление тяговой обмотки пост. тока, Ом	0,0215	$R_{то}$
10	Ток холостого хода, А	1,07	I_{xx}
11	Напряжение короткого замыкания, %	38	–
12	Индуктивность рассеяния на вторичной обмотке, мН	2,45	$L_{рт}$

Таблица А.2 – Параметры ключевых элементов 4-квadrантного преобразователя

№ п/п	Параметр IGB-транзистора		
	Наименование	Значение	Обозначение
1	Напряжение коллектор-эмиттер, кВ	6,5	U_{CE}
2	Постоянный ток коллектора, А	900	I_c
3	Импульсный ток коллектора, кА	1800	I_{cm}
4	Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, В	3,6	U_{CEsat}
5	Время включения, мкс	1,7	t_{on}
6	Время выключения, мкс	3,9	t_{off}
7	Потери энергии при включении, Дж	6,5	E_{on}
8	Потери энергии при выключении, Дж	5,3	E_{off}
9	Максимальная температура перехода, °С	150,0	$R_{th(j-c)}$
10	Активное сопротивление демпфирующей цепи, Ом	30,0	R_s
11	Емкостное сопротивление демпфирующей цепи, мкФ	2,0	C_s

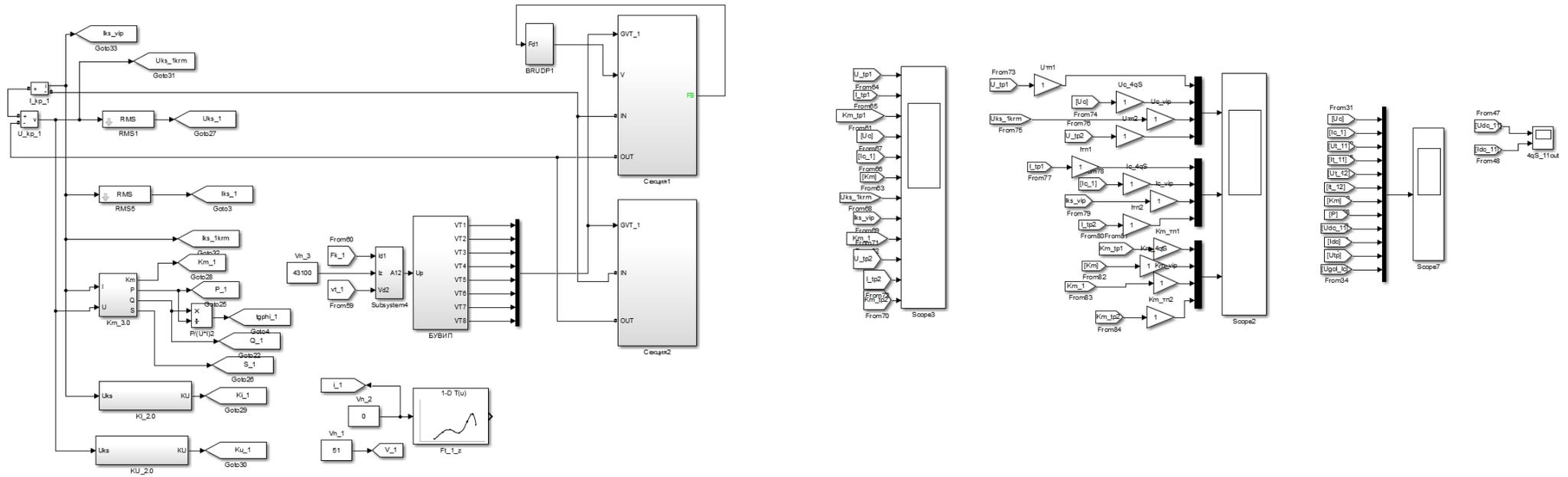
Приложение Б

Модель тяговой передачи электровоза с четырехквadrантным преобразователем



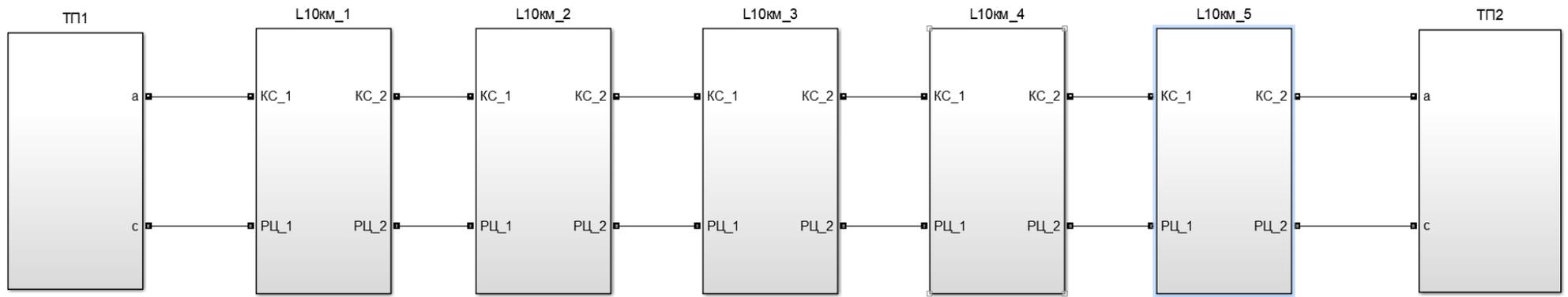
Приложение В

Модель тяговой передачи электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем



Приложение Г

Модель тяговой сети при двустороннем питании и распределенными параметрами сети



Список использованных источников информации

1. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1/ Под ред. К.Г. Марквардта. – М: Транспорт, 1980 – 256 с.
2. ГОСТ 6962-75 Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений.
3. Бадер М.П. Энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения постоянного тока с напряжением в тяговой сети 24 кВ [Текст] / М.П. Бадер // Электротехника. – 2011. – №8. – с. 20-28;
4. Розенфельд В.Е. Применение постоянного тока повышенного напряжения для электрической тяги [Текст] /В.Е. Розенфельд, В.В. Шевченко, В.А. Майбога // Железнодорожный транспорт. – 1962. – №7. – с. 35-39;
