

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет путей сообщения  
Императора Николая II»  
МГУПС (МИИТ)

На правах рукописи

Малютин Артём Юрьевич

Применение маловентильных преобразователей в системе питания  
вспомогательных цепей электровозов переменного тока

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Литовченко Виктор Васильевич

Москва – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	2
Введение.....	4
1 Анализ работы вспомогательных машин на электроподвижном составе.....	9
1.1 Вспомогательные машины и их роль в обеспечении работоспособности электроподвижного состава .....	9
1.2 Требования, предъявляемые к вспомогательным машинам на электроподвижном составе .....	10
1.3 Типы систем вспомогательных машин электроподвижного состава .....	12
1.3.1 Схемы питания систем вспомогательных машин постоянного тока с коллекторными двигателями .....	13
1.3.2 Схемы питания систем вспомогательных машин переменного тока с асинхронными двигателями.....	18
1.3.3 Принципы и структура построения статических полупроводниковых преобразователей собственных нужд .....	24
1.4 Характеристики двигателей для привода вспомогательных машин на электровозах переменного тока и их эксплуатационные показатели.....	28
1.5 Цель исследования и постановка задачи .....	32
1.5.1 Недостатки существующих схем питания систем вспомогательных машин электровозов переменного тока .....	32
1.5.2 Способы улучшения условий работы систем вспомогательных машин электровозов переменного тока .....	34
1.5.3 Постановка задачи.....	38
2 Математическое моделирование системы вспомогательных машин.....	39
2.1 Средства математического моделирования.....	39
2.2 Математическая модель системы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К .....	40

2.3 Математическая модель асинхронного двигателя с учётом эффекта вытеснения тока.....	44
2.4 Математическая модель тягового двигателя электровоза .....	60
2.5 Математическая модель тягового трансформатора электровоза .....	61
2.6 Математическая модель контактной сети .....	69
2.7 Математическая модель механической нагрузки вспомогательных машин ....	71
2.7.1 Нагрузка мотор-компрессора.....	71
2.7.2 Нагрузка мотор-вентилятора.....	72
3 Исследование электромагнитных процессов в системе вспомогательных машин электровозов переменного тока .....	74
3.1 Влияние несимметричного питания на работу асинхронных двигателей .....	74
3.2 Питание асинхронных двигателей от однофазной сети с использованием конденсаторов.....	77
3.3 Влияние величины ёмкости фазосдвигающего конденсатора, питающего напряжения и нагрузочного момента на работу вспомогательных асинхронных двигателей от однофазной сети переменного тока.....	82
3.4 Анализ влияния несимметричного питания на режимы работы фаз вспомогательных асинхронных двигателей .....	98
3.5 Анализ влияния тяговой нагрузки на работу системы вспомогательных машин электровоза.....	105
4 Применение маловентильного преобразователя для питания системы вспомогательных машин .....	115
4.1 Схемотехническая реализация преобразователя и принципы его работы.....	115
4.2 Система управления преобразователем.....	121
4.3 Анализ работы системы вспомогательных машин электровоза с применением маловентильного преобразователя.....	126
Заключение .....	139
Список использованных источников .....	142

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Железнодорожный транспорт обеспечивает надёжную быструю доставку грузов на значительные расстояния при сравнительно низкой стоимости перевозок и поэтому для Российской Федерации является стратегическим. Железные дороги согласно данным Федеральной службы государственной статистики по состоянию на 2015 год обеспечили 45,3% грузооборота, уступая только трубопроводному транспорту. При этом значительная часть грузоотправлений приходится на регионы Сибири и Дальнего Востока, являющиеся основными полигонами эксплуатации электровозов переменного тока. В настоящее время ОАО «РЖД» обновляет парк таких электровозов – на 2016 год запланирована закупка 20 единиц электровозов 2ЭС5К, 78 единиц электровозов 3ЭС5К. Общее число электровозов переменного тока на сети железных дорог России около пяти тысяч единиц.

Надёжность и работоспособность электровозов в значительной степени определяется надёжностью работы системы вспомогательных машин. Вопросы исследования систем вспомогательных машин электровозов переменного тока посвящены работы таких учёных, как А. М. Рутштейн, Р. И. Аликин, А. А. Суровиков, О. А. Некрасов, В. Я. Исаев, Н. Н. Горин, А. Ю. Конашинский, Н. А. Ротанов, В. П. Янов, О. Л. Рапопорт, Л. Н. Сорин, Г. Н. Шестопёров, В. Е. Чернохлебов Л. А. Астраханцев и др.

Для привода вспомогательных машин на современном электроподвижном составе переменного тока применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Практика показывает, что до 20% отказов на электровозах переменного тока происходит по причине повреждения вспомогательных машин, что во многом обусловлено несовершенством системы их питания. На электровозах 2ЭС5К, 3ЭС5К преобразование числа фаз переменного тока для питания вспомогательных машин производится при помощи конденсаторных расщепителей и пускового двигателя (расщепителя фаз). Аналогичная схема применяется и на более ранних

сериях электровозов ВЛ80 и ВЛ85 и характеризуется крайне низкой эксплуатационной надёжностью: за 2012 год на электровозах ВЛ85 депо Нижнеудинск было зафиксировано свыше 460 отказов. По всему парку электровозов ОАО «РЖД» на вспомогательные асинхронные двигатели приходится наибольшее число отказов. На каждый установленный двигатель типа АНЭ-225 за 2012 год зафиксировано 0,212 отказа, а на двигатель типа НВА-55 – 0,315 отказа.

Таким образом, значительный поток отказов вспомогательных асинхронных двигателей, а также несовершенство существующих систем питания таких двигателей обуславливает высокую актуальность исследований, направленных на повышение надёжности вспомогательных машин.

***Целью настоящей работы является*** совершенствование существующей системы питания вспомогательных машин электровозов переменного тока за счёт использования маловентильных преобразователей числа фаз.

Для достижения указанной цели были ***поставлены и решены следующие задачи:***

– разработана математическая модель асинхронной машины, учитывающая особенности двигателя типа НВА-55С, используемого для привода вспомогательных машин на электровозах переменного тока;

– выполнено исследование электромагнитных процессов в трёхфазных асинхронных двигателях при питании от источника однофазного переменного тока с оценкой влияния отклонения параметров конденсаторных расщепителей на работу системы вспомогательных машин;

– выполнено исследование влияния тяговой нагрузки электровоза и контактной сети на работу системы вспомогательных машин при общем питании от тягового трансформатора;

– разработан алгоритм и выполнено исследование работы маловентильного преобразователя числа фаз для системы питания вспомогательных машин от однофазной сети переменного тока;

– выполнено сравнение показателей работы традиционной системы питания вспомогательных машин и предлагаемой системы питания с использованием маловентильного преобразователя.

***Научная новизна работы:***

– предложена математическая модель асинхронного двигателя, учитывающая эффект вытеснения тока в обмотках ротора с глубокими пазами;

– разработана математическая модель для исследования электромагнитных процессов в системе вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К, учитывающая влияние тяговой нагрузки и параметров контактной сети на режимы работы электрооборудования;

– получены количественные характеристики для оценки влияния параметров конденсаторных фазорасщепителей на показатели работы асинхронных двигателей;

– предложена система управления маловентильным преобразователем, обеспечивающая минимальную несимметрию трёхфазного напряжения питания системы вспомогательных машин электровозов.

***Теоретическая и практическая значимость работы*** заключается в том, что её результаты могут быть использованы при разработке и создании полупроводниковых маловентильных симметрирующих преобразователей для электровозов переменного тока. Кроме того, материалы работы используются в учебном процессе МИИТа в курсах электрических машин и электронной преобразовательной техники.

***Методы исследований.*** В работе для достижения поставленных задач использованы методы математического моделирования и численного решения дифференциальных уравнений, реализованные в пакете Simulink приложения для инженерных расчётов Matlab, с применением основных положений теории электрических цепей. Для оценки показателей качества электрической энергии применены метод симметричных составляющих и метод гармонического анализа.

***На защиту выносятся следующие положения:***

- математическая модель асинхронного двигателя, учитывающая эффект вытеснения тока в обмотках ротора с глубокими пазами;
- математическая модель системы вспомогательных машин с учётом влияния тяговой нагрузки и параметров контактной сети;
- результаты анализа работы системы вспомогательных машин электровозов при изменении параметров конденсаторного расщепителя однофазного переменного тока;
- результаты анализа влияния тяговой нагрузки и параметров контактной сети на работу системы вспомогательных машин;
- результаты анализа работы системы вспомогательных машин с маловентильным преобразователем числа фаз.

***Достоверность результатов*** исследования подтверждается удовлетворительным совпадением результатов исследования с результатами испытаний, проведённых во ВНИИЖТ и ВЭЛНИИ.

***Апробация результатов.*** Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на научных конференциях: Научно-практической конференции «Наука МИИТа – транспорту», проходившей в Москве, в 2013 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности», проходившей в г. Хабаровске, в 2013 г.; Научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», проходившей в Москве, в 2013 г.; Международной научно-практической конференции «Перспективы сервисного обслуживания локомотивов», проходившей в Москве, в 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Перспективы сервисного обслуживания локомотивов», проходившей в Москве, в 2015 г.; Научно-практической конференции «Наука МИИТа – транспорту», проходившей в Москве, в 2016 г.

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

1. Сидорова, Н. Н. Техничко-экономическая эффективность модернизации моторвагонных электропоездов постоянного тока [Текст] / Н. Н. Сидорова, В. А. Шаров, Д. В. Назаров, А. Ю. Малютин // Наука и техника транспорта. – 2014. – №4. – С. 29–32;
2. Литовченко, В. В. Система питания вспомогательных машин электровозов с симметрированием трёхфазного напряжения [Текст] / В. В. Литовченко, А. Ю. Малютин // Мир транспорта. – 2015. – №4. – том 13. – С. 94–98;
3. Литовченко, В. В. Анализ работы вспомогательных машин на электровозах переменного тока [Текст] / В. В. Литовченко, А. Ю. Малютин, А. В. Невинский // Электроника и электрооборудование транспорта 2015. – №1. С. 36–40;
4. Феоктистов, В. П. Стендовые испытания тяговых электрических машин методом самоторможения [Текст] / В. П. Феоктистов, В. В. Литовченко, Ю. Ю. Чуверин, Д. В. Назаров, А. Ю. Малютин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – №4. – С. 21–23;
5. Малютин, А. Ю. Состояние вопроса о вспомогательных машинах отечественных электровозов переменного тока [Текст] / А. Ю. Малютин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – №6. – С. 24–28.

# 1 АНАЛИЗ РАБОТЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ

## 1.1 ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ И ИХ РОЛЬ В ОБЕСПЕЧЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Электроподвижной состав (ЭПС) состоит из комплекса различных устройств и агрегатов, совместная задача которых состоит в создании тяговых и тормозных усилий, прикладываемых к поезду. Очевидно, что в этом ключе наиболее важным является тяговое и тормозное оборудование локомотива, которое условно можно назвать основным. В тоже время на электрическом подвижном составе имеется целый комплекс устройств, от надёжной работы которых непосредственно зависит правильное функционирование локомотива и поезда в целом. Такое оборудование называют вспомогательным.

В комплексе вспомогательного оборудования имеется ряд устройств и механизмов, для привода которых необходимо использование электрических двигателей. На ЭПС такими устройствами являются вентиляторы, компрессоры, насосы, генераторы цепей управления, преобразователи напряжения, делители напряжения. Кроме того, к «двигательному» вспомогательному оборудованию также относят электромашинные преобразователи и вращающиеся фазорасщепители. Перечисленные аппараты выполняют функции, связанные с поддержанием нормальных условий работы тягового и тормозного оборудования.

Компрессоры обеспечивают локомотив и поезд сжатым воздухом для функционирования систем торможения, электрических аппаратов с пневматическим приводом, автоматических дверей (в электропоездах) и другого пневматического оборудования.

Вентиляторы осуществляют воздушное охлаждение электрического оборудования электроподвижного состава, которое подвергается нагреванию в

процессе работы (тяговые двигатели, преобразовательные установки, пусковые реостаты). Также осуществляют вентиляцию пассажирских помещений и кабины машиниста.

Насосы обеспечивают циркуляцию масла и других хладагентов в системах жидкостного охлаждения электрооборудования ЭПС.

Генераторы цепей управления, представляющие собой электрогенератор низкого напряжения, снабжают цепи управления, сигнализации и освещения электроэнергией с требуемыми параметрами.

Электромашинные преобразователи служат для необходимых изменений параметров электрической энергии во вспомогательных цепях.

Вращающиеся фазорасщепители (ФР) применяются для преобразования однофазного переменного тока в трёхфазный для питания асинхронных двигателей.

Приводные двигатели перечисленных устройств называются вспомогательными машинами (ВМ). На практике вспомогательными машинами также называют комплекс, состоящий из собственно агрегата и его электропривода (мотор-компрессор, мотор-вентилятор, мотор-насос).

Очевидно, что задачи, которые выполняют вспомогательные машины, имеют высокую степень значимости – выход из строя какого-либо вспомогательного агрегата негативно отражается на тяговых свойствах локомотива и безопасности движения. Например, отказ охлаждающих механизмов приводит к невозможности работы тягового оборудования, а отказ компрессора приводит систему торможения поезда в неработоспособное состояние.

## **1.2 ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ МАШИНАМ НА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ**

Как было отмечено, роль вспомогательных машин на локомотиве существенна: их отказ негативно отражается на безопасности движения, условиях работы тягового и силового оборудования, качестве питания цепей собственных нужд. Поэтому главным требованием к вспомогательным машинам является сохранение работоспособного состояния во всех режимах работы подвижного состава и во всех возможных условиях, на которые он рассчитан.

Также, как и другое оборудование, устанавливаемое в кузове электровоза, вспомогательные машины должны сохранять свою работоспособность в интервале температур от  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1]. В части электропитания вспомогательные машины должны сохранять работоспособность при колебаниях напряжения на токоприёмнике ЭПС на железных дорогах постоянного тока от 2000 В до 4000 В и переменного тока от 19 кВ до 29 кВ [2].

Кроме того, вспомогательные машины должны обладать высокими технико-экономическими показателями. Общая мощность вспомогательных машин на электровозах постоянного тока составляет до 3–5% общей мощности тяговых двигателей, а у электровозов переменного тока – до 7–10% при потреблении ими до 10% электроэнергии, затрачиваемой на тягу [2].

В наибольшей степени надёжность вспомогательных машин определяется надёжностью наиболее нагруженных и подверженных износу узлов. Распределение повреждений по отдельным узлам асинхронных двигателей изменяется в зависимости от условий их применения, однако наибольшее число повреждений всегда приходится на обмотку статора. В среднем из-за повреждений обмоток двигателей происходит 85–95% отказов [3]. Надёжность обмоток в первую очередь зависит от состояния изоляции, которая работает в сложных, неблагоприятных условиях, негативно влияющих на её электрическую прочность. Вопросу исследования надёжности изоляции асинхронных вспомогательных двигателей посвящена работа к.т.н. Иванова П. Ю. [4], согласно которой основные причины ускоренного старения изоляции заключаются в повышенных пусковых токах двигателей и воздействии вибраций.

Вторым основным источником отказов в электрических двигателях является подшипниковый узел. Наиболее часто отказ подшипникового узла обусловлен усталостными повреждениями, возникающими из-за локальных перегрузок, приводящих к появлению сколов, трещин и царапин на их рабочих поверхностях. Кроме того, для подшипников двигателей, работающих в неблагоприятных внешних условиях, характерен абразивный износ. Таким образом, для сохранения исправного состояния вспомогательных машин важна способность их наиболее нагруженных частей переносить тепловые и механические перегрузки, а также сохранять свои свойства в суровых условиях эксплуатации.

### **1.3 ТИПЫ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

На электрическом подвижном составе отечественных железных дорог наибольшее распространение нашли два типа систем вспомогательных машин:

- системы вспомогательных машин постоянного тока с коллекторными двигателями;
- системы вспомогательных машин переменного тока с асинхронными двигателями.

Вспомогательные коллекторные двигатели нашли широкое применение на ЭПС постоянного тока (ВЛ10, ВЛ11, ЧС7, ЭР2), где для питания таких машин не требуется преобразование рода тока.

Трёхфазные асинхронные двигатели в качестве вспомогательных машин в основном применяются на ЭПС переменного тока (ВЛ80, ВЛ85, 2ЭС5К). Однако на современном подвижном составе род тока электровоза (электропоезда) уже не оказывает влияние на выбор той или иной системы вспомогательных машин. С появлением достаточно дешёвых и надёжных электронных преобразователей всё большее распространение получают именно асинхронные вспомогательные

электродвигатели, в том числе и на ЭПС постоянного тока (2ЭС4К, ЭВС1 «Сапсан»).

### 1.3.1 СХЕМЫ ПИТАНИЯ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Обобщённая структура существующих схем питания систем вспомогательных машин постоянного тока с коллекторными двигателями показана на рисунке 1.1.

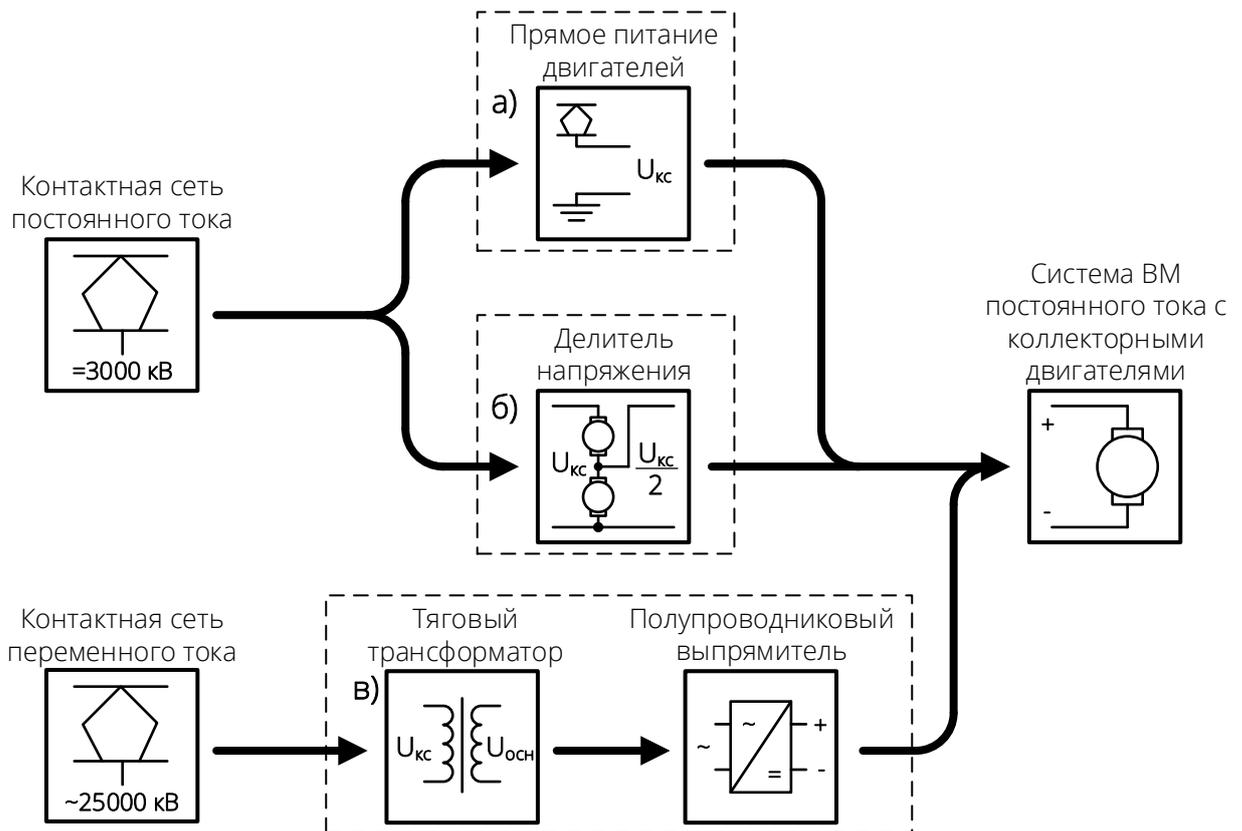


Рисунок 1.1 – Обобщённая структура схем питания систем вспомогательных машин постоянного тока с коллекторными двигателями

Вспомогательные машины постоянного тока могут быть высоковольтными и низковольтными. Высоковольтные вспомогательные машины подключают

непосредственно к контактной сети (**а** на рисунке 1.1), а низковольтные через электромашинные или статические преобразователи (**б, в** на рисунке 1.1).

Высоковольтное питание вспомогательных машин применяется на ЭПС постоянного тока, работающего от контактной сети 3000 В, при этом возможно подключение вспомогательных двигателей постоянного тока напрямую к контактной сети через пусковое сопротивление, автоматически закорачивающееся контакторами после запуска машин. Примерами такого решения служат электровозы серий ЧС7, ВЛ10 и ВЛ11 [5], [6], упрощённая схема питания вспомогательных машин которых представлена на рисунке 1.2

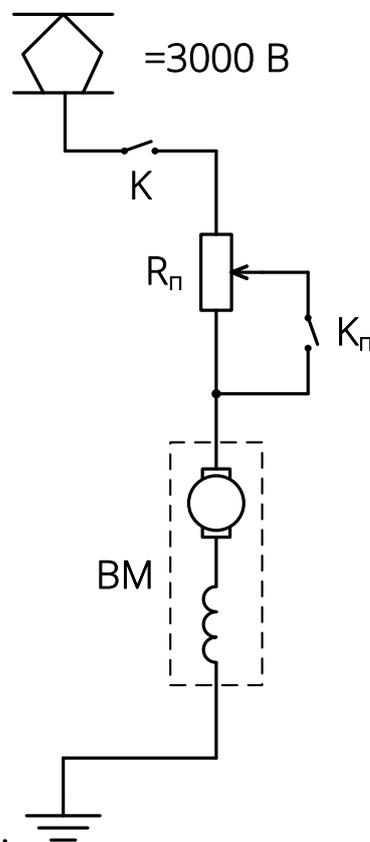


Рисунок 1.2 – Упрощённая схема прямого питания коллекторных вспомогательных машин от контактной сети постоянного тока

Такой подход, очевидно, обладает крайней простотой реализации в схемотехническом плане, однако имеются и существенные недостатки. Во-первых, это применение дорогостоящих высоковольтных коллекторных двигателей, обладающих повышенной массой и габаритами. Во-вторых, такие машины

требуют регулярного обслуживания коллекторно-щёточного узла, который является дополнительным источником отказов. А применение пусковых сопротивлений  $R_{\text{п}}$  в схеме питания вспомогательных машин приводит к дополнительным тепловым потерям в системе. Рассмотренный подход на сегодняшний день морально устарел и не применяется на вновь проектируемом и строящемся электроподвижном составе.

На электропоездах применение высоковольтных вспомогательных машин затруднено в силу невозможности их размещения в ограниченном подвагонном пространстве. Для снижения питающего напряжения до приемлемых значений на электропоездах серии ЭР2 применяются электромашинные делители напряжения (ДН) [7].

Упрощённая схема питания вспомогательных машин с делителем напряжения показана на рисунке 1.3 Делитель напряжения представляет собой машину с двумя одинаковыми якорными обмотками, расположенными в одних пазах, но подключёнными к разным коллекторам, имеющую общую магнитную систему со смешанным возбуждением. Конструкция делителя примерно на 40% меньше конструкции обычного электрического двигателя. Применение делителей напряжения позволяет использовать на ЭПС вспомогательные коллекторные двигатели постоянного тока, рассчитанные на напряжение 1500 В, имеющие меньшие массу и габариты по сравнению с аналогичными высоковольтными двигателями.

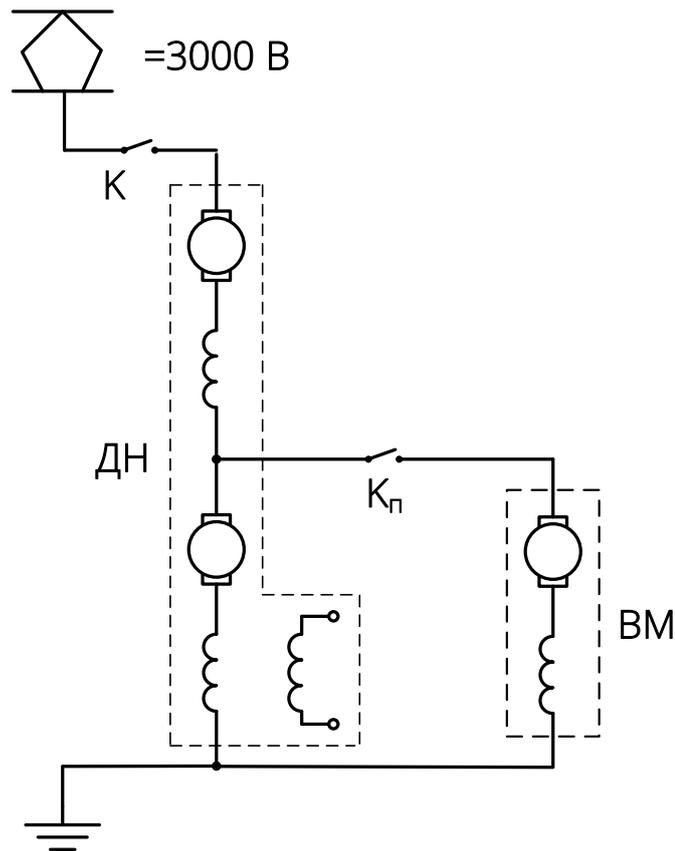


Рисунок 1.3 – Упрощённая схема питания коллекторных вспомогательных машин постоянного тока с делителем напряжения

Недостатки такого подхода заключаются в необходимости применения электромашинного агрегата – делителя напряжения, а также в применении в качестве привода вспомогательных машин сложных и требующих регулярного обслуживания коллекторных двигателей. На современном ЭПС подобные схемы питания вспомогательных машин не применяются.

На ЭПС переменного тока коллекторные двигатели нашли сравнительно ограниченное применение: примерами могут служить электровозы переменного тока серии ЧС4 и ЧС8 [8], упрощённая схема питания вспомогательных машин которых показана на рисунке 1.4.

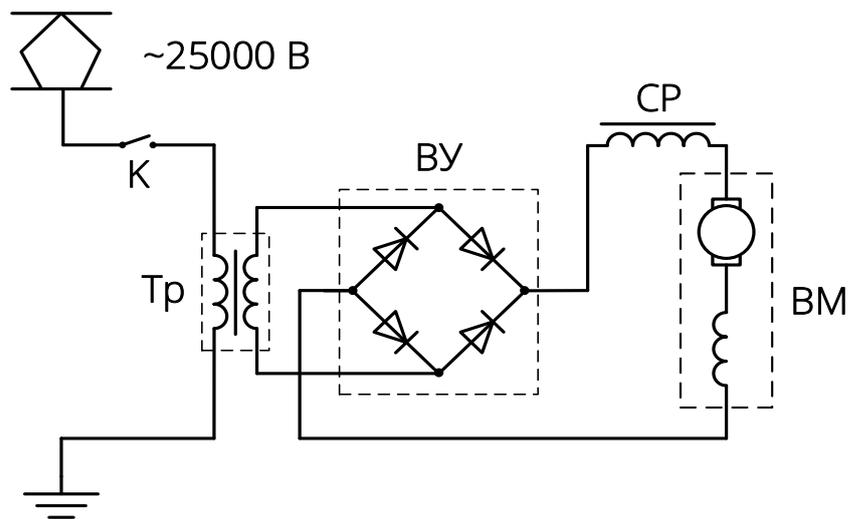


Рисунок 1.4 – Упрощённая схема питания коллекторных вспомогательных машин постоянного тока с выпрямительной установкой

На указанных электровозах система вспомогательных машин получает питание от контактной сети переменного тока через диодную выпрямительную установку (*ВУ*), питание которой осуществляется от обмотки собственных нужд (*ОСН*) тягового трансформатора (*Тр*).

Главный недостаток такой схемы связан со значительной зависимостью частоты вращения коллекторных двигателей от питающего напряжения. Изменение напряжения контактной сети переменного тока, а также его несинусоидальный характер, вызывают отклонение напряжения на обмотке собственных нужд от номинального. Повышение питающего напряжения вызывает рост производительности коллекторных вспомогательных машин, а, следовательно, и потребляемой мощности. Снижение напряжения в контактной сети приводит к уменьшению частоты вращения вспомогательных машин, что приводит к снижению их производительности, значение которой может оказаться ниже требуемой.

После модернизации таких электровозов питание вспомогательных машин на них осуществляется от управляемой выпрямительной установки. Применение полупроводникового преобразователя позволяет обеспечивать электрической

энергией с требуемыми параметрами вспомогательные коллекторные двигатели без значительных затрат на преобразование переменного напряжения в постоянное.

### **1.3.2 СХЕМЫ ПИТАНИЯ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Обобщённая структура существующих схем питания систем вспомогательных машин переменного тока с асинхронными двигателями показана на рисунке 1.5. Схемы питания вспомогательных машин переменного тока отличаются большей сложностью, так как в них осуществляется либо инвертирование постоянного напряжения с получением трёхфазного при питании ЭПС от контактной сети постоянного тока, либо расщепление однофазного переменного напряжения в трёхфазное при питании от сети однофазно-переменного тока.

Все используемые сегодня на ЭПС схемы питания систем вспомогательных машин переменного тока с асинхронными двигателями можно разделить на:

– схемы с электромашинным или конденсаторным преобразованием числа фаз (**а, в, г** на рисунке 1.5);

– схемы со статическими полупроводниковыми преобразователями собственных нужд (**б, д, з** на рисунке 1.5).

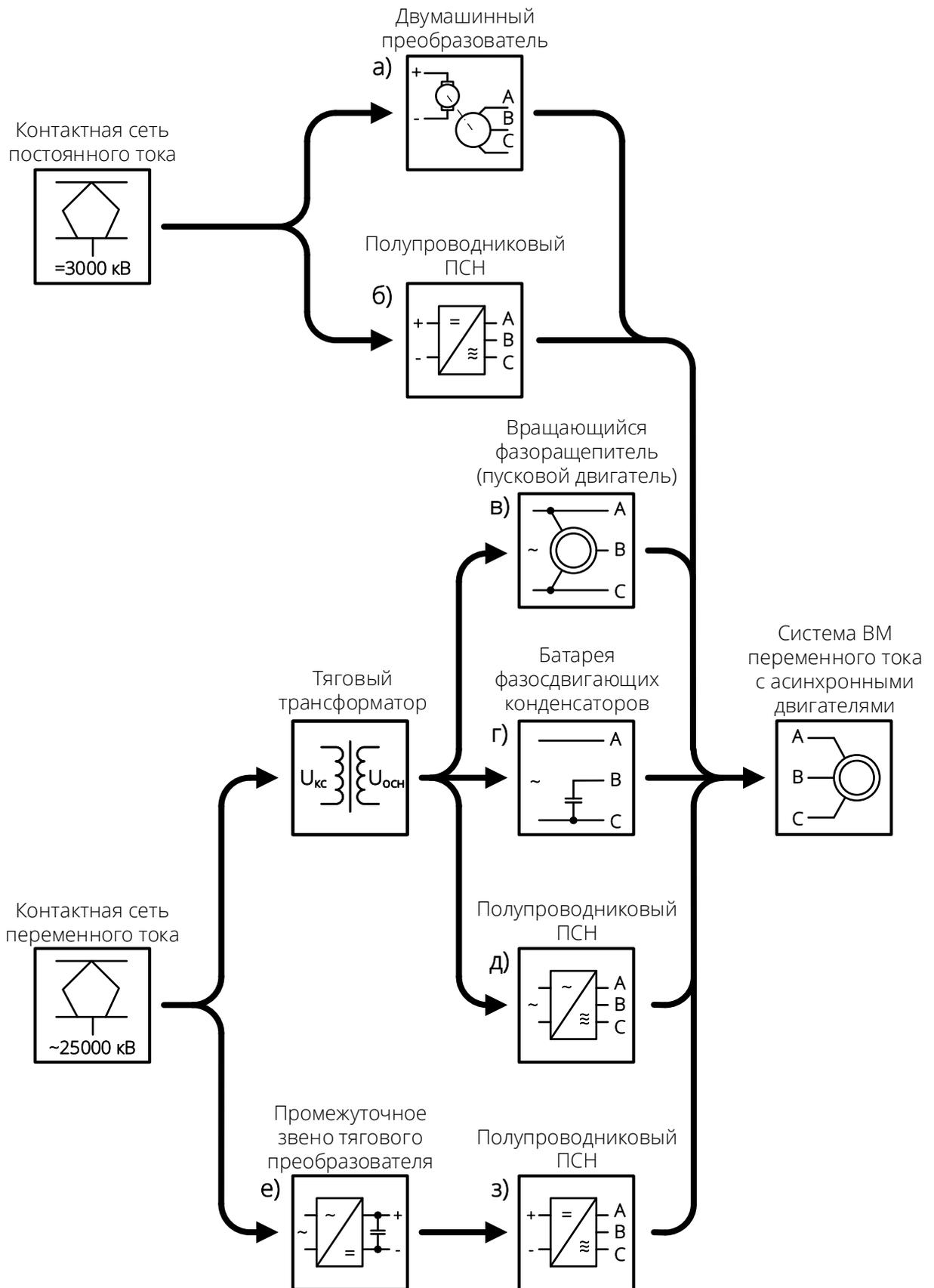


Рисунок 1.5 – Обобщённая структура схем питания систем вспомогательных машин переменного тока с асинхронными двигателями

Рассмотрим схемы с электромашинными преобразователями. На электроподвижном составе постоянного тока для получения трёхфазной сети используют электромашинные преобразователи, представляющие собой двухмашинный агрегат, состоящий из коллекторного двигателя со смешанным возбуждением, приводящего во вращение синхронный генератор. Такое решение встречается на электропоездах ЭД4М, ЭТ2М [9]. Упрощённый вид схемы питания вспомогательных машин с двухмашинным агрегатом показан на рисунке 1.6.

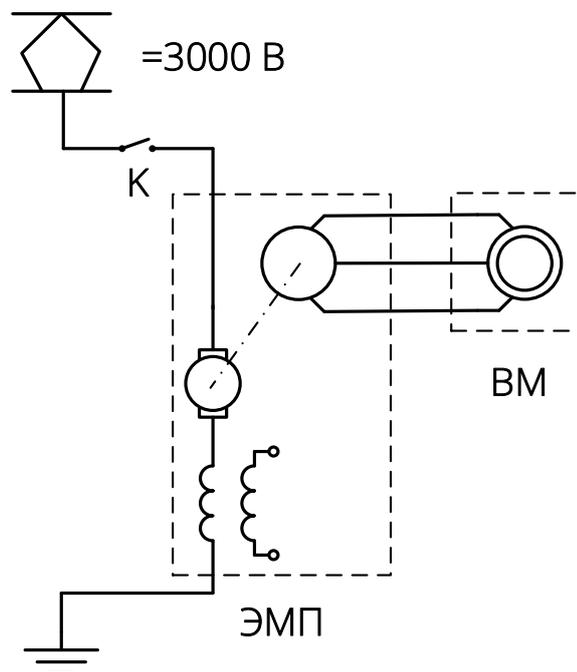


Рисунок 1.6 – Упрощённая схема питания вспомогательных машин переменного тока с электромашинным преобразователем

Двухмашинный преобразователь создаёт симметричную трёхфазную сеть, что положительно сказывается на условиях работы асинхронных вспомогательных двигателей, однако наличие электромашинного агрегата понижает общую надёжность системы вспомогательных машин, а также снижает её экономичность. На современном ЭПС, в том числе и на последних модификациях электропоездов ЭД4М (начиная с 500-ого номера) подобные схемы не применяются.

На ЭПС переменного тока в качестве электромашинного преобразователя, создающего трёхфазную сеть используется вращающийся фазорасщепитель (**ФР**).

Вращающийся фазорасщепитель запускается до включения в работу вспомогательных машин, обеспечивая им последующий облегчённый пуск [10]. Упрощённый вид схемы питания вспомогательных машин с таким преобразователем показан на рисунке 1.7. В роли фазорасщепителя может выступать как обычный асинхронный двигатель, так и специализированная машина с несимметричной обмоткой статора, схема которой показана на рисунке 1.8. Чередование фаз несимметричной обмотки при этом строго определённое: 1–3–2. Искусственно создаваемая таким образом несимметрия напряжений при холостом ходе расщепителя фаз в сочетании с подбором и распределением симметрирующих конденсаторов позволяют обеспечивать достаточно высокую симметрию магнитодвижущих сил, а соответственно и высокую симметрию напряжений, питающих вспомогательные машины [11].

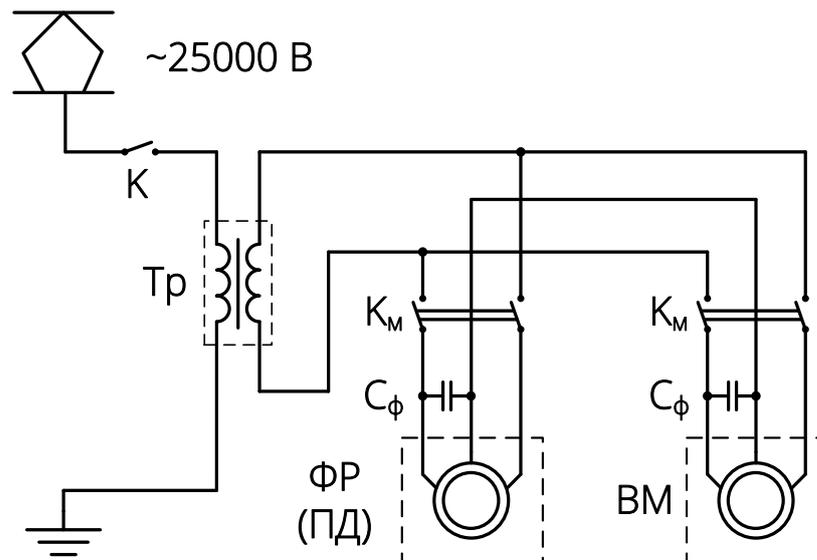


Рисунок 1.7 – Упрощённая схема питания вспомогательных машин переменного тока с вращающимся фазорасщепителем (пусковым двигателем)

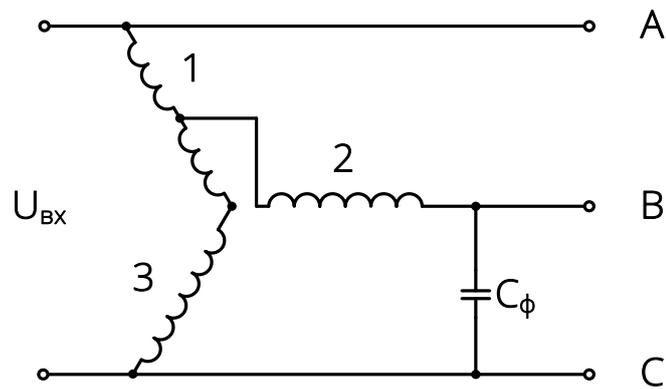


Рисунок 1.8 – Схема несимметричной обмотки вращающегося расщепителя фаз

Примером машины с несимметричной обмоткой является фазорасщепитель НБ-455А, устанавливаемый на электровозы серии ВЛ60, ВЛ80. Начиная с электровоза ВЛ85, с целью унификации применяемых асинхронных машин в качестве вращающегося расщепителя фаз используют обычный асинхронный двигатель [12].

Один из главных недостатков описанной схемы – наличие в ней фазорасщепителя, машины не производящей полезной работы, но находящейся во включённом состоянии на протяжении всего времени работы системы вспомогательных машин. При этом получаемая таким образом трёхфазная сеть будет симметричной только в случае соответствия всех параметров схемы расчётным значениям, что практически недостижимо на практике.

На более позднем ЭПС – 2ЭС5К, ЭП1М и пр., а также на электровозах ВЛ80ТК, от применения вращающихся расщепителей отказались, в пользу конденсаторной схемы питания системы вспомогательных машин, которая показана на рисунке 1.9.

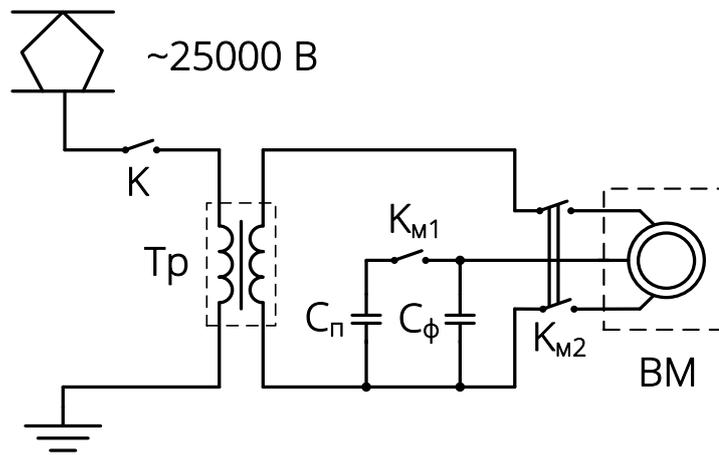


Рисунок 1.9 – Упрощённая схема питания вспомогательных машин переменного тока со статическим конденсаторным расщеплением фаз

С точки зрения реализации конденсаторная схема отличается существенной простотой, но, как и схема с вращающимся расщепителем фаз, она не обеспечивает формирование симметричной трёхфазной питающей системы напряжений во всём диапазоне изменения условий работы ЭПС. А отсутствие в схеме вращающегося расщепителя фаз обуславливает тяжёлые условия работы вспомогательных машин в пусковых и переходных режимах. В переходных режимах роль вращающегося расщепителя фаз существенна, что подтверждается результатами исследований, проведёнными в ВЭЛНИИ [13]. Практика показала, что вспомогательные машины, подключаемые к источнику питания по конденсаторной схеме имеют большое число отказов [14].

При дальнейшей эксплуатации электровозов с конденсаторной схемой питания вспомогательных машин вернулись к практике применения вращающихся расщепителей фаз, называя их при этом пусковыми двигателями. В настоящее время такие схемы питания вспомогательных машин распространены на наиболее массовых электровозах переменного тока (2ЭС5К, 3ЭС5К, ЭП1М).

### 1.3.3 ПРИНЦИПЫ И СТРУКТУРА ПОСТРОЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

В работе [15] выполнен анализ схем вспомогательных цепей современного подвижного состава (электровозы EG3100, ЭП10, электропоезда ICE-3, Talgo 350 и пр.), в результате которого предложена обобщённая структура схем питания систем вспомогательных машин (рисунок 1.10), а также установлено, что все современные схемы питания вспомогательных цепей отвечают следующим принципам:

- питание систем вспомогательных машин осуществляется от статических преобразователей собственных нужд (ПСН), преобразующих параметры электроэнергии источника питания в необходимые для потребителей;

- преобразователи собственных нужд различаются по способу подключения к источнику питания:

***на ЭПС переменного тока:***

- к обмотке собственных нужд тягового трансформатора (*a* – на рисунке 1.10);

- к промежуточному звену тягового преобразователя (*b* – на рисунке 1.10);

***на ЭПС постоянного тока:***

- непосредственно к контактной сети.

- преобразователи собственных нужд состоят из входного и выходного звеньев (*b, e, m* – на рисунке 1.10) с промежуточным звеном постоянного (от 600 В до 700 В) или переменного (380 В, 50 Гц или 440 В, 60 Гц) напряжения [16];

- питание всей системы собственных нужд ЭПС осуществляется от нескольких преобразователей собственных нужд (от двух до четырёх) с целью обеспечения резервирования.

