

На правах рукописи



Малютин Артём Юрьевич

Применение маловентильных преобразователей в системе питания
вспомогательных цепей электровозов переменного тока

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» (МГУПС(МИИТ)).

Научный руководитель: **Литовченко Виктор Васильевич**, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Розанов Юрий Константинович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Электрические и электронные аппараты», профессор;

Никифорова Нина Борисовна, кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», отдел «Тяговый подвижной состав», ведущий научный сотрудник.


Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «28» июня 2017 г. В 15.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

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

Автореферат разослан « » 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 218.005.02


Гречишников Виктор Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Общее число электровозов переменного тока (2ЭС5К, 3ЭС5К, ВЛ85) на сети железных дорог России около пяти тысяч единиц. Практика показывает, что до 20% отказов на электровозах переменного тока происходит по причине повреждения вспомогательных машин, для привода которых применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Так, в 2012 году по всему парку электровозов ОАО «РЖД» на каждый установленный вспомогательный асинхронный двигатель типа АНЭ-225 зафиксировано 0,212 отказа, а на двигатель типа НВА-55 – 0,315 отказа.

Причиной значительного потока отказов вспомогательных асинхронных двигателей является, как правило, несовершенство системы их питания, которая основана на преобразовании числа фаз переменного тока при помощи конденсаторных расщепителей и вращающихся расщепителей фаз (пусковых двигателей).

Недостатками существующей системы питания вспомогательных асинхронных двигателей являются: существенная зависимость работоспособности системы от режима работы контактной сети, тока нагрузки вспомогательных двигателей, технологического разброса составных элементов системы. Устранение этих недостатков является актуальной задачей в вопросе повышения надёжности работы электровозов переменного тока.

Степень разработанности темы. Принципиальные вопросы разработки структуры, проектирования, изготовления и эксплуатации электрооборудования электровозов, в том числе систем вспомогательных машин, исследованы в работах известных учёных: А. М. Рутштейна, Р. И. Аликина, А. А. Сурукова, О. А. Некрасова, В. Я. Исаева, Н. Н. Горина, А. Ю. Конашинского, Н. А. Ротанова, В. П. Янова, О. Л. Рапопорта, Л. Н. Сорина, Г. Н. Шестопёрова, В. Е. Чернохлебова, Л. А. Астраханцева. Вместе с тем, в известных работах недостаточное внимание уделено вопросам оценки степени влияния тяговой нагрузки электровоза, режима работы контактной сети, отклонения параметров конденсаторных расщепителей фаз на работу систем вспомогательных машин электровозов переменного тока.

В определённой мере указанные факторы учитываются в работах учёных ВЭЛНИИ, которыми совместно с ОАО «Электровыпрямитель» был разработан статический полупроводниковый преобразователь (ШПВМ-250-У2) для питания системы вспомогательных машин электровозов переменного тока типа 2ЭС5К. Испытания подтвердили работоспособность предложенного устройства, однако его применение для проведения массовой и быстрой модернизации уже эксплуатируемых электровозов затруднительно.

Целью настоящей работы является совершенствование существующей системы питания вспомогательных машин электровозов переменного тока за счёт использования маловентильных преобразователей числа фаз, построенных с применением меньшего количества электронных приборов по сравнению с известными решениями.

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

- разработка математической модели асинхронной машины, учитывающей особенности двигателя типа НВА-55С (обмотка ротора с глубокими пазами), используемого для привода вспомогательных машин на электровозах переменного тока;

- 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;

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

- разработка алгоритма управления и исследование работы маловентильного преобразователя числа фаз для системы питания вспомогательных машин от однофазной сети переменного тока;

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

Научная новизна работы:

- предложена математическая модель асинхронного двигателя с глубокопазовой обмоткой ротора, которая даёт возможность исследования работы таких двигателей в пусковых и переходных режимах;

- 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;

- предложена методика оценки степени 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 являются основой для разработки и создания полупроводниковых

маловентильных симметрирующих преобразователей для электровозов переменного тока. 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 математического моделирования и экспериментальных исследований, приведённых в открытых источниках.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и решаемые в работе задачи, а также указаны использованные методы исследования.

В первой главе работы рассмотрены особенности, функции и роль вспомогательного оборудования в обеспечении работоспособности электроподвижного состава

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. Вспомогательные машины ЭПС (мотор-вентиляторы, мотор-компрессоры) должны сохранять свою работоспособность в интервале температур от от +60 °С до –50 °С 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.

На наиболее массовых грузовых электровозах переменного тока, обеспечивающих большую часть перевозочной работы, 2ЭС5К, 3ЭС5К, ВЛ85 и их аналогах, для питания вспомогательных асинхронных двигателей от однофазной сети применяются схемы с вращающимся (рисунок 1-а) или с конденсаторным (рисунок 1-б) расщепителями фаз.

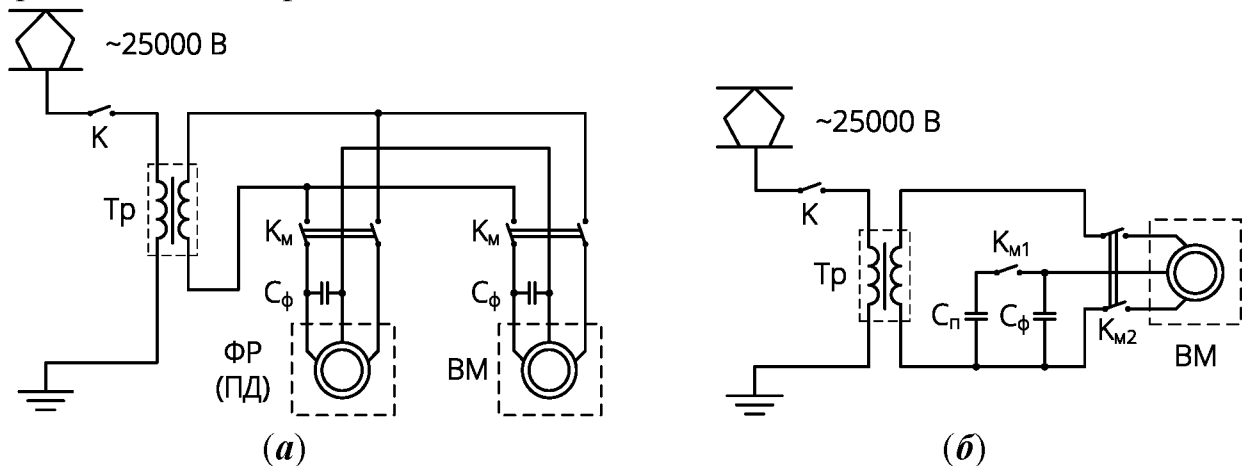


Рисунок 1 – Упрощённая схема питания вспомогательных машин переменного тока с вращающимся фазорасщепителем (пусковым двигателем) – *а*, со статическим конденсаторным расщепителем фаз – *б*.