5. Иньков Ю.М., Глызин И.И. Электрооборудование для высокоскоростных электропоездов перспективной системы электрической тяги. Электроника и электрооборудование транспорта. –2017.– №6. – с.17-20.
6. Бурков А.Т. Система электрической тяги постоянного тока 12 кВ [Текст] / А.Т. Бурков [и др.] // Тезисы докладов конференции ПГУПС. – 1995. – с.29-30;
7. Б.А. Аржанников, А. Г. Галкин, А. Т. Бурков, В. А. Мансуров, И. О. Набойченко Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 12, 24 кВ для скоростной магистрали Москва – Екатеринбург / Материалы Междунар. симп. «Элтранс-2015», 15-17 нояб. 2015 г. – СПб.: ПГУПС, 2015;
8. Калугин И.Г. Тяговая подстанция системы электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения (12/24 кВ) с фидерными выключателями без открытой дуги: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: (МГУПС (МИИТ) 2014.
9. Mayer L Valutazione della fattibilita di una sistema di trazione elettrica a 12 kV corrente continua [Текст] / L. Mayer, O. Ventura // Ingegneria Ferroviaria. – 1988 №5. – p.271–273.

10. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭСК) Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. [Текст]. – Новочеркасск, 2006. – 264с.

11. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. – М.: Транспорт, 1988. –311 с.

12. Korber J.: Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrische Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren // Elektrische Bahnen 45 (1974). Н.3, S.52–59.

13. Литовченко В.В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S-преобразователями. Электротехника, 1993, №5, с.23-31.

14. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

15. Электровоз ВЛ80с: Руководство по эксплуатации / Н. М. Васько, А. С. Девятков, А. Ф. Кучеров и др. - 2-е изд., переработ, и доп. - М.; Транспорт, 1990. - 454 с: 315 ил., 26 табл.