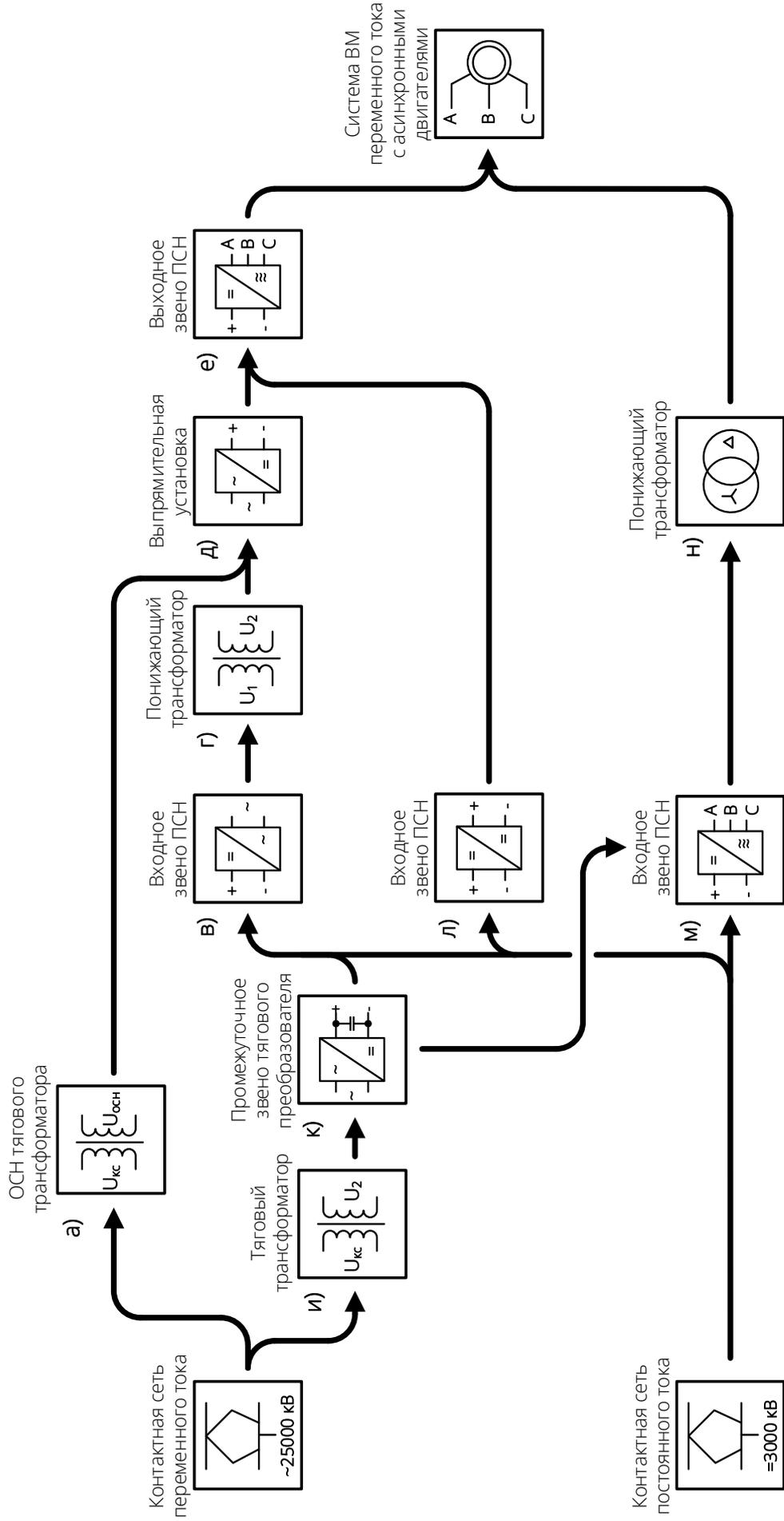


Рисунок 1.10 – Структура построения схем питания систем вспомогательных машин переменного тока со статическими преобразователями собственных нужд (ПСН)

Конфигурация входных звеньев преобразователя собственных нужд может быть различной. Наибольшее распространение при питании от контактной сети переменного тока получили варианты, показанные на рисунке 1.11.

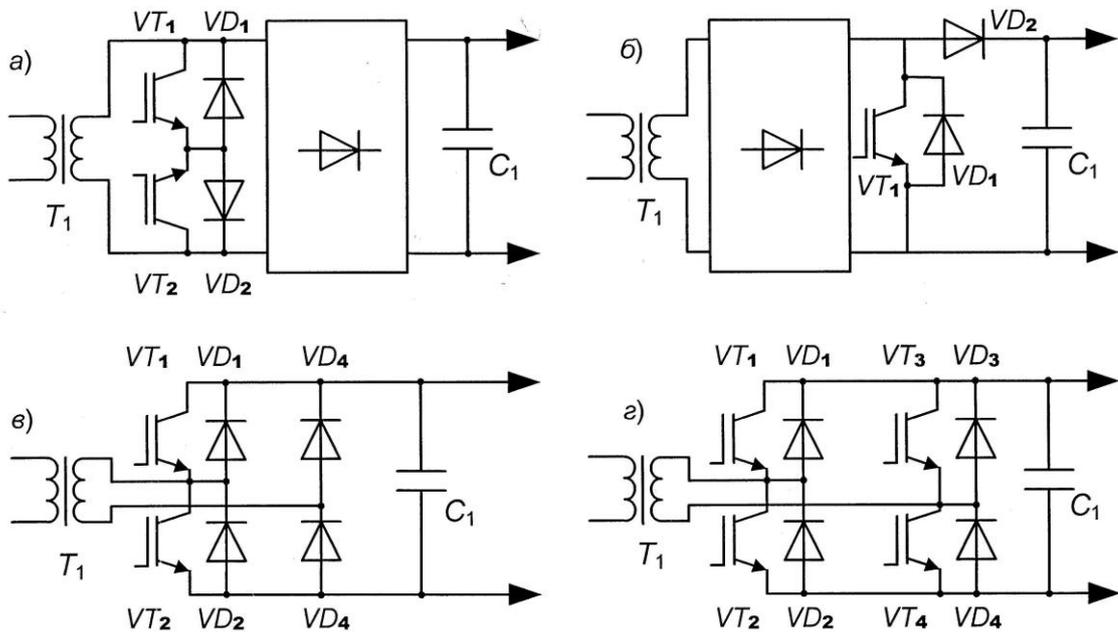


Рисунок 1.11 – Варианты схем входных звеньев статических преобразователей собственных нужд при работе от контактной сети переменного тока

В случае питания ЭПС от контактной сети постоянного тока входное звено преобразователя выполняется в виде прерывателя или инвертора напряжения (рисунок 1.12). При этом возможны варианты входного звена с гальванической развязкой (*б* – на рисунке 1.12) и без неё (*а* – на рисунке 1.12).

В свою очередь питание асинхронных двигателей системы вспомогательных машин переменного тока осуществляется при помощи трёхфазных автономных инверторов напряжения (схема показана на рисунке 1.13).

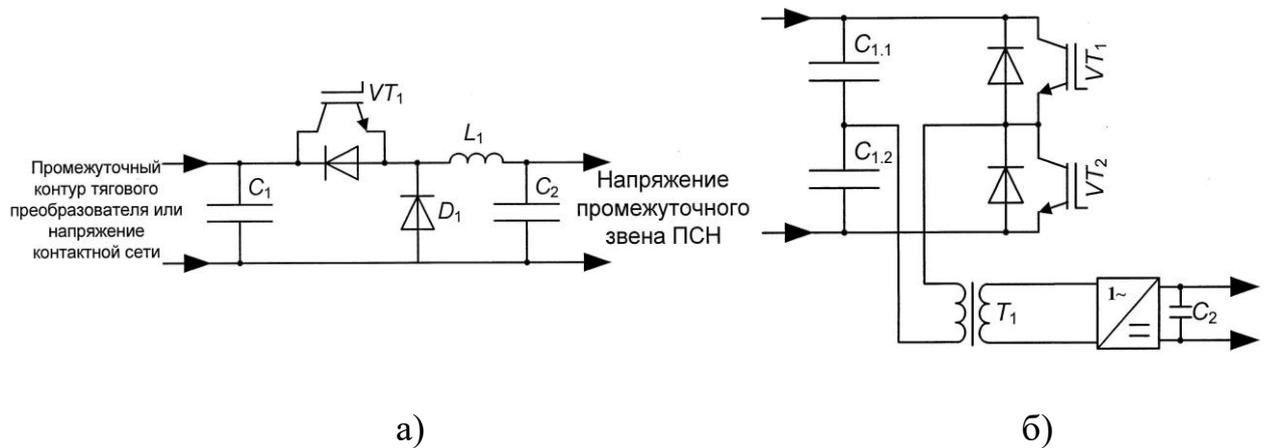


Рисунок 1.12 – Варианты схем входных звеньев статических преобразователей собственных нужд при работе от контактной сети постоянного тока

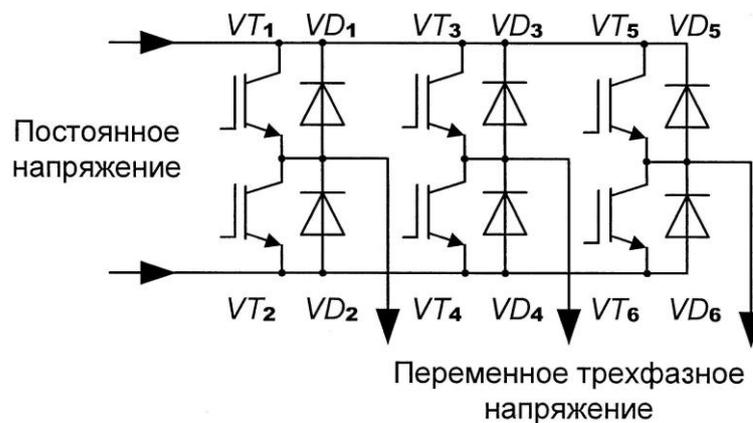


Рисунок 1.13 – Трёхфазный автономный инвертор напряжения

Построение системы питания вспомогательных машин возможно с функцией регулирования частоты и без неё. Канал питания с изменяемой частотой напряжения предусмотрен для машин, требуемая скорость вращения которых зависит от режима работы ЭПС, с целью уменьшения их энергопотребления и продления срока службы. К таким машинам, как правило, относятся мотор-вентиляторы.

На сегодняшний день весь вновь проектируемый подвижной состав содержит в себе систему вспомогательных машин переменного тока с асинхронными двигателями, получающую питание от полупроводниковых преобразователей собственных нужд. Исключениями являются некоторые серии отечественного подвижного состава: 2ЭС5К, ЭП1М. Среди ЭПС, эксплуатируемого на сети ОАО

«РЖД» примерами применения статических ПСН являются 2ЭС4К [17], 2ЭС5 [18], ЭП10 [19], ЭП20 [20], 2ЭС6 [21], 2ЭС10 [22], ЭВС1 и ЭВС2 [16].

#### **1.4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ**

На электровозах разработки второй половины двадцатого века в качестве преобразователей числа фаз применяются асинхронные вращающиеся фазорасщепители. Примером такой машины является фазорасщепитель НБ-455А. С целью унификации, начиная с электровозов ВЛ85, в качестве расщепителя фаз стал использоваться асинхронный двигатель типа АНЭ225L4-УХЛ2, применяемый для привода вспомогательного оборудования, производства Владимирского электромашиностроительного завода (ВЭМЗ). Этот двигатель был создан в начале восьмидесятых годов XX века специально для эксплуатации в условиях электрической тяги и в первую очередь для электровозов Байкало-Амурской магистрали. АНЭ225L4-УХЛ2 отличается от применяемого ранее АЭ92-4О2 повышенными требованиями по температурным режимам (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), а также увеличенной мощностью на единицу массы (при массе в 380 кг мощность двигателя составляет 55 кВт). После доводки конструкции двигателя АНЭ225L4-УХЛ2 его выпуск осваивается на ООО «ПК «НЭВЗ»: машина получает обозначение НВА-55А. Для односекционных пассажирских электровозов серии ЭП1 создана модификация НВА-22. В конце первого десятилетия XX века была выпущена новая модификация двигателя, получившая название НВА-55С, главным отличием которого является беличья клетка, выполненная из меди. Подробное описание истории развития вспомогательных асинхронных двигателей отечественного электроподвижного состава представлено в работе [23].

Описание характеристик вспомогательных двигателей электроподвижного состава представлено в [24]. Основные параметры двигателей, применяемых для привода вспомогательных машин на электровозах переменного тока, представлены в таблице 1.1.

Описанные выше схемы питания систем вспомогательных машин электровозов типов ВЛ85, 2ЭС5К и их аналогов демонстрируют в эксплуатации низкую надёжность. В целом, эксплуатация локомотивов всех типов на сети ОАО «РЖД» свидетельствует о недостаточной надёжности применяемых систем вспомогательных машин. Так, в 2012 году общее количество неисправностей вспомогательного оборудования на всех типах локомотивов составило 4129 (2,08 случая на 1 млн. км. пробега), а в 2013 – 4149 случаев (2,17 случая на 1 млн. км. пробега). При этом почти 90% от общего числа отказов приходится на вспомогательные машины электровозов.

На рисунке 1.14 представлены величины удельных показателей (число отказов на 1 млн. км пробега) отказов систем вспомогательных машин электровозов по отдельным дирекциям тяги в 2012 и 2013 годах.

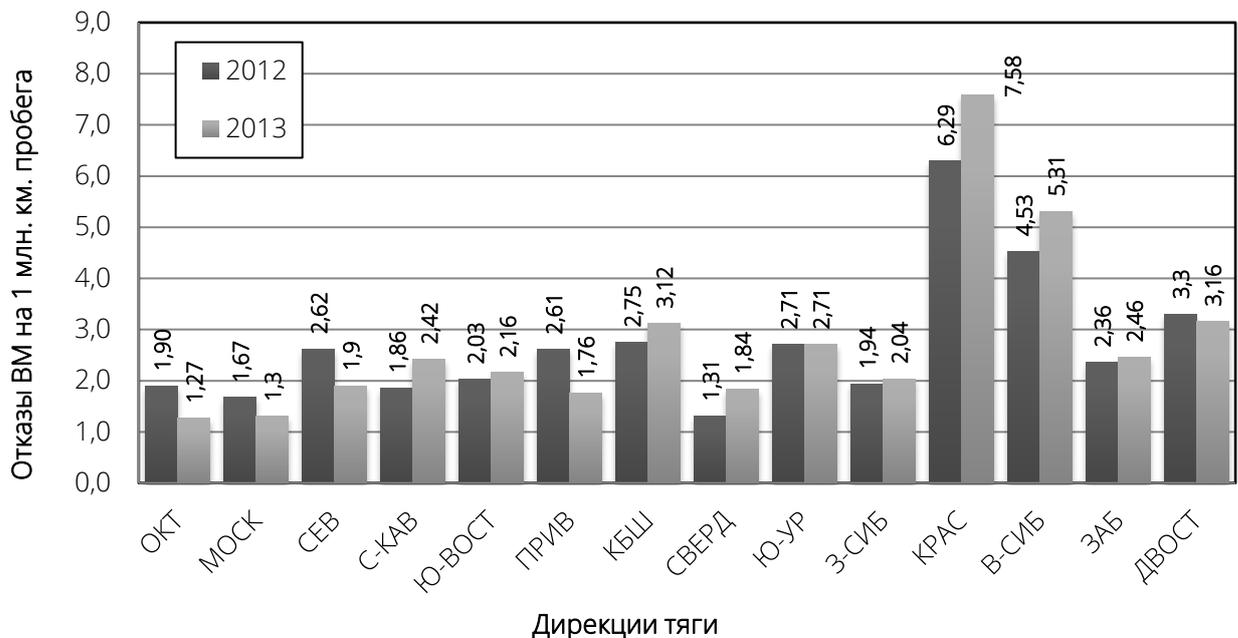


Рисунок 1.14 – Удельные показатели отказов вспомогательных машин электровозов по дирекциям тяги

Таблица 1.1 – Основные технические данные вспомогательных машин электровозов переменного тока

Показатель	НБ-455А	АЭ92-402	АНЭ-225	НВА-55А	НВА-22	НВА-55С
Серия ЭПС	ВЛ80	ВЛ60, ВЛ80	ВЛ85	2ЭС5К, ЭП1	ЭП1	2ЭС5К, ЭП1
Назначение	РФ	приводной	РФ, приводной	РФ, приводной	приводной	РФ, приводной
Номинальное линейное напряжение, В	380, 385, 430 (несимметричная обмотка)	380	380	380	380	380
Номинальная мощность, кВт	–	40	55	55	22	55
Номинальный фазный ток, А	154, 110, 77 (несимметричная обмотка)	90	119	113	69	116,3
Номинальная частота питающей сети, Гц	50	50	50	50	50	50
Синхронная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1500	1500	1500	1500	750	1500
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1485	1425	1432	1440	720	1473
Номинальный cos(φ)	–	0,79	0,80	0,82	0,57	0,782
Номинальный КПД, %	–	85,5	88,0	90,2	82,7	92,2

Наихудшими показателями по надёжности систем вспомогательных машин обладают электровозы, эксплуатируемые на полигонах Красноярской и Восточно-Сибирской дирекции тяги – регионах с суровыми климатическими условиями, тяжёлым рельефом, высокой грузонапряжённостью. К числу эксплуатируемых здесь электровозов относятся 2ЭС5К, 3ЭС5К, ВЛ85. Применяемые на них вспомогательные двигатели (серий АНЭ-225 и НВА-55) отличаются низкой надёжностью, что подтверждается данными по отказам, представленными на рисунке 1.15. Складывается ситуация, при которой асинхронные двигатели, применяемые для привода вспомогательных машин на электровозах переменного тока, уступают в надёжности коллекторным машинам, что не естественно. При

ЭТОМ ВЫСОКОЕ ЧИСЛО ОТКАЗОВ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ АСИНХРОННЫХ МАШИН НЕ МЕНЯЕТСЯ ГОД ОТ ГОДА.

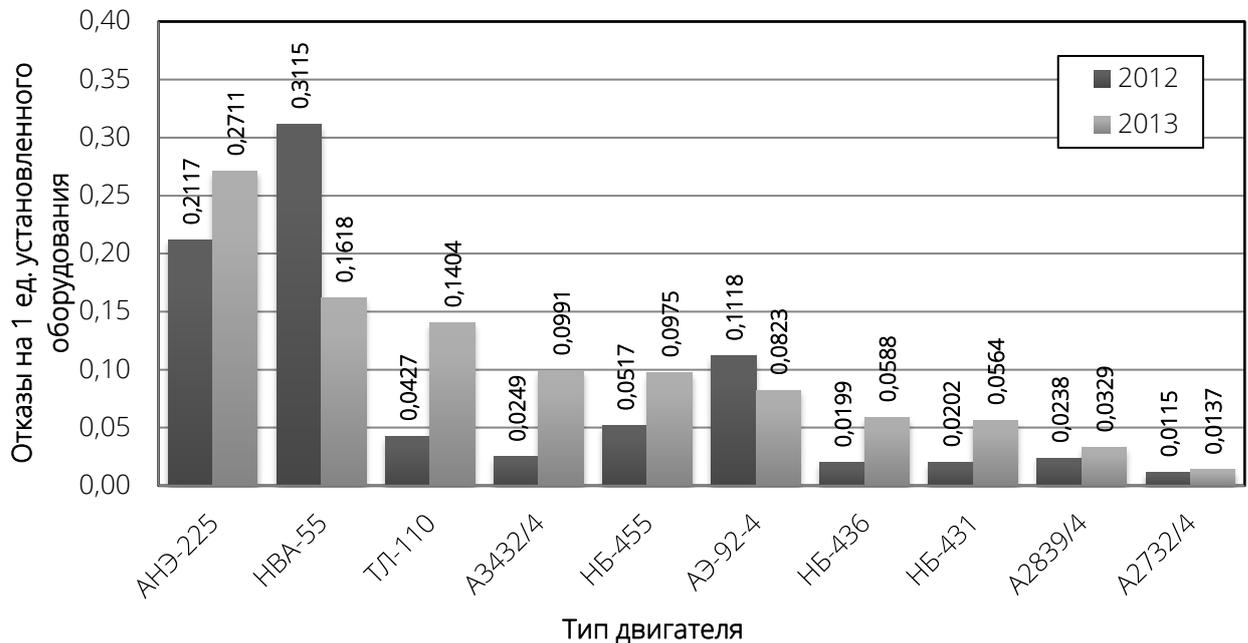


Рисунок 1.15 – Удельные показатели отказов вспомогательных электроприводов на единицу установленного оборудования

Основные виды повреждений асинхронных двигателей серий АНЭ-225 и НВА-55 показаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Доли основных неисправностей от их общего числа для двигателей АНЭ-225 и НВА-55

Неисправность	АНЭ-225	НВА-55
Выплавление обмотки ротора	30,7%	19,4%
Неисправность подшипниковых узлов	21,8%	28,8%
Межвитковое замыкание в обмотке статора	10,2%	22,9%
Пробой изоляции обмотки статора на корпус	7,0%	3,1%

Статистика распределения отказов по типам свидетельствует о преобладании повреждений, связанных с тепловыми перегрузками – выплавление ротора, пробой

изоляции. Такого рода отказы характерны для работы машины в условиях значительных недопустимых перегревов. А большая доля неисправностей подшипниковых узлов свидетельствует о наличии чрезмерных пульсаций крутящего момента на валах указанных машин.

## **1.5 ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

### **1.5.1 НЕДОСТАТКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ ПИТАНИЯ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Несмотря на то, что в мировой практике весь современный подвижной состав оснащается полупроводниковыми ПСН, на сети ОАО «РЖД» сохраняется значительное число электровозов (порядка 5000 единиц), оснащённых схемами питания асинхронных вспомогательных машин с вращающимися расщепителями фаз (пусковыми двигателями) (рисунок 1.7). Концепция такой системы питания вспомогательных машин была предложена ещё в середине двадцатого века в условиях отсутствия полупроводниковых приборов пригодных для преобразования параметров электрической энергии на электроподвижном составе. О необходимости модернизации такой схемы говорилось ещё на этапе создания электровозов ВЛ85 [25].

Применение вращающихся расщепителей фаз обладает рядом недостатков. Во-первых, это наличие самого расщепителя фаз, не производящего полезной работы, которое оправдано лишь в пусковых и переходных режимах. В установившихся же режимах работы 90–95% энергии потребляется вспомогательными машинами непосредственно из трансформаторной обмотки собственных нужд при участии конденсаторной батареи [13]. Во-вторых, наличие

дополнительной вращающейся машины усложняет конструкцию электровоза, понижает его общую надёжность и энергетические показатели.

Предложенная позже конденсаторная схема (без пускового двигателя, рисунок 1.9) действительно может применяться для питания асинхронных трёхфазных двигателей, однако симметрия получаемого таким образом напряжения гарантирована лишь для одного режима работы, при котором выполняется ряд жёстких требований, а именно: номинальное питающее напряжение, на которое рассчитана схема; номинальная величина нагрузки на двигатель; строго постоянное значение ёмкости фазосдвигающего конденсатора. Очевидно, что в условиях эксплуатации электроподвижного состава выполнение данных требований невозможно из-за широкого диапазона изменения напряжения в контактной сети, а, следовательно, и на обмотке собственных нужд. Величина же ёмкости фазосдвигающих конденсаторов может изменяться по причине старения. В случае применения конденсаторной схемы питания вспомогательные машины работают в крайне неблагоприятных условиях. Исследования, проведённые в работе [26] показывают, что асимметрия токов в двигателях может достигать 91% в пусковых и 55% в установившихся режимах. Кроме того, при пуске двигателя возникает 5–10 кратное увеличение тока, что также негативно сказывается на условиях его работы.

Известно, что несимметрия трёхфазной системы напряжений приводит к возникновению токов обратной последовательности, которые для асинхронной машины являются крайне нежелательными, так как вызывают значительный нагрев, а также увеличивают пульсации электромагнитного момента двигателя. Что касается экстремально высоких значений пусковых токов, то они приводят к возрастанию электродинамических усилий, действующих на обмотки двигателя. Отмеченные явления имеют место в системе питания вспомогательных электрических машин и обуславливают большое число отказов асинхронных двигателей, связанных с выплавлением стержней ротора, пробоем изоляции обмоток статора, повреждением подшипникового узла и обрывами соединительных муфт. Кроме того, дополнительный нагрев электрических машин,

возникающий в столь неблагоприятных условиях работы, существенно влияет на коэффициент полезного действия, повышая расход электроэнергии.

### **1.5.2 СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Первой попыткой по повышению надёжности систем вспомогательных машин электровозов переменного тока серии 2ЭС5К, ЭП1М стал отказ от чисто конденсаторной схемы питания вспомогательных асинхронных двигателей и возврат к применяемой на более ранних электровозах схеме с вращающимся расщепителем фаз (пусковым двигателем). Однако, практика показала, что подобные меры не приносят существенных улучшений в части повышения качества электропитания вспомогательных асинхронных машин [26].

Для повышения качества напряжения питания и управления производительностью вспомогательных электроприводов ОАО «Электровыпрямитель» в сотрудничестве с ОАО «ВЭЛНИИ» и ООО «ПК «НЭВЗ» осуществило разработку, изготовление и установку трёх шкафов питания вспомогательных машин ШПВМ-250-У2 (схема показана на рисунке 1.16) в электровозе 3ЭС5К № 153. Функционально ШПВМ-250-У2 представляет собой два независимых двухканальных преобразователя частоты на IGBT-модулях, каждый из которых преобразует входное переменное однофазное напряжение регулируемое по величине и частоте трёхфазное напряжение [27], [28]. В ходе испытаний ШПВМ-250-У2 подтвердил свою работоспособность, однако его применение для массовой модернизации электровозов переменного тока, которых на сети ОАО «РЖД» насчитывается порядка 5000 единиц, затруднительно в силу ряда причин:

- сложная конструкция, требующая для своей реализации большого количества дорогостоящих IGBT-ключей;
- затруднённое размещение ШПВМ-250-У2 в кузове уже построенного электровоза;
- высокая стоимость готового изделия.

Другим способом, предложенным для облегчения условий работы вспомогательных машин, является применение индуктивно-ёмкостного преобразователя. Такое устройство разработано группой учёных института электродинамики Национальной академии наук Украины под руководством член-корр. И. В. Волокова и получило название «Velvet». Опытный образец изготовлен в ООО «Арнади». Однако в ходе испытаний было установлено, что применение подобных устройств не обеспечивает достаточно симметрии питающих токов и напряжений вспомогательных асинхронных двигателей [29].

Наиболее удачным было бы решение, позволяющее объединить преимущества современных ПСН с преимуществами «конденсаторных» схем питания, применение которых оправдано их простотой, невысокой стоимостью, наличием опыта обслуживания и ремонтной базы. В этом ключе сохранение существующих «конденсаторных» схем с незначительной их доработкой является наиболее рациональным решением.

При этом доработка должна заключаться в применении в схеме питания системы вспомогательных машин полупроводникового преобразовательного устройства, задачей которого является не формирование трёхфазного напряжения, а коррекция существующей трёхфазной системы, получаемой при помощи конденсаторов. Таким устройством является маловентильный преобразователь, рассмотренный в работе к.т.н. А. В. Невинского [30]. Схема, поясняющая принцип подключения маловентильного преобразователя в конденсаторную схему питания асинхронного двигателя показана на рисунке 1.17.

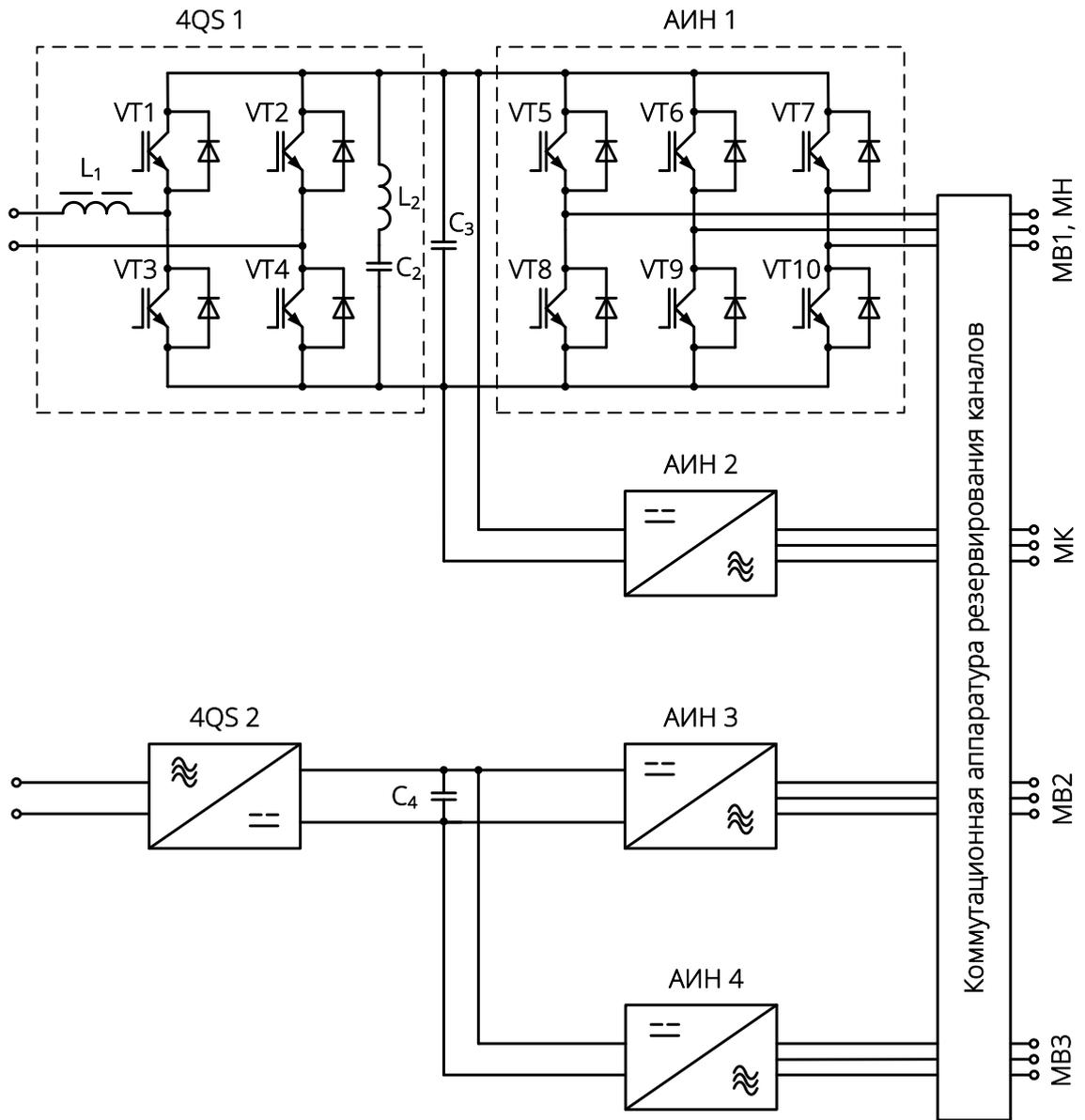


Рисунок 1.16 – Схема ШПВМ-250-У2

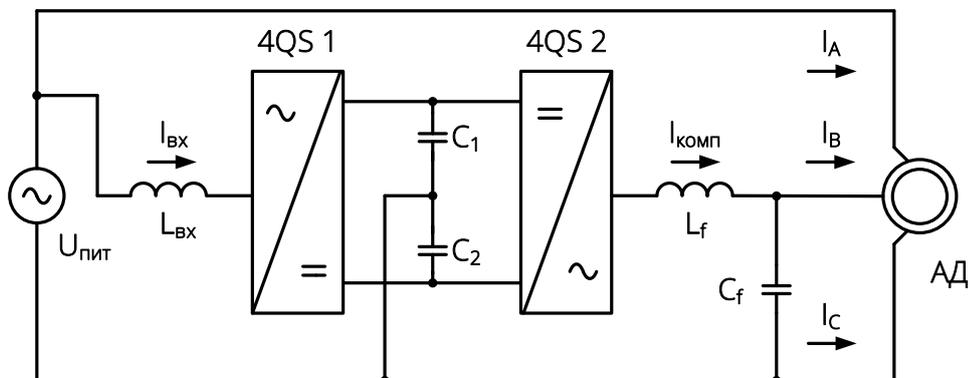


Рисунок 1.17 – Схема питания асинхронного двигателя с маловентильным преобразователем

Фазосдвигающий конденсатор при этом становится частью выходного синус-фильтра преобразователя ( $C_f, L_f$ ). Очевидно, что такое устройство будет обладать существенно меньшими габаритами, по сравнению с уже применяемыми преобразователями собственных нужд и соответственно меньшей стоимостью. В ходе работы для обеспечения симметричного трёхфазного питания преобразователь осуществляет дополнительный отбор мощности от источника питания, потребляя из него входной ток  $I_{вх}$ , и вырабатывает ток компенсации  $I_{комп}$ , направляемый в конденсаторную фазу двигателя. В отдельных режимах преобразователь осуществляет обратную работу – отводит лишнюю мощность с конденсаторной фазы в источник питания.

Одним из главных достоинств маловентильного преобразователя является возможность его установки в систему питания вспомогательных машин уже построенного и эксплуатируемого электровоза, что поясняется схемой на рисунке 1.18.

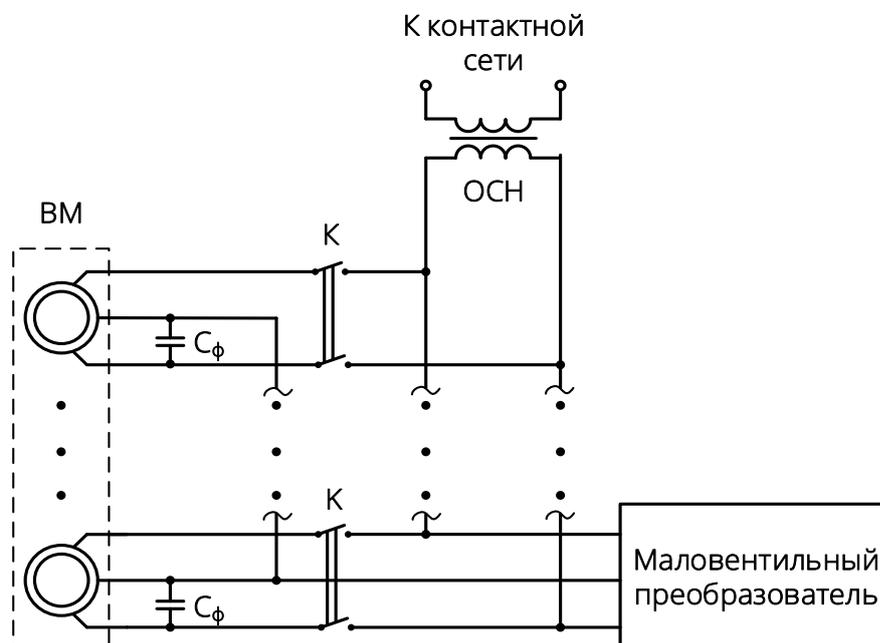


Рисунок 1.18 – Схема питания системы вспомогательных машин с маловентильным преобразователем

При этом возможна установка преобразователя взамен расположенных в кузове электровоза пусковых двигателей.

### 1.5.3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данная работа ставит своей целью совершенствование существующих схем питания вспомогательных машин электровозов переменного тока. Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

- исследование электромагнитных процессов в трёхфазных асинхронных электрических двигателях при питании от однофазной сети переменного тока;
- разработка математической модели асинхронной машины, учитывающая особенности двигателя НВА-55С, используемого на электровозах переменного тока;
- оценка влияния отклонений параметров существующих схем от номинальных значений на работу систем вспомогательных машин электровозов;
- исследование влияния тяговой нагрузки электровоза на работу системы вспомогательных машин при общем питании от тягового трансформатора электровоза;
- исследование работы маловентильного преобразователя собственных нужд в схеме питания системы вспомогательных машин от однофазной сети переменного тока;
- уточнение алгоритмов работы маловентильного преобразователя;
- сравнение показателей работы системы вспомогательных машин при существующей схеме питания и предлагаемой схеме с использованием маловентильного преобразователя.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН

### 2.1 СРЕДСТВА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Современные вычислительные средства, а также программное обеспечение позволяет производить построение и исследование математических моделей без длительного изучения языков программирования. Производители прикладного программного обеспечения для инженерных расчётов год от года стремятся упростить взаимодействие исследователя и математической модели посредством разработки алгоритмов, перекладывающих часть работы по построению математических моделей и средств их изучения на ЭВМ. Классическим примером такого подхода являются программные среды графической разработки LabVIEW [31] и Simulink [32], [33].

В работе для построения и исследования математических моделей используется Simulink, графическая среда имитационного моделирования, встроенная в программный пакет Matlab, позволяющая в виде блок-диаграмм строить модели электротехнических систем. При этом внешний вид получаемых блок-диаграмм повторяет структуру и начертание исследуемых электрических цепей.

Выбор среды моделирования обусловлен тем, что Simulink позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков пассивных (сопротивления, индуктивности, ёмкости) и активных (электронные приборы, электрические машины) электротехнических устройств, что существенно сокращает время разработки и отладки модели. Кроме того, использование в качестве средства математического моделирования среды Simulink позволяет применять подход модельно-ориентированного проектирования [34] для ускоренного построения реального прототипа электротехнического устройства и его системы управления,

заранее отлаженных в среде имитационного моделирования, а встроенные в Simulink средства позволяют на основе спроектированных в модели алгоритмов автоматически генерировать исполняемый программный код, пригодный для загрузки на микропроцессоры системы управления прототипа.

## 2.2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС5К

На сегодняшний день наиболее массовыми грузовыми электровозами, эксплуатируемыми на сети ОАО «РЖД» являются электровозы серии 2ЭС5К и их аналоги (3ЭС5К, ВЛ85), значительно не отличающиеся друг от друга в схемотехнической реализации тяговых цепей и цепей питания вспомогательных машин. Результаты исследований в части вспомогательного привода, проведённых для 2ЭС5К также применимы и для его аналогов.

Схема питания системы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К показана на рисунке 2.1. Система вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К состоит из 6 асинхронных двигателей *M10–M15*. Двигатели *M11–M13* применяются для привода мотор-вентиляторов, двигатель *M14* – для привода мотор-компрессора, а двигатель *M15* – для привода маслонасоса. Однофазное напряжение питания преобразуют в трёхфазное за счёт конденсаторов *C101–C109* и пускового двигателя *M10*. Конденсаторы *C101–C106* установлены в цепи питания электродвигателей *M10–M12*, *M14* и включаются вместе с соответствующими вспомогательными машинами. На период пуска в цепь включается пусковая ёмкость, представленная конденсаторами *C107–C109* [35].

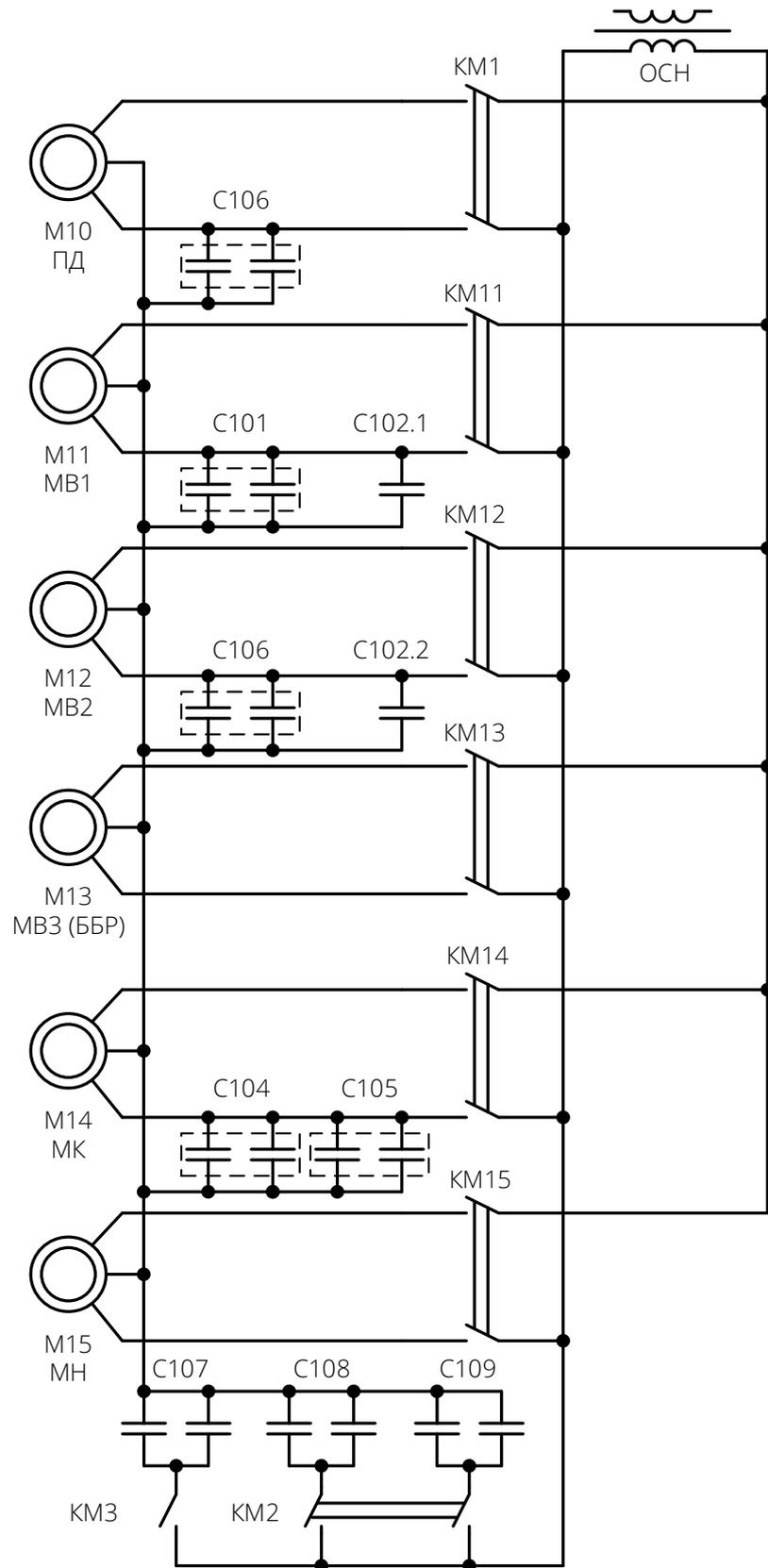


Рисунок 2.1 – Схема питания системы вспомогательных машин электровоза

2ЭС5К

Подключение и отключение батареи пусковых конденсаторов осуществляется по величине действующего напряжения на конденсаторах при помощи реле напряжения *ПРН-318-01* с напряжением срабатывания 300+50 В и коэффициентом возврата 0,25.

Укрупнённая схема для исследования электромагнитных процессов в цепях вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К, реализованная в виде математической модели, показана на рисунке 2.2. Математическая модель исследуемой системы состоит из функциональных блоков, отвечающих за моделирование отдельных элементов.

Модель электровоза включает в себя в виде подсистемы модель тягового привода, состоящую из эквивалентной выпрямительно-инверторной установки (*VSI-VS8*), питающей эквивалентный тяговый двигатель. Подсистема тягового привода получает питание от тяговой обмотки трансформатора (*ТО*) и электромагнитно связана через него с системой вспомогательных машин, получающей питание от обмотки собственных нужд (*ОСН*). Система вспомогательных машин состоит из трёх асинхронных двигателей (*АД1-АД3*) и трёх видов нагрузки: холостая нагрузка (режим пускового двигателя), вентиляторная нагрузка (*ВН*) и компрессорная нагрузка (*КН*). Запуск машин осуществляется при помощи контакторов и фазосдвигающих конденсаторов (*С10-С13*). Конденсатор *С10* моделирует пусковую ёмкость.

Модель сети электроснабжения состоит из блоков тяговых подстанций и блоков контактной сети, моделируемых четырёхполюсниками *A*, параметры которых характеризуются координатой электровоза между двумя тяговыми подстанциями в случае двустороннего питания. Исследование консольного питания электровоза производится при каскадном соединении четырёхполюсников и исключении блока моделирования второй тяговой подстанции.