Анализ результатов эксплуатации вспомогательных двигателей НВА-55, АНЭ-225, применяемых на грузовых электровозах переменного тока, говорит о том, что их показатели надёжности находятся на крайне низком уровне и уступают показателям надёжности коллекторных вспомогательных двигателей. Сравнение показателей надёжности по типам двигателей приведено на рисунке 2.

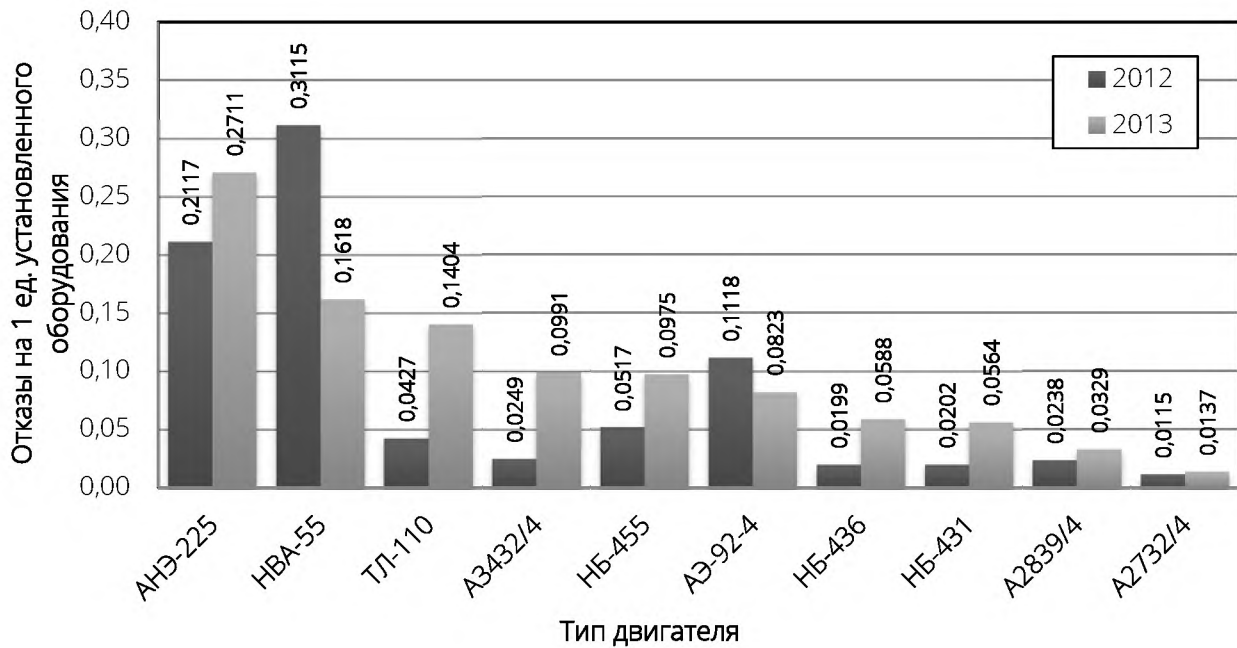


Рисунок 2 – Удельные показатели отказов вспомогательных электроприводов на единицу установленного оборудования

Статистика распределения отказов двигателей НВА-55 и АНЭ-225 по видам свидетельствует о преобладании повреждений, связанных с тепловыми перегрузками – выплавление ротора (до 30% отказов), пробой изоляции (до 20% отказов). Такого рода отказы характерны для работы электрических машин в условиях значительных перегревов. А большая доля неисправностей подшипниковых узлов (до 30% отказов), свидетельствует о наличии чрезмерных динамических усилий на эти узлы.

Значительное число таких отказов обусловлено тем, что схемы питания с конденсаторными и вращающимися расщепителями однофазного переменного тока не могут обеспечивать вспомогательные асинхронные двигатели симметричным трёхфазным напряжением во всех эксплуатационных режимах работы ЭПС переменного тока. Несимметрия трёхфазной питающей системы для асинхронных машин является крайне нежелательной так как вызывает значительный нагрев, а также увеличивает пульсации электромагнитного момента двигателя.

Для повышения качества питания вспомогательных машин на электровозах переменного тока предлагается использовать маловентильный преобразователь числа фаз, установка которого возможна в уже существующую конденсаторную схему питания вспомогательных асинхронных двигателей.

Во второй главе производится построение и описание математической модели для исследования электромагнитных процессов в существующей системе питания вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К.

Для моделирования вспомогательных двигателей НВА-55С электровозов 2ЭС5К предложена математическая модель, учитывающая эффект вытеснения тока в обмотке ротора с глубоким пазом.

Для учёта вытеснения тока в обмотке ротора с глубоким пазом активное сопротивление его обмотки может быть представлено в виде суммы:

$$R'_R = K_W \cdot R'_{RП} + R'_{RЛ}, \quad (1)$$

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

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

$R'_{RЛ}$ – лобовая составляющая активного сопротивления ротора, Ом.

Величина коэффициента Фильда K_W , корректирующего сопротивление обмотки ротора по мере разгона определяется по формуле:

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

где ξ – приведённая высота проводника.

Приведённая высота проводника ξ определяется по формуле:

$$\xi = h_{п} \cdot \sqrt{\pi \cdot f_2 \cdot \mu \cdot \gamma}, \quad (3)$$

где f_2 – частота тока в роторе, Гц;

μ – магнитная проницаемость материала, Гн/м;

γ – удельная проводимость материала, См/м;

$h_{п}$ – высота паза, см.

Зависимость коэффициента Фильда от скольжения для двигателя НВА-55С показана на рисунке 3.