16. Тихменев Б.Н., Каменев А.В., Рубчинский З.М. Способ управления вентилями преобразователями электроподвижного состава переменного тока, 1982, №32.

17. . Широченко Н.Н. Электромагнитное воздействие электровозов с тяговой сетью с распределенными параметрами и пути его уменьшения: Дисс. канд. техн. наук. – М.: (ВНИИЖТ) 1985.

18. B. Bahrani, A. Rufer, M. Aeberhard Catenary voltage support: adopting modern locomotives with active line-side converters. – IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 1, march 2012. p.377-387.

19. Глызин И.И., Иньков Ю.М., Кучумов В.А., Литовченко В.В., Улучшение показателей энергетической эффективности тяговой сети и электроподвижного состава переменного тока с 4qS-преобразователем.// Электротехника. 2019, № 9, с.16-20.

20. Jahangir Afsharian ; Dewei XU ; Bin WU ; Bing Gong ; ZhihUa Yang A New PWM and Commutation Scheme for One Phase Loss Operation of Three-Phase

Isolated Buck Matrix-Type Rectifier. – IEEE Transactions on Power Electronics, Journal Article, / 2018, Volume: 33, Issue 11.

21. Широченко Ю.Н. Совершенствование системы управления входным преобразователем двухсистемного электровоза с асинхронными тяговыми двигателями: Дисс. канд. техн. наук. – М.: (МИИТ) 2010.

22. Китаев А.В., Орлов И.Н. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины. – Электричество, 1978, №4, с.47-51.

23. Иньков Ю.М., Литовченко В.В. Преобразовательные устройства постоянного тока подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями. – Электротехническая промышленность Серия преобразовательная техника, 1983, выпуск 1(147), с. 20-24.

24. Жулев О.Н., Иванченко Н.К., Курочка А.Л., Янов В.П. Проблемы создания электровозов с асинхронными тяговыми двигателями. – Электротехника. Специальный выпуск, 1983, №11, с.19-27.

25. Герман Л.А. Регулируемые фильтрокомпенсирующие установки в тяговой сети переменного тока. – Электроника и электрооборудование транспорта, 2018, №6.

26. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 316 с.

27. Донской, Д.А. Регулируемый компенсатор реактивной мощности для электровозов переменного тока Текст. : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / Донской Дмитрий Александрович. М. : МГУПС (МИИТ), 2007.

28. Янов В.П. Оценка эффективности компенсатора реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К [Текст] / В.П. Янов, П.Г. Колпахчян //Вестник ВЭЛНИИ. – 2009., №1 (57), с.23-32.

29. Кулинич Ю.М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения [Текст]: монография / Ю.М. Кулинич. – Хабаровск: ДВГУПС, 2001. – 153 с.

30. Власьевский, С.В. Улучшение формы напряжения тяговой сети при работе электровозов с тиристорными выпрямителями Текст. / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, О.В. Мельниченко // Вестник ВНИИЖТ. -2007.- №5.-С. 42-47.

31. Мельниченко О.В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока [Текст]: дисс. д.т.н.: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы / О.В. Мельниченко. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

32. Иньков, Ю.М. Расчет и проектирование статических преобразователей подвижного состава Текст. / Ю.М. Иньков, В.М, Антюхин, В.В. Литовченко, О.С. Назаров; Под ред. Ю.М. Инькова : Учеб. пособие. — М. : МНИТ, 1985.-196 с;

33. Солодунов А.М., Иньков Ю.М., Коваливкер Г.Н., Литовченко В.В. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.