Исследование эталонных режимов работы вспомогательных асинхронных двигателей производится с исключением из модели подсистем сети электроснабжения, тягового привода и трансформатора и введением на их место идеального источника синусоидального питания.

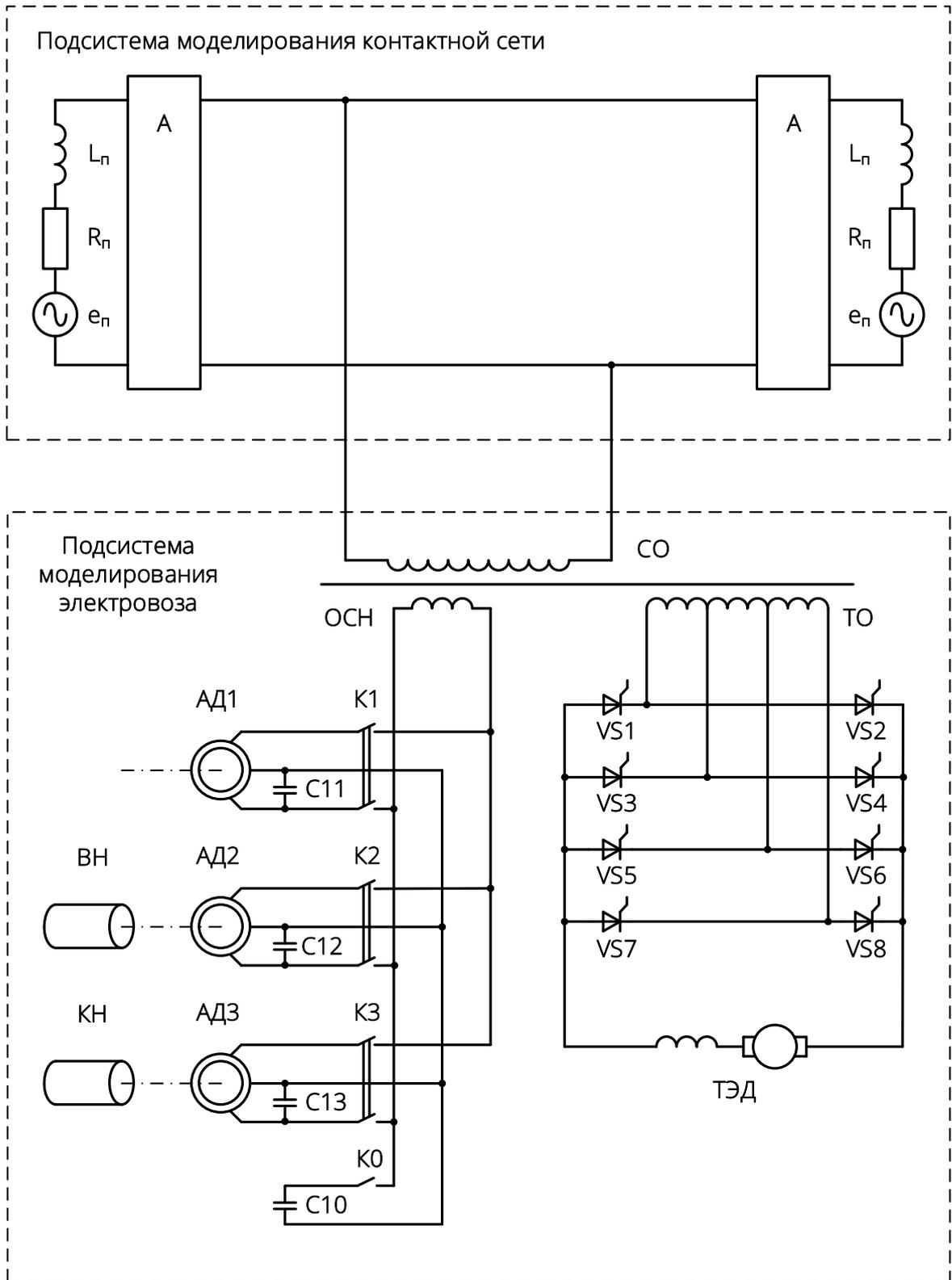


Рисунок 2.2 – Укрупнённая схема для анализа электромагнитных процессов в цепях системы вспомогательных машин

## 2.3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА

Для привода вспомогательных машин электровозов 2ЭС5К [36], начиная с 2009 года, применяются асинхронные вспомогательные двигатели НВА-55С [37] с медным ротором и увеличенной глубиной паза ротора. Для сравнения в таблице 2.1 сопоставлены параметры обмоток двигателя НВА-55А с ротором, выполненным из алюминиевого сплава АХЖ, и двигателя НВА-55С.

Таблица 2.1 – Параметры обмоток двигателей НВА-55А и НВА-55С

Параметр	НВА-55А	НВА-55С
Активное сопротивление статора $R_S$ , Ом	0,0476	0,0472
Реактивное сопротивление статора $x_S$ , Ом	0,1180	0,122
Активное сопротивление ротора (привед. к статору) $R'_R$ , Ом	0,0893	0,0392
Реактивное сопротивление ротора (привед. к статору) $x'_R$ , Ом	0,1170	0,1696

Существенное различие машин в величине активного сопротивления ротора – для исполнения с медным ротором этот показатель примерно **в 2,3 раза** ниже аналогичного у исполнения с ротором из алюминиевого сплава. Влияние величины сопротивления ротора на работу системы вспомогательных машин рассмотрено в работе [38], авторы которой приходят к заключению о том, что пониженное сопротивление обмотки ротора улучшает свойства машины в случае её работы в режиме вращающегося расщепителя фаз (пускового двигателя).

Прикладная библиотека моделирования электротехнических систем *SimPowerSystems* среды Simulink содержит блок моделирования асинхронной машины *Asynchronous Machine SI Units* [39]. Исходные данные для моделирования двигателя НВА-55С записаны согласно [37] и показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные данные для моделирования двигателя НВА-55С

Параметр	Обозначение	Значение параметра
Номинальная частота, Гц	$f$	50
Активное сопротивление статора, Ом	$R_S$	0,0472
Индуктивность рассеяния статора, мГн	$L_S$	0,3883
Активное сопротивление ротора (привед. к статору), Ом	$R'_R$	0,0392
Индуктивность рассеяния ротора (привед. к статору), мГн	$L'_R$	0,5399
Взаимная индуктивность, мГн	$L_m$	11
Число пар полюсов	$p$	2
Коэффициент инерции ротора, кг · м <sup>2</sup>	$J_R$	1,25

Для оценки применимости данного блока для моделирования системы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К с двигателями НВА-55С произведён численный эксперимент по снятию механической характеристики согласно схеме, представленной на рисунке 2.3, с последующим сравнением его результатов с результатами типовых испытаний [40].

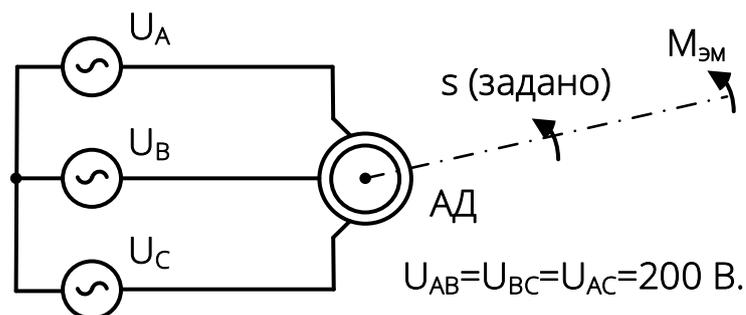


Рисунок 2.3 – Схема проведения численного эксперимента по снятию механической характеристики модели асинхронной машины

В качестве источника питания согласно [40] используется симметричный трёхфазный источник напряжения 200 В ( $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  на рисунке 2.3) частотой 50 Гц.

На рисунке 2.4 показаны механическая характеристика, полученная по результатам испытаний и характеристика, полученная по результатам моделирования.

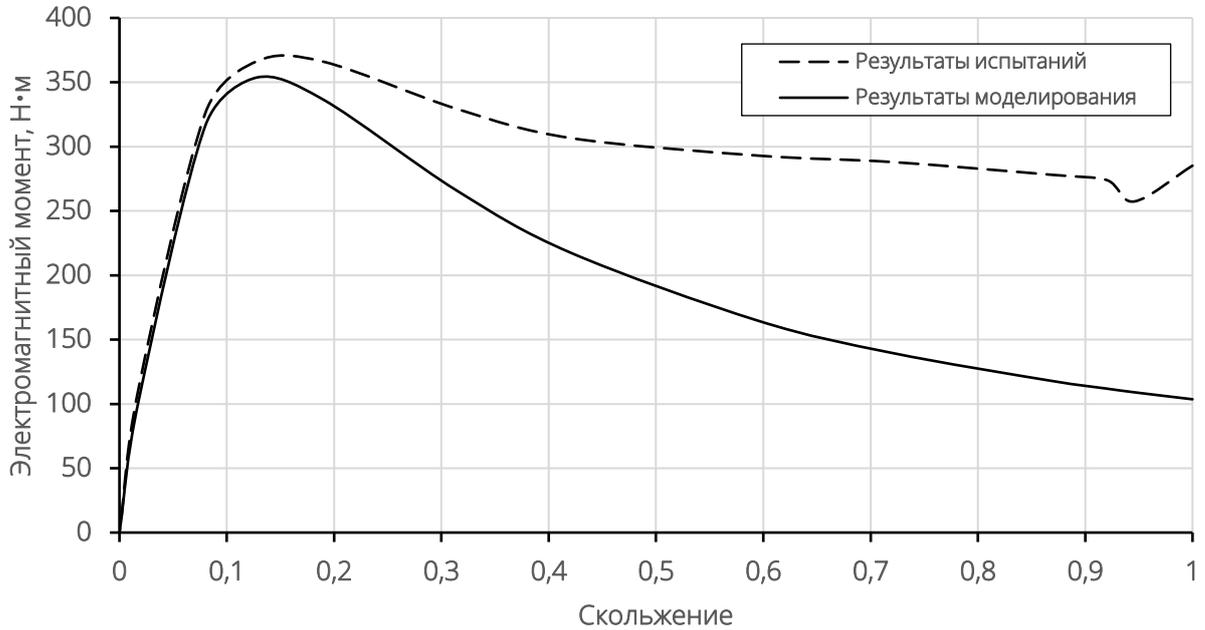


Рисунок 2.4 – Механические характеристики двигателя НВА-55С, построенные по результатам испытаний и результатам моделирования

Расхождение результатов моделирования и испытаний определено величиной относительной погрешности, согласно формуле (2.1)

$$\delta = \frac{|x_{\text{и}} - x_{\text{м}}|}{x_{\text{м}}} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где  $x_{\text{и}}$  – величина, полученная по результатам испытаний (эксперимента);

$x_{\text{м}}$  – величина, полученная по результатам моделирования.

Численно результаты испытаний, моделирования и рассчитанная относительная погрешность представлены в таблице 2.3. В таблице 2.3 переменными  $M_{\text{эм}}^{\text{и}}$  и  $M_{\text{эм}}^{\text{м}}$  обозначены значения электромагнитных моментов в зависимости от скольжения  $s$ , полученные по результатам испытаний и моделирования соответственно.

Таблица 2.3 – Результаты испытания и численного эксперимента для двигателя НВА-55С по снятию механической характеристики

$s$	$M_{ЭМ}^И, Н \cdot м$	$M_{ЭМ}^М, Н \cdot м$	$\delta, \%$
1	285,2	103,6	63,7
0,946	257,4	109	57,7
0,92	274	111,9	59,2
0,87	278	117,7	57,7
0,72	288	139,6	51,5
0,595	293	164,7	43,8
0,42	306,7	217,7	29,0
0,314	329,4	266	19,2
0,19	366	336,5	8,1
0,128	366,3	353,7	3,4
0,08	326	316,2	3,0
0,018	113	103,1	8,8
0	0	0	0,0

Согласно полученным результатам модель асинхронной машины является адекватной реальному двигателю только для режимов работы в зоне низких скольжений, при  $s < 0,2$ . В зоне высоких скольжений, при  $s > 0,2$ , результат моделирования имеет погрешность свыше 10%.

Обнаруженное расхождение результатов объясняется использованием в конструкции двигателя НВА-55С широкопазового ротора. Для сравнения на рисунке 2.5 приведены эскизы поперечных сечений пазов двигателей НВА-55А и НВА-55С.

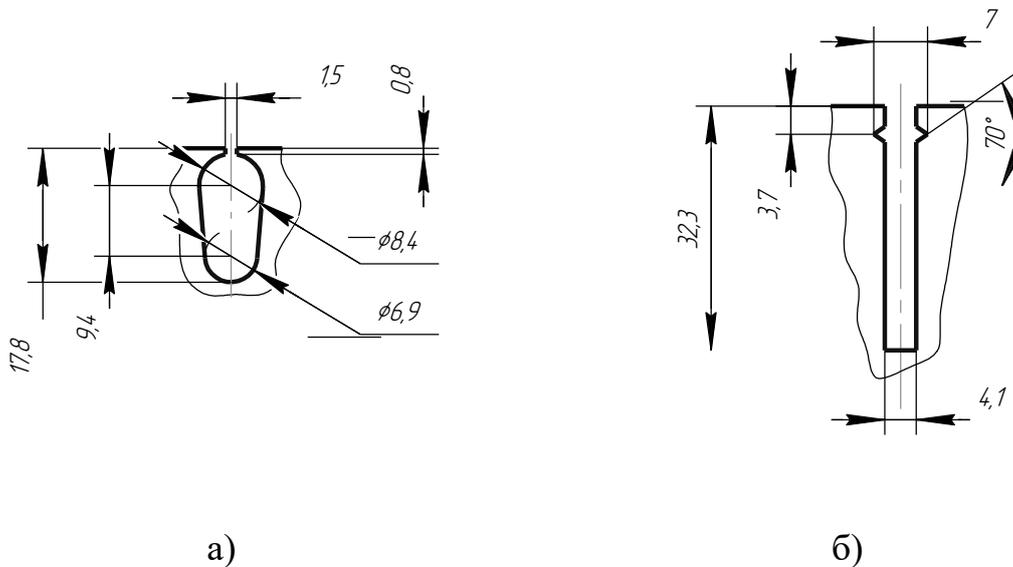


Рисунок 2.5 – Поперечное сечение паза ротора НВА-55А (а) и НВА-55С (б)

Известно, что применение на роторе асинхронного двигателя глубоких пазов за счёт эффекта вытеснения тока позволяет иметь повышенное значение активного сопротивления ротора при пуске машины. Тем самым достигается возможность улучшения пусковых характеристики двигателя.

Способ учёта влияния глубины паза на сопротивление ротора асинхронной машины рассмотрен в [41]. Согласно рассматриваемой в [41] методике активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора может быть представлено в виде сумм составляющих от пазовых и лобовых частей обмотки.

$$R'_R = K_W \cdot R'_{R\Pi} + R'_{R\sigma} \quad (2.2)$$

$$x'_{R\sigma} = K_B \cdot x'_{R\sigma\Pi} + x'_{R\sigma\sigma} \quad (2.3)$$

где  $K_W$  – коэффициент, учитывающие изменение активного сопротивления пазовой части обмотки под влиянием вытеснения тока (**коэффициент Фильда**);

$K_B$  – коэффициент, учитывающие изменение индуктивного сопротивления пазовой части обмотки под влиянием вытеснения тока;

$R'_{R\Pi}$  – пазовая составляющая активного сопротивления ротора, мм;

$R'_{Rл}$  – лобовая составляющая активного сопротивления ротора, Ом;

$x'_{R\sigma\Pi}$  – пазовая составляющая индуктивного сопротивления рассеяния ротора, Ом;

$x'_{R\sigmaл}$  – лобовая составляющая индуктивного сопротивления рассеяния ротора, Ом.

Коэффициенты  $K_W$  и  $K_B$ , являющиеся функцией скольжения, корректируют пазовую составляющую активного и индуктивного сопротивлений по мере разгона ротора асинхронного двигателя.

Индуктивное сопротивление рассеяния  $x_{R\sigma}$  является составляющей частью для полного индуктивного сопротивления ротора согласно формуле (2.4).

$$x_R = x_{R\sigma} + x_m, \quad (2.4)$$

где  $x_m$  – взаимное индуктивное сопротивление, Ом.

Величина  $x_{R\sigma}$  на порядок ниже величины  $x_m$ , в частности у двигателя НВА-55С  $x_m$  превосходит по значению  $x_{R\sigma}$  в 20 раз. Следовательно, изменение индуктивного сопротивления рассеяния в процессе разгона асинхронного двигателя практически не будет отражаться на его характеристиках. Поэтому в дальнейших расчётах влиянием глубокого паза ротора на величину индуктивного сопротивления пренебрегаем.

Величина коэффициента Фильда  $K_W$  определяется по формуле (2.5).

$$K_W = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}, \quad (2.5)$$

где  $\xi$  – приведённая высота проводника.

Приведённая высота проводника  $\xi$  определяется по формуле (2.6)

$$\xi = h_{\Pi} \cdot \sqrt{\pi \cdot f_2 \cdot \mu \cdot \gamma}, \quad (2.6)$$

где  $f_2$  – частота тока в роторе, Гц;

$\mu$  – магнитная проницаемость материала, Гн/м;

$\gamma$  – удельная проводимость материала, См/м;

$h_{\Pi}$  – высота паза, см.

Согласно [41] для двигателя с обмоткой ротора выполненной из меди  $\gamma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м и  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м при работе на частоте 50 Гц приближенное значение приведённой высоты проводника  $\xi$  может быть определено по формуле (2.7) при условии подстановки высоты паза в сантиметрах.

$$\xi \approx h_{\Pi} \cdot \sqrt{s}, \quad (2.7)$$

где  $s$  – скольжение.

Графически зависимость коэффициента Фильда от скольжения  $K_W(s)$  для двигателя НВА-55С показана на рисунке 2.6.

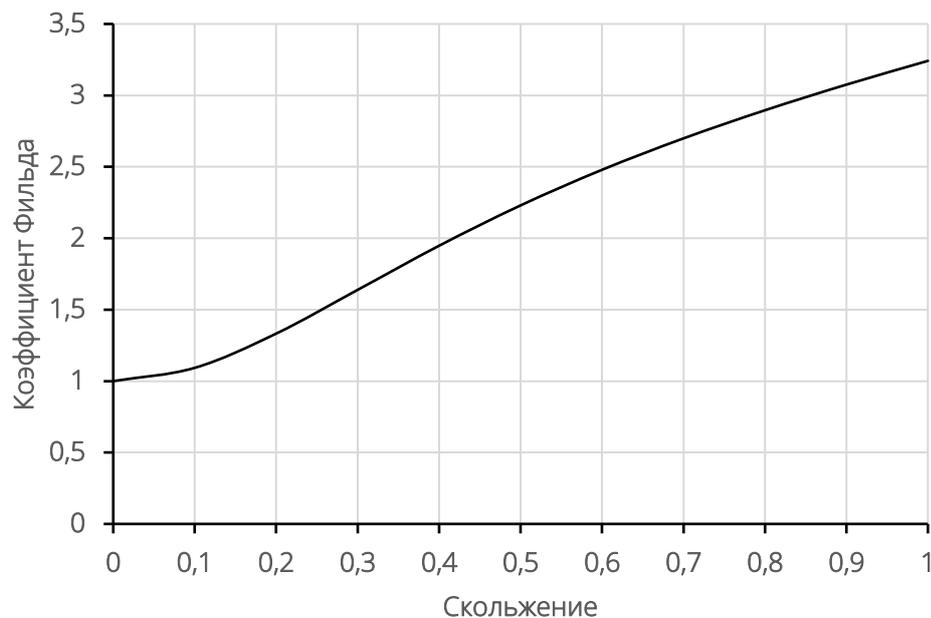


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента Фильда от скольжения для двигателя НВА-55С

Согласно графику, изображённому на рисунке 2.6, влияние коэффициента  $K_W$  на сопротивление обмотки ротора будет особенно проявляться в зоне больших скольжений. При работе двигателя в номинальном режиме  $K_W \approx 1$ , следовательно, явление вытеснения тока практически не проявляется.

Предлагаемый подход по учёту эффекта вытеснения тока может быть учтён в математической модели асинхронного двигателя, рассмотренной в работе к.т.н. А. Н. Паршина [42]. В [42] в качестве исходной принимается модель асинхронной машины, приведённая в [43], описываемая уравнениями (2.8) и (2.9).

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{SA} = R_S \cdot i_{SA} + \frac{d\psi_{SA}}{dt} \\ u_{SB} = R_S \cdot i_{SB} + \frac{d\psi_{SB}}{dt} \\ u_{SC} = R_S \cdot i_{SC} + \frac{d\psi_{SC}}{dt} \\ u_{RA} = R_R \cdot i_{RA} + \frac{d\psi_{RA}}{dt} \\ u_{RB} = R_R \cdot i_{RB} + \frac{d\psi_{RB}}{dt} \\ u_{RC} = R_R \cdot i_{RC} + \frac{d\psi_{RC}}{dt}, \end{array} \right. \quad (2.8)$$

где  $u_{SA}, u_{SB}, u_{SC}, u_{RA}, u_{RB}, u_{RC}$  – мгновенные значения фазных напряжений статора и ротора, В;

$i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}, i_{RA}, i_{RB}, i_{RC}$  – мгновенные значения фазных токов статора и ротора, А;

$R_S, R_R$  – активное сопротивление обмоток статора и ротора, Ом;

$\psi_{SA}, \psi_{SB}, \psi_{SC}, \psi_{RA}, \psi_{RB}, \psi_{RC}$  – мгновенные значения потокосцеплений статорных и роторных обмоток, Вб.

$$J \frac{d\omega_R}{dt} = M_{эм} - M_c, \quad (2.9)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции электропривода, приведённый к валу двигателя, кг · м<sup>2</sup>;

$M_{эм}$  – электромагнитный момент асинхронной машины, Н · м;

$M_c$  – момент сопротивления нагрузки, Н · м.

Уравнения системы (2.8) при их использовании имеют громоздкие решения с несколькими десятками членов. Для упрощения расчётов исходные уравнения

преобразуют, переходя от фазных к другим системам координат. Согласно преобразованиям, проведённым в [42] исходная система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в асинхронной машине может быть записана в виде системы (2.10)

$$\begin{cases} u_{SA} = R_S \cdot i_{SA} + \sigma L_S \frac{di_{SA}}{dt} + e_A \\ u_{SB} = R_S \cdot i_{SB} + \sigma L_S \frac{di_{SB}}{dt} + e_B \\ u_{SC} = R_S \cdot i_{SC} + \sigma L_S \frac{di_{SC}}{dt} + e_C, \end{cases} \quad (2.10)$$

где  $\sigma$  – приведённый коэффициент рассеяния, определяемый согласно формуле (2.11);

$L_S$  – полная индуктивность обмотки статора, Гн;

$e_A, e_B, e_C$  – фазные ЭДС обмоток статора, В.

Значение приведённого коэффициента рассеяния  $\sigma$  определяется по формуле.

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R} = 1 - k_R k_S, \quad (2.11)$$

где  $L_m$  – взаимная индуктивность, Гн;

$L_R$  – полная индуктивность обмотки ротора, Гн;

$k_R$  – коэффициент электромагнитной связи ротора;

$k_S$  – коэффициент электромагнитной связи статора.

Система уравнений (2.10) может быть реализована в среде математического моделирования Simulink в виде блок-диаграммы согласно электрической схеме, показанной на рисунке 2.7.

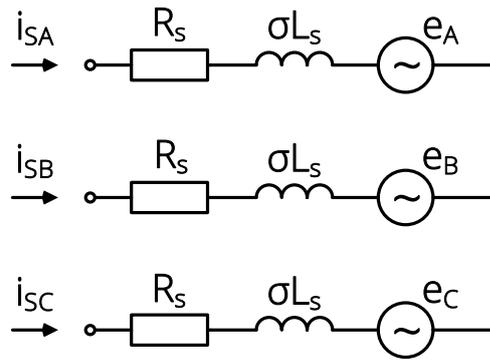


Рисунок 2.7 – Электрическая схема обмотки статора асинхронного двигателя

Фазные ЭДС обмоток статора обеспечивают связь статорной и роторной частей математической модели и определяются формулами (2.12)–(2.14)

$$e_A = k_R \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt}, \quad (2.12)$$

$$e_B = k_R \left[ -\frac{1}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} \right], \quad (2.13)$$

$$e_C = k_R \left[ -\frac{1}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} \right], \quad (2.14)$$

где  $\psi_{R\alpha}$ ,  $\psi_{R\beta}$  – составляющие потокосцепления ротора, разложенные по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , Вб.

Производные потокосцепления ротора определяются через значения фазных токов статора согласно формулам (2.15) и (2.16).

$$\frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} = k_R R_R i_{s\alpha} - \frac{R_R}{L_R} \psi_{R\alpha} - \omega_{R\text{эл}} \psi_{R\beta}, \quad (2.15)$$

$$\frac{d\psi_{R\beta}}{dt} = k_R R_R i_{s\beta} - \frac{R_R}{L_R} \psi_{R\beta} + \omega_{R\text{эл}} \psi_{R\alpha}, \quad (2.16)$$

где  $\omega_{Rэл}$  – частота вращения ротора электрическая, определяемая умножением частоты вращения ротора на число пар полюсов, рад/с;

$i_{S\alpha}, i_{S\beta}$  – составляющие тока статора, разложенные по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , А

$R_R$  – активное сопротивление обмотки ротора, Ом.

Для учёта эффекта вытеснения тока в соответствии с формулой (2.2) величину сопротивления ротора  $R_R$  в формулах (2.15), (2.16) следует скорректировать, разбив её на пазовую и лобовую составляющую с домножением пазовой составляющей на коэффициент Фильда. Доли пазовой и лобовой частей сопротивления ротора  $R_R$  определяются по геометрическим параметрам беличьей клетки ротора согласно [44] по формуле (2.17).

$$R_R \approx \rho \left[ \frac{l_s}{q_s} + \frac{N_r D_r}{2\pi \cdot q_r \cdot z_p^2} \right], \quad (2.17)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала ротора, Ом · м;

$l_s$  – длина стержня беличьей клетки ротора, м;

$q_s$  – площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>;

$N_r$  – число пазов ротора;

$D_r$  – средний диаметр короткозамыкающего кольца, м;

$q_r$  – площадь поперечного сечения короткозамыкающего кольца, м<sup>2</sup>;

$z_p$  – число пар полюсов.

Для асинхронного двигателя НВА-55С, исходя из данных представленных в [37], доля пазовой составляющей активного сопротивления ротора – 81,2%, а доля лобовой составляющей – 18,8%.

С учётом формулы (2.2), выражения для определения производных потокосцеплений ротора с учётом эффекта вытеснения тока примут следующий вид

$$\frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} = k_R \cdot i_{S\alpha} \cdot [K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}] - \frac{K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}}{L_R} \psi_{R\alpha} - \omega_{RЭл} \psi_{R\beta}, \quad (2.18)$$

$$\frac{d\psi_{R\beta}}{dt} = k_R \cdot i_{S\beta} \cdot [K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}] - \frac{K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}}{L_R} \psi_{R\beta} + \omega_{RЭл} \psi_{R\alpha}. \quad (2.19)$$

Механическая часть модели описывается дифференциальным уравнением (2.9) и может быть представлена в виде кинематической схемы, показанной на рисунке

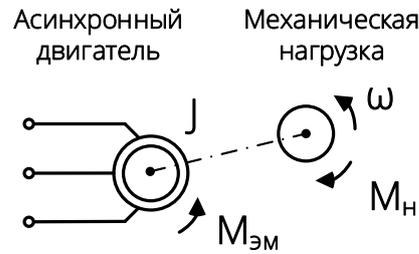


Рисунок 2.8 – Схема механики асинхронной машины

Согласно [42] электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется уравнением (2.20).

$$M_{ЭМ} = \frac{3}{2} z_p k_R [\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}], \quad (2.20)$$

Структурная схема математической модели с учётом эффекта вытеснения тока в глубокопазовом роторе, составленная на основании приведённых выше выкладок, показана на рисунке 2.9.

Описанная математическая модель асинхронного двигателя была реализована в виде подсистемы в программном пакете Simulink. Оценка адекватности полученной модели производилась аналогично оценке стандартного блока моделирования асинхронной машины Asynchronous Machine SI Units библиотеки SimPowerSystems пакета Simulink, согласно схеме, изображённой на рисунке 2.3.

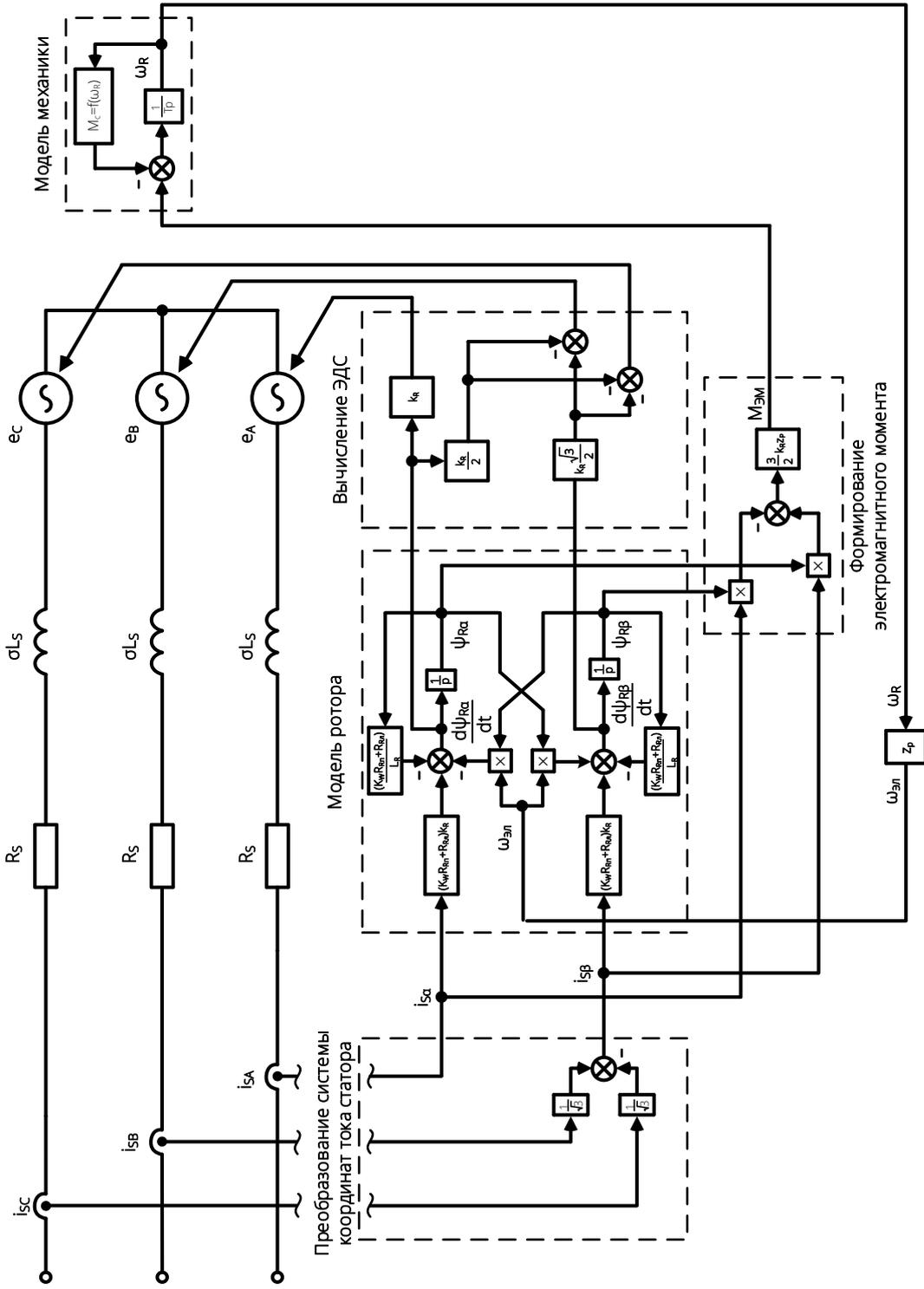


Рисунок 2.9 – Структурная схема математической модели асинхронного двигателя с учётом вытеснения тока в глубокополюсовом роторе

На рисунке 2.10 графически представлены механические характеристики, полученные по результатам испытаний двигателя НВА-55С и по результатам расчёта на реализованной модели.

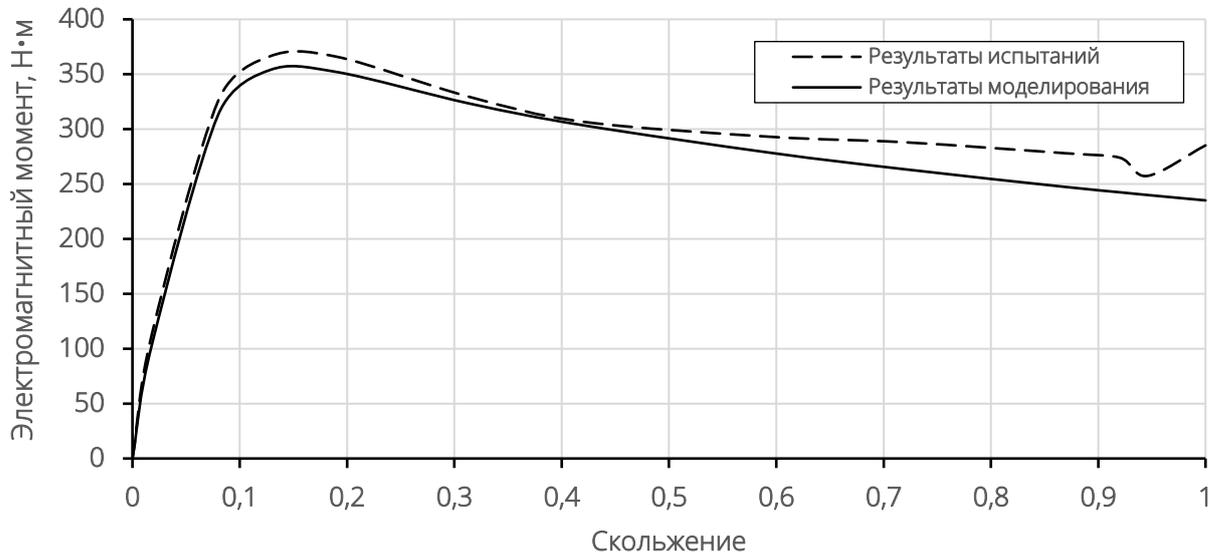


Рисунок 2.10 – Механические характеристики двигателя НВА-55С, построенные по результатам испытаний и результатам моделирования (с учётом эффекта вытеснения тока в обмотке ротора)

В численной форме полученные зависимости показаны в таблице 2.4, в ней же приведена относительная погрешность для результатов, полученных при помощи моделирования.

Таблица 2.4 – Результаты испытания и численного эксперимента с реализованной моделью для двигателя НВА-55С по снятию механической характеристики

$s$	$M_{ЭМ}^И, Н \cdot м$	$M_{ЭМ}^М, Н \cdot м$	$\delta, \%$
1	285,2	235,1	17,6
0,946	257,4	240	6,8
0,92	274	242,5	11,5
0,87	278	247,3	11,0
0,72	288	263,4	8,5
0,595	293	278,4	5,0
0,42	306,7	303,5	1,0
0,314	329,4	323,3	1,9
0,19	366	352,1	3,8
0,128	366,3	353,8	3,4
0,08	326	313,3	3,9
0,018	113	103,3	8,6
0	0	0	0,0

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной точности математической модели. Превышение погрешности, имеющее место на небольшом интервале работы, при скольжении близком к единице, объясняется допущениями, принятыми в модели, в частности пренебрежением влияния эффекта вытеснения тока на индуктивность ротора.

В таблице 2.5 сопоставлены паспортные данные электродвигателя НВА-55С с аналогичными данными, полученными для реализованной математической модели.

Согласно таблице 2.5 величина погрешности расчёта по отношению паспортным данным не превышает 5%, что говорит о достаточной точности реализованной модели асинхронного двигателя с учётом эффекта вытеснения тока и возможности её применения в дальнейших расчётах.

Таблица 2.5 – Паспортные данные двигателя НВА-55С в сравнении с параметрами модели

Параметр	НВА-55С	Модель	$\delta$ , %
Номинальное линейное напряжение, В	380	380	0
Номинальный фазный ток, А	116,3	115,7	0,5
Номинальная частота вращения, об/мин	1473	1473	0
Номинальный момент, Н·м	357,5	372,8	4,3
Номинальная мощность, Вт	59859	60380	0,9
Номинальный $\cos(\varphi)$	0,782	0,793	1,4
Номинальный КПД	0,922	0,952	3,3

## 2.4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

В качестве тягового двигателя электровоза 2ЭС5К используется коллекторный двигатель НБ-514Б [36]. Технические характеристики продолжительного режима двигателя НБ-514Б показаны в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Технические характеристики тягового двигателя НБ-514Б

Параметры	Значения
Номинальная мощность, кВт	765
Номинальный ток якоря, А	810
Номинальная частота вращения, об/мин	940
КПД, %	94,7
Сопротивление обмотки якоря, Ом	0,0112
Сопротивление главных полюсов (без шунта), Ом	0,0069
Сопротивление компенсационной обмотки и добавочных полюсов, Ом	0,0125

В работе используется математическая модель тягового двигателя электровоза, предложенная и описанная в работах [45], [46]. Рассматриваемая модель состоит из последовательной цепочки, содержащей индуктивность, активное сопротивление и источник напряжения, согласно схеме, показанной на рисунке 2.11



Рисунок 2.11 – Схема-замещения коллекторного двигателя постоянного тока

Напряжение, прикладываемое к такой цепи определяется согласно выражению

$$U_d = e_d + r_d \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt}, \quad (2.21)$$

где  $e_d$  – электродвижущая сила вращения двигателя, В;

$r_d$  – активное сопротивление цепи двигателя (обмоток якоря, дополнительных полюсов, компенсационных обмоток и обмоток возбуждения), Ом;

$i_d$  – ток двигателя, А;

$L_d$  – индуктивность цепи двигателя (обмоток якоря, дополнительных полюсов, компенсационных обмоток и обмоток возбуждения), Гн.

На одной секции электровоза 2ЭС5К установлены 4 тяговых электродвигателя. Питание двигателя получают от выпрямительно-инверторных преобразователей, причём на каждые два двигателя приходится один преобразователь.

Для повышения скорости расчётов в математической модели все тяговые двигатели заменены одним эквивалентным, получающим питание от одной выпрямительной установки. Согласно [47] сопротивления всех обмоток эквивалентного двигателя определяются согласно формуле:

$$Z_{дэ} = \frac{m}{n} \cdot Z_d, \quad (2.22)$$

где  $m$  – число последовательно включённых двигателей;

$n$  – число параллельно включённых двигателей;

$Z_d$  – полное сопротивление обмоток одного двигателя, Ом.

## 2.5 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЭЛЕКТРОВОЗА

Моделирование трансформатора в рамках работы осуществляется путём использования стандартного блока моделирования многообмоточных трансформаторов пакета Simulink библиотеки SimPowerSystems – *Multi-Winding Transformer* [38]. Вопрос моделирования тягового трансформатора электровоза также освещён в работах [49], [50], [46].

Тяговый трансформатор электровоза выполняет преобразование напряжения контактной сети в напряжение питания тяговых двигателей, цепей вспомогательных машин. На электровозе 2ЭС5К в качестве тягового используется трансформатор ОНДЦЭ-4350/25, технические параметры которого приведены в [51], [52]. Схема обмоток трансформатора ОНДЦЭ-4350/25 показана на рисунке 2.12. Используемая в модели расчётная схема замещения трансформатора показана на рисунке 2.13.

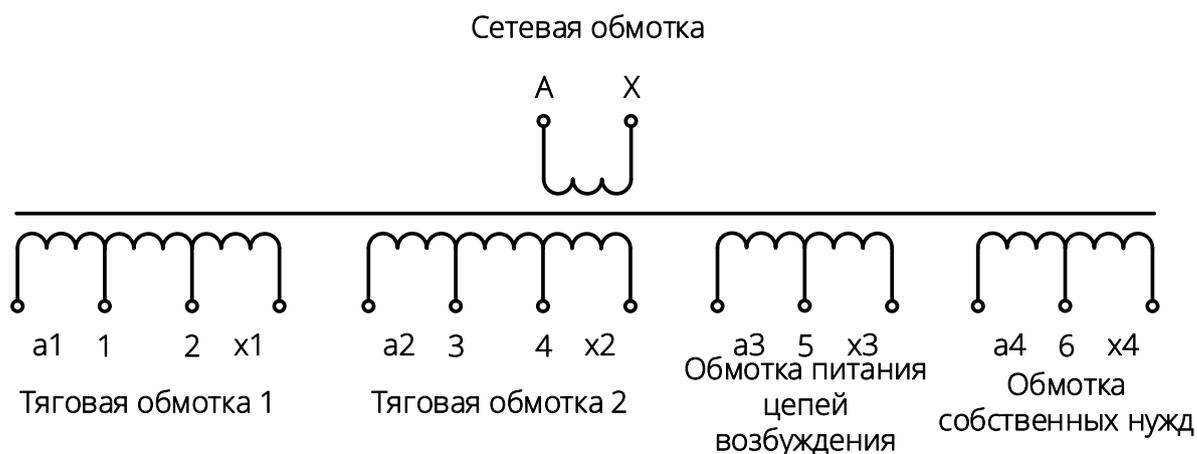


Рисунок 2.12 – Схема обмоток тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25 электровоза 2ЭС5К

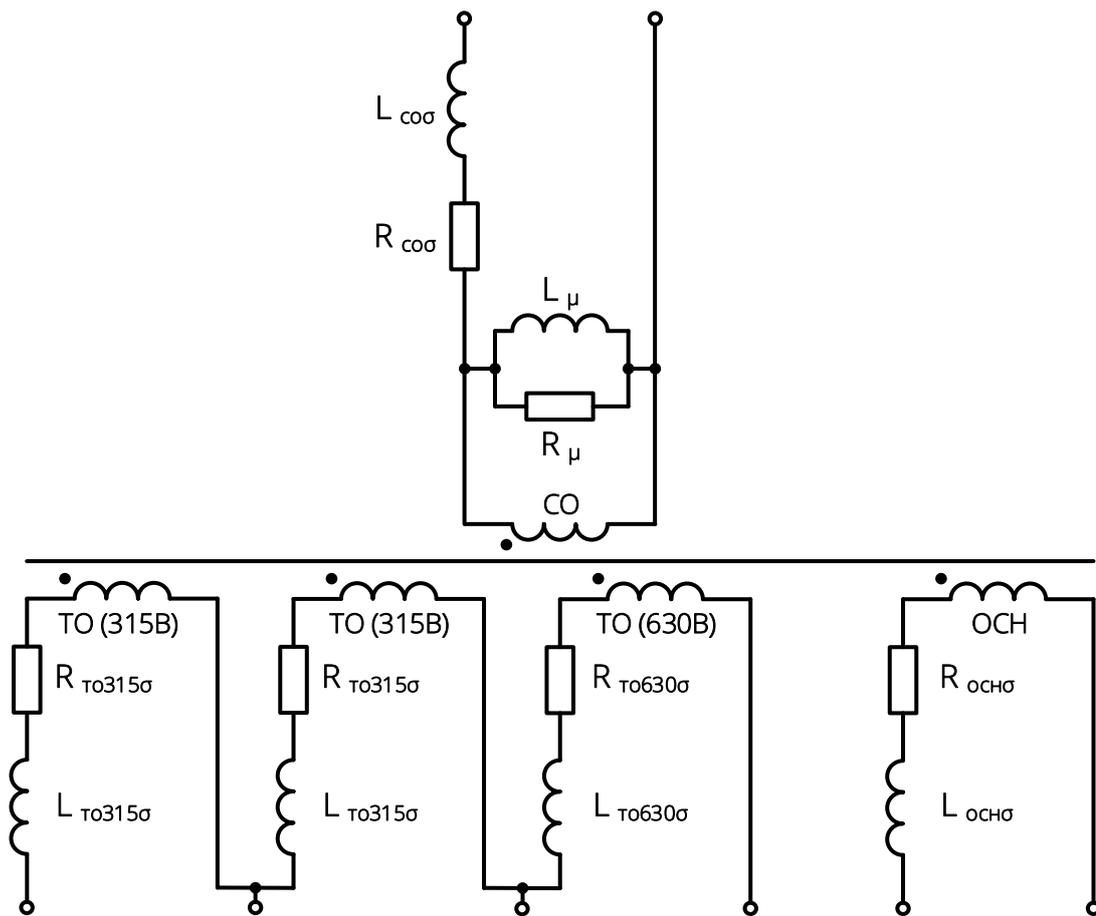


Рисунок 2.13 – Расчётная схема замещения тягового трансформатора электровоза 2ЭС5К

На рисунке 2.13 приняты следующие обозначения:

- $L_{co\sigma}$  – индуктивность рассеяния сетевой обмотки;
- $R_{co\sigma}$  – активное сопротивление сетевой обмотки;
- $L_{\mu}$  – индуктивность цепи намагничивания;
- $R_{\mu}$  – активное сопротивление цепи намагничивания;
- $L_{TO315\sigma}$  – индуктивность рассеяния секции тяговой обмотки с номинальным напряжением 315 В;
- $R_{TO315\sigma}$  – активное сопротивление секции тяговой обмотки с номинальным напряжением 315 В;
- $L_{TO630\sigma}$  – индуктивность рассеяния секции тяговой обмотки с номинальным напряжением 630 В;

–  $R_{\text{то}630\sigma}$  – активное сопротивление секции тяговой обмотки с номинальным напряжением 630 В;

–  $L_{\text{осн}\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки собственных нужд;

–  $R_{\text{осн}\sigma}$  – активное сопротивление обмотки собственных нужд.