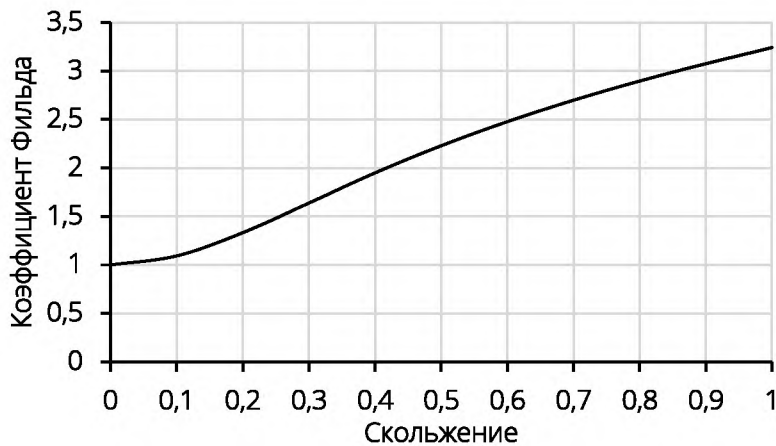


Рисунок 3 – Зависимость K_W от скольжения для двигателя НВА-55С

Уравнения (1)–(3) учтены в модели асинхронной машины, электрическая часть которой описывается системой уравнений (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{SA} = R_S \cdot i_{SA} + \sigma L_S \frac{di_{SA}}{dt} + e_A \\ u_{SB} = R_S \cdot i_{SB} + \sigma L_S \frac{di_{SB}}{dt} + e_B \\ u_{SC} = R_S \cdot i_{SC} + \sigma L_S \frac{di_{SC}}{dt} + e_C \\ \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} = k_R \cdot i_{S\alpha} \cdot [K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}] - \frac{K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}}{L_R} \psi_{R\alpha} - \omega_{RЭл} \psi_{R\beta} \\ \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} = k_R \cdot i_{S\beta} \cdot [K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}] - \frac{K_W \cdot R_{R\Pi} + R_{RЛ}}{L_R} \psi_{R\beta} + \omega_{RЭл} \psi_{R\alpha} \end{array} \right. \quad (4)$$

где σ – приведённый коэффициент рассеяния;

L_S – полная индуктивность обмотки статора, Гн;

e_A, e_B, e_C – фазные ЭДС обмоток статора, В;

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

Значения фазных ЭДС связаны с величинами потокосцеплений уравнениями:

$$e_A = k_R \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt}, \quad (5)$$

$$e_B = k_R \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} \right], \quad (6)$$

$$e_C = k_R \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} \right], \quad (7)$$

Оценка предложенной модели показывает, что погрешность получаемых с её помощью результатов не превышает 10%. Для сравнения на рисунке 4 показаны механическая характеристика двигателя НВА-55С, полученная по результатам испытаний и характеристика, полученная путём расчёта на модели.

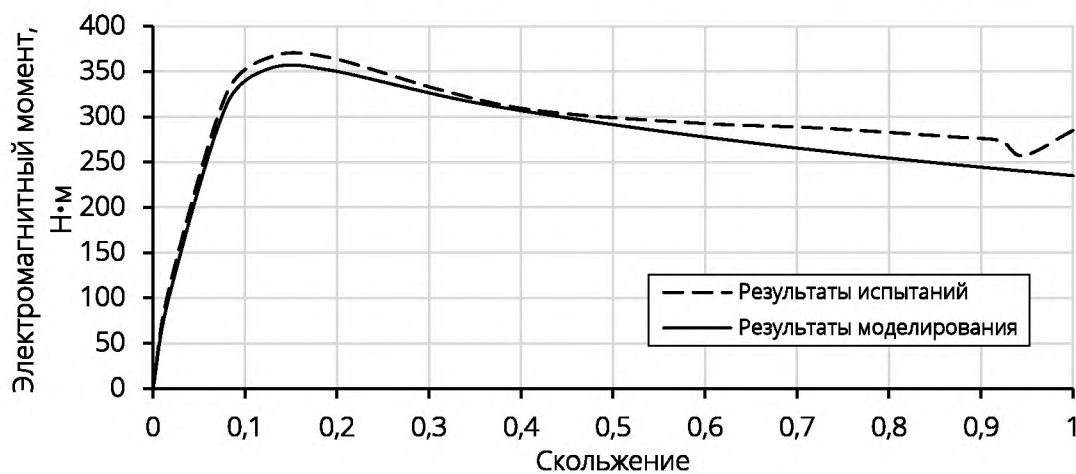


Рисунок 4 – Механические характеристики двигателя НВА-55С, полученные на испытаниях и на модели

Модель системы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К построена согласно расчётной схеме, показанной на рисунке 5.

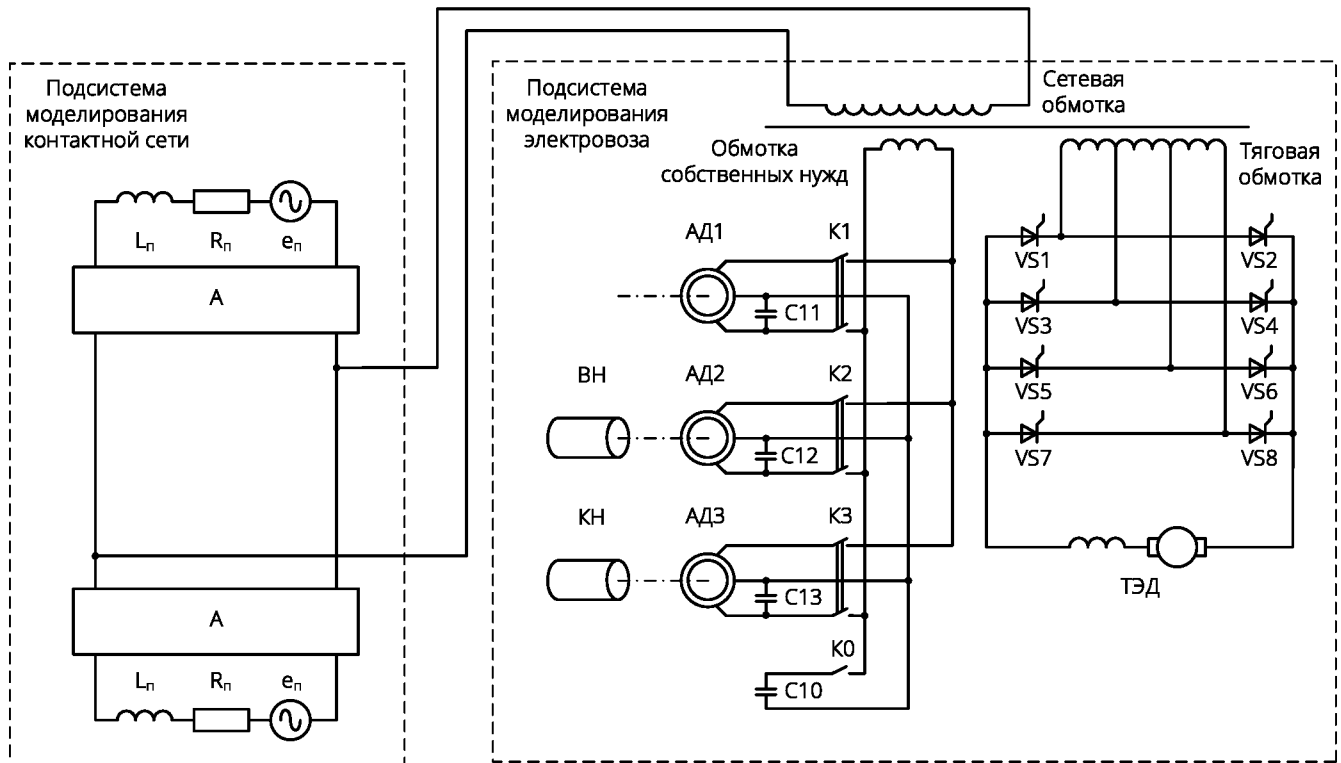


Рисунок 5 – Расчётная схема математической модели для исследования электромагнитных процессов в цепях питания вспомогательных машин

В модели учтены параметры тяговых подстанций (L_n , R_n), влияние контактной сети, моделируемой четырёхполюсниками (A), а также влияние тягового электропривода с выпрямительно-инверторным преобразователем ($ТЭД$, $VS1-VS8$).