34. Кучумов В.А. Выбор схемы и параметров компенсатора реактивной мощности для электроподвижного состава переменного тока Текст. / В.А. Кучумов, Н.Н. Широченко, Д.И. Мамонтов // Вестник ВНИИЖТ. 1991. - №4. - С. 23-25.;

35. Кучумов В.А., Похель В.Б., Компенсация реактивной мощности на электроподвижном составе переменного тока. – М.: Интекст, 2001. – 88 с.;

36. Малютин В.А., Литовченко В.В., Талья Ю.И. Анализ построения тягового и вспомогательного преобразовательного оборудования современного ЭПС. Электрическая тяга на рубеже веков: Сб. науч. тр./ Под ред. А.Л. Лисицына. – М.: Интекст, 2000, – 256 с.;

37. Программа приобретения тягового подвижного состава на 2018 год и период до 2025 г. утв. 16.10.2017 г.

38. ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники. Преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В.

39. М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский Электрические машины. Машины постоянного тока, трансформаторы. Часть 1. – Энергия, 1964, – с.548.

40. Игонин А.И., Барановский Е. Ф., Куканов В.П. Тяговые трансформаторы и реакторное оборудование электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1981 – 144 с.

41. Захарченко Д.Д. и др. Тяговые электрические машины и трансформаторы: Учебник для вузов ж.-д. трансп./ Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов, Е.В.Горчаков; Под ред. Д.Д. Захарченко. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с., ил., табл. – Библиогр.: с.295.

42. Проектирование систем управления электроподвижным составом. Под ред. Н.А. Ротанова, М., Транспорт, 1986г.

43. Кирьянов Д.В. Mathcad 14. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.

44. Разевиг В.Д. OrCAD 9.2. – М.: Солон-Р, – 2001 – 519 с.

45. OrCAD CaptUre for Windows. User's gUIde. – Cadence DesIgn Systems, 2001.

46. Хернитер М.Е. MUltIsIm 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа электронных устройств. (Пер. с англ.) / Пер. с англ. Осипов А.И. – М.: ДМК-пресс, 2006. – 488 с.: ил.

47. Герман-Галкин С.Г., Гаврилова С.В. Исследование активного полупроводникового преобразователя в среде Matlab Simulink. – Электротехника, 2011, № 4, с.51-56.

48. Обухов С.Г., Коровин В.В. Математическое моделирование и визуализация процессов при исследовании устройств силовой электроники в учебной лаборатории. «Практическая силовая электроника», 2004, № 13.

49. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab SIm Power Systems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – М: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

50. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. MatLab 6.0 [Текст] / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

51. Сорин Л.Н., Колпахчян П.Г., Янов В.П. «Выбор способа моделирования IGBT-транзистора в системе «статический преобразователь-асинхронный двигатель» – Электротехника, №10, 2004, с. 7-10.

52. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе "контактная сеть-электровоз". Электричество, 2002, №2 – с.29-35.

53. Электровоз магистральный ЭП20. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. [Текст]. – Новочеркасск, 2012. – 297с;

54. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов – Л., «Энергия», 1970, 432 с.

55. Донской Н.В. трехфазная математическая модель асинхронного двигателя. Электротехника, 2011, 1, с.40-46.

56. Суптель А., Малинин Г., Ларин Е. Виртуальные модели асинхронного двигателя. Силовая электроника, 2010, 4, с.42-45.

57. Алексеев В.В., Емельяненко А.П., Козярук А.Е. Анализ динамических режимов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе при различных структурах и алгоритмах управления. Электротехника, 2016, 4, с.2-9.

58. Донской Н.В. Регулируемые электроприводы переменного тока. Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2007.

59. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей: Учеб. пособие для ВУЗов ж.д. трансп./ Под ред А.С. Курбасова. – М: Транспорт, 1987. – 536 с.

60. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х частях. Часть 2. – Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1973. 648 с. с ил.

61. Д.Д. Захарченко, А.В. Плакс, А.Н. Савоськин, В.И. Некрасов, В.П. Феокистов Автоматизация электрического подвижного состава. Под ред. Д.Д. Захарченко. Изд. 2-е, доп. и перераб. Учебник для ВУЗов ж.-д. транспорта. М., «Транспорт», 1978. 280 с.