Технические характеристики обмоток трансформатора, необходимые для моделирования взяты из [51], [52] и дополнительно представлены в таблице 2.7. Методика расчёта параметров трансформаторов изложена в [53].

Таблица 2.7 – Технические характеристики сетевой, тяговых и обмотки собственных нужд трансформатора ОНДЦЭ-4350/25

Параметры		Значения
Номинальная мощность трансформатора, кВА		4350
Номинальная частота питающей сети, Гц		50
Ток холостого хода, %		0,8
Потери холостого хода, кВт		3,7
Потери короткого замыкания, кВт		56,8
Суммарные потери		60,5
Сетевая обмотка (СО)	Номинальная мощность, кВА	4345
	Номинальный ток, А	173,8
	Номинальное напряжение, В	25000
	Активное сопротивление обмотки, Ом	0,8863
Тяговые обмотки (ТО1, ТО2)	Номинальная мощность, кВА	2x2016
	Номинальное напряжение на зажимах а1–х1, а2–х2, В	1260
	Номинальное напряжение на зажимах а1–2, 2–х1, а2–4, 4–х2, В	630
	Номинальное напряжение на зажимах а1–1, 1–2, а2–3, 3–4, В	315
	Номинальный ток обмотки и её частей, А	1600
	Активное сопротивление обмотки, Ом	0,0045
Обмотка собственных нужд	Номинальная мощность, кВА	201
	Номинальное напряжение между выводами а4–х4, В	405
	Номинальное напряжение между выводами а4–6, В	229
	Номинальный ток обмотки и её частей, А	500
	Активное сопротивление обмотки, Ом	0,0068
Напряжение короткого замыкания между каждой тяговой обмоткой и сетевой обмоткой, отнесённое к мощности соответствующей тяговой обмотки, %		7,0
Напряжение короткого замыкания между двумя тяговыми обмотками и сетевой обмоткой, отнесённое к общей мощности тяговых обмоток, %		7,0
Напряжение короткого замыкания между обмоткой собственных нужд и сетевой обмоткой, отнесённое к мощности обмотки собственных нужд, %		3,0

Необходимые для моделирования величины активных сопротивлений обмоток известны и представлены в таблице 2.7. Величины индуктивностей обмоток определяются на основании результатов опытов короткого замыкания, представленных в таблице 2.7. Для опыта короткого замыкания двух тяговых обмоток модуль комплексного сопротивления трансформатора

$$|z| = \sqrt{\left[r_{co} + \frac{r'_{то}}{2}\right]^2 + \left[x_{co\sigma} + \frac{x'_{то\sigma}}{2}\right]^2}, \quad (2.23)$$

где  $r_{co}$  – активное сопротивление сетевой обмотки, Ом;

$r'_{то}$  – приведённое активное сопротивление тяговой обмотки, Ом;

$x_{co\sigma}$  – индуктивное сопротивление сетевой обмотки, Ом;

$x'_{то\sigma}$  – приведённое индуктивное сопротивление тяговой обмотки, Ом.

Величина модуля комплексного сопротивления трансформатора также может быть вычислена по результатам опыта короткого замыкания по формуле:

$$|z| = \frac{U_{кз}}{I_{co}}, \quad (2.24)$$

где  $U_{кз}$  – напряжение короткого замыкания, В;

$I_{co}$  – ток сетевой обмотки при опыте короткого замыкания, А.

Используя уравнения (2.23), (2.24) и зная значения активных сопротивлений обмоток, получили уравнение

$$x_{co\sigma} + \frac{1}{2}x'_{то\sigma} = 10,705. \quad (2.25)$$

Неизвестные значения  $x_{co\sigma}$  и  $x'_{то\sigma}$  в (2.25) определили с учётом допущения, что

$$x_{co\sigma} = \frac{1}{2}x'_{то\sigma} \quad (2.26)$$

В результате расчёта и последующих преобразований индуктивных сопротивлений в величины индуктивностей получили  $L_{\text{со}\sigma} = 0,017$  Гн,  $L_{\text{то}\sigma} = 8,637 \cdot 10^{-5}$  Гн. Параметры секций тяговых обмоток определили, учитывая их номинальные напряжения 315 В, 315 В и 630 В, и с учётом дальнейшей замены двух тяговых обмоток трансформатора одной эквивалентной. Результаты расчёта параметров сетевой и тяговой обмоток представлен в таблице 2.8

Параметры обмотки собственных нужд определили аналогичным образом, используя данные об опыте короткого замыкания обмотки и данные об активном сопротивлении обмотки. Результат расчёта приведён в таблице 2.8.

Расчёт параметров цепи намагничивания  $L_{\mu}$  и  $R_{\mu}$  производится на основании результатов опыта холостого хода, показанных в таблице 2.7, по следующим формулам.

$$x_{\mu} = \frac{U_{\text{со}}}{I_{\text{хх}}}, \quad (2.27)$$

где  $U_{\text{со}}$  – номинальное напряжение холостого хода, В;

$I_{\text{хх}}$  – ток холостого хода, А.

$$r_{\mu} = \frac{U_{\text{со}}^2}{P_{\text{хх}}}, \quad (2.28)$$

где  $P_{\text{хх}}$  – потери холостого хода, Вт.

Результаты расчёта параметров контура намагничивания показаны в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Параметры модели трансформатора

Параметры		Значения
Номинальная мощность трансформатора, кВА		4350
Номинальная частота питающей сети, Гц		50
Сопротивление цепи намагничивания, Ом		168900
Индуктивность цепи намагничивания, Гн		57,232
Активные сопротивления обмоток, Ом	Сетевая обмотка	0,8863
	Тяговая обмотка (секция 630 В)	0,001125
	Тяговая обмотка (секция 315 В)	0,0005625
	Обмотка собственных нужд	0,0068
Индуктивности рассеяния обмоток, Гн	Сетевая обмотка	0.017
	Тяговая обмотка (секция 630 В)	2.159e-5
	Тяговая обмотка (секция 315 В)	1.08e-5
	Обмотка собственных нужд	7.003e-5

Оценка адекватности модели трансформатора произведена путём сравнения результатов опыта холостого хода и короткого замыкания приведёнными в паспорте с результатами аналогичных опытов, проведённых на модели. В численной форме сравнение результатов показано в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Оценка адекватности модели тягового трансформатора

Параметр	По паспорту	Моделирование	$\delta$ , %
Напряжение КЗ тяговой обмотки, %	7,0	7,0	0
Напряжение КЗ обмотки собственных нужд, %	3,0	3,0	0
Ток холостого хода, %	0,08	0,0805	0,63

Полученные результаты свидетельствуют о приемлемой точности модели тягового трансформатора электровоза.

## 2.6 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Питание электровозов в пути следования осуществляется от тяговых подстанций через контактную сеть. При этом для достижения требуемого напряжения на токоприёмнике электровоза контактная сеть разделена на фидерные зоны определённой длины, получающие питание от своих тяговых подстанций. В зависимости от типа электроподвижного состава (постоянного тока или переменного), особенностей географического расположения железнодорожной линии конкретная конфигурация контактной сети может быть различной. Однако в среднем для линий, электрифицированных переменным током, значения расстояний между соседними тяговыми подстанциями – 50 км (напряжение 25 кВ) и 80 км (напряжение 2x25 кВ) [54].

В рамках данной работы модель контактной сети строится на базе четырёхполюсников, согласно схеме, показанной на рисунке 2.14.

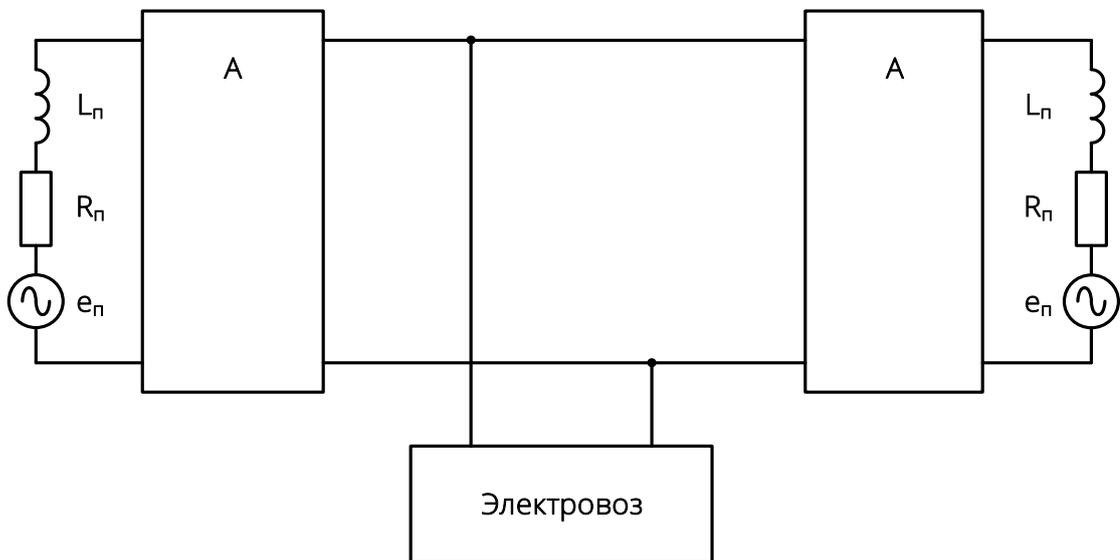


Рисунок 2.14 – Схема замещения контактной сети для случая двустороннего питания

Также на рисунке 2.14 показаны последовательные цепи, моделирующие тяговые подстанции. Соответственно  $e_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{п}}$  и  $L_{\text{п}}$  – это напряжение, активное

сопротивление и индуктивность тяговых подстанций. В случае рассмотрения консольного питания одна из таких цепей исключается из схемы.

В общем случае параметры четырёхполюсников, моделирующих участки контактной сети между электровозом и подстанциями определяются координатой электровоза относительно тяговых подстанций. В данной работе рассматриваются только 3 варианта местоположения электровоза:

- в начале фидерной зоны;
- в середине фидерной зоны;
- в конце фидерной зоны при консольном питании.

Схема внутренней структуры четырёхполюсника, моделирующего участок контактной сети имеет вид, показанный на рисунке 2.15 [55].

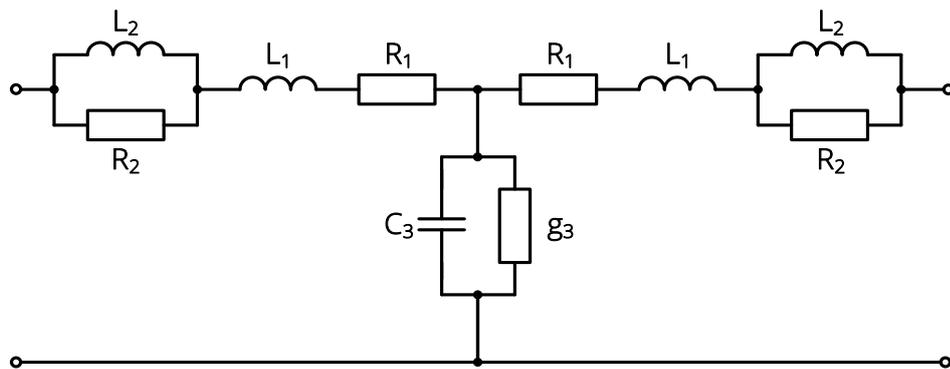


Рисунок 2.15 – Схема замещения участка контактной сети

Величины элементов схемы определяются техническими параметрами контактной сети (провод, марка рельса и т. д.). Составляющие  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $C_3$ ,  $g_3$  определяют продольное и поперечное сопротивление сети, а составляющие  $L_2$ ,  $R_2$  определяют сопротивление, вызванное эффектом вытеснения тока.

В модели в качестве расчётного принят участок длиной 60 км. Согласно [50] параметры схемы замещения для такого участка имеют следующие значения:

- $L_1 = 7,16$  мГн;
- $R_1 = 0,93$  Ом;
- $L_2 = 1,26$  мГн;
- $R_2 = 8,18$  Ом;

$$- C_3 = 0,435 \text{ мкФ};$$

$$- g_3 = 15 \text{ мкСм.}$$

Параметры элементов цепи, моделирующей тяговые подстанции, также приняты согласно [50]:

$$- L_{\Pi} = 0,123 \text{ Гн};$$

$$- R_{\Pi} = 0,2 \text{ Ом.}$$

## **2.7 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН**

### **2.7.1 НАГРУЗКА МОТОР-КОМПРЕССОРА**

В работе исследуется два варианта механической нагрузки вспомогательных асинхронных двигателей: компрессорная и вентиляторная.

Момент сопротивления компрессора зависит от противодействия в напорной магистрали, максимальное значение которого составляет 0,9 МПа. С целью уменьшения нагрузки на вал двигателя в момент пуска участок пневмомагистрали от компрессора до обратного клапана сообщается с атмосферой при помощи разгрузочного клапана [51]. Для снабжения пневматической системы электровоза 2ЭС5К сжатым воздухом в системе вспомогательных машин используется блок мотор-компрессора ВУ 3,5/10, паспортные данные которого показаны в таблице 2.10 [56].

Таблица 2.10 – Технические характеристики мотор-компрессора электровоза 2ЭС5К

Параметры	Значения
Номинальное напряжение электродвигателя, В	380
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	55
Частота вращения, об/мин	1450
Производительность компрессора, м <sup>3</sup> /мин	3,5
Максимальное рабочее давление компрессора, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	1 (10)

Согласно [30] момент сопротивления компрессора в Н·м описывается уравнениями (2.29), (2.30).

$$M_c = \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_R \leq 0 \\ 91,5 \cdot P + 84,7 & \text{при } \omega_R > 0 \end{cases}, \quad (2.29)$$

где  $P$  – противодействие, МПа.

$$P = \begin{cases} \frac{\varphi_R}{10} \cdot 0,6 & \text{при } \varphi_R \in [0 \dots 6] \\ 0,9 & \text{при } \varphi_R > 6 \end{cases}, \quad (2.30)$$

где  $\varphi_R$  – угол поворота ротора, рад.

Момент сопротивления компрессора в номинальном режиме работы составляет 157,9 Н·м. При этом пусковой момент может достигать 2,5 номинальных значений [30], [57].

### 2.7.2 НАГРУЗКА МОТОР-ВЕНТИЛЯТОРА

Момент сопротивления мотор-вентилятора непостоянен и зависит от скорости вращения. В системе вентиляции электровоза 2ЭС5К применяются

центробежные вентиляторы Ц9-37,6-7,6 и ЦВ9-37,6-7,6, параметры которых показаны в таблице 2.11 [56].

Таблица 2.11 – Технические характеристики вентиляторов электровоза 2ЭС5К

Тип вентилятора	ЦВ9-37,6-7,6	Ц9-37,6-7,6
Номинальная производительность, м <sup>3</sup> /мин	265	225
Полное давление, даПа (кг/м <sup>2</sup> )	336 (343)	345 (352)
Мощность на валу электродвигателя, кВт	24	20
Эффективность очистки воздуха от снега, %	90	-
Максимальный КПД	0,6	0,615
Частота вращения, об/мин	1470	1470

В качестве расчётного принимается вентилятор, момент сопротивления которого согласно [30] описывается квадратичной зависимостью

$$M_c = 0,0032 \cdot \omega_R^2 + 0,45 \cdot \omega_R + 15,8. \quad (2.31)$$

Пусковое значение момента сопротивления мотор-вентилятора обусловленное трением в подшипниках составляет 15,8 Н·м. Значение момента сопротивления в номинальном режиме – 161,4 Н·м.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 3.1 ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО ПИТАНИЯ НА РАБОТУ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронный двигатель является наиболее распространённой в промышленности электрической машиной – порядка 90% всех электрических двигателей в мире являются асинхронными [58]. В нормальных условиях асинхронный двигатель получает питание от симметричной трёхфазной системы напряжений, под которой следует понимать совокупность трёх переменных напряжений:

$$\begin{cases} u_A = U_{A \max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_A) \\ u_B = U_{B \max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_B), \\ u_C = U_{C \max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_C) \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $U_{A \max}$ ,  $U_{B \max}$ ,  $U_{C \max}$  – амплитудные напряжения в соответствующих фазах В;

$\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  – фазовые сдвиги в соответствующих фазах, рад;

$\omega$  – круговая частота, рад/с.

При этом симметричной трёхфазной системой является такая система напряжений, для которой равны амплитуды напряжений в отдельных фазах, а взаимное смещение этих напряжений составляет  $2\pi/3$ . Если не выполняется хотя бы одно из этих условий, то система становится несимметричной. Для анализа и расчёта несимметричных режимов в трёхфазных системах применяют метод симметричных составляющих, согласно которому несимметричную систему трёх

величин одинаковой частоты можно представить в виде суммы трёх систем симметричных величин: нулевой, прямой и обратной последовательностей [55].

Величины векторов напряжений нулевой ( $\dot{U}_0$ ), прямой ( $\dot{U}_1$ ) и обратной ( $\dot{U}_2$ ) последовательностей определяются согласно уравнениям (3.2) – (3.4).

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \quad (3.2)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_A + a \cdot \dot{U}_B + a^2 \cdot \dot{U}_C), \quad (3.3)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_A + a^2 \cdot \dot{U}_B + a \cdot \dot{U}_C), \quad (3.4)$$

где  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – вектора напряжений фаз А, В, С соответственно, В,

$a$  – поворотный множитель трёхфазной системы ( $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ ).

Степень несимметрии оценивают отношением составляющей напряжения обратной последовательности к составляющей прямой последовательности, выраженным в процентах:

$$k_{2u} = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} \cdot 100, \quad (3.5)$$

где  $|\dot{U}_2|$  – модуль вектора обратной последовательности напряжения, В;

$|\dot{U}_1|$  – модуль вектора прямой последовательности напряжения, В.

Это отношение называют коэффициентом несимметрии по обратной последовательности. Приведённые выше выражения (3.2)–(3.5) также применимы и для трёхфазной системы токов. Коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности, выраженный в процентах, определяется аналогичным образом:

$$k_{2i} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \cdot 100, \quad (3.6)$$

где  $|I_2|$  – модуль вектора обратной последовательности тока, А;

$|I_1|$  – модуль вектора прямой последовательности тока, А.

Согласно [59] несимметрия напряжения в 2% снижает КПД двигателя на 1%, а несимметрия 3,5% – примерно на 3%. Таким образом несимметричное питание является нежелательным с точки зрения экономии электроэнергии. Максимально допустимая величина коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в точках общего подключения к электрическим сетям нормируется стандартом [60] и составляет 4%.

Для оценки воздействия несимметричного питания на обмотки асинхронной машины рассмотрим её схему замещения. Скольжение для прямой и обратной последовательности по-разному влияет на активное сопротивление цепи ротора, как показано на рисунке 3.1 [61].

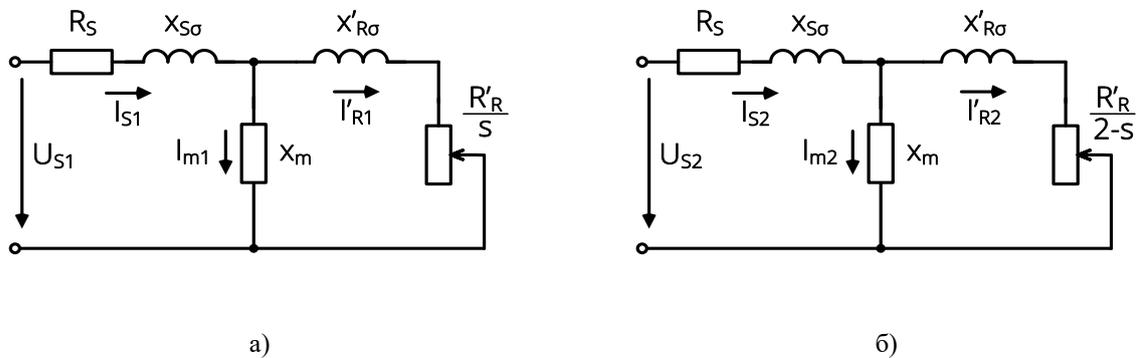


Рисунок 3.1 – Схемы замещения асинхронной машины для прямой (а) и обратной последовательностей (б)

Схема замещения для обратной последовательности отличается цепью нагрузки, которая зависит от скольжения по отношению к полю обратной последовательности

$$s_2 = 2 - s, \quad (3.7)$$

где  $s$  – скольжение.

Согласно (3.7), а также схемам замещения сопротивления в цепи ротора для прямой ( $R'_R/s$ ) и обратной ( $R'_R/(2-s)$ ) полей будет вести себя по-разному, при этом в номинальном режиме величина сопротивления для обратного поля будет на два порядка меньше величины сопротивления для прямого поля. В таблице 3.1 приведены величины сопротивлений цепи ротора для вспомогательных двигателей АНЭ-225, НВА-55А, НВА-55С в зависимости от величины номинального скольжения.

Таблица 3.1 – Влияние скольжения на сопротивления цепи ротора для прямой и обратной последовательностей

Показатель	АНЭ-225	НВА-55А	НВА-55С
$s_{nom}$	0,045	0,04	0,018
$R'_R/s$	$22,1 \cdot R'_R$	$25,0 \cdot R'_R$	$55,6 \cdot R'_R$
$R'_R/2-s$	$0,512 \cdot R'_R$	$0,510 \cdot R'_R$	$0,505 \cdot R'_R$

Для рассмотренных двигателей величина тока обратной последовательности, вызванного обратной последовательностью напряжений будет ограничена незначительным сопротивлением цепи ротора. Данный факт говорит о том, что незначительное по величине отклонение в симметрии питающих напряжений провоцирует появление больших токов обратной последовательности, приводящих к дополнительному нагреву конструкций двигателя, в частности – его обмоток.

### 3.2 ПИТАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНДЕНСАТОРОВ

Обеспечить трёхфазный асинхронный электродвигатель симметричным питанием при подключении к однофазной сети возможно при помощи фазосдвигающих конденсаторов (см. рисунок 3.2).

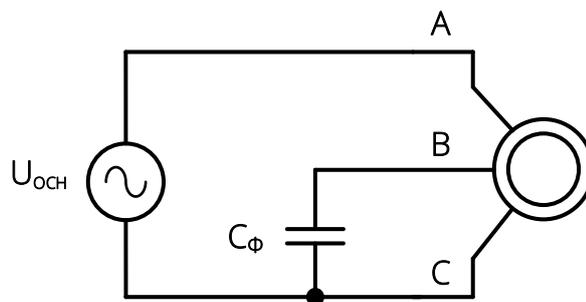


Рисунок 3.2 – Конденсаторная схема питания асинхронной машины

Подобные схемы нашли достаточно широкое применение на электроподвижном составе для питания вспомогательных машин. Формирование симметричной трёхфазной питающей системы происходит за счёт напряжения  $U_\phi$  на фазосдвигающей ёмкости  $C_\phi$ , равного по амплитуде напряжению питающей сети  $U_{\text{сети}}$  и сдвинутого относительно него на угол 60 градусов, согласно векторной диаграмме, показанной на рисунке 3.3.

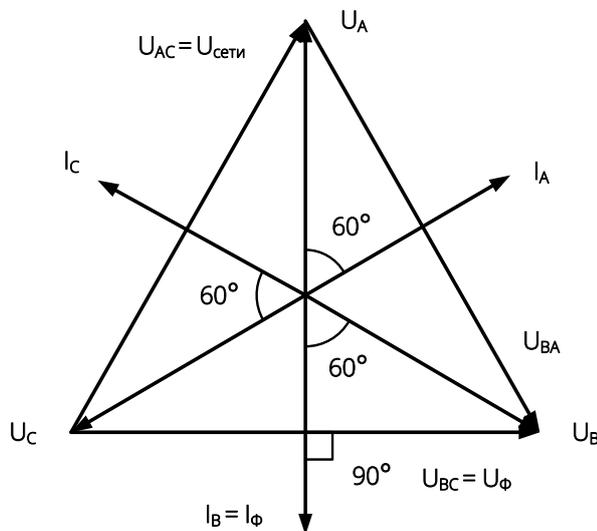


Рисунок 3.3 – Векторная диаграмма симметричного режима работы конденсаторной схемы питания асинхронной машины

При этом напряжение сети  $U_{\text{сети}}$  для двигателя является линейным напряжением  $U_{AC}$ , а напряжение на фазосдвигающей ёмкости – линейным

напряжением  $U_{BC}$ . В симметричном режиме напряжение на фазосдвигающей ёмкости  $U_\phi$  связано с величиной этой ёмкости равенством

$$|\dot{U}_{BC}| = |\dot{I}_B| \frac{1}{\omega \cdot C_\phi}. \quad (3.8)$$

На основании (3.8) определяется необходимая величина фазосдвигающей ёмкости

$$C_\phi = \frac{|\dot{I}_B|}{\omega \cdot |\dot{U}_{BC}|}. \quad (3.9)$$

На время пуска машины параллельно рабочей фазосдвигающей ёмкости подключается пусковая, величина которой в 2–3 раза больше рабочей [62]. Следует отметить, что выбор фазосдвигающего сопротивления по формуле (3.9) справедлив для случая работы двигателя с коэффициентом мощности 0,5. Конденсаторная схема может работать в симметричном режиме, когда механическая нагрузка асинхронной машины обеспечивает потребление из сети тока с коэффициентом мощности 0,5, в соответствии с векторной диаграммой, показанной на рисунке 3.3.

В соответствии с вышесказанным, выбор необходимой ёмкости осуществляется по характеристикам тока и коэффициента мощности асинхронного двигателя, построенным для заданного напряжения источника однофазного питания. В рассматриваемом случае таким источником является обмотка собственных нужд с напряжением 405 В.

Характеристики тока и коэффициента мощности рассчитываются на основании уравнений (3.10), (3.11).

$$I_S = \left| \frac{\dot{U}_S}{\dot{Z}_{AD}} \right|, \quad (3.10)$$

где  $\dot{U}_S$  – комплексная величина напряжения статора, В;

$\dot{Z}_{AD}$  – эквивалентное комплексное сопротивление схемы замещения асинхронного двигателя, Ом.

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{Re}(I_s)}{|I_s|}, \quad (3.11)$$

Графически полученные для двигателя НВА-55С характеристики тока и коэффициента мощности при напряжении источника питания 405 В показаны на рисунке 3.4,

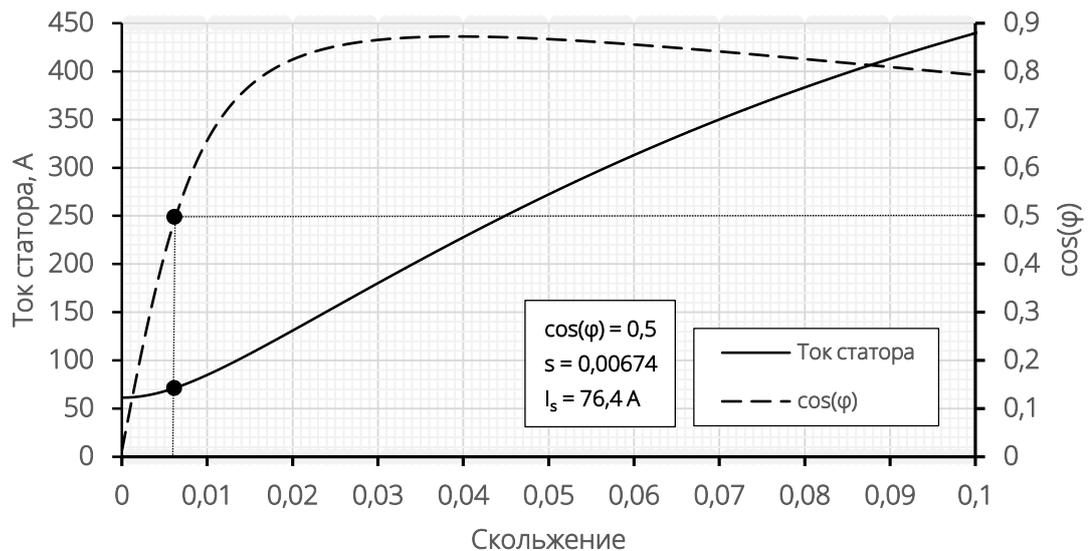


Рисунок 3.4 – Характеристики тока и коэффициента мощности двигателя НВА-55С при напряжении питания 405 В

Расчёт показывает, что двигатель при выбранном напряжении работает с коэффициентом мощности 0,5, потребляя ток 76,4 А со скольжением 0,00674. Согласно (3.9) требуемая величина ёмкости для такого режима

$$C_{\phi} = \frac{76,4}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 405} = 600,073 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \approx 600 \text{ мкФ}.$$

Величина электромагнитного момента, соответствующая найденным значениям скольжения и тока определяется по механической характеристике двигателя. Согласно [41] электромагнитный момент асинхронной машины вычисляется по формуле

$$M_{\text{эм}} = \frac{m_S \cdot U_S^2 \cdot R'_R}{\omega_S \cdot s \cdot \left[ \left( R_S + \frac{R'_R}{s} \right)^2 + (x_{S\sigma} + x'_{R\sigma})^2 \right]}, \quad (3.13)$$

где  $m_S$  – число фаз двигателя.

Сопротивление ротора  $R'_R$  для расчёта механической характеристики двигателя НВА-55С скорректировано с учётом эффекта вытеснения тока согласно методике, рассмотренной в разделе 2.3. Полученная характеристика графически показана на рисунке 3.5

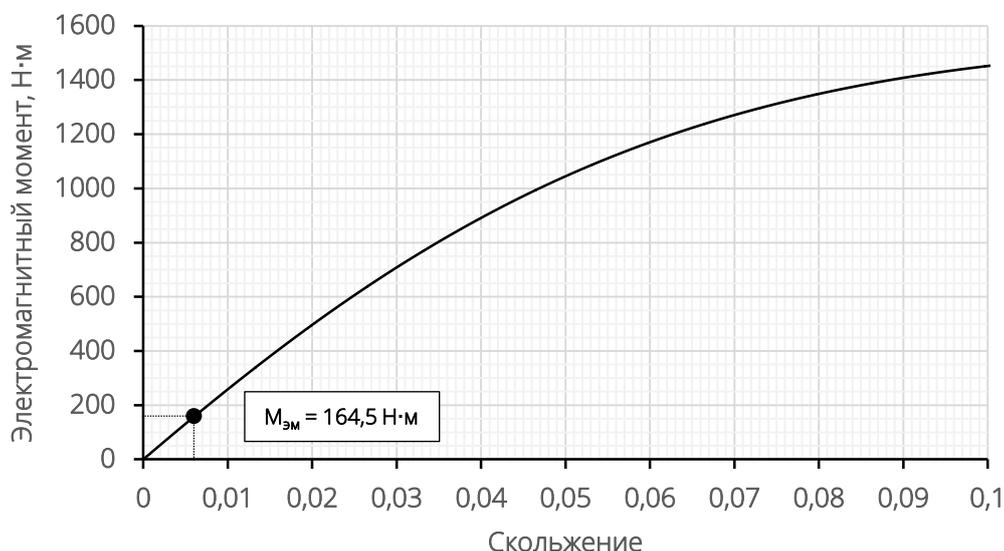


Рисунок 3.5 – Характеристика электромагнитного момента двигателя НВА-55С при напряжении питания 405 В

В рабочей точке двигателя при коэффициенте мощности 0,5 величина момента составляет 164,5 Н·м.

Произведённый расчёт показывает, что схема будет работать в симметричном режиме только в одной рабочей точке, когда механическая нагрузка двигателя, ёмкость конденсатора и напряжение источника питания строго равны расчётным значениям. Очевидно, что выполнение таких требований, а соответственно и формирование необходимого линейного напряжения  $U_{BC}$  в реальных условиях эксплуатации асинхронных машин затруднено по причине возможных перепадов

питающего напряжения и меняющейся в ходе работы машин нагрузки. Негативно отражается на работе такой системы и наличие частых пусковых и переходных режимов, что приводит к необходимости регулирования величины фазосдвигающей ёмкости за счёт применения дополнительных (пусковых) конденсаторов. Именно поэтому конденсаторные схемы подключения асинхронных машин нашли наибольшее распространение в промышленном применении в качестве электроприводов маломощных механизмов с минимальными колебаниями питающего напряжения, нечастыми пусками, постоянной величиной механической нагрузки. Негативным является ещё и тот факт, что в расчётном режиме работы схемы, хоть и достигается минимальная несимметрия питающих напряжений, асинхронный электродвигатель работает с недоиспользованием своей мощности ( $\cos \varphi = 0,5$ ). Это приводит к необходимости использования машин, номинальная мощность которых завышена по отношению к реально необходимой в эксплуатации.

### **3.3 ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЁМКОСТИ ФАЗОСДВИГАЮЩЕГО КОНДЕНСАТОРА, ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ И НАГРУЗОЧНОГО МОМЕНТА НА РАБОТУ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Как было показано выше, симметричная работа трёхфазного двигателя с конденсаторной системой питания возможна лишь для одного расчётного режима. На практике имеют место как постоянные отклонения напряжений в питающей сети, так и варьирующиеся нагрузки. В этой связи важно установить взаимосвязь показателей несимметрии с величинами нагрузки и питающего напряжения. При таком рассмотрении коэффициенты несимметрии представляют собой функции двух аргументов:

$$k_{2u} = f(U_{\text{осн}}, M_c), \quad (3.14)$$

$$k_{2i} = f(U_{\text{осн}}, M_c), \quad (3.15)$$

где  $U_{\text{осн}}$  – действующее значение напряжения обмотки собственных нужд, В;  
 $M_c$  – момент сопротивления, Н · м.

Построение зависимостей (3.14), (3.15) возможно по результатам моделирования установившихся режимов работы системы вспомогательных машин при отсутствии тяговой нагрузки и напряжении на токоприёмнике электровоза, меняющегося в пределах установленных допусков.

Оценка коэффициентов несимметрии производится для расчётной ёмкости фазосдвигающего конденсатора 600 мкФ. Однако применяемые на электровозах конденсаторы серии КПС имеют широкий допуск на отклонение ёмкости величиной  $\pm 10\%$  [63]. Поэтому оценка коэффициентов асимметрии производится для трёх значений ёмкостей: 540, 600 и 660 мкФ.

Возможный диапазон изменения напряжения контактной сети – от 19 кВ до 29 кВ. Допустимые отклонения напряжения на обмотке собственных нужд связаны с допустимыми отклонениями напряжения в контактной сети через коэффициент трансформации

$$k_{\text{осн}} = \frac{U_{\text{то}}}{U_{\text{осн}}}, \quad (3.16)$$

где  $U_{\text{то}}$  – номинальное напряжение сетевой обмотки, В.

Согласно формуле (3.16) коэффициент трансформации обмотки собственных нужд трансформатора ОНДЦЭ-4350/25 электровоза 2ЭС5К составляет 61,73, а возможные пределы изменения напряжения на обмотке собственных нужд – от 307,8 В до 469,8 В, они же и приняты за исследуемый диапазон.

Выбор исследуемого диапазона моментов сопротивления основан на его минимальном и максимально возможном значениях. Очевидно, что минимальный момент сопротивления наблюдается при работе асинхронной машины в режиме

пускового двигателя в условиях отсутствия механической нагрузки. Максимально возможный момент сопротивления в соответствии с разделом 2.7.1 характерен для мотор-компрессора и может достигать 2,5 номинальных значений. Поэтому за исследуемый диапазон моментов сопротивления принимается интервал от 0 до 400 Н · м.

Графически искомые зависимости коэффициентов несимметрии напряжения и тока имеют вид поверхностей и показаны на рисунках 3.6–3.8.

Как показывают полученные результаты, отклонение ёмкости в пределах  $\pm 10\%$  делает симметричное питание невозможным. Даже в случае расчётной нагрузки и напряжения питания несимметрия достигает 0,89% для напряжения и 9,05% для тока. Поведение фазных токов и напряжений двигателя при отклонении ёмкости проиллюстрировано рисунками 3.9–3.14 (расчётное напряжение и нагрузка). Количественная оценка влияния ёмкости фазосдвигающего конденсатора на фазные токи и напряжения двигателя и их коэффициент несимметрии приведена в таблице 3.2.

Как показывают полученные результаты, отклонение ёмкости в пределах  $\pm 10\%$  делает симметричное питание невозможным. Даже в случае расчётной нагрузки и напряжения питания несимметрия достигает 0,89% для напряжения и 9,05% для тока.

Поведение фазных токов и напряжений двигателя при отклонении ёмкости проиллюстрировано рисунками 3.9–3.14 (расчётное напряжение и нагрузка).