Рассмотрены три варианта нагрузки: режим пускового двигателя (холостой ход), вентиляторная нагрузка ($ВН$), компрессорная нагрузка ($КН$). Реализация и исследование модели произведены в среде имитационного моделирования и инженерных расчётов Matlab.

В третьей главе произведены анализ особенностей работы асинхронных двигателей от однофазной сети переменного тока и анализ работы вспомогательных машин электровозов с учётом влияния тяговой нагрузки и контактной сети.

Для оценки качества электрической энергии питания вспомогательных машин использованы следующие параметры:

– коэффициенты несимметрии напряжения и тока по обратной последовательности:

$$k_{2u} = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} \cdot 100, \quad (8)$$

$$k_{2i} = \frac{|\dot{I}_2|}{|\dot{I}_1|} \cdot 100, \quad (9)$$

где $|\dot{U}_2|$ – модуль вектора обратной последовательности напряжения, В;
 $|\dot{U}_1|$ – модуль вектора прямой последовательности напряжения, В;
 $|\dot{I}_2|$ – модуль вектора обратной последовательности тока, А;
 $|\dot{I}_1|$ – модуль вектора прямой последовательности тока, А.
– коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока:

$$k_{u(1)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100, \quad (10)$$

$$k_{i(1)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100, \quad (11)$$

где n – номер гармоники напряжения и тока.

Пульсации электромагнитного момента двигателя оцениваются коэффициентом пульсаций:

$$k_{\text{пульс}} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\text{ср}}} \cdot 100, \quad (12)$$

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

Расчёт показал, что вспомогательный двигатель НВА-55С может работать с минимальными коэффициентами несимметрии при напряжении на обмотке собственных нужд 405 В, ёмкости фазосдвигающего конденсатора 600 мкФ, нагрузочном моменте 164,5 Н · м.

Отклонение ёмкости фазосдвигающего конденсатора от расчётного значения в пределах $\pm 10\%$ приводит к увеличению коэффициентов несимметрии по току до 11%. 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.

В значительной степени на коэффициенты несимметрии влияют отклонение напряжения на обмотке собственных нужд (возможный диапазон от 307,8 В до 469,8 В), и отклонение нагрузочного момента, минимальное значение которого равно 0 для пускового двигателя, а максимальное в условиях низких температур для мотор-компрессора может достигать величины 400 Н · м. Влияние питающего напряжения и нагрузочного момента на коэффициенты несимметрии по току и напряжению показано на рисунке 6.

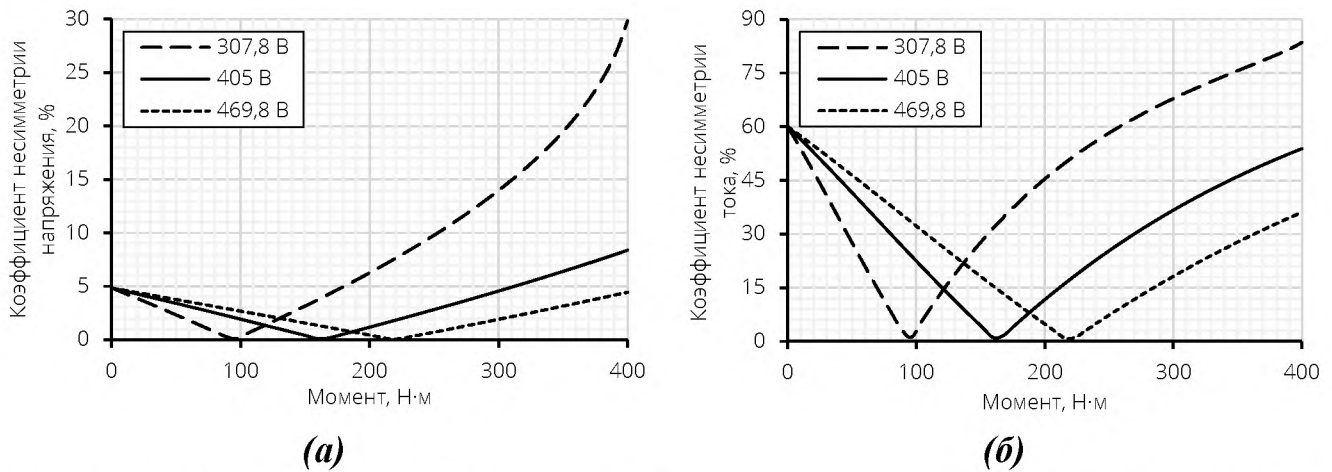


Рисунок 6 – Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения (а) и тока (б) от момента при различных значениях питающего напряжения.

При работе асинхронного двигателя в режиме расщепителя фаз значительный коэффициент несимметрии по току 60% сохраняется во всём диапазоне изменения питающего напряжения. Отдельные фазы двигателя в таком режиме генерируют активную мощность, компенсация которой осуществляется другими фазами, работающими в двигательном режиме. При этом величина активной мощности отдельных фаз по модулю может превышать 5 кВт, в то время как двигатель, работая на холостом ходу, потребляет не более 1 кВт активной мощности.

При токе ТЭД 810 А, различных напряжениях на тяговой подстанции (ТП) и различном расположении электровоза на блок-участке форма напряжения на обмотке собственных нужд имеет вид, показанный на рисунке 7.