62. Основы автоматического управления. Под ред. В.С. Пугачева. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1974, 720 стр.

63. Патент RU 2610303 C1 Способ регулирования напряжения тяговой сети переменного тока. Герман Л.А., Гончаренко В.П., Максимова А.А. Опубликовано 09.02.2017, бюллетень №4.

64. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. –М.: Наука, 1967. – 625с.

65. Н.А. Булгаков Основные законы и формулы по математике и физике. Справочник – Тамбов, Издательство ТГТУ, 2002г.

66. Г.Н. Ватсон Теория Бесселевых функций – Москва, издательство иностранной литературы 1949г.

67. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Электромагнитная совместимость электроустановок нетяговых потребителей и системы электроснабжения с высоковольтным питающим проводом. Электричество, 2020, №1 – с.12-19.

68. Электровозы магистральные грузовые для Восточного полигона. Технические требования. Утв. №1450 Заместителем генерального директора – главным инженером ОАО «РЖД» С.А. Кобзевым от 29.12.2018 г.

69. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

70. Гарбузов И.И. Влияние бортовых компенсирующих устройств на энергетические показатели качества электровозов переменного тока: Дисс. канд. техн. наук. – М.: (МИИТ) 2015.

71. Anreas, J. Getriebelose Drehstromantriebe für Schienenfahrzeuge / J. Anreas // Elektrische Bahnen – 2003. №3. – p. 113-119.

72. Bernhard, K. Güterzuglokomotive Baureihe 152 der Deutschen Bahn / K. Bernhard, J. Wach // Elektrische Bahnen. – 1996. - №8, p. 248-260

73. Büchi, H. Zweisystemfähige Triebzüge ALLEGRA der Rhätischen Bahn / H. Büchi, N. Wiesent, R. Enzler, P. Gysin // Elektrische Bahnen. – 2010. - № 6. p. 243 - 256.

74. Luszcz J., Dworakowski P. Destructive impact of PWM inverters on traction AC motors // Electromotion. – 2010/ - № 17. p.55-60.

75. Литовченко, В.В. Исследование электромагнитных процессов в силовых цепях электроподвижного состава переменного тока с асинхронными

тяговыми двигателями: 05.09.03 дис..... канд. техн. наук / Литовченко Виктор Васильевич – М., 1974. – 196 с.

76. Киреев, А.В. Компьютерная модель четырехквандратного преобразователя для ЭПС / А.В. Киреев, А.В. Лебедев, А.Н. Гудков // Вестник ВэлНИИ. – 2007. - №53. – С. 185-198.

77. Лебедев, А.В. Спектральный анализ входного тока преобразователя 4 q-S на основе быстрого преобразования Фурье / А.В. Лебедев, А.В. Киреев, В.В. Манако, Г.Г. Гончаров // Вестник ВэлНИИ. – 2007. - №2(54). – С. 63-70.

78. Алексеев, А.С. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03/ Алексеев Алексей Сергеевич. – М., 2009. – 302 с.

79. Иньков, Ю.М. Входные преобразовательные устройства подвижного состава переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями. / Ю.М. Иньков, В.В. Литовченко // Научн. техн. реф. сб. Электротехническая промышленность / Преобразовательная техника. – 1983. – вып. 2/148. – С. 10 – 14.

80. Косарев, Б.И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока /Б.И. Косарев. – М.: Транспорт, 1988. – 216 с.

81. Косарев, А.Б. Электромагнитные процессы в системах электроснабжения железных дорог переменного тока / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев, Д.В. Сербиненко. – М.: ВМГ-Принт, 2015. – 349 с.

82. Косарев, А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев. – М.: Интекст, 2008. – 480 с.

83. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

84. Монахов О.И., Корнеев П.А. Поисковые алгоритмы оптимизации в решении задач теории автоматического управления. Учебно-методическое пособие к практическим занятиям и курсовому проекту по дисциплине «Методы оптимизации». – М.: МГУПС (МИИТ), 2017.