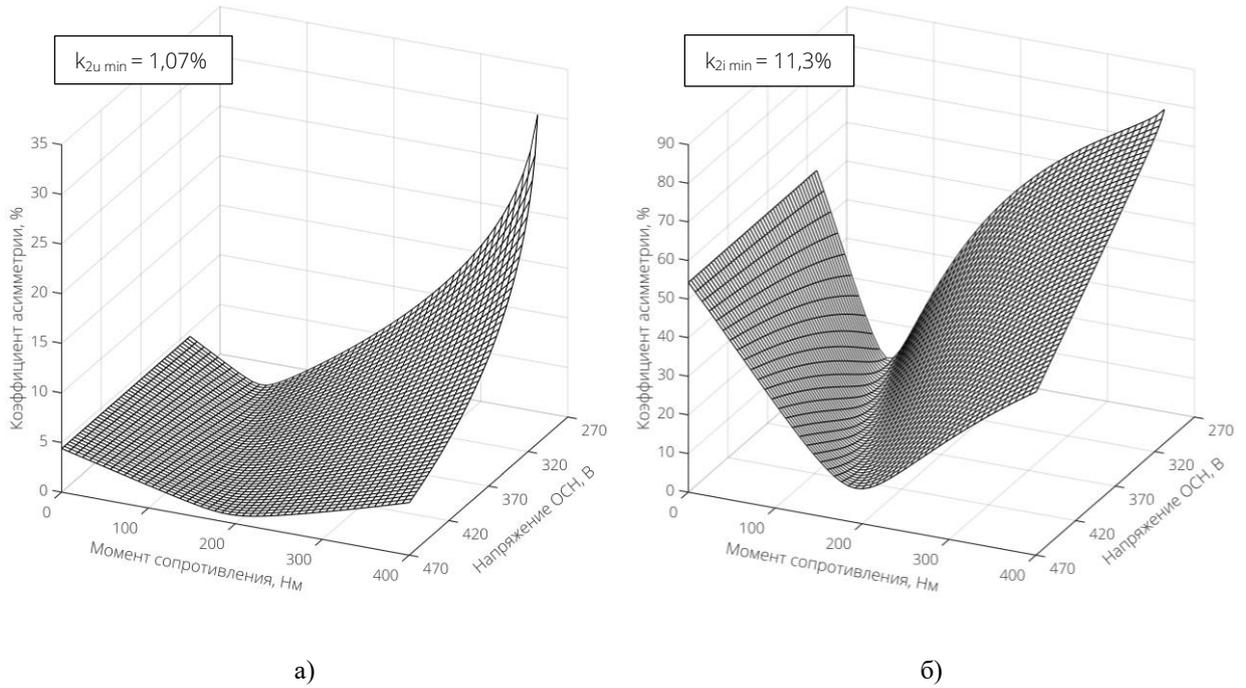


Рисунок 3.6 – Коэффициенты несимметрии напряжения (а) и тока (б) для ёмкости 540 мкФ

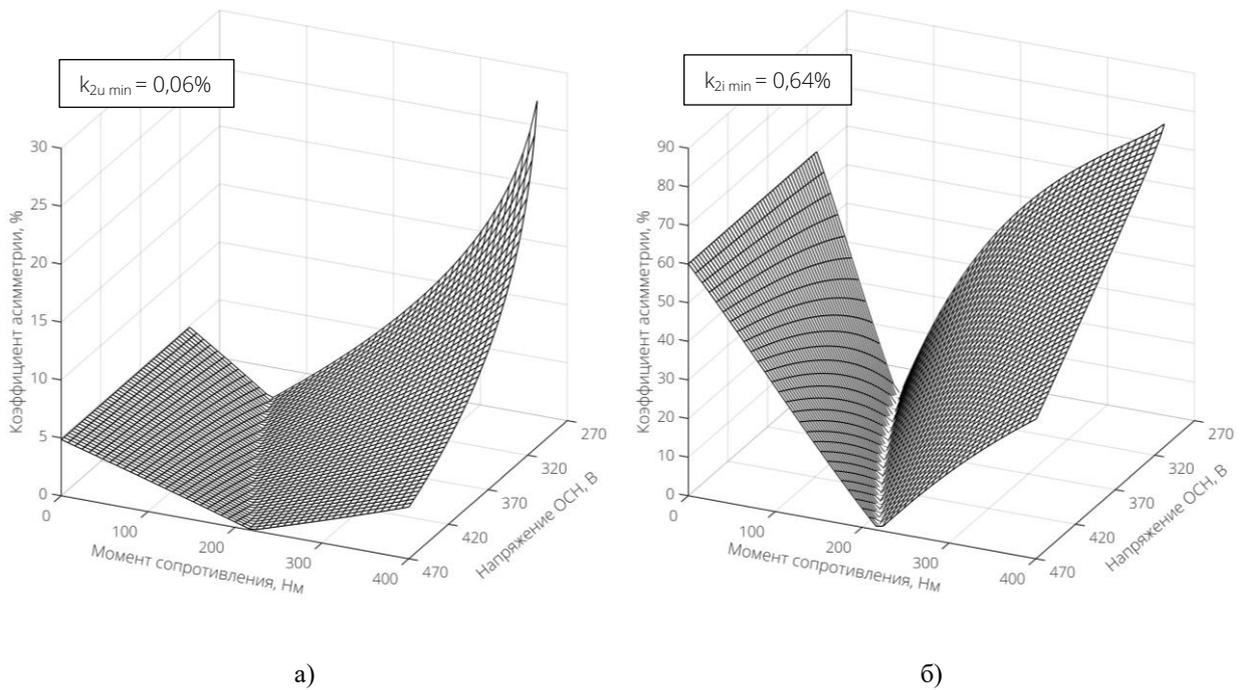


Рисунок 3.7 – Коэффициенты несимметрии напряжения (а) и тока (б) для ёмкости 600 мкФ

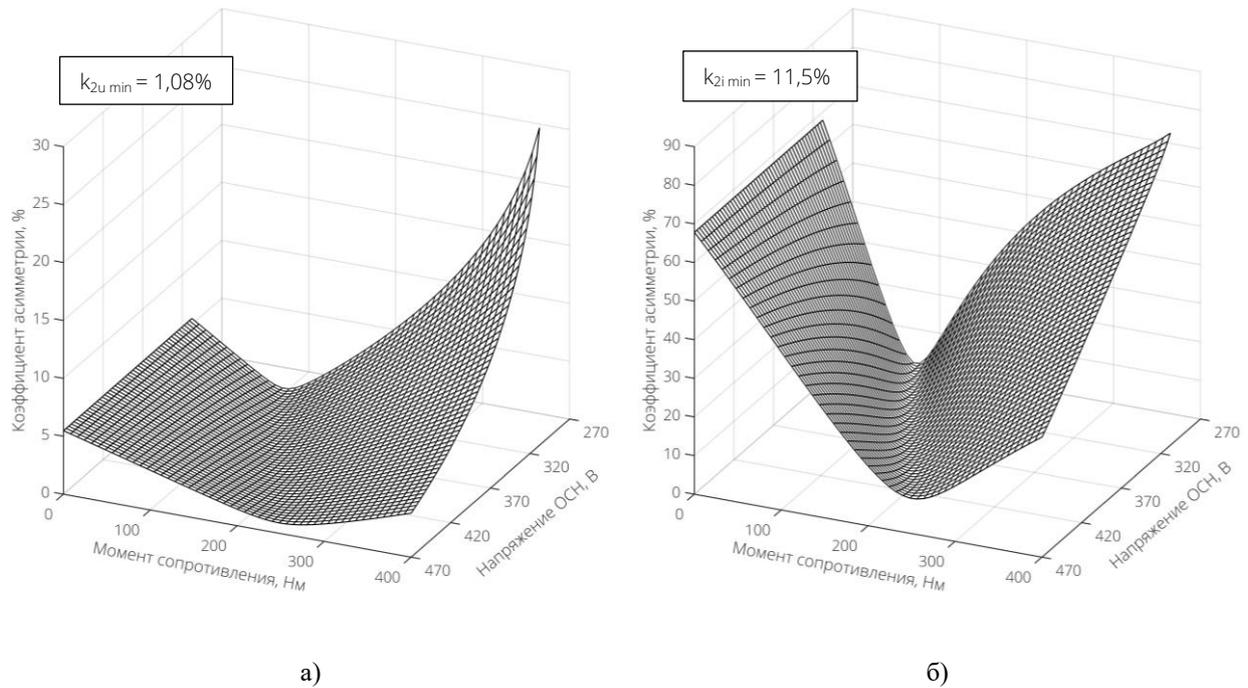


Рисунок 3.8 – Коэффициенты несимметрии напряжения (а) и тока (б) для ёмкости 660 мкФ

Таблица 3.2 – Влияние величины ёмкости фазосдвигающего конденсатора на коэффициенты несимметрии токов и напряжений двигателя

Ёмкость $C_{\phi}$ , мкФ	540	600	660
Фазные напряжения, В	233,5	234	234,5
	229,2	233,9	238,8
	231,9	233,7	235,6
Коэффициент несимметрии напряжения, %	1,07	0,06	1,08
Фазные токи, А	81,0	76,8	73,1
	67,5	76,3	85,5
	80,2	75,9	72,3
Коэффициент несимметрии тока, %	11,3	0,64	11,5

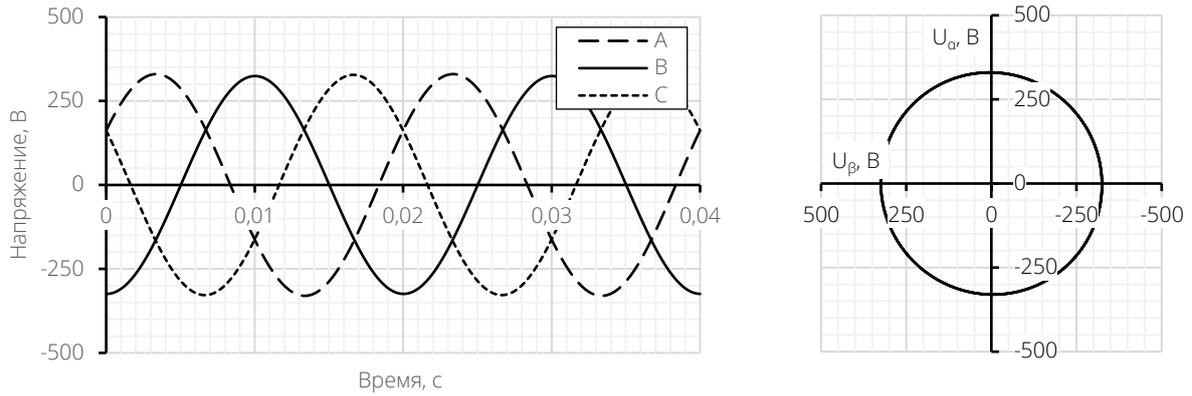


Рисунок 3.9 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при ёмкости фазосдвигающего конденсатора 540 мкФ

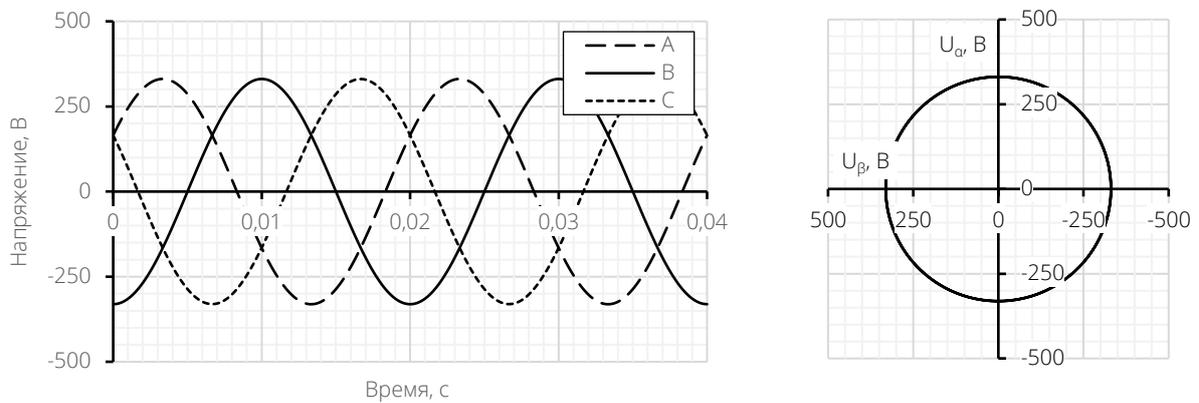


Рисунок 3.10 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при ёмкости фазосдвигающего конденсатора 600 мкФ

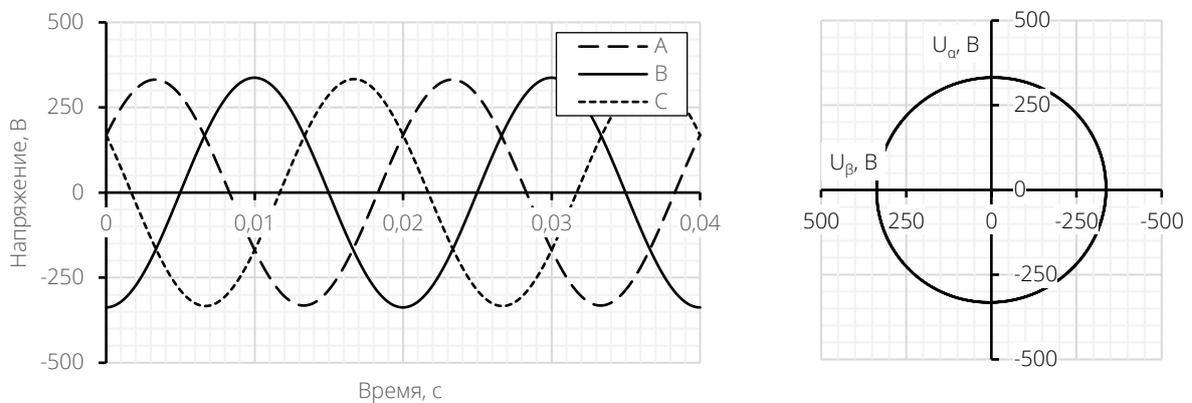


Рисунок 3.11 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при ёмкости фазосдвигающего конденсатора 660 мкФ

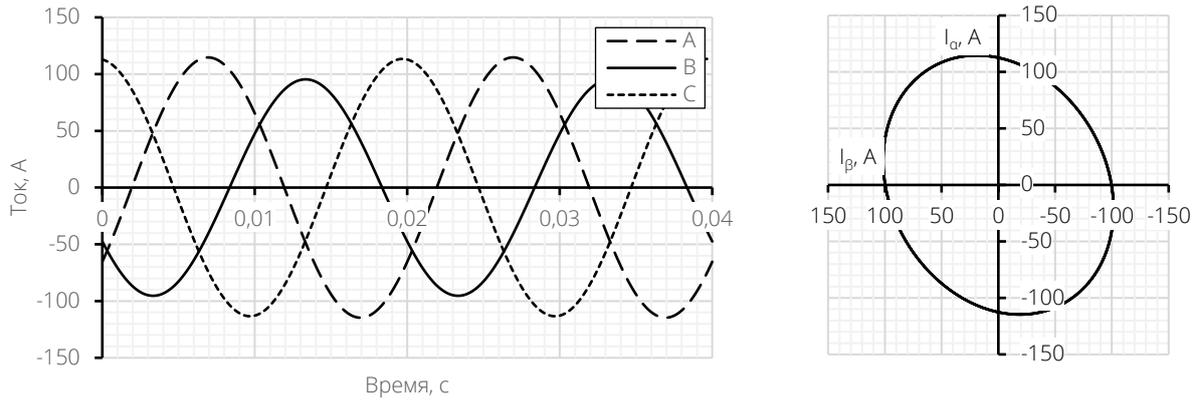


Рисунок 3.12 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при ёмкости фазосдвигающего конденсатора 540 мкФ

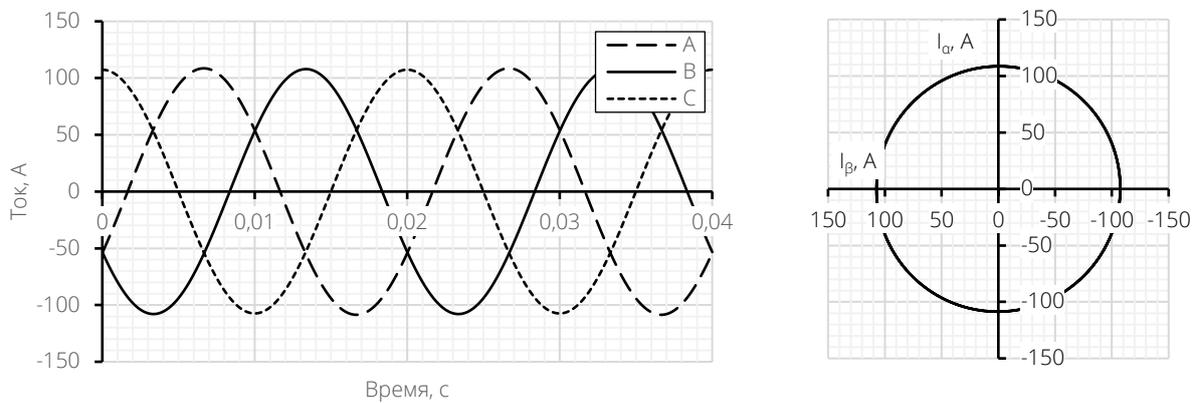


Рисунок 3.13 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при ёмкости фазосдвигающего конденсатора 600 мкФ

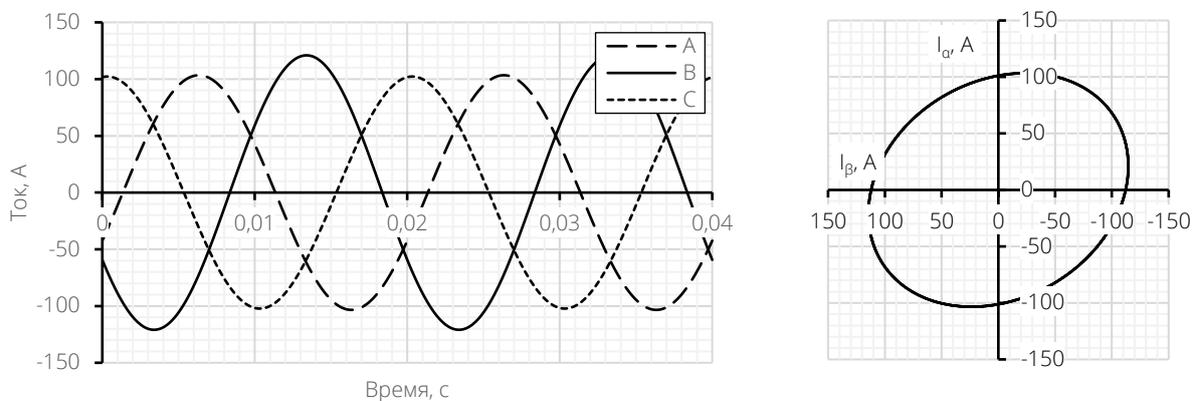


Рисунок 3.14 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при ёмкости фазосдвигающего конденсатора 660 мкФ

Расчёты показывают, что работа схемы с отклонением ёмкости фазосдвигающего конденсатора от расчётной сопровождается появлением дополнительной несимметрии токов, сохраняющейся во всем диапазоне изменения напряжения питания и нагрузки на валу двигателя.

Недостаточная ёмкость приводит к перегрузке фаз А, С, в то время как избыточная ёмкость перегружает фазу В, что в совокупности с другими причинами может привести к недопустимому возрастанию фазного тока. Возрастание тока в «конденсаторной» фазе В при увеличении ёмкости объясняется снижением ёмкостного сопротивления фазосдвигающего конденсатора

$$x_{сф} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\phi}}, \quad (3.17)$$

Снижение же фазосдвигающей ёмкости приводит к ограничению тока в фазе В с возрастанием тока в двух других фазах.

Краевые сечения поверхности, показанной на рисунке 3.7 (расчётная ёмкость 600 мкФ) не только характеризуют работу асинхронной машины на границах разрешённых допусков напряжений – 307,8 В и 469,8 В, но и отражают влияние момента сопротивления и напряжения источника питания на работу асинхронного двигателя с конденсаторной схемой. Их графики показаны на рисунках 3.15 и 3.16.

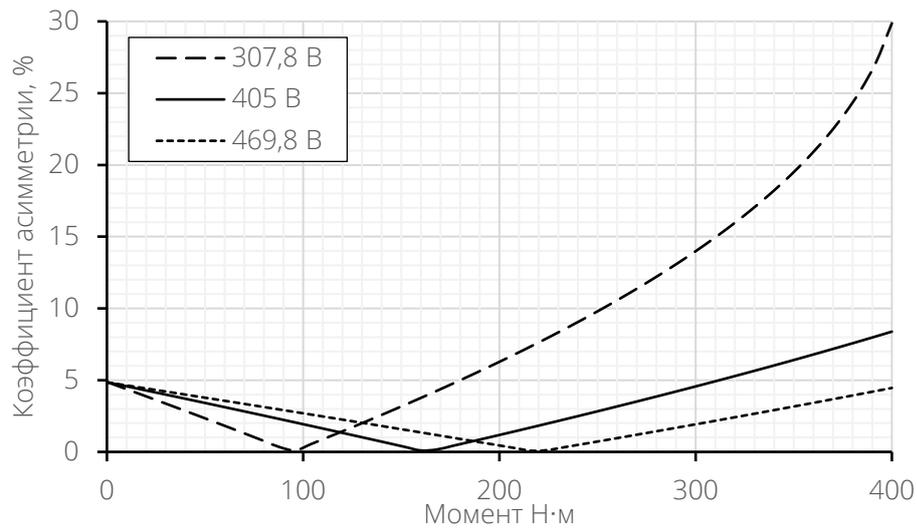


Рисунок 3.15 – Зависимости коэффициента асимметрии напряжения от момента при различных значениях питающего напряжения

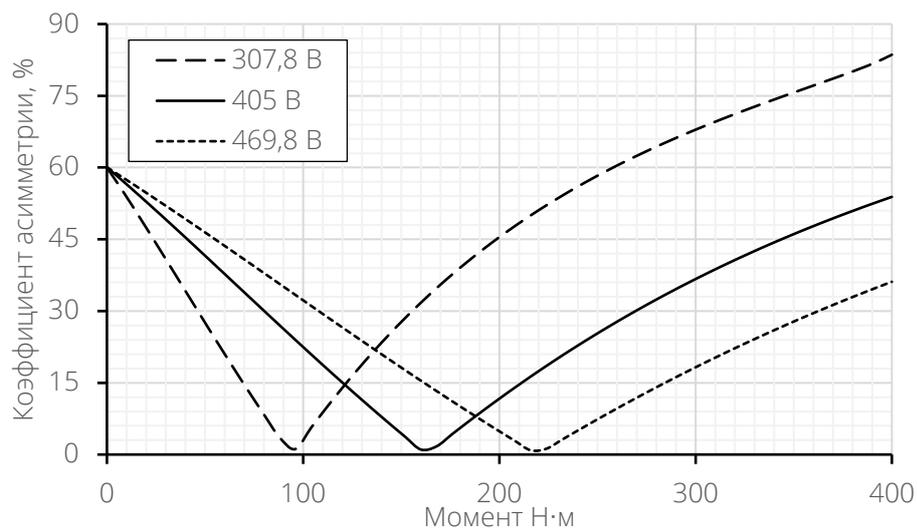


Рисунок 3.16 – Зависимости коэффициента асимметрии тока от момента при различных значениях питающего напряжения

Графики на рисунках 3.15 и 3.16 показывают, что наибольшие отклонения симметрии токов и напряжений наблюдается для случаев с повышенным моментом сопротивления и пониженным напряжением источника питания, при этом несимметрия тока достигает величины порядка 80%. Негативно сказывается на симметрии и отсутствие нагрузки на валу – коэффициент несимметрии тока при

этом достигает величины порядка 60% во всем диапазоне изменения напряжения питания.

Поведение фазных токов и напряжений при отклонении напряжения питающей однофазной сети и расчётном значении момента проиллюстрировано рисунками 3.17–3.22. Численно влияние напряжения источника питания на фазные токи и напряжения двигателя и их несимметрию показано в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Влияние величины напряжения источника питания на коэффициенты несимметрии токов и напряжений двигателя

<b>Напряжение ОСН, В</b>	<b>307,8</b>	<b>405</b>	<b>469,8</b>
<b>Фазные напряжения, В</b>	181,9	234,0	269,1
	172,3	233,9	273,7
	170,7	233,7	274,6
<b>Коэффициент несимметрии напряжения, %</b>	4,034	0,06	1,25
<b>Фазные токи, А</b>	95,4	76,8	71,39
	54,8	76,3	90,06
	74,2	75,9	89,35
<b>Коэффициент несимметрии тока, %</b>	33,5	0,64	14,22

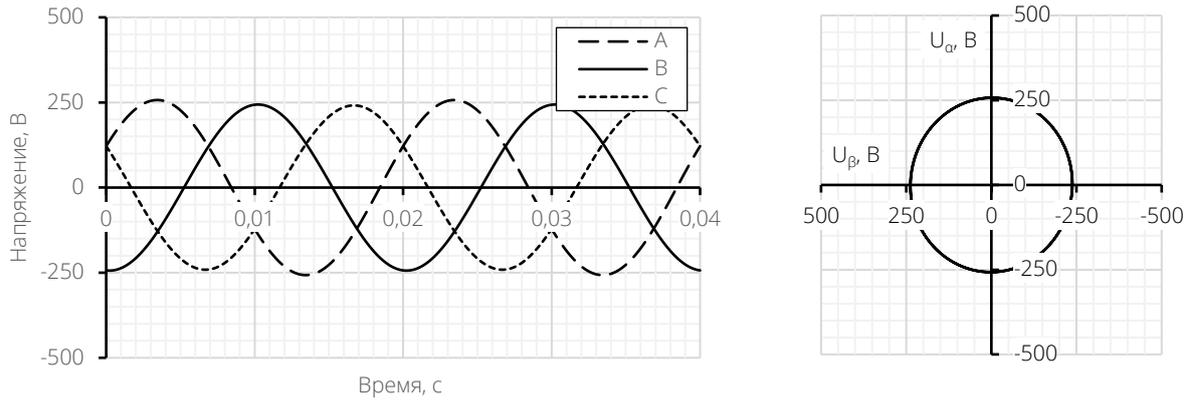


Рисунок 3.17 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при напряжении источника питания 307,8 В

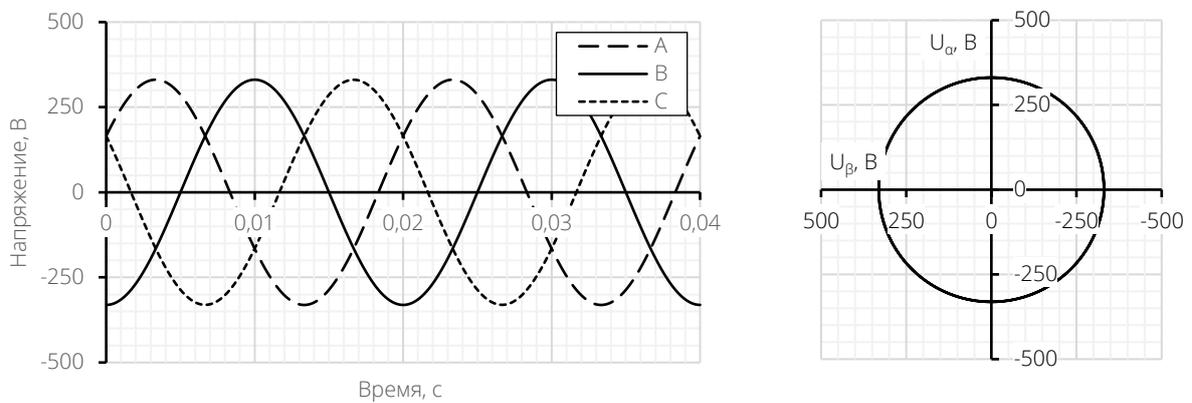


Рисунок 3.18 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при напряжении источника питания 405 В

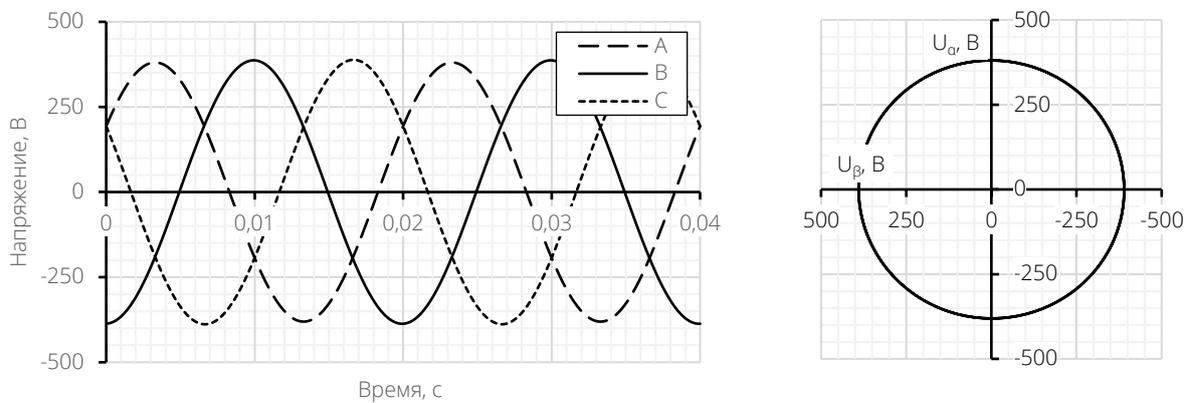


Рисунок 3.19 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при напряжении источника питания 469,8 В

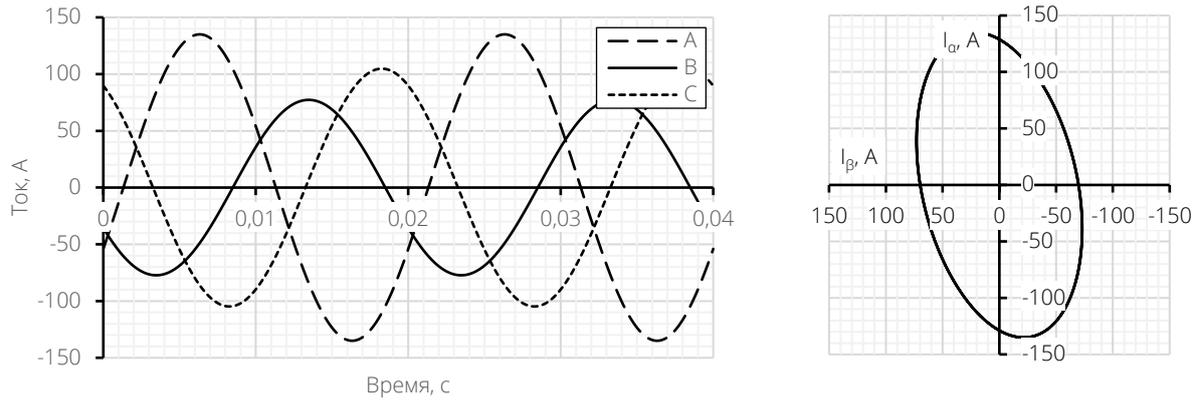


Рисунок 3.20 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при напряжении источника питания 307,8 В

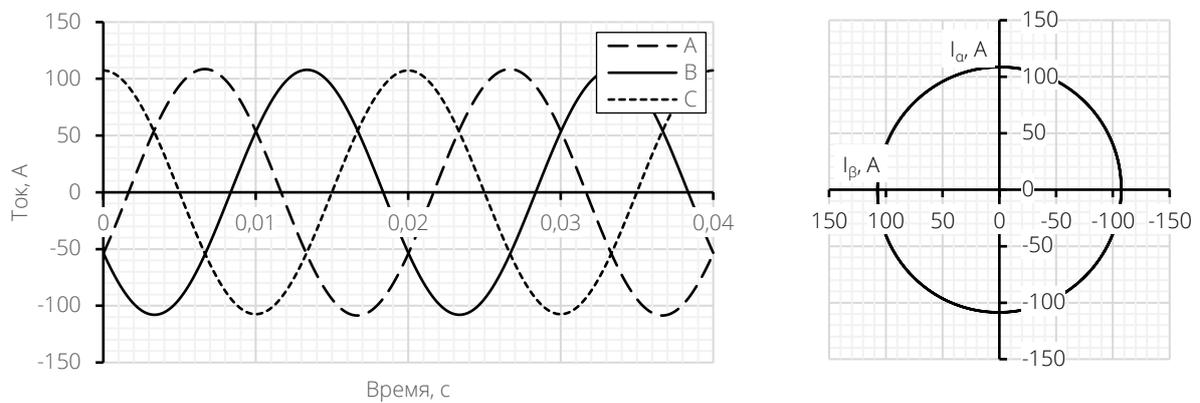


Рисунок 3.21 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при напряжении источника питания 405 В

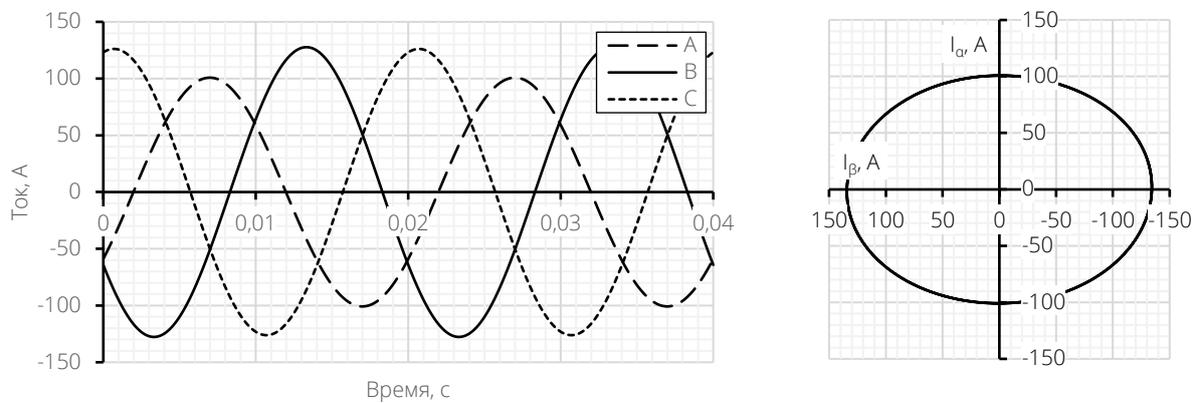


Рисунок 3.22 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при напряжении источника питания 469,8 В

По токовой нагрузке наиболее тяжёлые условия работы асинхронного двигателя наблюдаются при снижении напряжения питания, при этом происходит возрастание коэффициента несимметрии напряжения до 4,03% и тока до 33,5%. При этом наблюдается токовая перегрузка фазы А. Повышенное же напряжение приводит к гораздо меньшей несимметрии с повышением тока в фазах В и С.

Поведение фазных токов и напряжений при изменении момента сопротивления на валу двигателя и расчётном напряжении источника питания проиллюстрировано рисунками 3.23–3.28. Численно влияние момента сопротивления на фазные токи и напряжения двигателя и их несимметрию показано в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Влияние величины момента сопротивления на коэффициенты несимметрии токов и напряжений двигателя

<b>Момент сопротивления, Н·м</b>	<b>0</b>	<b>164,5</b>	<b>400</b>
<b>Фазные напряжения, В</b>	225,9	234	244
	241	233,9	217,8
	245	233,7	215
<b>Коэффициент несимметрии напряжения, %</b>	4,86	0,06	8,38
<b>Фазные токи, А</b>	33,7	76,8	178,1
	81,1	76,3	67,4
	101,1	75,9	142,7
<b>Коэффициент несимметрии тока, %</b>	60,07	0,64	53,87

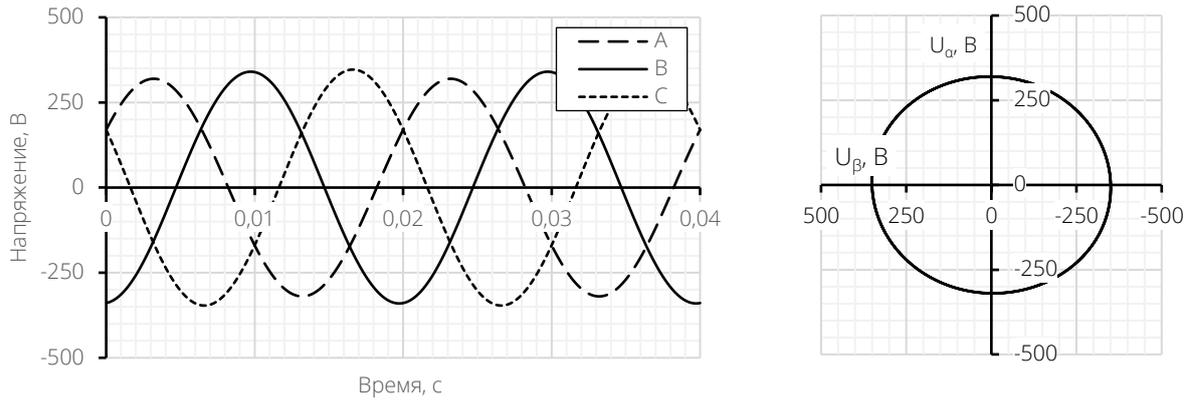


Рисунок 3.23 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при моменте сопротивления  $0 \text{ Н} \cdot \text{м}$

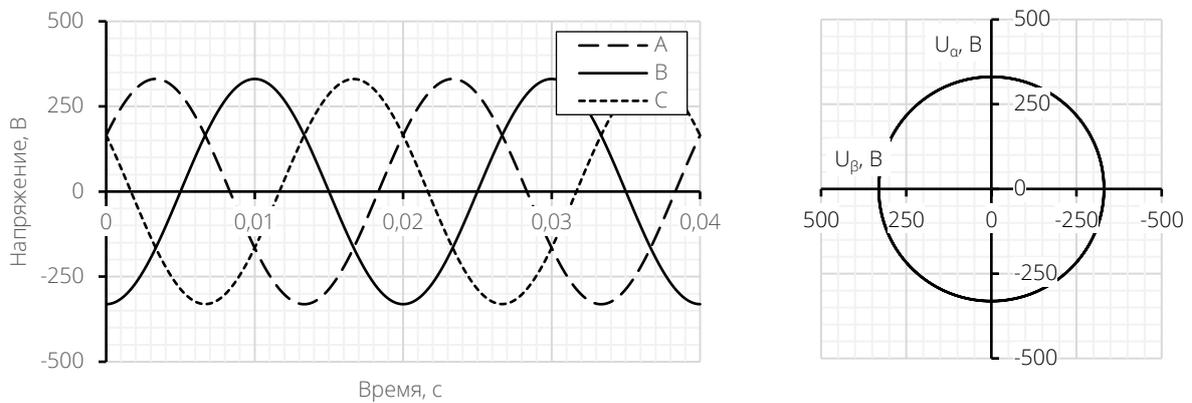


Рисунок 3.24 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при моменте сопротивления  $164,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

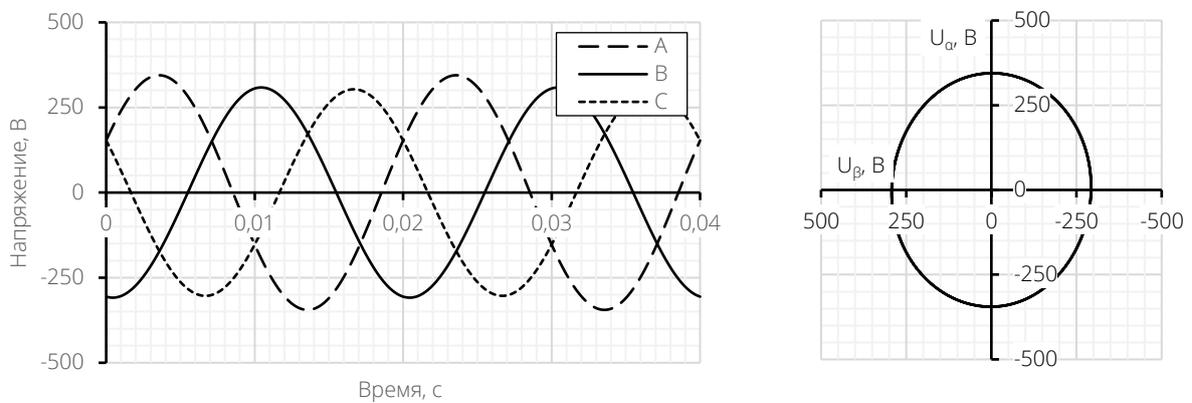


Рисунок 3.25 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора при моменте сопротивления  $400 \text{ Н} \cdot \text{м}$

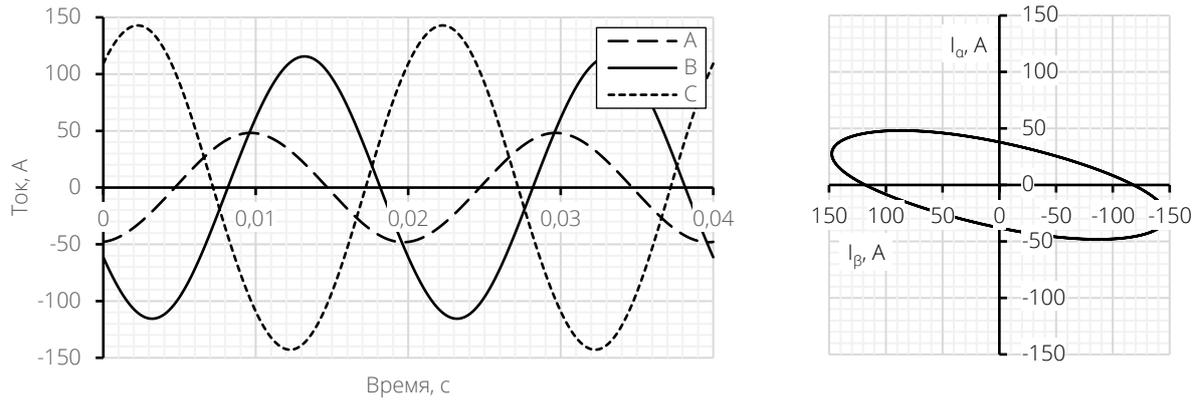


Рисунок 3.26 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при моменте сопротивления  $0 \text{ Н} \cdot \text{м}$

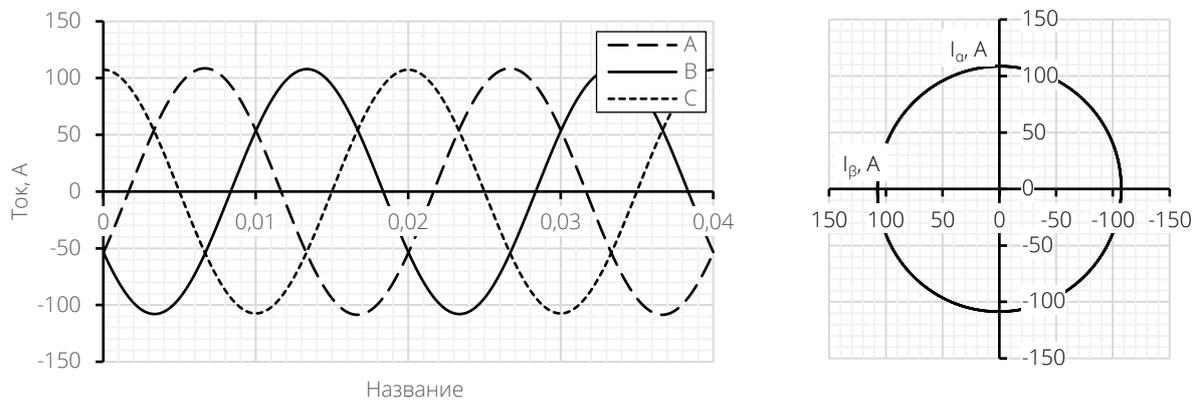


Рисунок 3.27 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при моменте сопротивления  $164,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

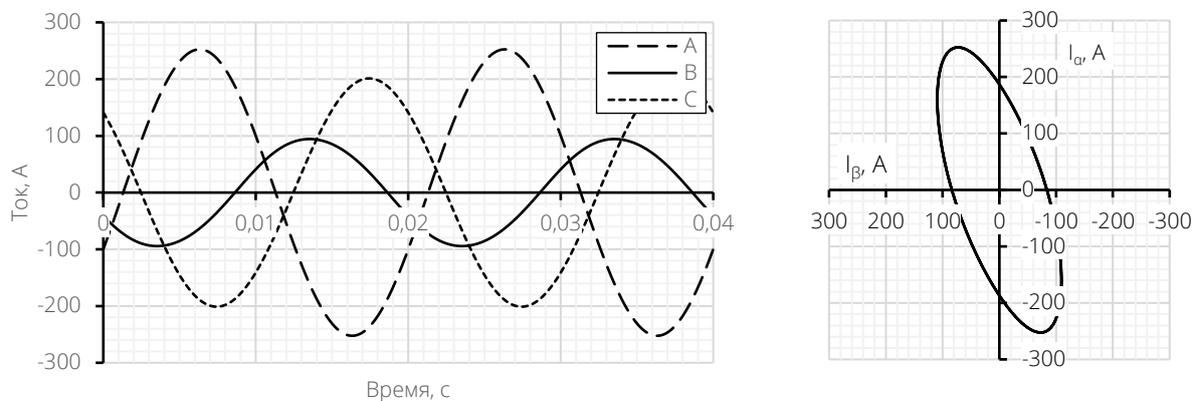


Рисунок 3.28 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при моменте сопротивления  $400 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Повышенный момент сопротивления, характерный для работы компрессора с загустевшим маслом приводит к возникновению значительной асимметрии тока 53,87%. При этом происходит перегрузка фаз двигателя А и С током, превышающим номинальное значение 120 А [64]. Следует также отметить, что отсутствие нагрузки на валу также негативно отражается на работе асинхронной машины – при этом возникает значительная несимметрия тока 60,07%

В реальных условиях эксплуатации вспомогательных асинхронных двигателей возможны отклонения всех параметров конденсаторной схемы и условий работы, что в совокупности приводит к большим отклонениям токов в фазах двигателей. Полученные результаты показывают, что наиболее негативной комбинацией является пониженное напряжение источника питания, пониженная ёмкость фазосдвигающего конденсатора и повышенный момент сопротивления. При этом происходит вытягивание годографа результирующего вектора тока относительно действительной оси с повышением тока  $I_\alpha$  (см. рисунки 3.12, 3.20, 3.28).

Графики фазных токов и напряжений статора, характеризующие наиболее тяжёлый режим работы асинхронного двигателя с конденсаторной схемой показаны на рисунках 3.29, 3.30.

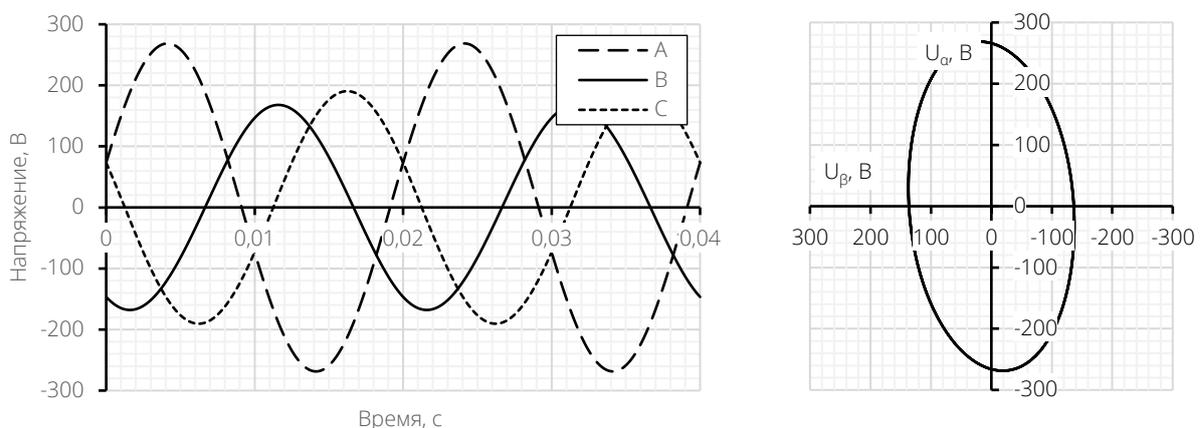


Рисунок 3.29 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжений статора при ёмкости конденсатора 540 мкФ, напряжении 307,8 В и моменте сопротивления 400 Н · м

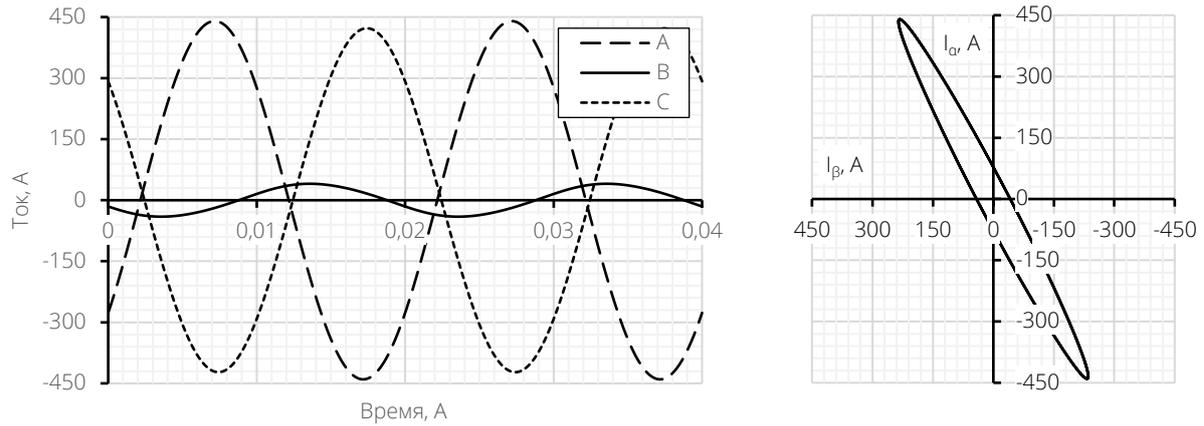


Рисунок 3.30 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора при ёмкости конденсатора 540 мкФ, напряжении 307,8 В и моменте сопротивления 400 Н · м

При этом напряжение источника питания 307,8 В, ёмкость конденсатора 540 мкФ, а момент сопротивления составляет 400 Н · м. Действующие значения фазных напряжений составляют 190 В, 118 В, 134 В при несимметрии напряжений 33,1%. Действующие значения фазных токов – 311 А, 28,5 А, 298,6 А при несимметрии токов 86,4 %.