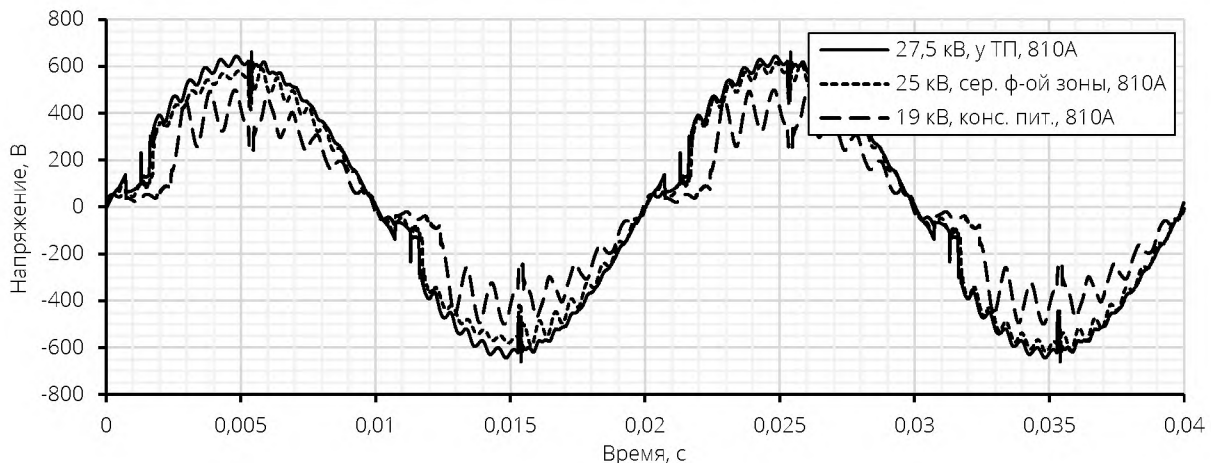


Рисунок 7 – Форма напряжения на обмотке собственных нужд электровоза 2ЭС5К

Результаты моделирования работы системы вспомогательных машин с учётом влияния тяговой нагрузки и влияния контактной сети показаны в таблице 1. Анализ результатов моделирования показал, что запуск мотор-компрессора с загустевшим маслом не гарантирован для случаев консольного питания электровоза при напряжении на тяговой подстанции 25 кВ и 19 кВ. 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.

Таблица 1 – Результаты моделирования системы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К с традиционной схемой питания 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		

Наиболее тяжёлыми режимами работы по несимметрии являются:

– работа мотор-компрессора при напряжении 27,5 кВ и нахождении электровоза у тяговой подстанции, что объясняется завышенной ёмкостью фазосдвигающего конденсатора в цепи питания мотор-компрессора, на 60% превышающей расчётную;

– работа мотор-вентилятора при напряжении 19 кВ и консольном питании электровоза, что объясняется снижением напряжения на токоприёмнике электровоза до минимального значения. При этом не происходит срабатывание реле напряжения, отключающего пусковые конденсаторы.

В четвёртой главе рассмотрены принцип работы предложенного маловентильного преобразователя числа фаз, варианты схем его построения и его система управления.

Схема маловентильного преобразователя, построенного на основе двухуровневого инвертора напряжения, показана на рисунке 8.

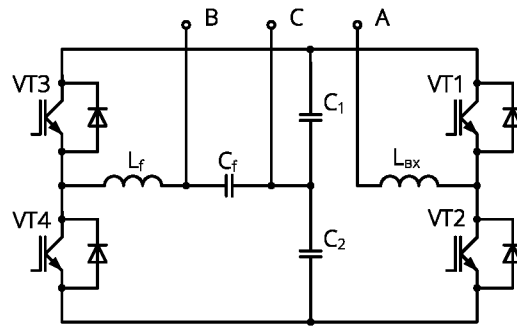


Рисунок 8 – Схема маловентильного преобразователя для питания системы вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К

Преобразователь состоит из входной ($VT1, VT2$) и выходной частей ($VT3, VT4$). Входная часть формирует стабилизированное напряжение в звене постоянного тока ($C1, C2$). Выходная часть методом широтно-импульсной модуляции формирует на ёмкости C_f требуемую величину линейного напряжения BC для создания трёхфазной системы напряжений. Схемы систем управления входной и выходной частями преобразователя показаны на рисунках 9, 10.

Выполнено моделирование работы системы вспомогательных машин с маловентильным преобразователем, результаты которого приведены в таблице 2.

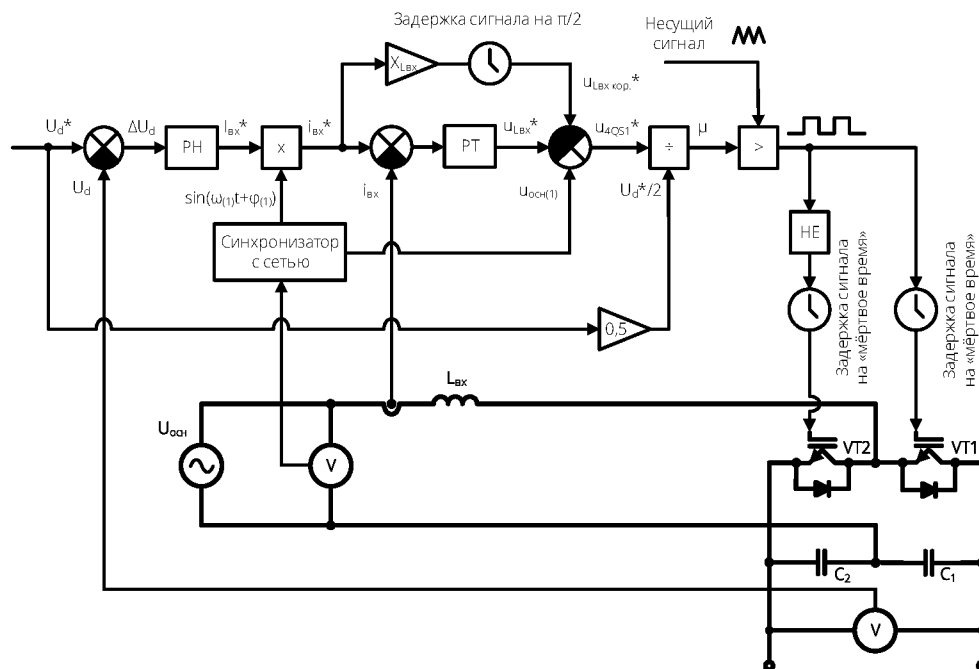


Рисунок 9 – Система управления входным преобразователем

Во всех рассмотренных вариантах коэффициент несимметрии напряжения не превышает 1,2%, а коэффициент несимметрии тока не превышает 9%. Применение в схеме маловентильного преобразователя также позволило осуществить запуск холодного мотор-компрессора при консольном питании и ограничить коэффициент гармонических составляющих тока в фазах двигателя до 30%, обеспечив снижение тепловой нагрузки и перегрев двигателя.