В рассматриваемом случае токи в фазах А и С более чем в 2,5 раза превышают номинальные, что вызывает локальные перегревы двигателя в областях расположения обмоток этих фаз и в конечном итоге сокращает срок службы асинхронной машины по причине старения изоляции.

### 3.4 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО ПИТАНИЯ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ФАЗ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Результаты, приведённые в разделе 3.3 показывают, что токи в фазах асинхронного двигателя при несимметричном питании могут существенно отличаться. При отсутствии механической нагрузки (режим пускового двигателя)

возможны ситуации, когда токи в отдельных фазах машины различаются в 3 раза, а их величина достигает номинального значения. В тоже время вся активная мощность, потребляемая асинхронной машиной, не имеющей нагрузки, затрачивается на преодоление сил трения, а её величина во много раз меньше номинальной и в сравнении с ней близка к 0.

Активная мощность, потребляемая асинхронным двигателем, складывается из отдельных мощностей, потребляемым по его фазам. В случае несимметричного питания машины в трёхфазной системе токов и напряжений появляются отклонения углов  $\varphi$  между фазными токами и напряжениями. В таких условиях может произойти смена режима работы некоторых фаз с двигательного на генераторный. Режим работы фазы определяется её  $\cos(\varphi)$ . При отрицательных значениях этого показателя фаза переходит в генераторный режим, а угол  $\varphi$  приобретает значения больше  $90^\circ$ .

В таблице 3.5 показаны результаты моделирования работы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К при синусоидальном питании напряжением 405 В с оценкой потребляемой ими мощности. Значения активной и реактивной мощностей рассчитаны согласно [50] по формулам (3.18) и (3.19) соответственно.

$$P = \frac{1}{T_{\text{изм}}} \int_t^{t+T_{\text{изм}}} u(t) \cdot i(t) dt, \quad (3.18)$$

где  $T_{\text{изм}}$  – интервал измерения (равен периоду напряжения в контактной сети), с.

$$Q = \frac{\omega}{T_{\text{изм}}} \int_t^{t+T_{\text{изм}}} i(t) \left( \int_0^t u(t) dt \right) dt. \quad (3.19)$$

По полученным значениям  $P$  и  $Q$  определён коэффициент мощности  $\cos(\varphi)$ .

Таблица 3.5 – Параметры электрических нагрузок фаз вспомогательных асинхронных двигателей при несимметричном питании

Тип ВМ	ПД	МВ	МК	МК с загустевшим маслом
$U_A, В$	224,8	229,3	230,4	235,0
$U_B, В$	231,7	237,3	247,9	239,2
$U_C, В$	241,4	238,9	243,3	233,1
$I_A, А$	49,3	56,5	48,5	124,1
$I_B, А$	63,3	90,7	108,8	125,5
$I_C, А$	97,8	86,2	84,1	105,4
$P_A, кВт$	-5,1	7,1	8,3	24,0
$P_B, кВт$	7,0	13,4	15,5	21,8
$P_C, кВт$	-0,9	6,4	1,5	19,1
$Q_A, кВАр$	9,8	10,9	7,4	16,6
$Q_B, кВАр$	12,9	16,8	22,1	20,7
$Q_C, кВАр$	23,6	19,6	20,4	15,4
$\cos(\varphi)_A$	-0,46	0,5	0,7	0,8
$\cos(\varphi)_B$	0,48	0,6	0,6	0,7
$\cos(\varphi)_C$	-0,04	0,3	0,1	0,8
$k_{ai}, \%$	<b>51,20</b>	<b>26,6</b>	<b>47,3</b>	<b>10,7</b>
$k_{au}, \%$	4,18	2,5	4,3	1,5

Работа мотор-вентилятора (МВ) и мотор компрессора (МК) со значительными коэффициентами несимметрии при номинальном напряжении источника питания объясняется наличием в цепях их питания фазосдвигающих ёмкостей отличных от расчётных – 726 мкФ для мотор-вентилятора и 968 мкФ для мотор-компрессора (согласно расчёту, требуемая величина ёмкости составляет 600 мкФ). На практике выбор ёмкости обусловлен не только расчётами, но и требованиями по сохранению работоспособности в жёстких условиях эксплуатации. Так для повышения момента мотор-компрессора в его цепь включена большая ёмкость, обеспечивающая наименьшую несимметрию в условиях низких температур, при загустевшей смазке.

В таблице 3.5 также видно, что потребление мощности по отдельным фазам машины связано с наличием на валу двигателя механической нагрузки. Диаграммы загрузки фаз двигателя для рассмотренных случаев показаны на рисунке 3.31.

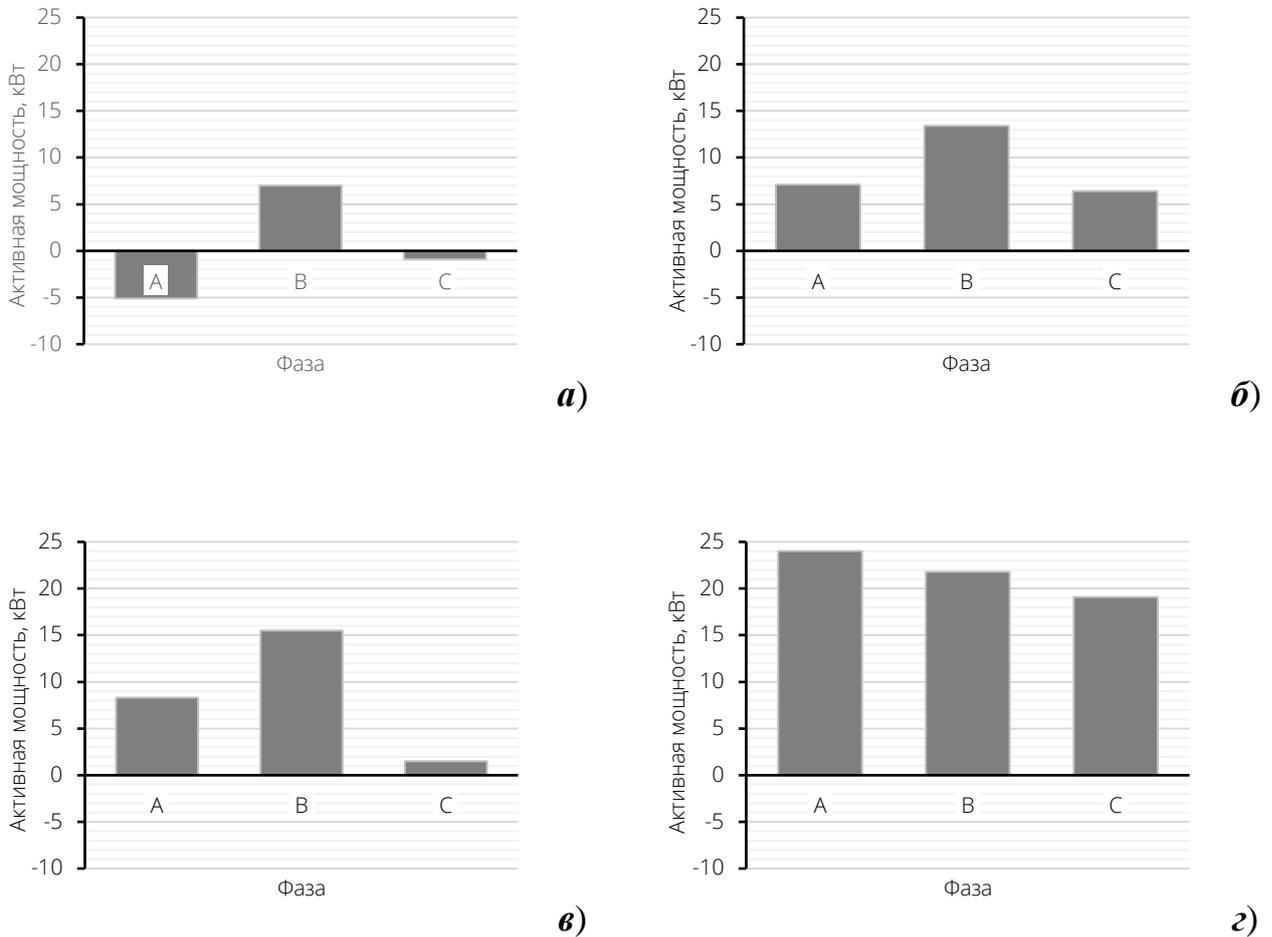


Рисунок 3.31 – Диаграммы активных мощностей фаз вспомогательных машин

Наибольшие различия в фазных мощностях характерны для пускового двигателя – его фазы потребляют -5,1 кВт, 7,0 кВт и -0,9 кВт (рисунок 3.31-а), в то время как суммарная его мощность не превышает 1 кВт. Таким образом, мощности в режиме холостого хода сопоставимы по величине с мощностями для мотор-вентилятора (рисунок 3.31-б). Работа в таком режиме, несёт дополнительные тепловые потери, связанные с явлением, когда отдельные фазы машины, работают «друг на друга», потребляя и генерируя значительную активную мощность, не идущую на полезную работу, а компенсирующую саму себя внутри машины. Перекос в потреблении мощности также характерен и для работы мотор

компрессора (рисунок 3.31-в), что связано со значительной несимметрией, вызванной завышенной фазосдвигающей ёмкостью. Перекос мощностей у мотор-компрессора с загустевшей смазкой проявляется не столь значительно, однако величины самих мощностей существенно превышают расчётные.

Появление отрицательной активной мощности соответствует работе машины в режиме торможения. Именно поэтому, помимо негативных явлений электрической природы, несимметричное питание асинхронных машин приводит к негативным последствиям, и в части механики. На валу асинхронного двигателя при несимметричном питании наблюдается возникновение пульсаций момента, частота которых составляет 100 Гц при питании от источника напряжения с частотой 50 Гц [65].

Вектор момента, приложенного к ротору асинхронного двигателя определяется уравнением (3.20). Причём положительным момент будет при опережении результирующим вектором тока  $\vec{i}_S$  результирующего вектора потокосцепления  $\vec{\psi}_S$  [66].

$$\vec{M}_{эм} = \frac{3}{2} \vec{\psi}_S \times \vec{i}_S, \quad (3.20)$$

где  $\vec{\psi}_S$  – результирующий вектор потокосцепления статора, Вб;

$\vec{i}_S$  – результирующий вектор тока статора, А.

Пульсации электромагнитного момента на валу двигателя определяются размахом момента за период и его средним значением [67]. Соответственно коэффициент пульсаций момента, выраженный в процентах, определяется по формуле

$$k_{пульс} = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{ср}} \cdot 100, \quad (3.21)$$

где  $M_{max}$ ,  $M_{min}$ ,  $M_{ср}$  – максимальная, минимальная и средняя величина момента за период измерения, Н · м.

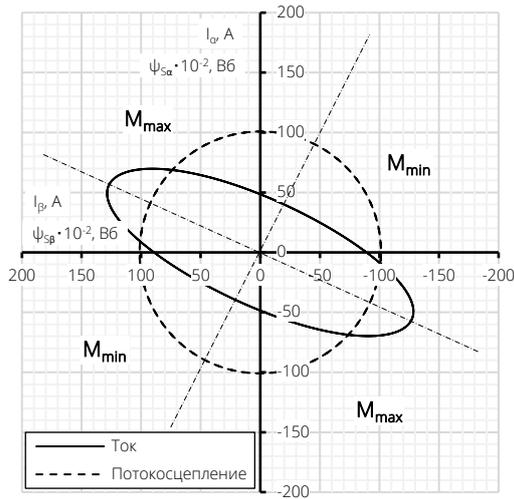
В таблице 3.6 показаны значения момента и коэффициента пульсаций, полученные по результатам моделирования вспомогательных машин при синусоидальном питании расчётным напряжением 405 В.

Таблица 3.6 – Электромагнитный момент вспомогательных асинхронных двигателей при несимметричном питании

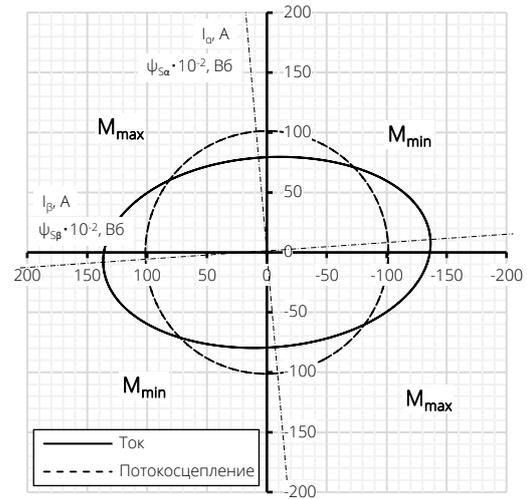
Тип ВМ	ПД	МВ	МК	МК с загустевшим маслом
$M_{cp}$ , Н · м	0,49	164,6	151,0	400,4
$M_{max}$ , Н · м	140,7	247,5	299,9	450,6
$M_{min}$ , Н · м	-131,0	81,6	2,1	350,2
$k_{пульс}$ , %	554	101	197	25,1
$k_{2i}$ , %	51,20	26,6	47,3	10,7
$k_{2u}$ , %	4,18	2,5	4,3	1,5

В соответствии с (3.20) для оценки режима работы асинхронного двигателя в каждый момент времени необходимо сравнить положение векторов тока статора и магнитного потока друг относительно друга. Для этого на рисунке 3.32 показаны годографы тока и потокосцепления статора пускового двигателя (а), мотор-вентилятора (б), мотор-компрессора (в) и мотор-компрессора с загустевшим маслом (г).

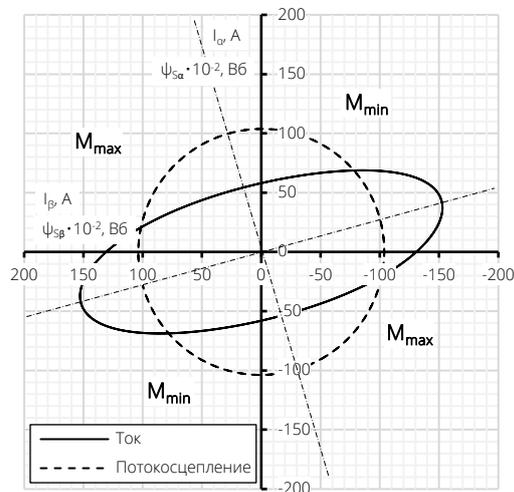
Вытянутая форма годографов тока говорит о переменной скорости вращения их результирующих векторов. На участках с большей кривизной скорость вектора уменьшается, при этом вектор потокосцепления вращается по практически круговому годографу с почти постоянной скоростью. На участках максимальной кривизны годографа тока происходит смена режима работы двигателя, так как меняется знак момента с положительно на отрицательный. Такой процесс повторяется два раза за период напряжения источника питания, что объясняет возникновение пульсаций с частотой 100 Гц. При меньших коэффициентах несимметрии, характерных для мотор-вентилятора и мотор-компрессора на валу двигателя не возникает знакопеременного момента, однако при этом сохраняется переменный характер момента на валу, проявляющийся в виде пульсаций.



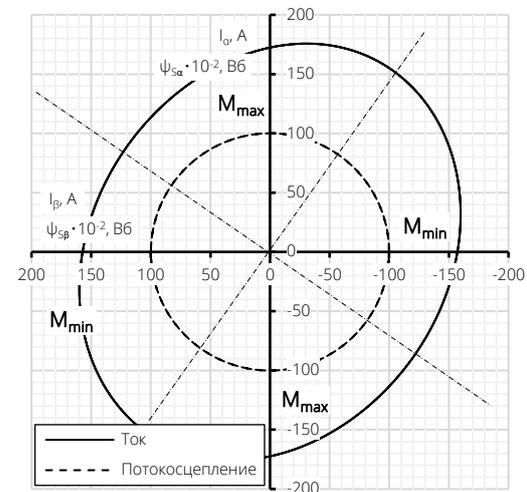
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.32 – Годографы результирующих векторов токов статора и потокосцеплений вспомогательных машин при расчётном питании

Как было отмечено разделе 1.4, неисправности подшипников, являются второй по распространённости причиной отказов вспомогательных асинхронных двигателей электровозов. Причиной же столь интенсивного износа подшипников таких двигателей является несимметричное питание, приводящее к пульсациям момента.

### 3.5 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗА

В эксплуатации величина и форма напряжения на токоприёмнике электровоза определяется напряжением на тяговой подстанции, параметрами контактной сети, удалением электровоза от подстанции, величиной потребляемого тока. Соответственно происходят искажения и на обмотке собственных нужд, питающую систему вспомогательных машин электровоза. На рисунке 3.33 показано, как меняется форма напряжения на обмотке собственных нужд для наиболее благоприятного случая (электровоз у тяговой подстанции, напряжение на подстанции 27500 В, ток ТЭД 810 А), усреднённого случая (электровоз на середине фидерной зоны, напряжение подстанции 25000 В, ток ТЭД 810 А, ) и наихудшего случая (консольное питание, напряжение на подстанции 19000 В, ток ТЭД 810 А). Во всех случаях выпрямительно-инверторный преобразователь работает в середине четвёртой зоны регулирования напряжения.

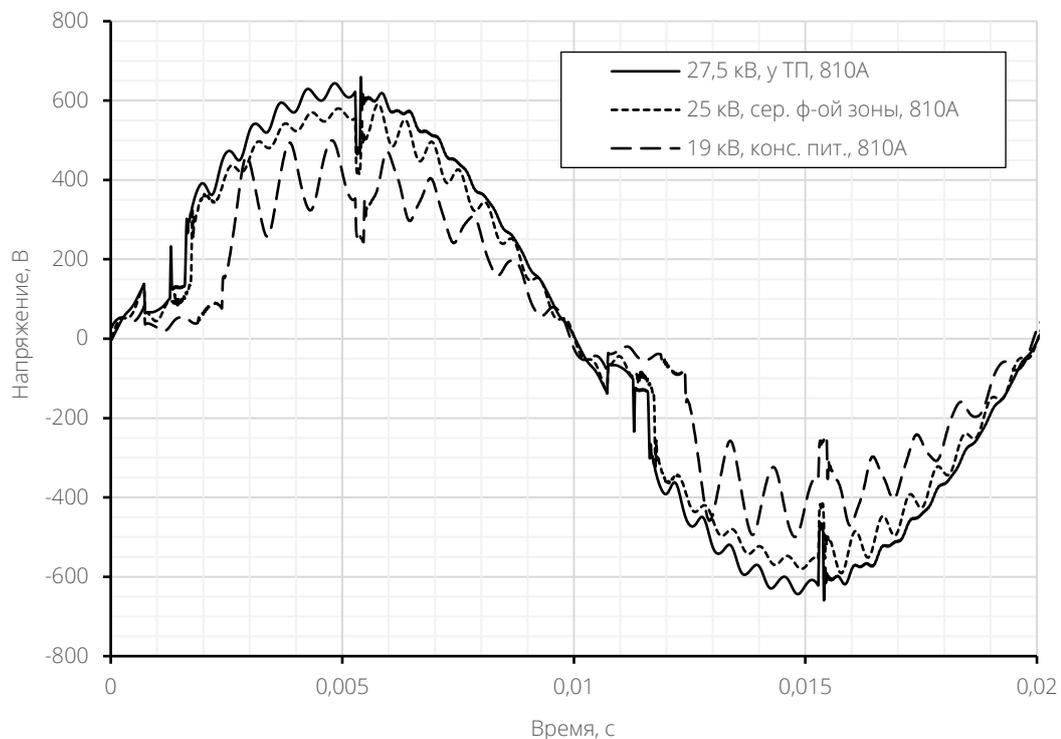


Рисунок 3.33 – Форма напряжения на обмотке собственных нужд

Очевидно, что на форму напряжения в части амплитуды в значительной мере оказывает влияние напряжение на фидерах тяговой подстанции. Расположение же электровоза на участке и тип питания определяют степень колебательности напряжения.

Удаление электровоза от подстанции влияет на длительность коммутаций в выпрямительно-инверторном преобразователе. При консольном питании интервал коммутации достигает 2,5 мс – во всех же остальных случаях коммутация длится не дольше 1,6 мс. На интервале коммутации происходит закорачивание тяговой обмотки трансформатора, что отражается в снижении напряжения обмотки собственных нужд до 0. Провалы питающего напряжения приводят к его несинусоидальному характеру.

Согласно [60] величина искажений напряжения и тока оценивается коэффициентами гармонических составляющих напряжения и тока, выраженных в процентах по формулам (3.22), (3.23).

$$k_{u(1)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100, \quad (3.22)$$

$$k_{i(1)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100, \quad (3.23)$$

где  $n$  – номер гармоники тока или напряжения.

Согласно [68] провалы питающего напряжения приводят к броскам фазных токов вспомогательных асинхронных двигателей, также приводящих к дополнительным пульсациям момента. Причина этого явления состоит в том, что на интервале отсутствия напряжения питания асинхронный двигатель продолжает генерировать ЭДС, не уравновешенную напряжением сети. Фазный ток реагирует на такое резкое снижение напряжения выбросом треугольной формы.

В таблице 3.7 представлены результаты моделирования системы вспомогательных машин электровоза, характеризующие работу системы в

наиболее благоприятных условиях (при нормальном напряжении на тяговой подстанции 27,5 кВ и нахождении электровоза непосредственно у подстанции), в осреднённом режиме (напряжении 25 кВ и нахождении электровоза в середине фидерной зоны при двустороннем питании, на максимальном удалении при консольном питании) и в наиболее тяжёлом режиме (пониженное напряжение в контактной сети 19 кВ и максимальное удаление с консольным питанием). Величина момента на валах вспомогательных асинхронных двигателей не является постоянной и зависит от типа приводного механизма (см. раздел 2.7). Поэтому работа асинхронных двигателей рассматривается для трёх фиксированных случаев – режим работы в качестве мотор-вентилятора, компрессора и компрессора с загустевшим маслом. При этом величина фазосдвигающей ёмкости определяется типом вспомогательной машины.

Таблица 3.7 – Результаты моделирования системы вспомогательных машин электровоза с учётом тяговой нагрузки

Напряжение подстанции, кВ	27,5			25,0			25			19,0		
	МВ	МК	МК (хол од.)	МВ	МК	МК (хол од.)	МВ	МК	МК (хол од.)	МВ	МК	МК (хол од.)
Ток ТЭД, А	810			810			810			810		
Удаление от подстанции	У тяговой подстанции			Середина фидерной зоны			Консольное питание			Консольное питание		
Напряжение на токопр-ке, кВ	27,3			24,6			23,9			17,7		
$U_A, В$	245	246	250	232	234	238	216	218	Не запускается	174	163	Не запускается
$U_B, В$	254	267	258	240	252	243	219	234		209	172	
$U_C, В$	255	261	251	241	247	236	219	226		176	163	
$I_A, А$	56,1	48,6	117	57,7	51,2	125	63,7	60,9		108	76,2	
$I_B, А$	96,6	120	133	93,0	116	131	90,9	122		159	104	
$I_C, А$	93,0	94,3	104	88,4	89,1	108	85,6	89,3		56,9	77,6	
$k_{2u}, \%$	2,79	4,58	1,85	2,54	4,38	1,55	1,97	3,96		13,8	1,98	
$k_{2i}, \%$	30,6	51,4	14,1	27,0	47,9	10,9	19,9	40,9		119	15,2	
$k_{u(1)A}, \%$	9,53	10,1	9,79	11,8	12,4	12,1	25,3	26,3		27,4	28,4	
$k_{u(1)B}, \%$	7,41	11,5	11,5	9,1	14,1	14,2	18,8	28,5		14,6	36,6	
$k_{u(1)C}, \%$	6,31	8,46	8,65	7,8	10,4	10,8	16,4	21,5		10,6	27,3	
$k_{i(1)A}, \%$	19,6	33,2	12,8	22,2	36,6	13,9	37,6	60,3		31,3	41,3	
$k_{i(1)B}, \%$	16,9	28,4	24,4	20,5	36,6	29,2	39,8	67,8		17	80	
$k_{i(1)C}, \%$	16,7	24,9	22,2	20,6	31,2	25	40,8	64,6		14,1	73,4	
$M_{cp}, Н \cdot м$	165	153	400	165	153	400	164	153		164	153	
$M_{max}, Н \cdot м$	295	279	537	274	267	539	242	290		429	265	
$M_{min}, Н \cdot м$	83,1	3	271	105	28	245	61	7,45	-108	15,8		
$k_{пульс}, \%$	128	180	66,5	103	156	73,4	109	184	328	163		

Моделирование показало, что запуск мотор-компрессора не гарантирован для случаев консольного питания как с напряжением подстанции 19 кВ, так и с напряжением 25 кВ. Анализ других вариантов работы мотор-компрессора показывает, что его рабочая ёмкость 968 мкФ подобрана для обеспечения

минимальной несимметрии тока в случае повышенного значения момента на валу, то есть для случая пуска в условиях пониженной температуры. Работая же с расчётным моментом мотор-компрессор потребляет существенно несимметричный ток с коэффициентом несимметрии порядка 50% в случаях питания напряжением 27,5 кВ и 25 кВ, что объясняется наличием в цепи его питания завышенной ёмкости. Также следует отметить, что при снижении напряжения до 19 кВ условия работы мотор-компрессора улучшаются, для этого случая коэффициент несимметрии по току составляет всего 15,2 %.

На рисунках 3.34, 3.35 показаны фазные токи и напряжения статора мотор компрессора для случая питания напряжением 27,5 кВ при нахождении электровоза у тяговой подстанции.

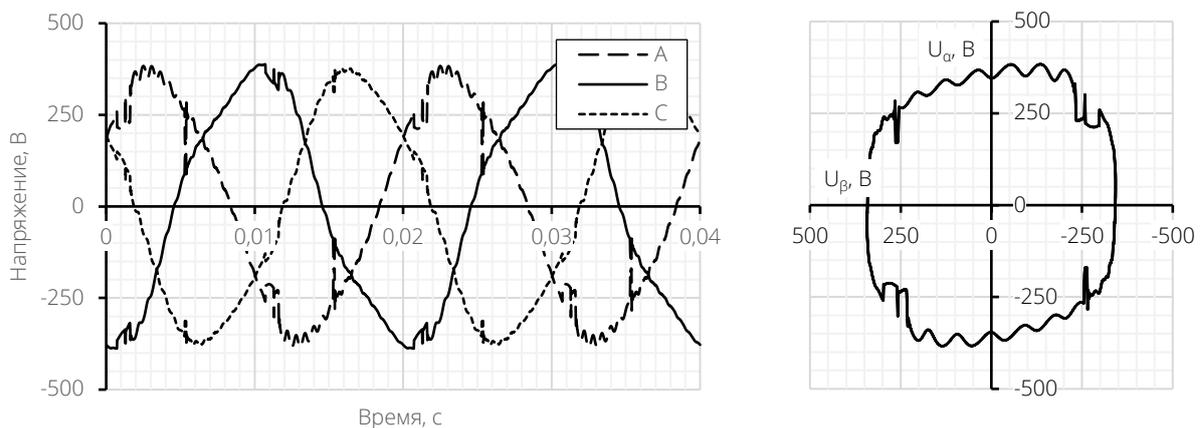


Рисунок 3.34 – Фазные напряжения и годограф результирующего вектора напряжения статора мотор-компрессора для случая питания напряжением 27,5 кВ при нахождении электровоза у тяговой подстанции

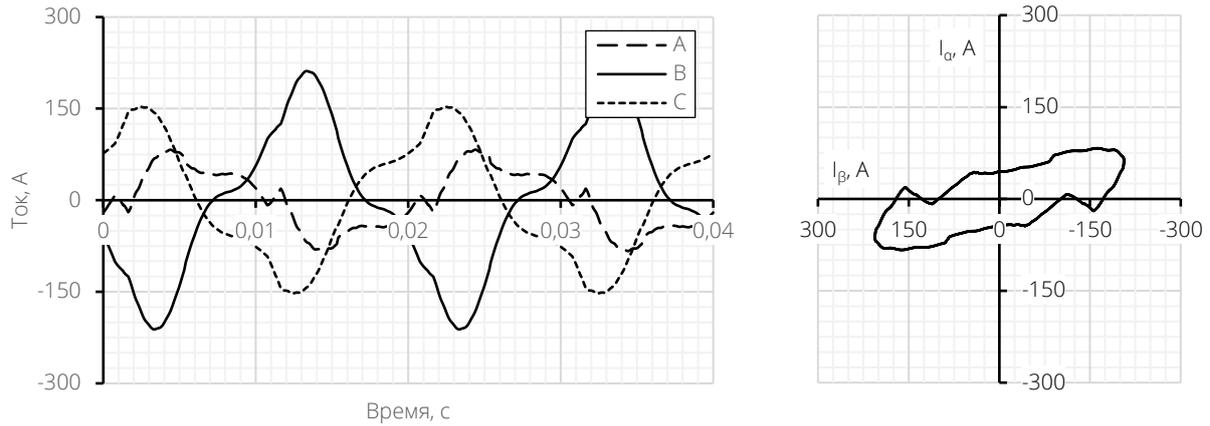


Рисунок 3.35 – Фазные токи и годограф результирующего вектора тока статора мотор-компрессора для случая питания напряжением 27,5 кВ при нахождении электровоза у тяговой подстанции

Спектральный состав показанных кривых представлен в виде диаграмм на рисунке 3.36.

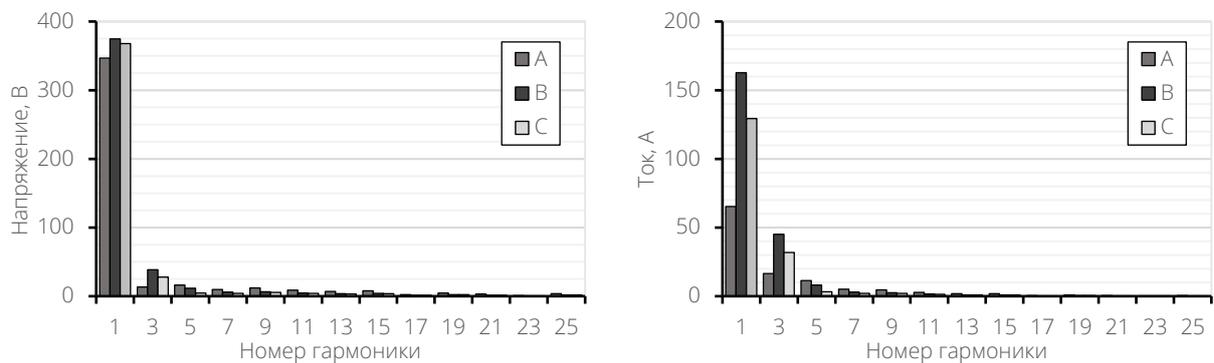


Рисунок 3.36 – Спектры фазных напряжений и токов статора мотор-компрессора для случая питания напряжением 27,5 кВ при нахождении электровоза у тяговой подстанции

График мгновенного значения электромагнитного момента для рассматриваемого случая показан на рисунке 3.37.

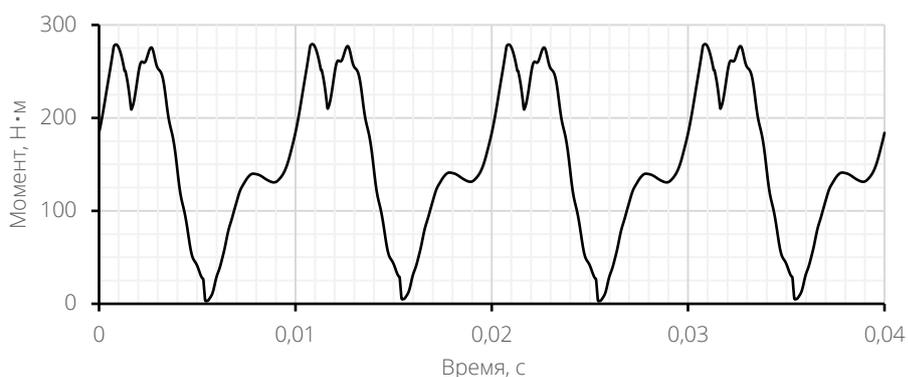


Рисунок 3.37 – Электромагнитный момент мотор-компрессора для случая питания напряжением 27,5 кВ при нахождении электровоза у тяговой подстанции

Таким образом варианты питания, на первый взгляд являющийся наиболее благоприятным, для работы компрессора оказываются достаточно тяжёлым. Отметим, что возможные отклонения ёмкости рабочего конденсатора в пределах допуска мотор-компрессора существенно усугубляют условия его работы. Так с повышением его рабочей ёмкости на 10% коэффициент несимметрии тока достигает значения 60,3%, а действующие значения его фазных токов составляют 50,6 А, 131 А и 96 А.

Для мотор-вентилятора наиболее тяжёлыми являются случаи работы при пониженном напряжении, когда коэффициент несимметрии тока достигает 119%. Столь значительный коэффициент несимметрии обусловлен тем, что при просадке питающего конденсаторную схему напряжения реле, осуществляющее отключение пусковых конденсаторов, не срабатывает, оставляя в работе пусковой конденсатор со значительной ёмкостью в 1452 мкФ. Согласно разделу 3.3 повышение ёмкости приводит к перегрузке фазы В, что и наблюдается в рассматриваемом случае – ток фазы В составляет 159 А.

Мгновенные значения фазных токов и напряжений статора мотор-вентилятора для этого случая, а также годограф их результирующего вектора показаны на рисунках 3.38, 3.39. При этом следует заметить, что годограф тока вращается в обратную сторону – по часовой стрелке, так как коэффициент несимметрии тока стал больше 100%.

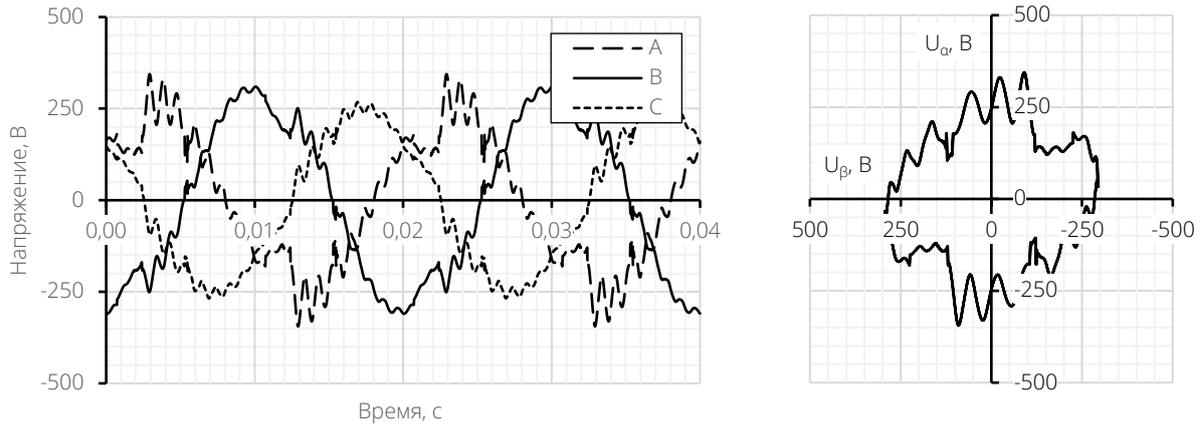


Рисунок 3.38 – Фазные напряжения мотор-вентилятора и годограф результирующего вектора напряжений статора для случая консольного питания напряжением 19 кВ

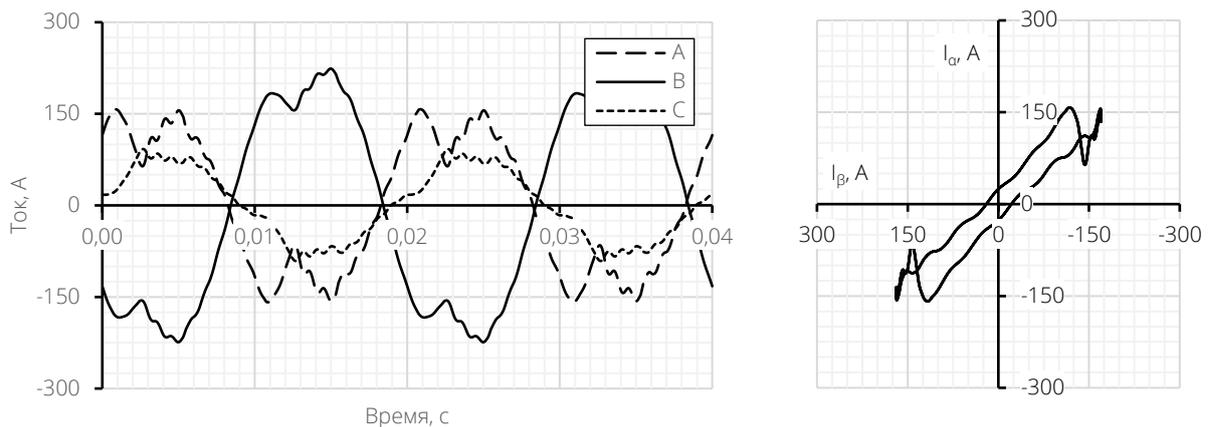


Рисунок 3.39 – Фазные токи мотор-вентилятора и годограф результирующего вектора тока статора для случая консольного питания напряжением 19 кВ

Спектральный состав показанных кривых представлен в виде диаграмм на рисунке 3.40.

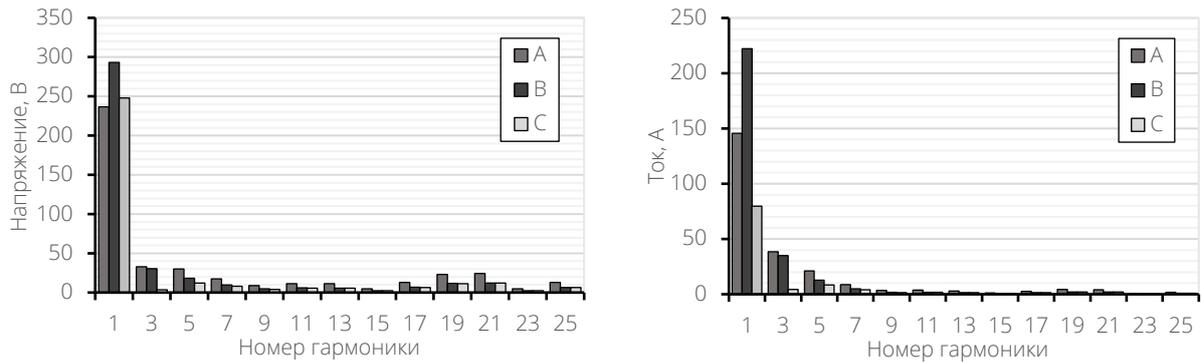


Рисунок 3.40 – Спектры фазных напряжений и токов статора мотор-вентилятора для случая консольного питания напряжением 19 кВ

Столь жёсткие условия работы отражаются и на механических показателях работы двигателя, в частности на моменте. График мгновенного значения электромагнитного момента для рассматриваемого случая показан на рисунке 3.41.

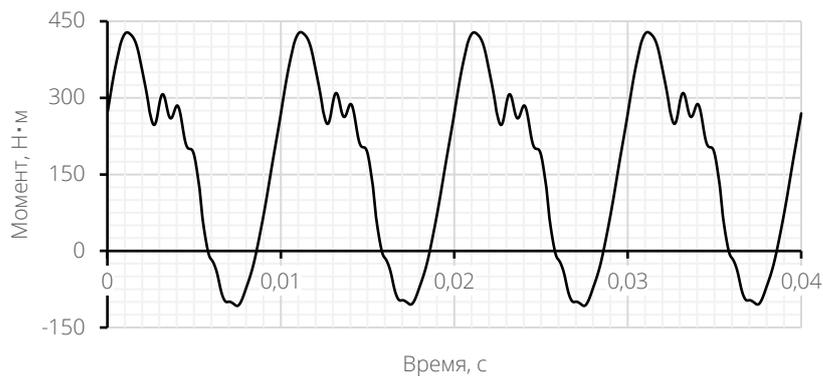


Рисунок 3.41 – Электромагнитный момент мотор-вентилятора для случая консольного питания напряжением 19 кВ

При среднем значении момента мотор вентилятора в 164 Н·м его максимальное значение достигает 429 Н·м. Также возникают и тормозные режимы работы, отражающиеся в отрицательном значении момента. Сохранение направления вращения ротора и положительного значения средней величины момента при обратно вращающемся результирующем векторе тока объясняется тем что момент, создаваемый обратной последовательностью токов существенно

ниже момента, создаваемого прямой последовательностью, что следует из уравнений момента (3.24), (3.25) [61].

$$M_1 = \frac{m_S \cdot p}{\omega_S} \cdot I'_{R1}{}^2 \cdot \frac{R'_R}{s} \quad (3.24)$$

$$M_2 = \frac{m_S \cdot p}{\omega_S} \cdot I'_{R2}{}^2 \cdot \frac{R'_R}{2 - s} \quad (3.25)$$

где  $I'_{R1}$  – приведённый ток ротора прямой последовательности, А;

$I'_{R2}$  – приведённый ток ротора обратной последовательности, А.

В остальных случаях мотор вентилятор работает в более благоприятных условиях.

Полученные результаты наглядно показывают, что подобрать необходимые условия для работы используемой схемы невозможно. В работе это приводит к значительным токовым перегрузкам в установившихся режимах и высоким пульсациям электромагнитного момента:

– мотор-компрессор в наиболее худшем случае работает с коэффициентами несимметрии 4,58% по напряжению и 51,4% по току, потребляя при этом ток 120 А по фазе В. Коэффициент пульсации момента в этом случае составляет 180%;

– мотор-вентилятор в наиболее худшем случае работает с коэффициентами несимметрии 13,8% по напряжению и 119% по току, потребляя при этом ток 159 А по фазе В. Коэффициент пульсации момента в этом случае составляет 328%. Завышенная несимметрия в этом случае обусловлена работой схемы с включённой в установившемся режиме пусковой ёмкостью.

## 4 ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ СИСТЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН

### 4.1 СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ПРИНЦИПЫ ЕГО РАБОТЫ

Маловентильный преобразователь представляет собой электротехническое устройство, состоящее из двух автономных инверторов напряжения – входного и выходного. Укрупнённая схема преобразователя показана на рисунке 4.1.

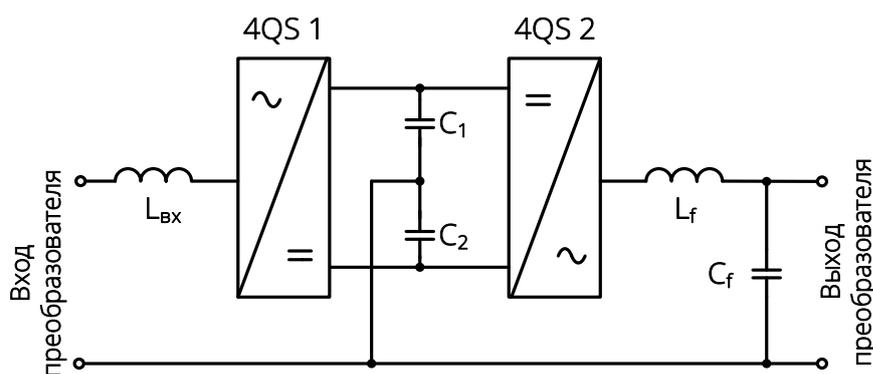


Рисунок 4.1 – Укрупнённая схема маловентильного преобразователя

Входной (*4QS1*) и выходной (*4QS2*) инверторы работают в режиме четырёхквadrантных преобразователей. Такая комбинация инверторов позволяет передавать электрическую энергию в обоих направлениях: со входа на выход и с выхода на вход в случае работы фаз вспомогательного асинхронного двигателя в режиме генерации активной мощности.

Входной частью преобразователя, подключаемой к однофазному источнику переменного напряжения является инвертор *4QS1*, задачами которого являются:

- стабилизация напряжения в звене постоянного тока, состоящего из конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ ;

– поддержание тока с коэффициентом мощности близким к 1 в дросселе  $L_{вх}$ .

Задачами выходного инвертора **4QS2** являются:

– формирование на конденсаторе  $C_f$  напряжения требуемой формы с заданной амплитудой и фазой;

– передача энергии от нагрузки в звено постоянного тока в генераторных режимах работы.

В случае питания трёхфазной нагрузки маловентильный преобразователь подключается согласно схеме, показанной на рисунке 4.2

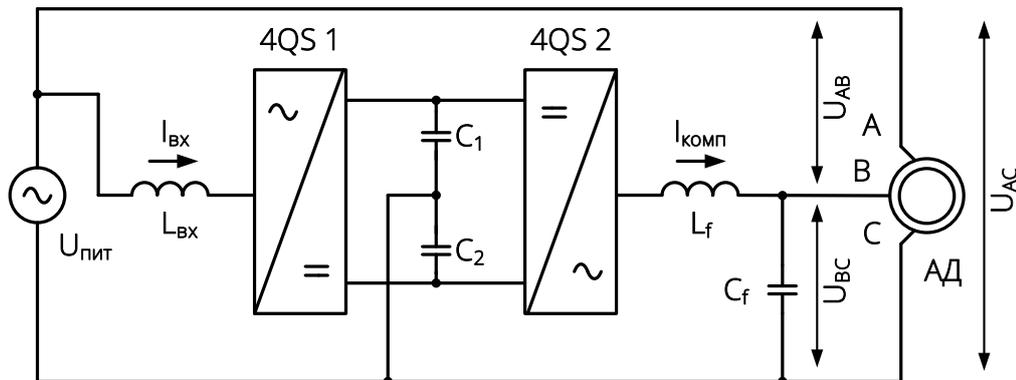


Рисунок 4.2 – Схема питания асинхронного двигателя с маловентильным преобразователем

Для получения трёхфазного симметричного напряжения при помощи маловентильного преобразователя необходимо на его выходе сформировать напряжение по амплитуде равное напряжению источника питания, а по фазе смещённое относительно него на угол  $60^\circ$ . При подключении трёхфазной нагрузки к фазам **A** и **C** прикладывается напряжение источника –  $U_{AC}$ , к фазам **B** и **C** – напряжение, сформированное преобразователем. Полученная при этом на фазах **A** и **B** разность потенциалов обуславливает третьё линейное напряжения  $U_{AB}$ . Наглядно это объяснено на рисунке 4.3.

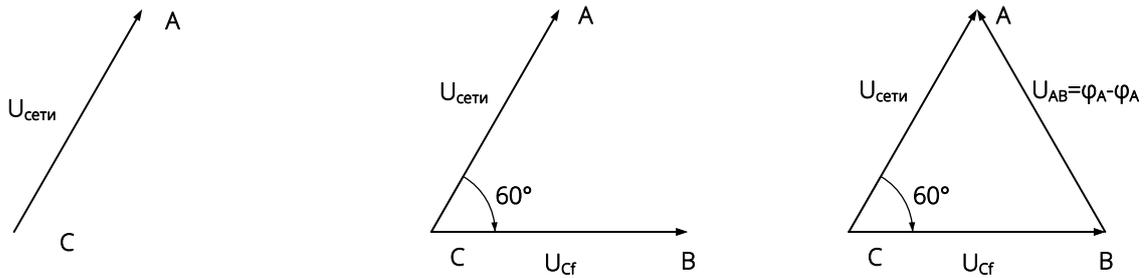


Рисунок 4.3 – Формирование трёхфазного напряжения маловентильным преобразователем

Известны также варианты использования такого преобразователя в качестве стабилизатора напряжения в однофазных сетях [69], [70].

Реализация преобразователя возможна с использованием как двухуровневых инверторов, так и трёхуровневых.

На рисунках 4.4, 4.5 показаны варианты построения маловентильного преобразователя на базе двухуровневого и трёхуровневого инверторов напряжения.

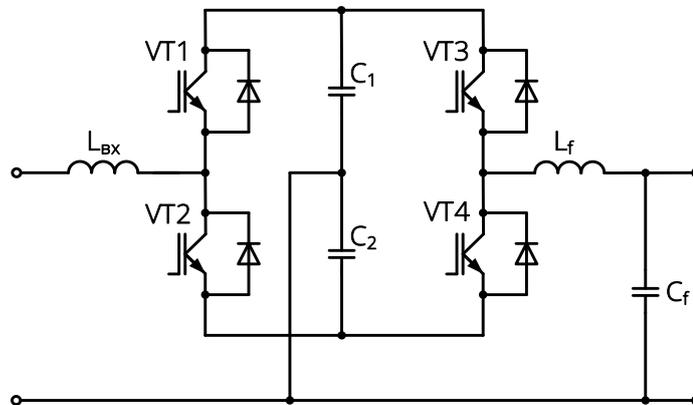


Рисунок 4.4 – Вариант построения преобразователя на двухуровневых инверторах

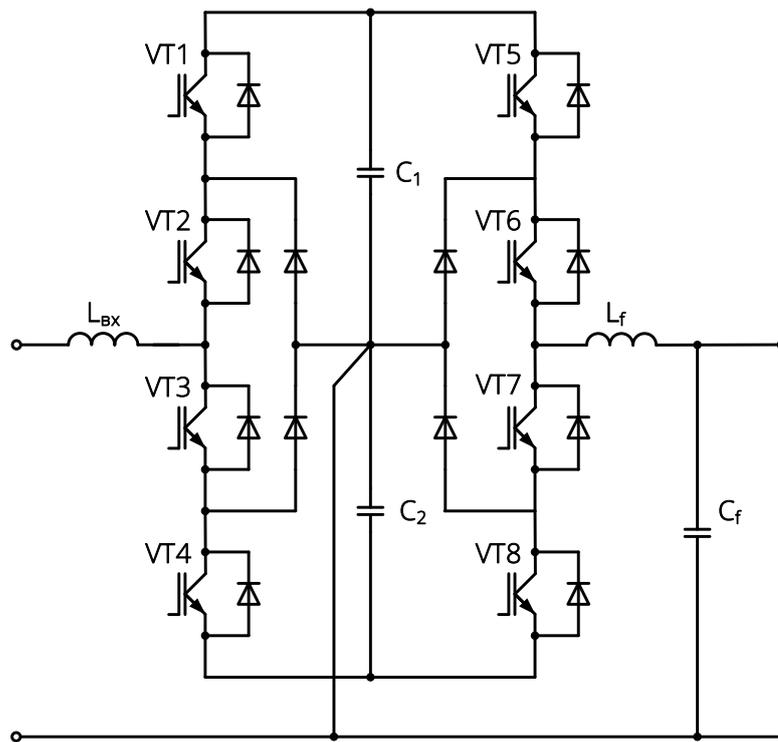


Рисунок 4.5 – Вариант построения преобразователя на трёхуровневых инверторах

В обоих случаях входной и выходной преобразователи работают как автономные инверторы напряжения. При этом формирование напряжения ими осуществляется при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Рассмотрим принципы формирования напряжения входным преобразователем, построенным на базе двухуровневого ( $VT1$ ,  $VT2$ ) и трёхуровневого инвертора ( $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VT3$ ,  $VT4$ ). Метод широтно-импульсной модуляции основан на формировании импульсов управления транзисторов инвертора, скважность которых меняется по синусоидальному закону. Такой подход позволяет получать на выходе инвертора синусоидальное напряжение любой амплитуды в пределах диапазона регулирования, ограниченного напряжением звена постоянного тока. Амплитуда получаемого напряжения определяется модулирующим сигналом, определяемым отношением

$$u_{\text{мод}} = \frac{U^*}{U_d}, \quad (4.1)$$

где  $U^*$  – требуемое значение напряжения на выходе инвертора, В;

$U_d$  – напряжение звена постоянного тока, В.

При формировании импульсов управления происходит сравнение модулирующего сигнала с несущим. В качестве несущего сигнала используется пилообразный сигнал, значение которого определяется по формуле:

$$u_{\text{нес}} = \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin(2\pi \cdot f_t)), \quad (4.2)$$

где  $f_t$  – частота несущего сигнала, Гц.

Частота несущего сигнала выбирается нечётно-кратной частоте модулирующего для исключения постоянной составляющей в выходном напряжении инвертора. Отношение величины модулирующего сигнала к несущему называется глубиной модуляции  $\mu$ :

$$\mu = \frac{u_{\text{мод}}}{u_{\text{нес}}}. \quad (4.3)$$

Для исключения искажения выходного напряжения (явление перемодуляции) значение глубины модуляции не должно превышать 1. Обычно в системах управления эту величину ограничивают на уровне 0,95–0,99. На рисунке 4.6 проиллюстрировано формирование напряжения методом широтно-импульсной модуляции в двухуровневом инверторе.

В моменты, когда значение модулирующего сигнала превышает значение несущего на верхний транзистор  $VT1$  подаётся сигнал на открытие. Когда значение модулирующего сигнала становится меньше значения несущего, на транзистор  $VT1$  подаётся сигнал на закрытие. Транзистор  $VT2$  работает в противофазе – его сигналы управления являются инверсными по отношению к сигналам управления первого транзистора. Запрещённым состоянием инвертора является случай, когда включены оба транзистора, что приводит к короткому замыканию в звене постоянного напряжения. Для исключения этого состояния во время коммутации транзисторов сигналы управления задерживают на так называемое «мёртвое время», длительность которого составляет величину порядка 1 мкс.

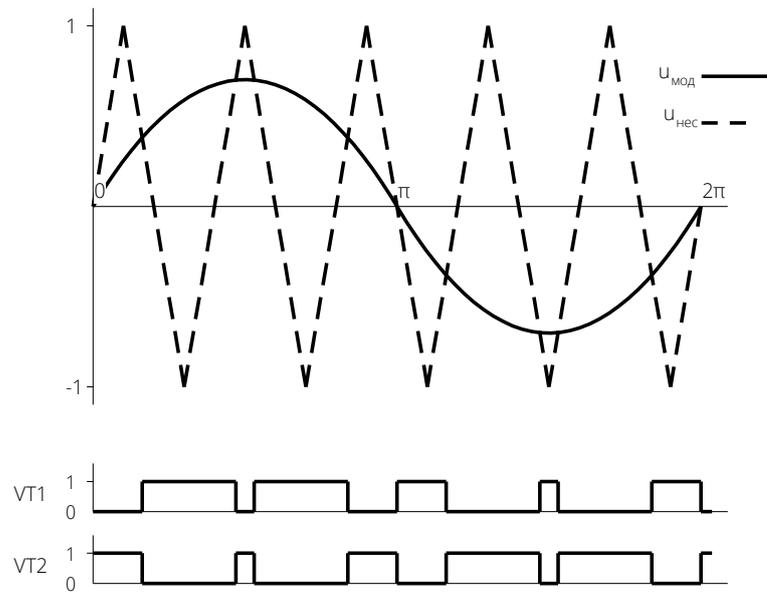


Рисунок 4.6 – Принцип формирования напряжения двухуровневым инвертором

Принцип формирования напряжения в трёхуровневом инверторе проиллюстрирован рисунком 4.7.

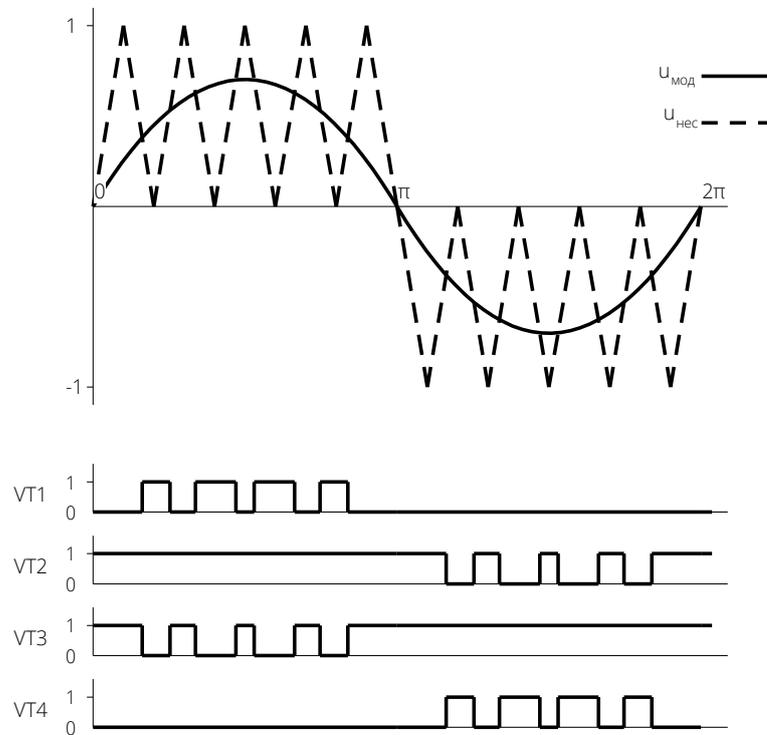


Рисунок 4.7 – Принцип формирования напряжения трёхуровневым инвертором

В трёхуровневом инверторе несущий сигнал имеет одну полярность, соответствующую полярности модулирующего сигнала. Формирование напряжения осуществляется в первый полупериод парой транзисторов  $VT1$  и  $VT3$ , во второй полупериод парой транзисторов  $VT2$  и  $VT4$ . Одновременное включение транзисторов  $VT2$  и  $VT3$  подключает выход инвертора к нулевому потенциалу.

Преимущества трёхуровневых инверторов в сравнении с двухуровневыми рассмотрены в работе [71] и заключаются в следующем:

- для достижения такого же гармонического состава выходного напряжения трёхуровневого инвертора требуется меньшая частота переключения транзисторных ключей;
- выходные фильтры трёхуровневого инвертора имеют меньшие размеры;
- максимальное рабочее напряжение транзисторных ключей в трёхуровневом инвертора вдвое меньше.

К недостаткам трёхуровневой схемы относятся:

- более сложная система управления;
- необходимость использования большего количества транзисторных ключей.

## 4.2 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Систему управления маловентильным преобразователем собственных нужд можно условно разделить на

- систему управления входным инвертором  $4QS1$ ;
- систему управления выходным инвертором  $4QS2$ .

Схема входной части преобразователя для случая двухуровневого инвертора с обозначенными токами и напряжениями показана на рисунке 4.8

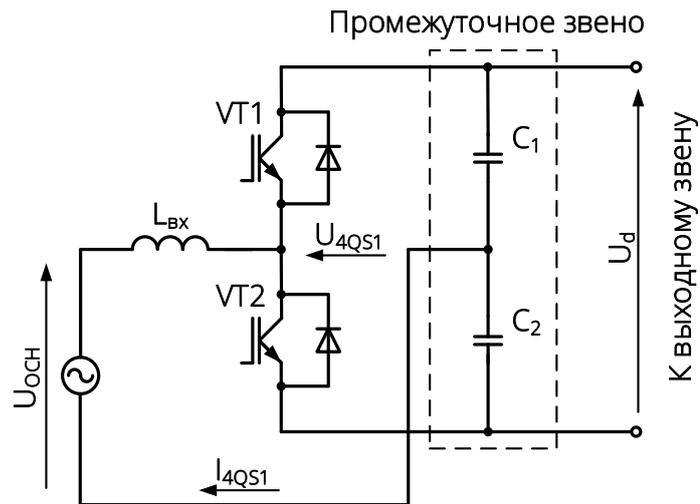


Рисунок 4.8 – Входной преобразователь

Стабилизация напряжения в промежуточном звене осуществляется путём заряда (или разряда в случае обратной передачи энергии) конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  током  $I_{4qS1}$ , потребляемым из сети. Направление и величина этого тока определяются амплитудой и фазой напряжения  $U_{4qS1}$ , формируемого входным преобразователем. Уравнение падений напряжений в контуре потребления тока (4.4), а также векторные диаграммы на рисунке 4.9 поясняют работу такой схемы с коэффициентом мощности близким к 1.

$$\dot{U}_{очн} = j\omega L_{вх} \cdot \dot{I}_{4qS1} + \dot{U}_{4qS1}. \quad (4.4)$$

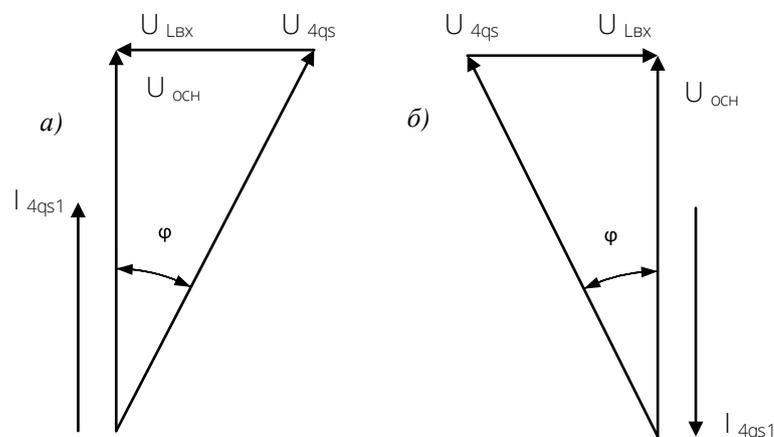


Рисунок 4.9 – Векторные диаграммы входного преобразователя

На рисунке 4.9 рассмотрены оба режима работы входного преобразователя: **а)** – отбор мощности от источника питания, **б)** – обратная передача мощности.

Схема системы управления входным преобразователем показана на рисунке 4.10. Система управления входным преобразователем является двухконтурной с внешним контуром регулирования напряжения и внутренним контуром регулирования тока. Задающим сигналом является величина напряжения в промежуточном звене  $U_d^*$ . Для работы схемы с коэффициентом мощности близким к 1, во внутреннем контуре задание по току  $i_{вх}^*$  синхронизируется с первой гармоникой питающего напряжения, значение которой в реальном времени вычисляется согласно алгоритму, основанному на разложении в ряд Фурье [72].

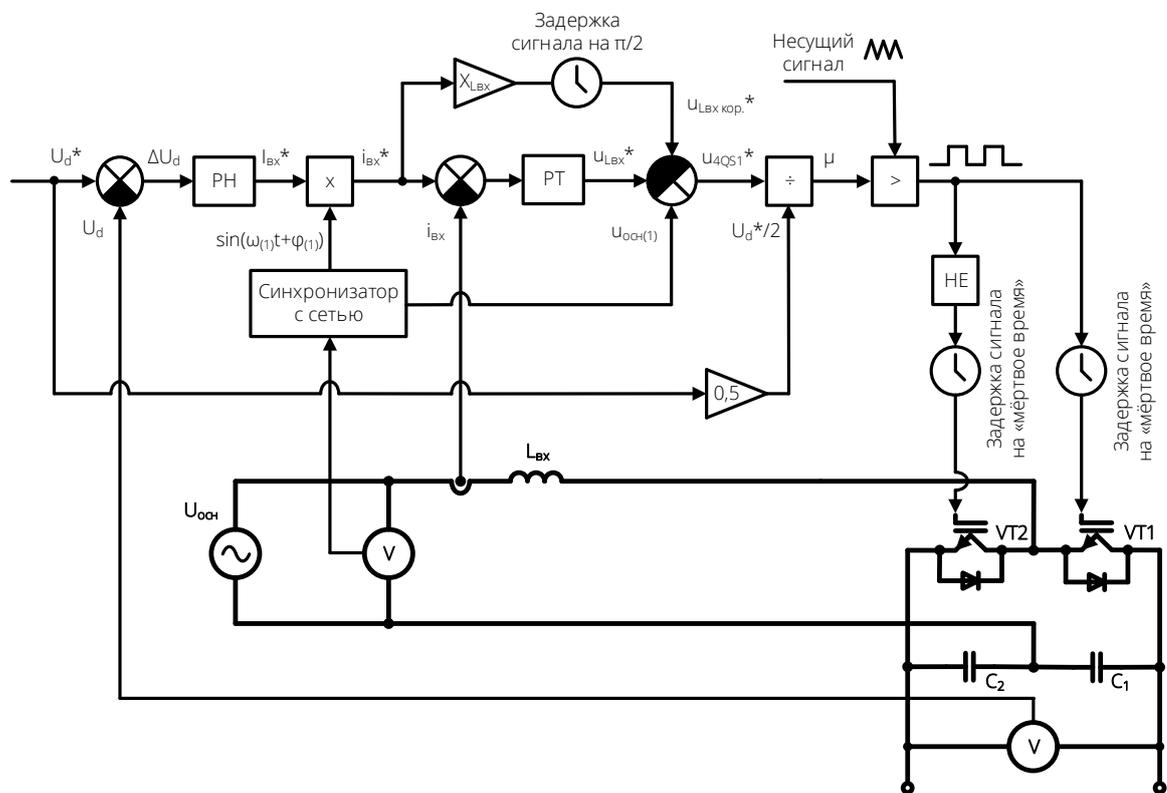


Рисунок 4.10 – Схема системы управления входным преобразователем

Регулятор тока внутреннего контура формирует задающую величину напряжения на выходе  $4QS1$ , которая поступает на блок широтно-импульсной модуляции, вырабатывающий управляющие импульсы транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ .

Функциональная схема алгоритма работы синхронизатора с сетью показана на рисунке 4.11.

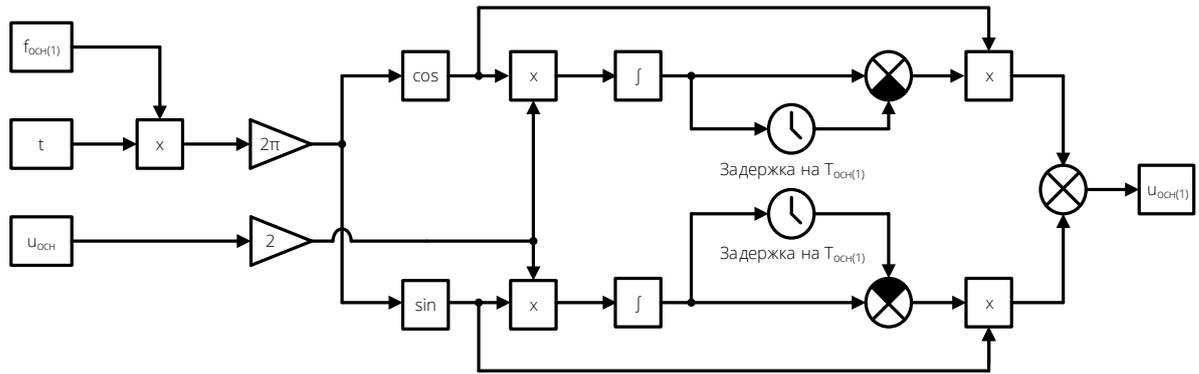


Рисунок 4.11 – Функциональная схема алгоритма работы синхронизатора с сетью

Алгоритм позволяет выделять первую гармонику сигнала после обработки одного периода его основной гармоники. Значение частоты основной гармоники сигнала  $f_{очн(1)}$ , требуемое для работы алгоритма может быть получено при помощи фильтров, реализованных программно или при помощи электрических схем.

Звено постоянного тока является источником питания для выходного инвертора **4QS2**. Схема системы управления выходным преобразователем показана на рисунке 4.12.

Задающим сигналом для выходного преобразователя является величина первой гармоники напряжения обмотки собственных нужд. Программно этот сигнал задерживается на 60 эл. град. Полученный после сдвига сигнал представляет собой заданное значение напряжения на конденсаторе или линейного напряжения  $U_{BC}$ . Заданное значение напряжения обрабатывается двухконтурной системой автоматического управления аналогичной по своему принципу работы системе управления входным преобразователем. На выходе инвертора **4QS2** методом широтно-импульсной модуляции формируется напряжение требуемой амплитуды, фазы и формы.

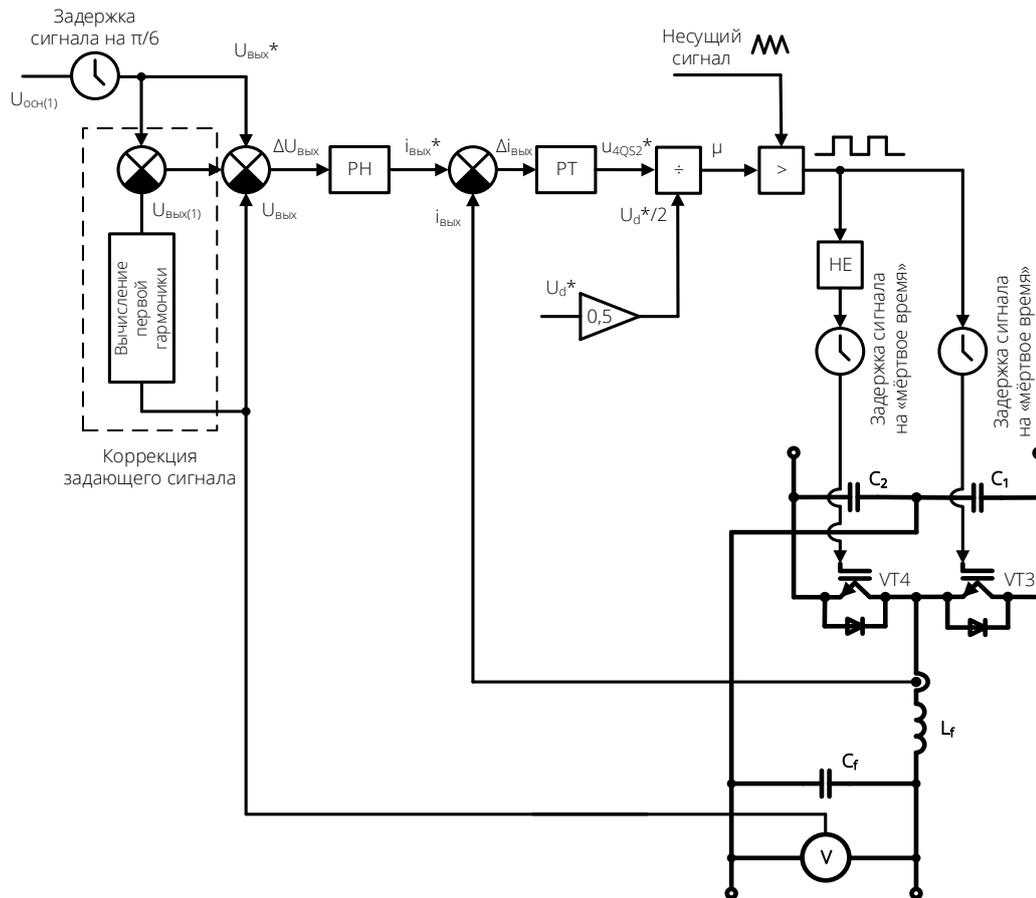


Рисунок 4.12 – Схема САУ выходным преобразователем на основе двухуровневого инвертора

Используемые в системе управления регуляторы тока и напряжения представляют собой пропорционально-интегрирующие (ПИ) регуляторы, параметры которых выбраны методом организованного поиска для обеспечения аperiodического характера переходных процессов и максимального быстродействия системы.

Отладка системы управления преобразователем, произведённая на математической модели, показала, что формируемое на выходе напряжение  $U_{ВС}$  имеет отклонение по амплитуде, приводящее к несимметрии тока порядка 20–30%. Для достижения большей симметрии тока в систему управления выходным преобразователем добавлен блок коррекции задающего сигнала, вычисляющий рассогласование между первой гармоникой требуемого выходного напряжения и первой гармоникой фактического выходного напряжения. Полученная разница

впоследствии складывается с задающим сигналом, что уменьшает амплитудные искажения напряжения  $U_{BC}$  на выходе преобразователя.

### 4.3 АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАЛОВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Маловентильный преобразователь подключается в схему питания системы вспомогательных машин без изменений её структуры и параметров её элементов. Пусковой двигатель исключается из схемы – его роль в пусковых и переходных режимах возьмёт на себя преобразователь. Для подключения к трёхфазной сети маловентильный преобразователь может быть представлен в виде схемы, показанной на рисунке 4.13.

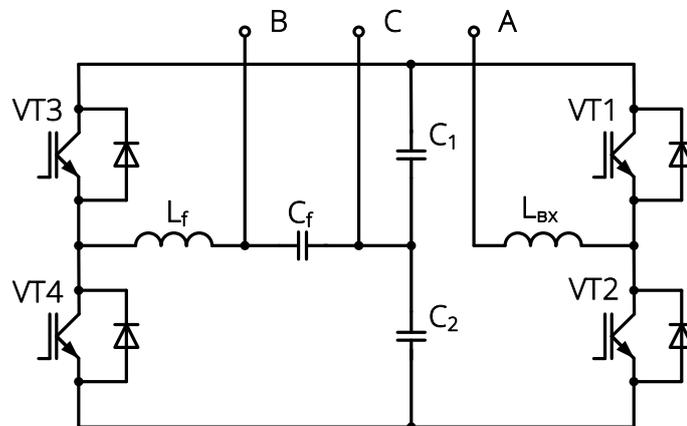


Рисунок 4.13 – Схема подключения маловентильного преобразователя к трёхфазной сети системы вспомогательных машин электровоза

При этом в роли ёмкости выходного синус-фильтра  $C_f$  выступают пусковые и рабочие конденсаторы системы вспомогательных машин.

Анализ работы предлагаемой схемы питания системы вспомогательных машин производился на математической модели, рассмотренной в разделе 2. При этом модель системы вспомогательных машин электровоза дополнена блоком

моделирования маловентильного преобразователя, согласно рисунку 4.14. Блок моделирования пускового двигателя исключён.

Результаты моделирования работы системы вспомогательных машин электровоза в численной форме приведены в таблице 4.1. В качестве исследуемых вариантов работы системы приняты:

- напряжение подстанции 27,5 кВ при нахождении электровоза у тяговой подстанции;
- напряжение подстанции 25 кВ при нахождении электровоза на середине фидерной зоны;
- консольное питание электровоза напряжением 25 кВ;
- консольное питание электровоза напряжением 19 кВ.

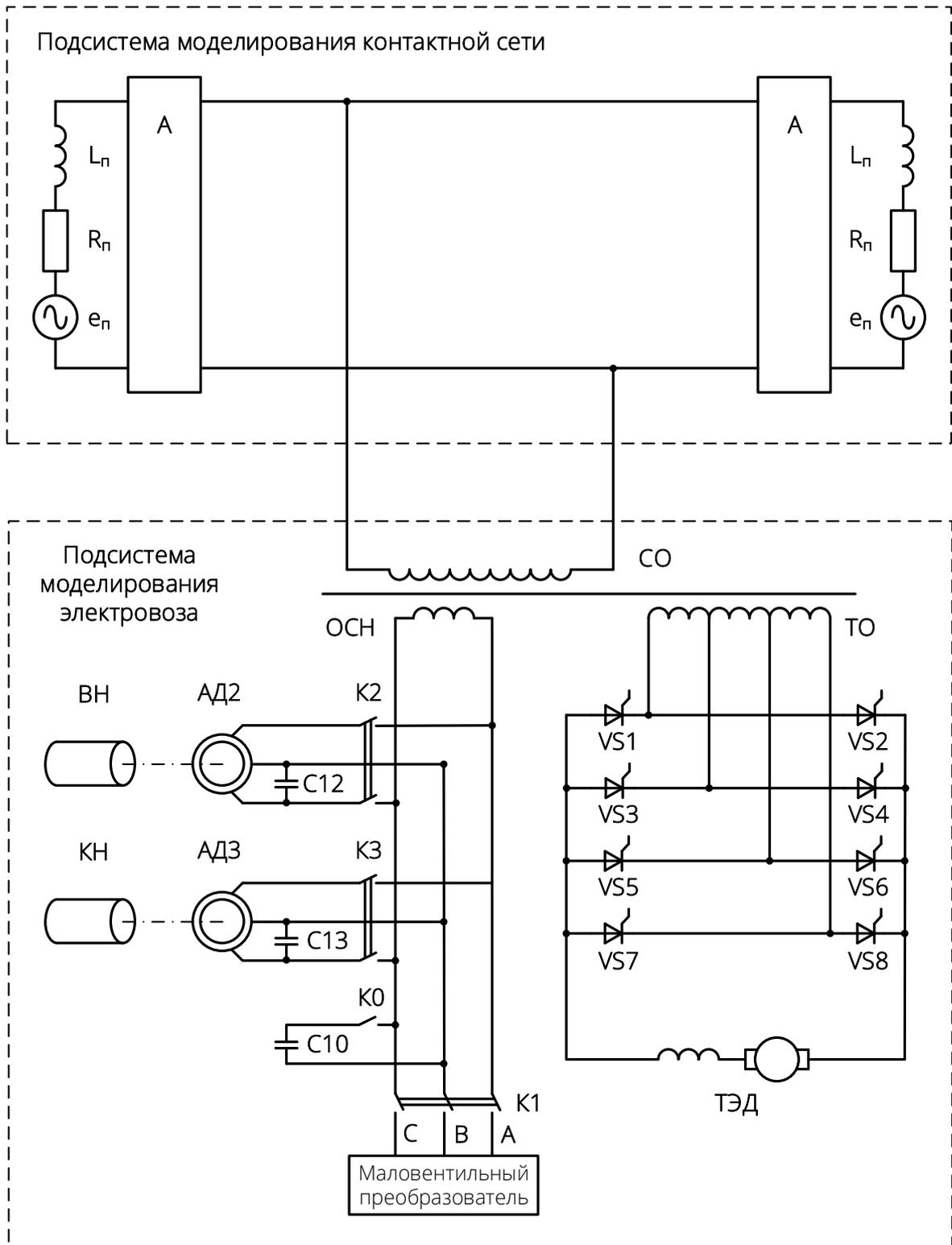


Рисунок 4.14 – Укрупнённая схема для анализа электромагнитных процессов в цепях системы вспомогательных машин с маловентильным преобразователем

Таблица 4.1 – Результаты моделирования системы вспомогательных машин электровоза с маловентильным преобразователем с учётом влияния тяговой нагрузки

Напряжение подстанции, кВ	27,5			25,0			25			19,0		
Тип ВМ	МВ	МК	МК (хол од.)	МВ	МК	МК (хол од.)	МВ	МК	МК (хол од.)	МВ	МК	МК (хол од.)
Ток ТЭД, А	810			810			810			810		
Удаление от подстанции	У тяговой подстанции			Середина фидерной зоны			Консольное питание			Консольное питание		
Напряжение на токопр-ке, кВ	27,3			24,6			23,9			17,7		
$U_A, В$	253	253	252	229	229	228	224	224	223	167	168	Не запускается
$U_B, В$	247	248	246	223	223	221	213	213	212	158	158	
$U_C, В$	248	247	247	223	223	222	213	213	212	157	156	
$I_A, А$	85,9	84,9	122	82,1	80,8	126	84,1	82,7	133	84,8	82,5	
$I_B, А$	73,9	73,8	110	70,7	69,9	116	70,5	69,2	121	71,9	69,4	
$I_C, А$	78,3	75,7	117	75,3	72,5	124	75,5	72,5	129	74,1	70,3	
$k_{2u}, \%$	0,741	0,731	0,787	0,762	0,749	0,813	0,772	0,755	0,818	1,09	1,18	
$k_{2i}, \%$	8,18	8,17	5,78	7,74	7,85	5,138	7,49	7,72	4,76	7,89	8,83	
$k_{u(1)A}, \%$	17,5	17,6	17,6	21,7	21,6	21,65	32,2	32,3	32,2	37,3	37,1	
$k_{u(1)B}, \%$	9,15	9,01	9,02	11,2	11	11,01	16,6	16,5	16,5	18,9	18,9	
$k_{u(1)C}, \%$	9,13	9,1	9,06	11,3	11,2	11,22	16,5	16,5	16,4	19,1	18,9	
$k_{i(1)A}, \%$	18,7	18,9	13,1	24,5	22,7	14,38	38,1	38,8	23,3	34,8	35,9	
$k_{i(1)B}, \%$	10,5	10,5	7,14	12,6	12,5	7,66	20,9	21,3	12,2	19,6	20,6	
$k_{i(1)C}, \%$	10,4	10,8	7	12,4	12,9	7,58	21,2	22,1	12,4	19,5	20,5	
$M_{cp}, Н \cdot м$	165	153	400	164	153	400	164	153	400	163	153	
$M_{max}, Н \cdot м$	247	238	485	249	238	484	279	269	515	244	236	
$M_{min}, Н \cdot м$	16,9	6,91	258	20,3	9,59	264	-27,3	-36,1	221	65,1	56,1	
$k_{пульс}, \%$	140	151	56,6	139	149	55,2	186	199	73,6	110	118	

Во всех случаях ток тяговых двигателей составляет 810 А, а выпрямительно-инверторный преобразователь работает в середине четвертой зоны регулирования напряжения.

Анализ полученных результатов показывает, что во всех рассмотренных вариантах коэффициент несимметрии напряжения не превышает 1,2%, а коэффициент несимметрии тока не превышает 9%. При этом среднее снижение коэффициента несимметрии по току в сравнении с вариантом без маловентильного преобразователя составляет 4,89 раза. Снижение коэффициентов несимметрии обусловило и снижение фазных токов, величина которых для всех рассмотренных случаев не превышает 86 А – незначительные превышения тока зафиксированы только для случаев холодного компрессора, что естественно при повышенном моменте сопротивления.

Применение в схеме маловентильного преобразователя также позволило осуществить запуск холодного мотор-компрессора при консольном питании напряжением 25 кВ. Однако запуск холодного компрессора в случае консольного питания напряжением 19 кВ осуществить не удалось, что объясняется недопустимым снижением напряжения на токоприёмнике электровоза (17,7 кВ для рассматриваемого случая). В части механики применение преобразователя также позволило снизить максимально значение электромагнитного момента на величину порядка 30 Н · м. При этом величина коэффициента пульсации электромагнитного момента снизилась в среднем в 1,38 раза в сравнении с вариантом без маловентильного преобразователя.

Как показал анализ результатов моделирования системы вспомогательных машин без преобразователя, наиболее критичными случаями являются:

- работа мотор-компрессора при напряжении 27,5 кВ и нахождении электровоза у тяговой подстанции;
- работа мотор-вентилятора при напряжении 19 кВ и консольном питании электровоза.

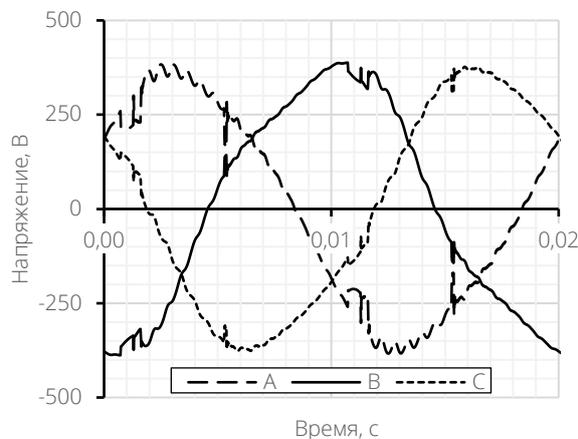
Для численного сравнения влияния маловентильного преобразователя на работу вспомогательных машин в указанных критичных случаях в таблице 4.2 приведены результаты моделирования работы вспомогательных машин с преобразователем и без него.

Таблица 4.2 – Сравнение критичных режимов работы вспомогательных машин

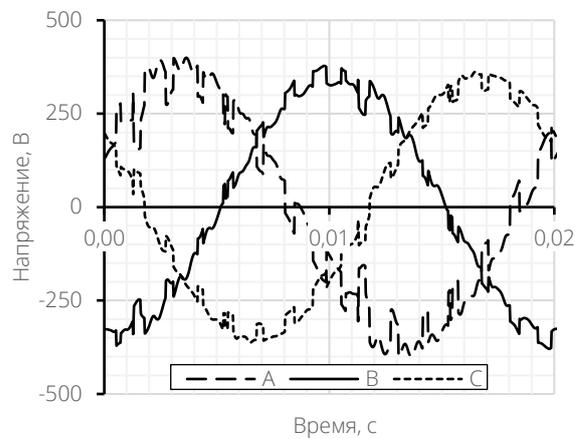
Параметр	МК 27,5 кВ у тяговой подстанции						МВ 19 кВ консольное питание					
	без преобразователя			с преобразователем			без преобразователя			с преобразователем		
Фазные напряжения, В	246	267	261	253	248	247	174	209	176	167	158	157
Фазные токи, А	48,6	120	94,3	84,9	73,8	75,7	108	159	56,9	84,8	71,9	74,1
Коэффициент несимметрии напряжения, %	4,58			0,731			13,8			1,09		
Коэффициент несимметрии тока, %	51,4			8,17			119			7,89		
Коэффициент пульсаций момента, %	1,8			1,51			3,28			1,1		

В критичных случаях применение преобразователя позволило снизить коэффициент несимметрии тока мотор-компрессора с 51,4% до 8,17%, а коэффициент асимметрии мотор-вентилятора со 119% до 7,89%. При этом удалось исключить токовую перегрузку фазы В, ток которой для случая мотор-компрессора снизился со 120 А до 73,8 А, а для случая мотор-вентилятора со 159 А до 71,9 А.

Сравнение мгновенных величин фазных токов и напряжений, а также годографов их результирующих векторов для рассматриваемых случаев приведено на рисунках 4.15–4.22.