Для оценки влияния маловентильного преобразователя на работу вспомогательных машин в наиболее тяжёлых режимах на рисунках 10–17 показано сравнение форм фазных токов и напряжений вспомогательных двигателей, а также годографов их результирующих векторов для случаев питания по традиционной схеме и по схеме с маловентильным преобразователем числа фаз.

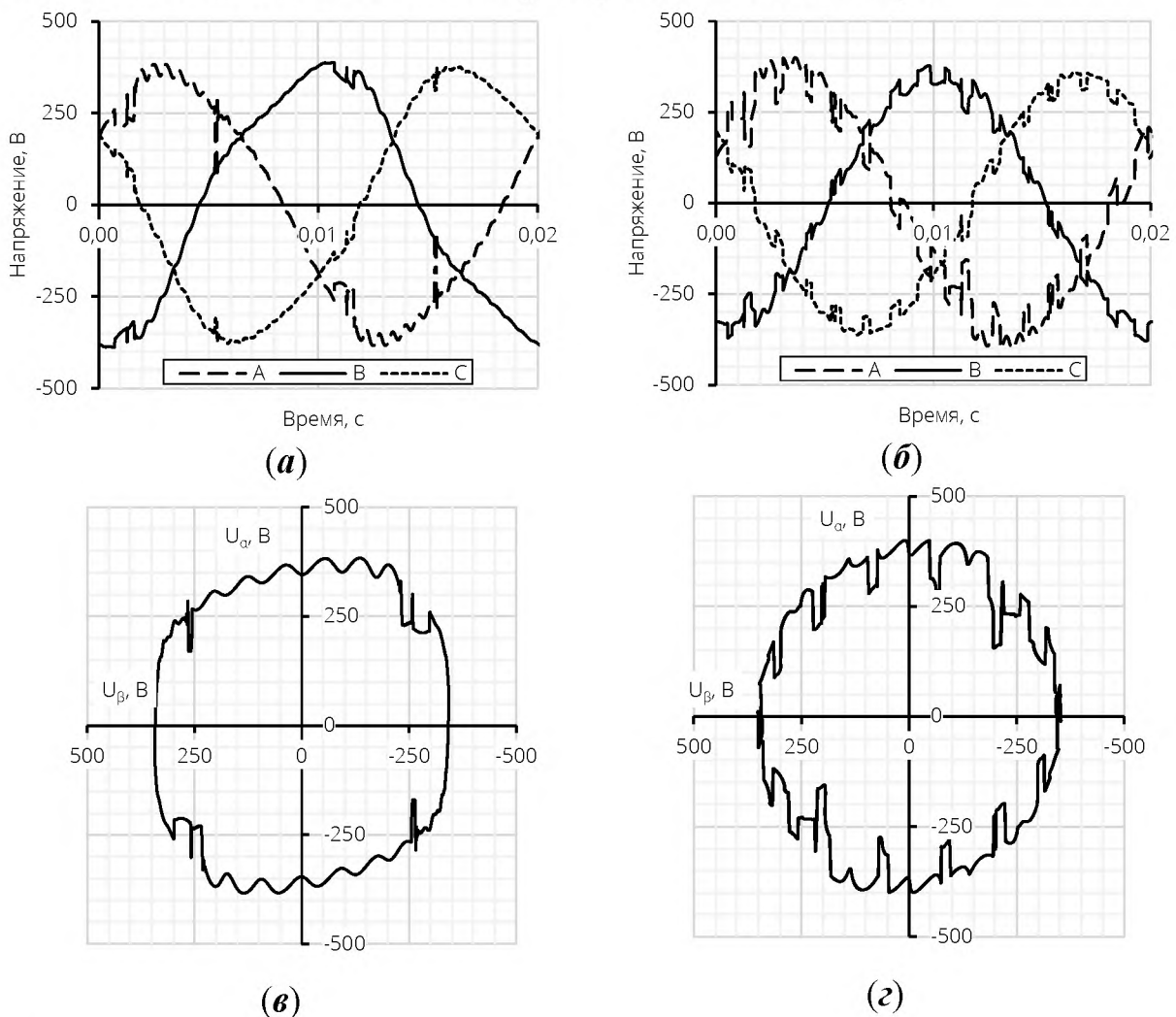


Рисунок 11 – Диаграммы мгновенных значений напряжения статора мотор-компрессора и годографы их результирующих векторов при питании по традиционной схеме (а, в) и при питании по схеме с маловентильным преобразователем (б, г) при напряжении в контактной сети 27,5 кВ, нахождении электровоза у тяговой подстанции и токе тяговых двигателей 810 А.

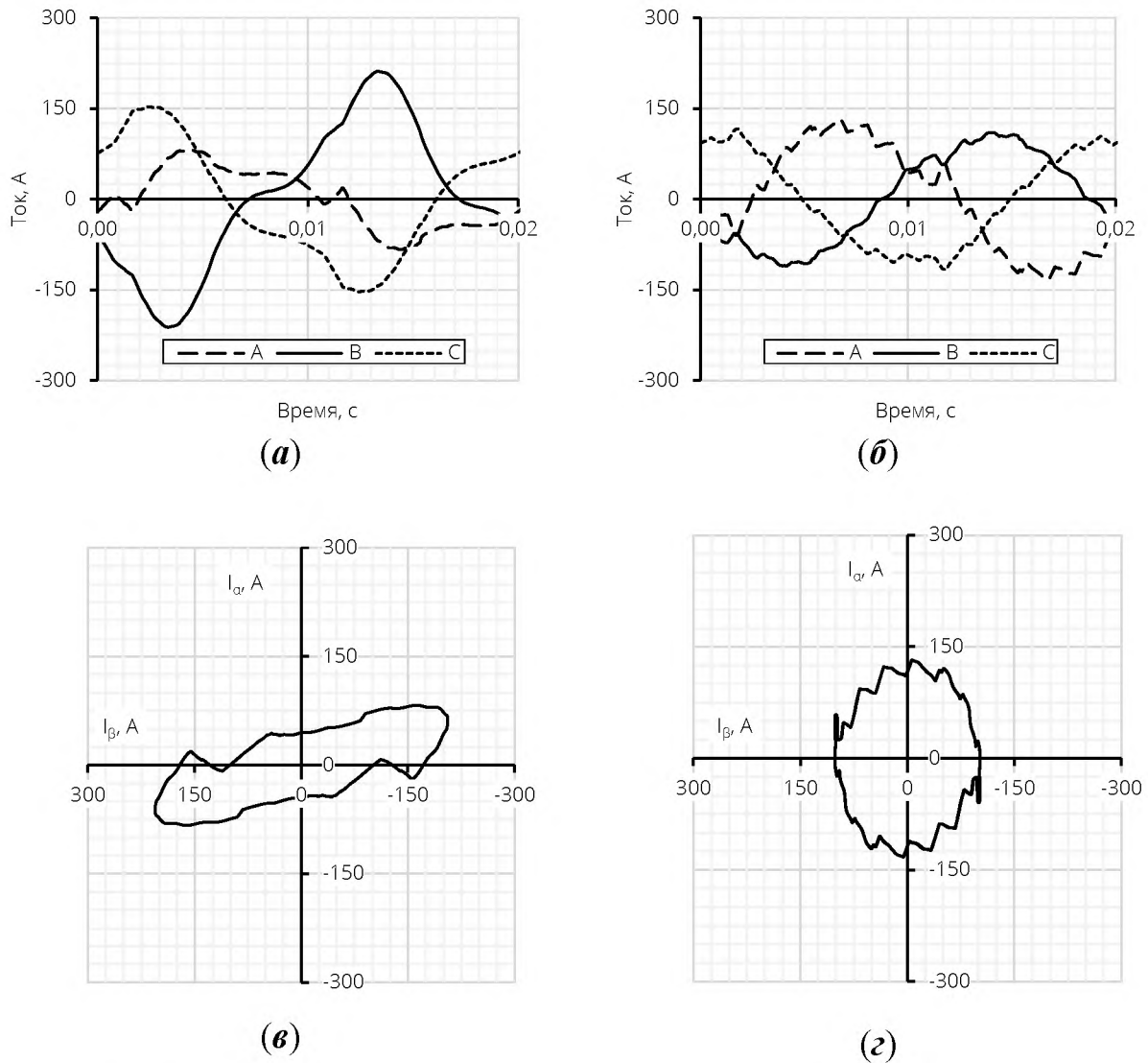


Рисунок 12 – Диаграммы мгновенных значений тока статора мотор-компрессора и годографы их результирующих векторов при питании по традиционной схеме (а, в) и при питании по схеме с маловентильным преобразователем (б, г) при напряжении в контактной сети 27,5 кВ, нахождении электровоза у тяговой подстанции и токе тяговых двигателей 810 А.

При нахождении электровоза у тяговой подстанции с напряжением 27,5 кВ наблюдается повышение несимметрии тока и напряжения. Применение маловентильного преобразователя позволяет существенно повысить симметричность питания, что следует из анализа кривых, показанных на рисунках 11, 12. В этом случае коэффициент несимметрии напряжения снижается с 4,58% до 0,73%, а коэффициент несимметрии тока – с 51,4% до 8,17%.

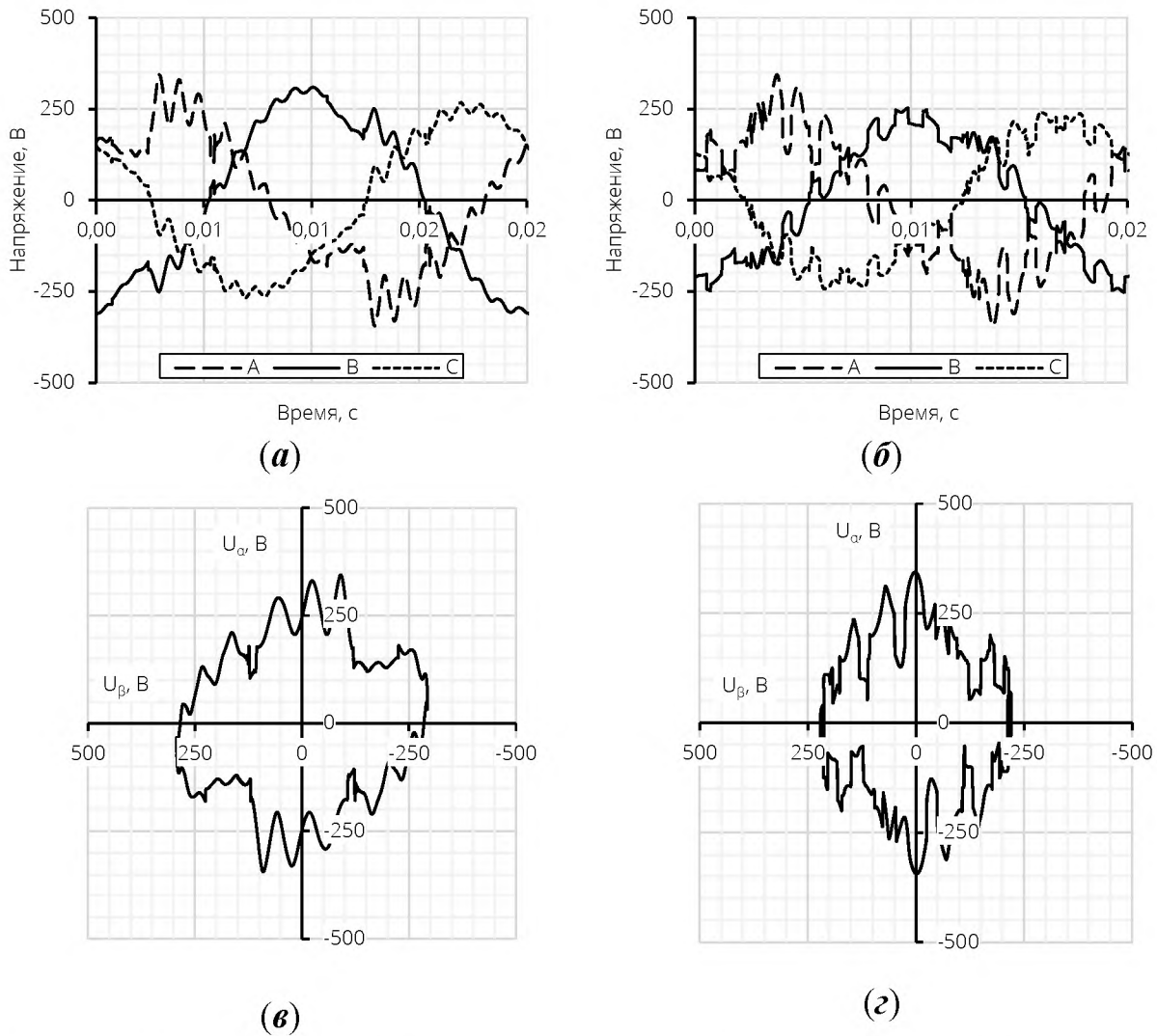
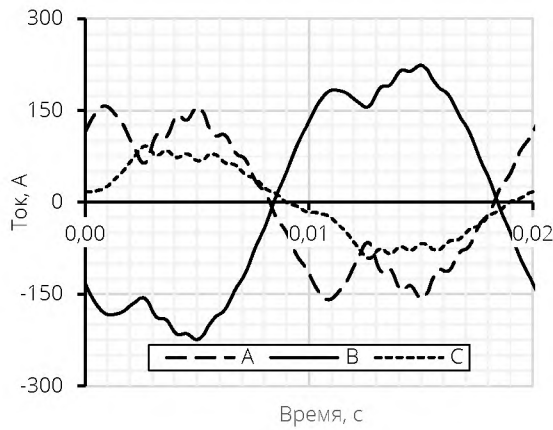