а)



б)

Рисунок 4.15 – Влияние маловентильного преобразователя на форму мгновенных напряжений статора мотор-компрессора при напряжении в контактной сети 27,5 кВ и нахождении электровоза у тяговой подстанции **а)** – работа без преобразователя **б)** – работа с маловентильным преобразователем

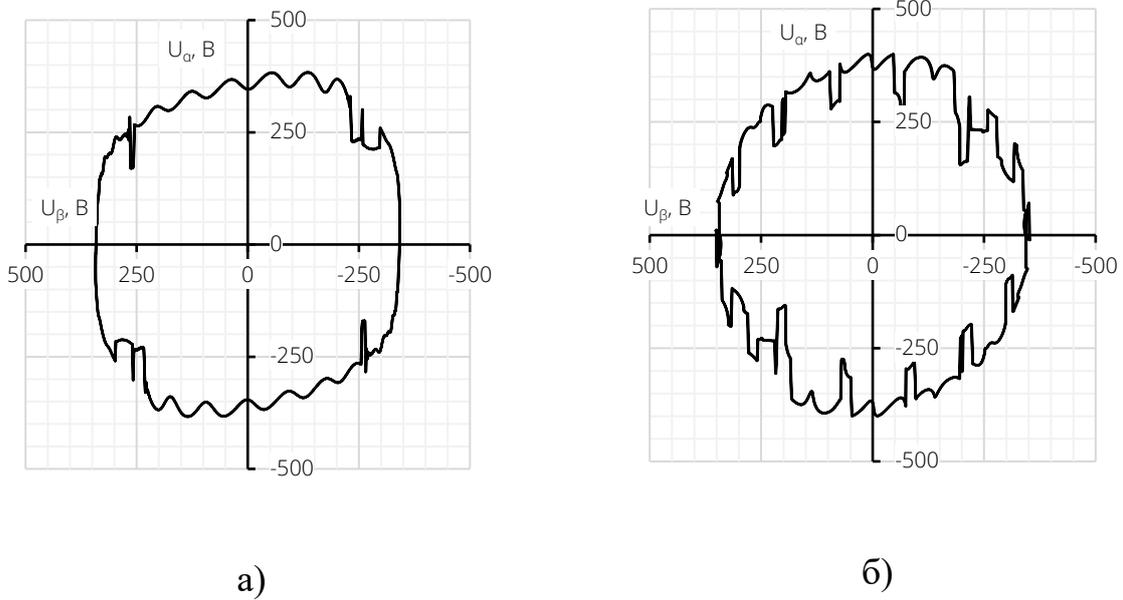
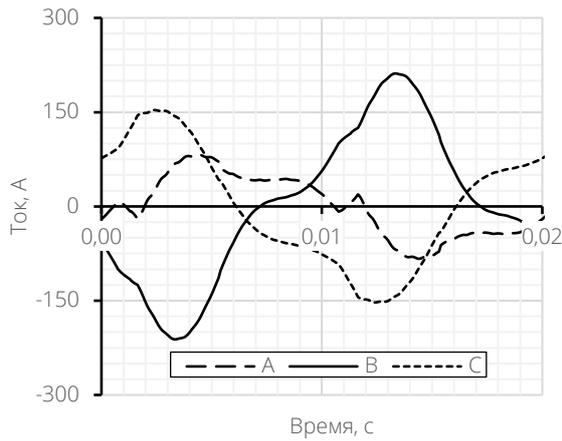
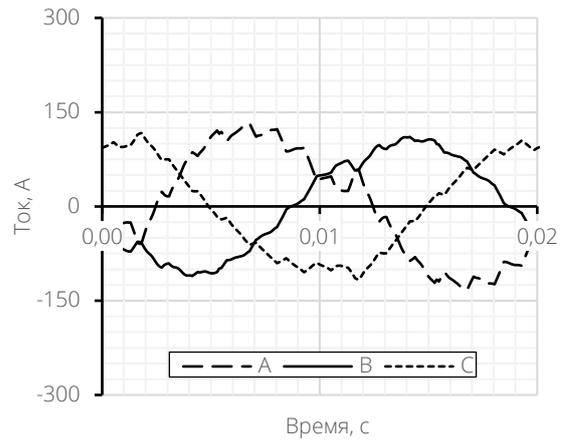


Рисунок 4.16 – Влияние маловентильного преобразователя на форму годографа результирующего вектора напряжения статора мотор-компрессора при напряжении в контактной сети 27,5 кВ и нахождении электровоза у тяговой подстанции **а)** – работа без преобразователя **б)** – работа с маловентильным преобразователем

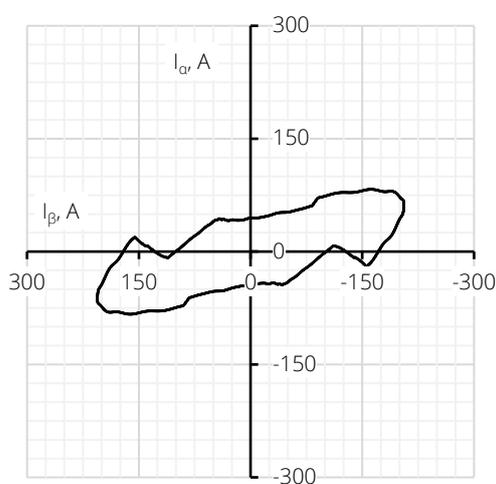


а)

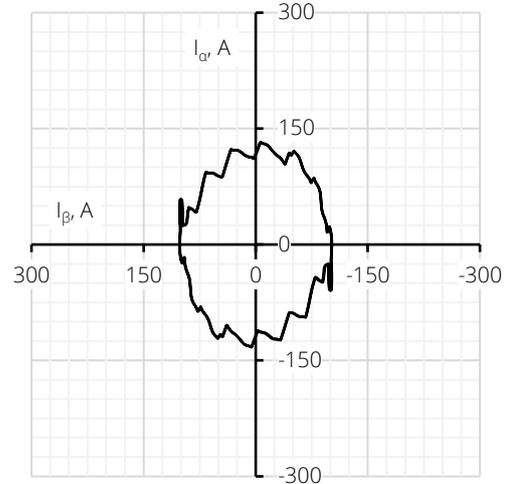


б)

Рисунок 4.17 – Влияние маловентильного преобразователя на форму мгновенных токов статора мотор-компрессора при напряжении в контактной сети 27,5 кВ и нахождении электровоза у тяговой подстанции **а)** – работа без преобразователя **б)** – работа с маловентильным преобразователем



а)



б)

Рисунок 4.18 – Влияние маловентильного преобразователя на форму годографа результирующего вектора тока статора мотор-компрессора при напряжении в контактной сети 27,5 кВ и нахождении электровоза у тяговой подстанции **а)** – работа без преобразователя **б)** – работа с маловентильным преобразователем

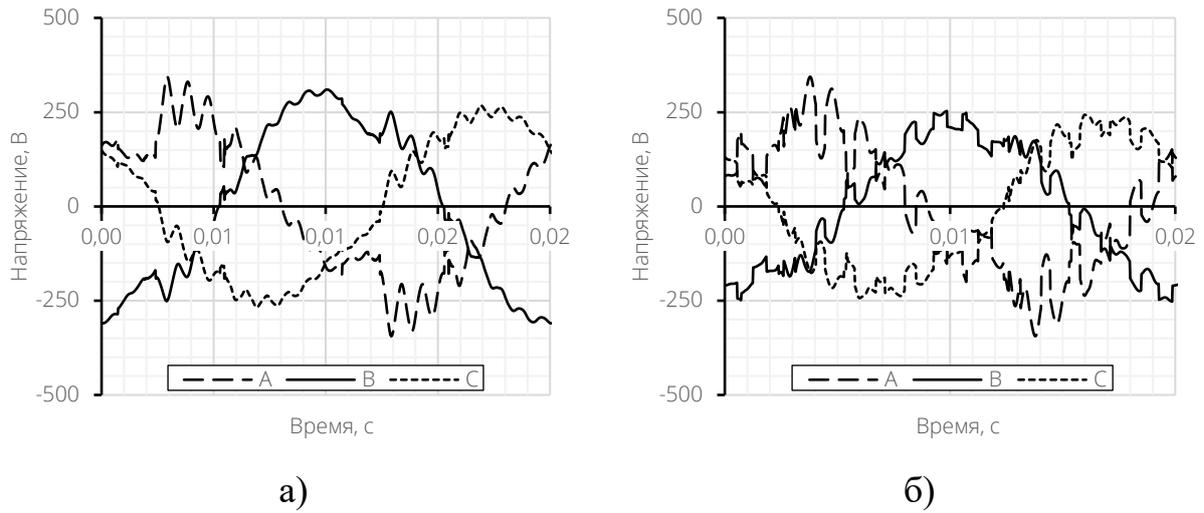


Рисунок 4.19 – Влияние маловентильного преобразователя на форму мгновенных напряжений статора мотор-вентилятора при напряжении в контактной сети 19 кВ и консольном питании электровоза *a)* – работа без преобразователя *б)* – работа с маловентильным преобразователем

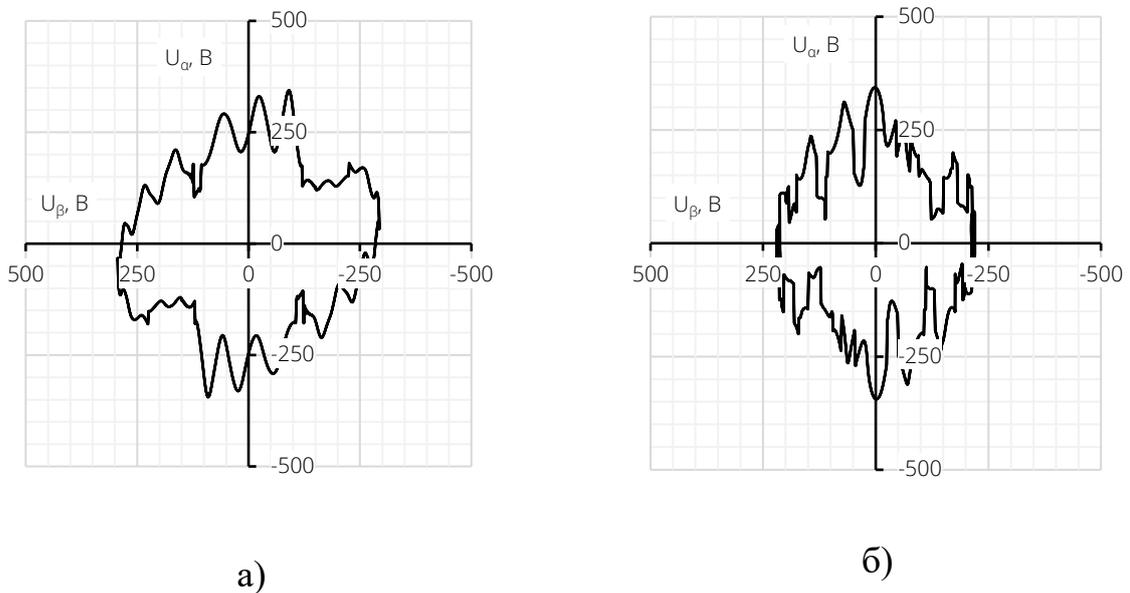
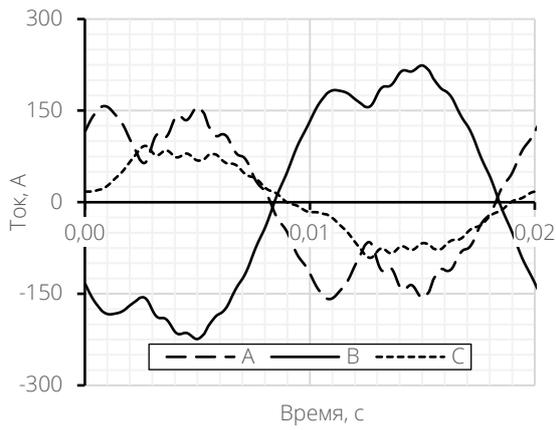
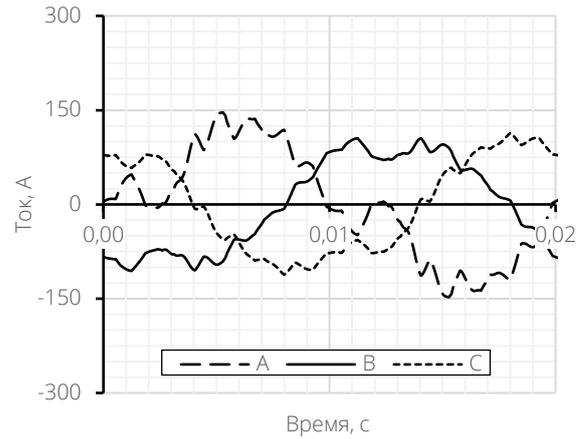


Рисунок 4.20 – Влияние маловентильного преобразователя на форму годографа результирующего вектора напряжения статора мотор-вентилятора при напряжении в контактной сети 19 кВ и консольном питании электровоза *a)* – работа без преобразователя *б)* – работа с маловентильным преобразователем

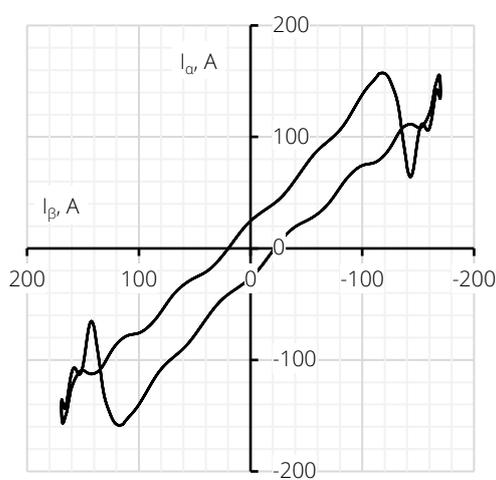


а)

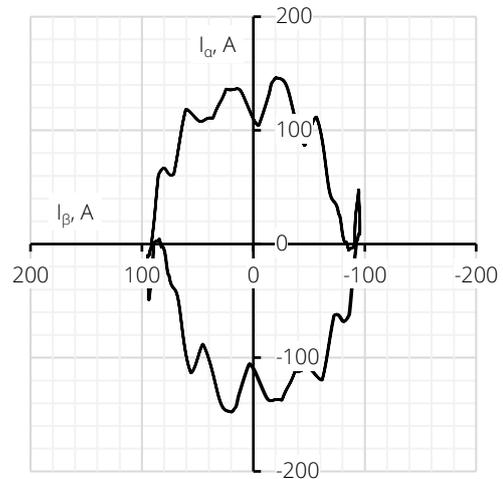


б)

Рисунок 4.21 – Влияние маловентильного преобразователя на форму мгновенных токов статора мотор-вентилятора при напряжении в контактной сети 19 кВ и консольном питании электровоза **а)** – работа без преобразователя **б)** – работа с маловентильным преобразователем



а)



б)

Рисунок 4.22 – Влияние маловентильного преобразователя на форму годографа результирующего вектора тока статора мотор-вентилятора при напряжении в контактной сети 19 кВ и консольном питании электровоза **а)** – работа без преобразователя **б)** – работа с маловентильным преобразователем

Высокочастотные искажения формы токов и напряжений обусловлены работой входного преобразователя в режиме широтно-импульсной модуляции с частотой 750 Гц, это прослеживается и в спектральном составе токов и напряжений. Влияние же 3 и 5 гармоник снижено по сравнению со случаем работы без применения преобразователя. Сравнение спектральных составов показано на рисунках 4.23–4.25

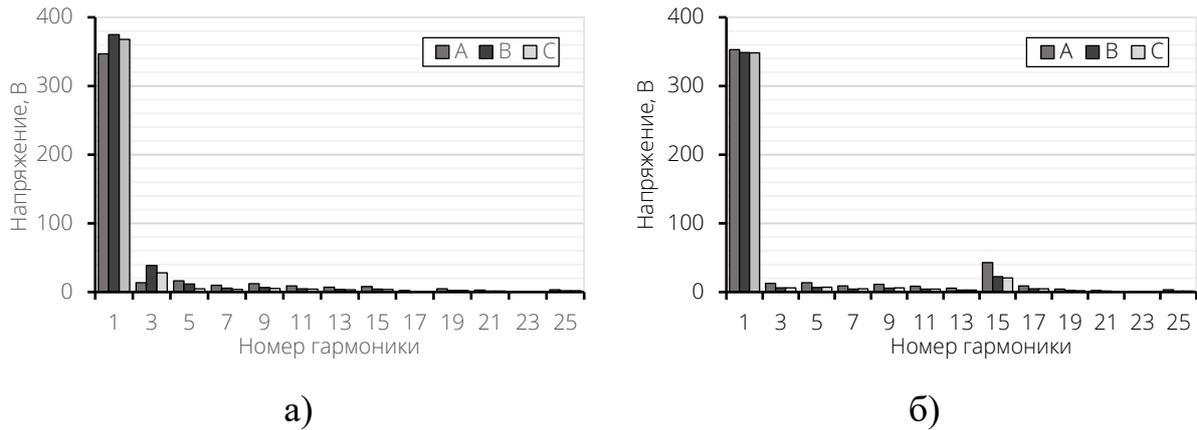


Рисунок 4.23 – Спектры фазных напряжений статора мотор-компрессора в критическом режиме *а)* – работа без преобразователя *б)* – работа с маловентильным преобразователем

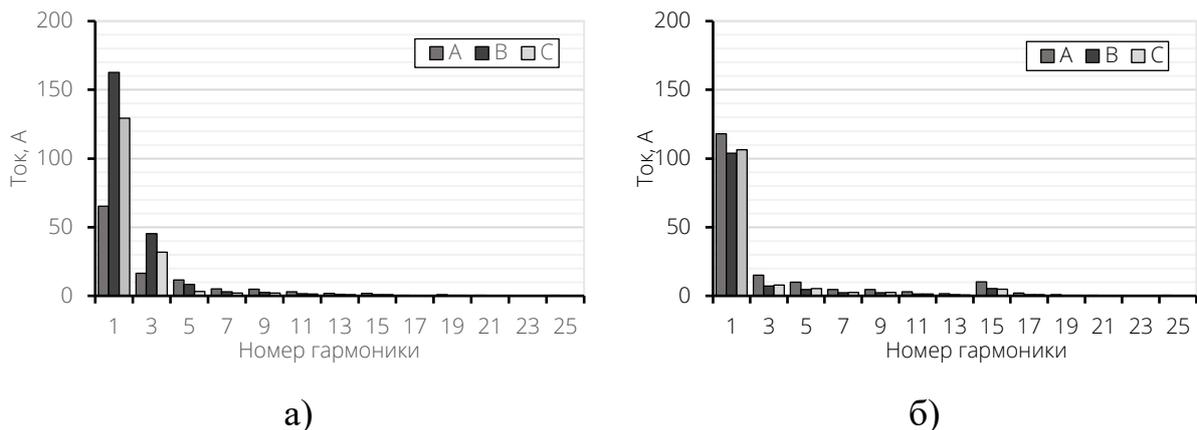


Рисунок 4.24 – Спектры фазных токов статора мотор-компрессора в критическом режиме *а)* – работа без преобразователя *б)* – работа с маловентильным преобразователем

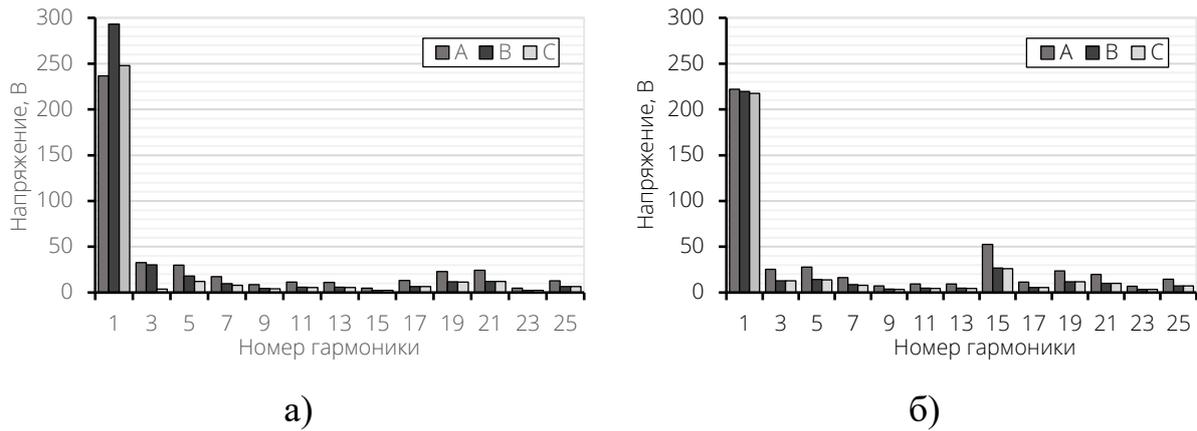


Рисунок 4.25 – Спектры фазных напряжений статора мотор-вентилятора в критичном режиме *а)* – работа без преобразователя *б)* – работа с маловентильным преобразователем

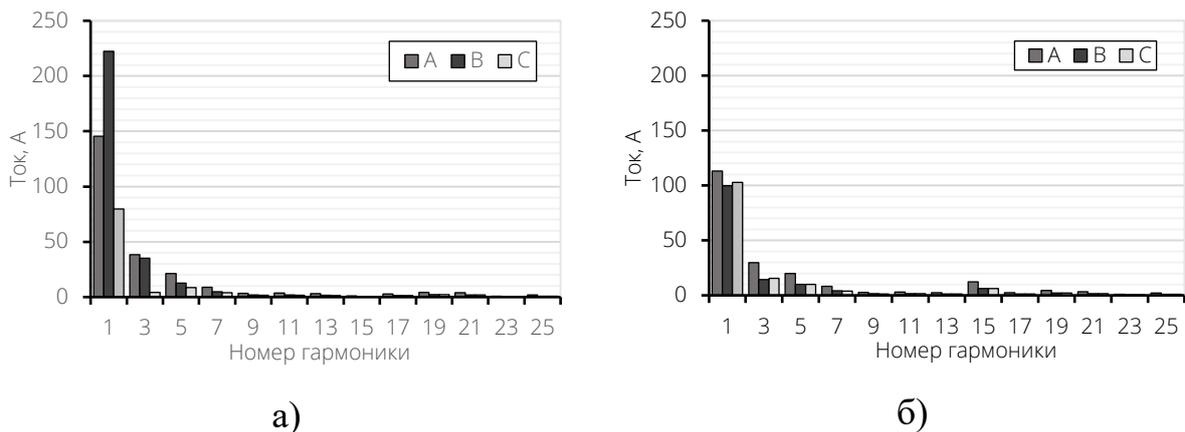


Рисунок 4.26 – Спектры фазных токов статора мотор-вентилятора в критичном режиме *а)* – работа без преобразователя *б)* – работа с маловентильным преобразователем

Анализ результатов моделирования также показал, что реле, производящее отключение пусковой ёмкости во всех случаях срабатывает в самом начале пуска, до выхода машины на номинальную частоту вращения, так как преобразователь обеспечивает на ёмкости наличие напряжения  $U_{BC}$ , величина которого больше уставки реле. При снижении напряжения в контактной сети отключение пусковой ёмкости не происходит, как в режиме пуска, так и в установившемся режиме, аналогично схеме без маловентильного преобразователя. Следовательно, при

использовании преобразователя из схемы может быть исключена пусковая ёмкость. Анализ результатов моделирования пуска мотор-компрессора показывает, что вариант без пусковой ёмкости аналогичен варианту работы с ней. На рисунке 4.27 показаны графики разгона ротора мотор-компрессора при пониженном напряжении в контактной сети с питанием от маловентильного преобразователя. Результаты показывают, что длительность пуска мотор-компрессора в обоих случаях практически одинакова. Для варианта с пусковой ёмкостью она составляет 0,57 с, а для варианта без неё 0,59 с. При этом в случае подключения пусковой ёмкости двигатель работает с коэффициентами несимметрии 1,19% по напряжению и 8,87% по току. С отключённой же ёмкостью коэффициенты несимметрии составляют 0,817% по напряжению и 6,32% по току.

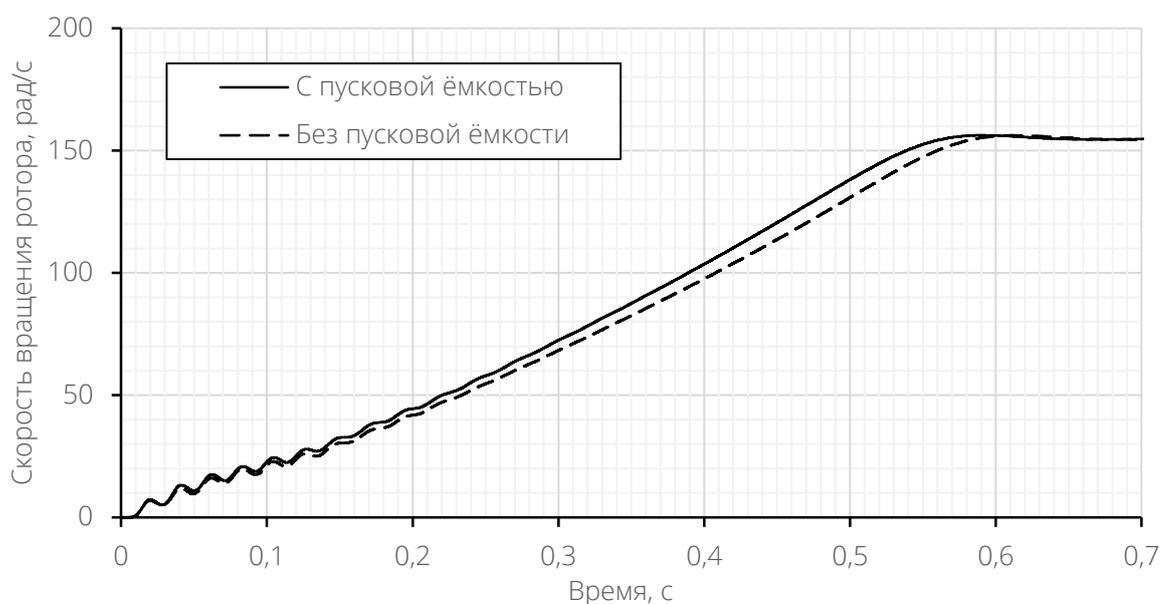


Рисунок 4.27 – Сравнение длительности пуска мотор-компрессора с питанием от маловентильного преобразователя с пусковой ёмкостью и без

Таким образом, применение пусковой ёмкости в цепи питания вспомогательных машин с маловентильным преобразователем не оправдано. Однако полный отказ от батареи пусковых конденсаторов нежелателен по причине необходимости обеспечения работоспособности схемы питания вспомогательных машин в случае выхода из строя маловентильного преобразователя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ схем питания систем вспомогательных машин электроподвижного состава показал, что на современном электроподвижном составе для питания вспомогательных асинхронных машин применяют полупроводниковые преобразователи собственных нужд, обеспечивающие трёхфазное питание.

2. На электровозах переменного тока Российских железных дорог типа 2ЭС5К, 3ЭС5К, ЭП1М и их аналогах питание трёхфазных асинхронных двигателей осуществляется от однофазной сети с использованием вращающегося или конденсаторного расщепителя фаз, что не обеспечивает качественного питания вспомогательных машин и приводит к увеличенному числу отказов вспомогательных машин, достигающему 20% от общего числа отказов электровозов.

3. Предложенная в работе модель асинхронного двигателя позволяет исследовать процессы в асинхронной машине с учётом эффекта вытеснения тока в обмотке ротора, при этом расхождение результатов моделирования с результатами, полученными при стендовых испытаниях не превышают 10%.

4. Предложенная математическая модель системы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К позволяет исследовать влияние изменения величин ёмкости фазосдвигающих конденсаторов, нагрузочных моментов и тяговой нагрузки на показатели работы вспомогательных асинхронных двигателей.

5. Исследование работы вспомогательных машин при питании от однофазного источника синусоидального напряжения показало:

– Отклонение ёмкости фазосдвигающего конденсатора от расчётного значения в пределах  $\pm 10\%$  приводит к увеличению коэффициентов несимметрии по току до 11% при расчётных значениях питающего напряжения 405 В и нагрузочного момента 164,5 Н·м. При этом установлено, что снижение ёмкости приводит к токовой перегрузке фаз А и С, подключённых непосредственно к

источнику однофазного напряжения, а повышение ёмкости приводит к возрастанию тока в фазе В, подключённой к источнику напряжения через конденсатор.

– При расчётных величинах ёмкости фазосдвигающего конденсатора, нагрузочного момента и пониженном на 31% относительно номинала напряжении на обмотке собственных нужд 308 В коэффициент несимметрии по току составляет 33,5% с ростом тока в фазе А. При повышенном на 16% напряжении на обмотке собственных нужд 470 В коэффициент несимметрии по току составляет 14,2% и сопровождается повышением тока в фазах В и С.

– При номинальном напряжении источника питания и расчётной величине ёмкости фазосдвигающего конденсатора 600 мкФ увеличение момента сопротивления на валу двигателя на 240% до 400 Н·м приводит к увеличению коэффициента несимметрии по току до 53,9% и сопровождается токовой перегрузкой фаз А и С.

– При холостом ходе асинхронного двигателя типа НВА-55С, характерном для режима работы вращающегося расщепителя фаз, коэффициент несимметрии по току составляет 60% и сохраняется во всем диапазоне изменения напряжения на обмотке собственных нужд от 308 В до 470 В. При этом некоторые из фаз двигателя генерируют активную мощность, компенсация которой осуществляется другими фазами, работающими в двигательном режиме. Величина активной мощности отдельных фаз может превышать 5 кВт, в то время как двигатель, работая на холостом ходу, потребляет не более 1 кВт активной мощности.

6. Исследование работы системы вспомогательных машин на электровозе с учётом влияния тяговой нагрузки и контактной сети, показало:

– Запуск двигателя привода компрессора с загустевшим маслом не гарантирован для случаев консольного питания электровоза с напряжением на тяговой подстанции 25 кВ и 19 кВ.

– На электровозах 2ЭС5К при напряжении на токоприёмнике 27,5 кВ двигатель привода компрессора работает с коэффициентом несимметрии по току 51,4%, что объясняется завышенной ёмкостью фазосдвигающего конденсатора, на

60% превышающей расчётную. При снижении напряжения на токоприёмнике или увеличении момента нагрузки двигателя несимметрия токов сохраняется достаточно большой и составляет 10–15%, что указывает на невозможность обеспечить качественное трёхфазное питание двигателя привода компрессора при принятых параметрах фазосдвигающего конденсатора.

– Установлено, что при снижении напряжения на подстанции до минимального значения и консольном питании на электровозе 2ЭС5К не происходит отключение пусковых конденсаторов. При этом для случая пуска мотор-вентилятора коэффициент несимметрии по току составил 119%, а ток в фазе В достигает 159 А, что на 37% превышает номинальное значение.

– Тяговая нагрузка и конечные параметры контактной сети приводят к искажению форм напряжений и токов фаз вспомогательных двигателей, что вызывает повышение коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 36% и тока до 80% и увеличивает токовую нагрузку на фазы двигателя, увеличивая их перегрев.

7. Исследование работы системы вспомогательных машин с маловентильным преобразователем показало:

– Применение маловентильного преобразователя числа фаз позволяет получить симметричное трёхфазное напряжение для питания вспомогательных машин и отказаться от использования пускового двигателя, гарантируя при этом запуск вспомогательных машин во всех эксплуатационных условиях.

– Питание вспомогательных машин от маловентильного преобразователя позволяет снизить коэффициент несимметрии по напряжению до 2% и коэффициент несимметрии по току до 9% во всём диапазоне изменения питающих напряжений и нагрузок.

– Питание вспомогательных машин от маловентильного преобразователя позволяет снизить влияние тяговой нагрузки на их работу, ограничить коэффициент гармонических составляющих тока в фазах двигателя до 30% и обеспечить снижение тепловой нагрузки и нагрев двигателя.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. ГОСТ Р 55364-2012 Электровозы. Общие технические требования.
2. Захарченко Д. Д. Подвижной состав железных электрических дорог. Тяговые электромашины и трансформаторы / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто – М.: Транспорт, 1968 – 296 с.
3. Ермолин П. П. Надёжность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин – Л.: Энергия, – 248 с.
4. Иванов П. Ю. Повышение эксплуатационной надёжности асинхронных вспомогательных машин магистральных электровозов переменного тока: дисс. канд. тех. наук // Иркутск: ИрГУПС, 2015.
5. Чиркадзе Г. И. Электровоз ВЛ11. Руководство по эксплуатации / Г. И. Чиркадзе, О. А. Кикнадзе – М.: Транспорт, 1983 – 464 с.
6. Кикнадзе О. А. Электровозы ВЛ10 и ВЛ10У. Руководство по эксплуатации / О. А. Кикнадзе – М.: Транспорт, 1981 – 519 с.
7. Амелин В. М. Электропоезда. Механическая часть, тяговые двигатели и вспомогательные машины. Системы обслуживания и ремонта / В. М. Амелин, Ю. М. Иньков, М. И. Озеров, В. Н. Ротанов, А. А. Рубцов, Е. К. Рыбников, Я. И. Шур – М.: НЦ ЭНАС, 2000 – 200 с.
8. Каптелкин В. А. Пассажирские электровозы ЧС4 и ЧС4Т / В. А. Каптелкин, Ю. В. Колесин, И. П. Ильин, А. С. Потопов, Д. И. Моховиков – М.: Транспорт, 1975 – 384 с.
9. Пегов Д. В. Электропоезда постоянного тока ЭТ2, ЭТ2М, ЭР2Т, ЭД2Т / Д. В. Пегов, П. В. Бурцев, В. Е. Андреев – М.: Центр коммерческих разработок, 2003 – 184 с.
10. Федюков Ю. А. Расщепитель фаз и расщепительный эффект / Ю. А. Федюков, Е. А. Марченко, С. В. Фошкина // Локомотив, 2011 №4.

11. Некрасов О. А. Вспомогательные машины электровозов переменного тока / О. А. Некрасов, А. М. Рутштейн – М.: Транспорт, 1988 – 223 с.
12. Тушканов Б. А. Электровоз ВЛ85. Руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарёв, Л. А. Позднякова – М.: Транспорт, 1992 – 480 с.
13. Федюков Ю. А. Энергетические характеристики расщепителей фаз // Электровозостроение. Сборник научных трудов. – Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2011 т. 43.
14. Литовченко В. В. Совершенствование системы питания вспомогательных машин электровозов переменного тока / В. В. Литовченко, А. В. Невинский // Сборник научных трудов XI научно-практической конференции "Безопасность движения поездов" – М.: МИИТ, 2010.
15. Невинский А. В. Системы питания цепей собственных нужд современного тягового подвижного состава // Электроника и электрооборудование транспорта, 2009 № 2-3.
16. Богомоллов Н. Ю. Высокоскоростные поезда "Сапсан" В1 и В2. Часть 1 – М.: ОАО "РЖД", 2013 – 522 с.
17. Электровоз 2ЭС4К. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы ИДМБ.661141.004РЭ1 (ЗТС.000.003РЭ1) – Новочеркасск: ОАО «ВЭЛНИИ», 2006.
18. Марченко А. В. Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5 / А. В. Марченко, К. П. Солтус // Локомотив, 2013 №1.
19. Покровский С. В. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / С. В. Покровский, М. И. Корешков, С. В. Волконовский, А. И. Шутко, А. В. Мулиненко, А. Е. Чекмарёв, В. В. Кобылянский – М.: Интекст, 2009 – 356 с.
20. Солтус К. П. Знакомьтесь: электровоз ЭП20 / К. П. Солтус // Локомотив, 2013 №4.

21. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми двигателями. Руководство по эксплуатации. 2ЭС6.00.000.000 РЭ – Верхняя Пышма: ОАО «УЗЖМ», 2010.
22. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми двигателями. Руководство по эксплуатации. Описание и работа. Электронные системы и статические преобразователи. Часть 2. 2ЭС10.00.000.000 РЭ1 – Екатеринбург: ОАО «СТМ», 2010.
23. Рутштейн А. М. Вспомогательный привод электровозов переменного тока // Электровозостроение. Сборник научных трудов – Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2008 т. 56.
24. Тищенко А. И. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам. Том 1 / А. И. Тищенко, И. П. Исаев, Н. И. Панов и др. – М.: Транспорт, 1976 – 432 с.
25. Рутштейн А. М. Совершенствование системы вспомогательного привода электровозов переменного тока / А. М. Рутштейн, А. А. Щупак, А. И. Назаров // Электровозостроение. Сборник научных трудов – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 1984 т. 25.
26. Шестопёров Г. Н. Анализ электрических характеристик в системах питания вспомогательных машин электровозов переменного тока серии "Ермак" / Г. Н. Шестопёров, О. Г. Аriskин, А. А. Тишкин, И. В. Синявский // Электровозостроение. Сборник научных трудов – Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2011 т. 61.
27. Шестопёров Г. Н. Разработка шкафа питания вспомогательных машин для электровозов переменного тока 2ЭС5К "Ермак" / Г. Н. Шестопёров, О. Г. Аriskин, А. С. Живечков // Электровозостроение. Сборник научных трудов – Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2011 т. 61.
28. Тишкин А. А. Энергоснабжение в система питания вспомогательных машин электровозов переменного тока серии "Ермак" / А. А. Тишкин, А. А. Курганов,

- А. А. Калюжный, И. В. Синявский // Электровозостроение. Сборник научных трудов – Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2012 т. 63.
29. Протокол испытаний электродвигателя типа АНЭ225L4 с устройством "Velvet" №7.14.12.652 – Владимир: ИЦ ЭМБЭП ОАО "НИПТИЭМ", 2014.
30. Невинсий А. В. Совершенствование системы питания вспомогательных электроприводов электровозов переменного тока: дисс. канд. тех. наук // М.: МИИТ, 2011.
31. Магда Ю. С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков – М.: ДМК Пресс, 2012 – 208 с.
32. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink: Учебник – СПб.: Лань, 2013 – 448 с.
33. Simulink [Электронный ресурс] // MATLAB и Simulink центр компетенций компании Mathworks: [сайт]. [2016]. URL: <http://matlab.ru/products/simulink> (дата обращения: 29.09.2016).
34. Модельно-ориентированное проектирование [Электронный ресурс] // MATLAB и Simulink центр компетенций компании Mathworks: [сайт]. [2016]. URL: <http://matlab.ru/solutions/mbd/mbd> (дата обращения: 29.09.2016).
35. Электровоз 2ЭС5К (3ЭС5К) Магистральный. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы ИДМБ.661142.009РЭ1 (ЗТС.001.012РЭ1) – Новочеркасск: ОАО «ВЭЛНИИ», 2004.
36. Электровоз 2ЭС5К (3ЭС5К) Магистральный. Руководство по эксплуатации. Книга 3. Описание и работа. Электрические машины ИДМБ.661142.009РЭ3 (ЗТС.001.012РЭ3) – Новочеркасск: ОАО «ВЭЛНИИ», 2004.
37. Электродвигатель асинхронный НВА-55С. Расчётная записка. 699.014.660 РР – ВЭЛНИИ-ОПЭМ.
38. Федюков Ю. А. Процесс пуска асинхронных двигателей в несимметричных режимах / Ю. А. Федюков, Е. А. Марченко, С. В. Фошкина //

Электровозостроение: сборник научных трудов – Новочеркасск: ОАО «ВЭЛНИИ», 2010. – т. 59.

39. Asynchronous Machine [Электронный ресурс] // MathWorks develops, sells, and supports MATLAB and Simulink products: [сайт]. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html> (дата обращения: 13.03.2017).
40. Типовые испытания двигателя НВА-55С с обмоткой ротора, выполненной из медных стержней. Протокол ЭМ – 39 – 2008 – Новочеркасск: ОАО «ВЭЛНИИ», 2008.
41. Важнов А. И. Электрические машины – Л.: Энергия, 1968 – 768 с.
42. Паршин А. Н. Регулируемый электропривод на базе тиристорного преобразователя с непосредственной связью для систем собственных нужд электровозов переменного тока: дисс.канд.тех.наук // М.: МИИТ, 2006.
43. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин – М.: Высшая школа, 2001 – 327 с.
44. Шуйский В. П. Расчёт электрических машин (перевод с немецкого) – Л.: Энергия, 1968 – 732 с.
45. Алексеев А. С. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза: дисс. канд. тех. наук // М.: МИИТ, 2009.
46. Телегин М. В. Адаптивная система комбинированного автоматического управления током тяговых двигателей электроподвижного состава: дисс. канд. тех. наук // М.: МИИТ, 2012.
47. Савоськин А. Н. Синтез систем автоматического управления электроподвижного состава. Часть 1. Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления» / А. Н. Савоськин, А. С. Алексеев – М.: МИИТ, 2010 – 48 с.
48. Multi-Winding Transformer [Электронный ресурс] // MathWorks develops, sells, and supports MATLAB and Simulink products: [сайт]. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/multiwindingtransformer.html>

[www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/multiwindingtransformer.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/multiwindingtransformer.html) (дата обращения: 12.01.2017).

49. Евграфов А. Г. Моделирование тяговых трансформаторов электроподвижного состава / А. Г. Евграфов, С. А. Фролов // Вестник МИИТа, 2005 №13.
50. Донской Д. А. Регулируемый компенсатор реактивной мощности для электровозов однофазно-постоянного тока : дисс. канд. тех. наук // М.: МИИТ, 2007.
51. Электровоз 2ЭС5К (3ЭС5К) Магистральный. Руководство по эксплуатации. Книга 4. Описание и работа. Электрические аппараты и оборудование ИДМБ.661142.009РЭ4 (ЗТС.001.012РЭ4) – Новочеркасск: ОАО «ВЭлНИИ», 2004.
52. Трансформатор тяговый однофазный типа ОНДЦЭ-4350/25-У2-02. Паспорт – Хмельницкий: ПАО «Укрэлектроаппарат», 2012.
53. Тихомиров П. М. Расчёт трансформаторов / П. М. Тихомиров – М.: Транспорт, 1989 – 176 с.
54. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог – М.: Транспорт, 1965 – 465 с.
55. Бессонов А. А. Теоретические основы электротехники – М.: Высшая школа, 1978 – 516 с.
56. Электровоз 2ЭС5К (3ЭС5К) Магистральный. Руководство по эксплуатации. Книга 2. Компоновка оборудования. Монтаж электрический. Система вентиляции ИДМБ.661142.009РЭ2 (ЗТС.001.012РЭ2) – Новочеркасск: ОАО «ВЭлНИИ», 2004.
57. Пехотский И. В. Вопросы частотного пуска мотор-компрессора с асинхронным двигателем / И. В. Пехотский, М. Ю. Пустоветов, П. Г. Колпахчян, С. Ю. Пустоветова / Электровозостроение. Сборник научных трудов – Новочеркасск: ВЭлНИИ, 2003 т. 45.

58. Богданов В. С. Дипломное и курсовое проектирование механического оборудования и технологических комплексов предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В. С. Богданов, А. С. Ильин, В. Я. Дзюзер, В. Г. Струпков, М. Т. Макридина, Е. М. Кудрявцев, Ю. П. Чудный – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006 – 784 с.
59. Радин В. И. Электрические машины: асинхронные машины. Учебник для электромеханических специальностей вузов / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Захарович – М.: Высшая школа, 1998 – 328с.
60. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
61. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов – СПб.: Питер, 2010 – 350 с.
62. Торопцев Н. Д. Трёхфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 95 с.
63. Конденсаторы типа КПС. Руководство по эксплуатации МКЖИ.673116.001РЭ – Серпухов: ЗАО «Электроинтер», 2009.
64. Электродвигатели асинхронные типа НВА. Технические условия. ТУ 16-99 ДТЖИ.526413.001ТУ – Новочеркасск: ОАО «ВЭЛНИИ», 1999.
65. Малютин А. Ю. Особенности электромагнитных процессов асинхронных двигателей вспомогательных машин электровозов переменного тока // Труды научно-практической конференции "Неделя науки – 2016" – М.: МИИТ, 2016.
66. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац, – М.: Государственное энергетическое издательство, 1963 – 744 с.
67. Вигриянов П. Г. Пульсации электромагнитного момента многофазных вентильных двигателей в аварийных режимах работы // Вопросы электромеханики. – Москва: АО Корпорация "ВНИИЭМ", 2012 т. 128.

68. Литовченко В. В. Систему питания вспомогательных машин необходимо совершенствовать/ В. В. Литовченко, А. В. Невинский // Локомотив, 2011 №6 [Электронный ресурс]
69. Cao J. Wide correction range three-level dynamic voltage corrector / J. Cao, H. Liu, P. Ding, B. Yang, S. Xie // IEEE transactions on power electronics. A publication of the IEEE power electronics society, 2016 volume 31 №9.
70. Zhong Q. C. Virtual Synchronous Machines. A unified interface for smart grid integration // IEEE. Power electronics, 2016 volume 3 №4.
71. Филатов В. Двух- и трёхуровневые инверторы на IGBT // Силовая электроника, 2012 № 4.
72. Данко П. Е. Высшая математика в упражнениях и задачах. Часть 1 / П. Е. Данко, А. Г. Попов, Т. Я. Кожевникова, – М.: Высшая школа, 1986 – 415 с.