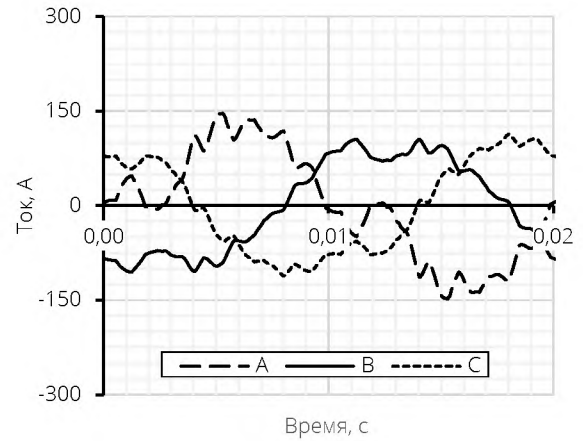
Рисунок 13 – Диаграммы мгновенных значений напряжения статора мотор-вентилятора и годографы их результирующих векторов при питании по традиционной схеме (а, в) и при питании по схеме с маловентильным преобразователем (б, г) при напряжении в контактной сети 19 кВ, консольном питании электровоза и токе тяговых двигателей 810 А.

Наибольшее влияние маловентильного преобразователя на повышение показателей качества электрической энергии наблюдается при работе электровоза на консольном участке, когда параметры контактной сети оказывают наибольшее влияние на снижение напряжения на токоприёмнике электровоза и увеличение углов коммутации ВИП до 45–50 эл. град. В этом случае коэффициент несимметрии напряжения снижается с 13,8% до 1,09%, а коэффициент несимметрии тока – со 119% до 7,89%, что следует из сравнения диаграмм, изображённых на рисунках 13,14.

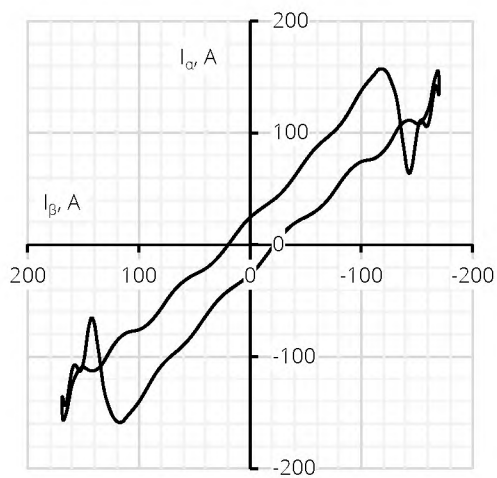
Таким образом применение маловентильного преобразователя числа фаз позволяет получить симметричное трёхфазное напряжение в цепи питания вспомогательных машин во всех эксплуатационных режимах.



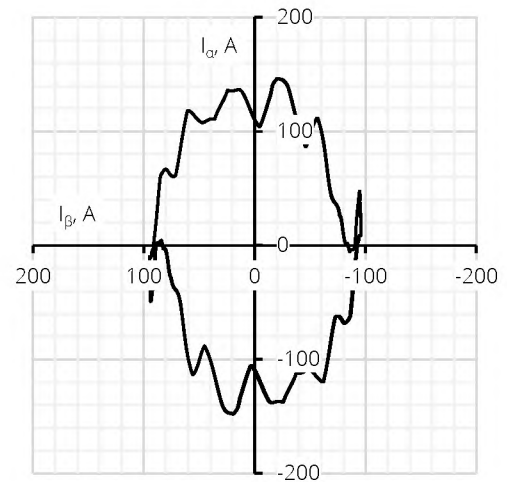
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 14 – Диаграммы мгновенных значений тока статора мотор-вентилятора и годографы их результирующих векторов при питании по традиционной схеме (а, в) и по предлагаемой схеме (б, г) при напряжении в контактной сети 19 кВ, консольном питании электровоза и токе тяговых двигателей 810 А.

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 увеличение 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 токов 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, вызывая 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.

8. На основании проведённого исследования рекомендуется провести работы по разработке конструкторской документации на маловентильный преобразователь, изготовлению опытного образца и проведению испытаний.

9. Перспективой дальнейшей разработки темы являются исследования, направленные на анализ потерь в маловентильных преобразователях и выбор рациональных параметров их составных элементов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. 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.
2. 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;
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. 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;
5. 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;

б) в материалах конференций и изданиях:

6. Малютин, А. Ю. Особенности электромагнитных процессов асинхронных двигателей вспомогательных машин электровозов переменного тока [Текст] / А. Ю. Малютин // Труды научно-практической конференции «Наука МИИТа – транспорту». – 2016. – С. III-67.
7. Литовченко, В. В. Применение симметрирующего устройства, как способ снижения отказов вспомогательных асинхронных двигателей [Текст] / В. В. Литовченко, А. Ю. Малютин // Материалы второй международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – 2015. – С. 186–188;

8. Литовченко, В. В. Повышение надёжности вспомогательных машин электровозов переменного тока путём простой модернизации [Текст] / В. В. Литовченко, А. Ю. Малютин // Материалы второй международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – 2014. – С. 31–36;
9. Литовченко, В. В. Повышение надёжности системы вспомогательных машин электровозов переменного тока [Текст] / В. В. Литовченко, А. Ю. Малютин // Труды четырнадцатой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2013. – С. III-6– III-7;
10. Литовченко, В. В. Повышение надёжности системы вспомогательных машин электровозов переменного тока [Текст] / В. В. Литовченко, А. Ю. Малютин, А. В. Невинский // Труды всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности». – 2013. – С. 31–36;
11. Малютин, А. Ю. Алгоритм управления выпрямительно-инверторным преобразователем на базе контроллера CompactRIO [Текст] / А. Ю. Малютин // Труды научно-практической конференции «Наука МИИТа – транспорту». – 2013. – С. III-43.

Малютин Артём Юрьевич

Применение маловентильных преобразователей в системе питания
вспомогательных цепей электровозов переменного тока

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2017 г. Заказ № _____ Формат 60X84/16 Тираж 80 экз.
Усл. – печ. л. – 1,5

УПЦ ГИ МИИТ, 127944, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9