

На правах рукописи

ЛУТОНИН Александр Сергеевич



**СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОТОР-КОЛЕС С
СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

*Специальность 05.09.03 —
«Электротехнические комплексы и системы»*

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

Санкт-Петербург — 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научные руководители:

доктор технических наук, доцент

Шклярский Ярослав Элиевич

доктор технических наук, профессор

Шонин Олег Борисович

Официальные оппоненты:

Кузнецов Владимир Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра систем автоматического управления, профессор.

Синюкова Татьяна Викторовна

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра электропривода, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 23 декабря 2020 г. в 13 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmti.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2020 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Мотор-колеса являются конкурентоспособным аналогом классической трансмиссии так как они помогают избежать использования дополнительных передаточных механизмов, освобождают место в подкапотном пространстве и равномерно распределяют вес транспортного средства.

При этом, одной из особенностей использования мотор-колес является необходимость отказа от коробки передач. В этом случае подход к разработке тяговой установки с использованием мотор-колес значительно ограничен в выборе силовых агрегатов: механическая характеристика мотора должна позволять транспортному средству работать в широком диапазоне скоростей без потери крутящего момента на валу. Это затрудняет внедрение мотор-колес как основных тяговых агрегатов, поэтому задача разработки топологии и алгоритма управления системы электропривода, которые позволят обеспечить эффективность работы электромоторов в составе мотор-колес транспортного средства с увеличением диапазона рабочих скоростей является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Авторы *D. Sun, Z. Zheng* и др., так же как и *Y. Lee* рассматривали возможность компенсации противотока синхронного двигателя с постоянными магнитами в режимах ослабления поля за счёт подключения к концу обмоток преобразователя частоты с компенсирующей ёмкостью. Работы *M. Leijon, J. Lonkarski* и др. посвящены сравнительному анализу параметров двух топологий электропривода, в одной из которых электродвигатель подключён к двум батареям с одинаковой ёмкостью к началу и концу обмоток статора, в то время как в другой топологии электромотор подключается со стороны начала обмоток статора к батарее с двухкратным значением напряжения по отношению к предыдущему случаю, при этом конец обмоток статора подключается по схеме «Звезда». Результаты исследования показали, что, при использовании двух аккумуляторных батарей, электромотор имеет меньшие значения пульсаций тока в

обмотках статора, а следовательно и более высокий КПД. Также данная система имеет возможность шунтирования концов обмоток преобразователя частоты при неисправности одной из батарей, что повышает надёжность системы. В трудах *C. Attainese* и *M. D'Arpino* была рассмотрена совместная работа двух электродвигателей, начала обмоток которых были подключены к преобразователям частоты с тяговыми батареями разной ёмкости, а их конец к преобразователю частоты с конденсаторной батареей. Авторы *М. В. Пронин*, *О. Б. Шонин* рассматривали возможность повышения эффективности работы СДПМ посредством использования многофазной обмотки статора, которая позволяет снизить уровень пульсаций электромагнитного момента. В работах *И. Е. Овчинникова* рассматривались особенности управления вентильным электродвигателем в составе транспортного средства. Труды *Е. А. Смотров* посвящены исследованию характеристик транспортного средства с использованием мотор-колёс.

Однако, работ, в комплексе рассматривающих систему электропривода в составе электротехнического комплекса транспортного средства с использованием синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в качестве тяговых агрегатов для мотор-колес, подключённых к аккумуляторным батареям через преобразователь частоты со стороны начала обмоток статора электродвигателя и к конденсаторной батарее через вспомогательный преобразователь частоты к их концу для работы в широком диапазоне скоростей, на данный момент не было представлено.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам паспорта научной специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.2. «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области

проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем»; п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Объект исследования – электротехнический комплекс, включающий синхронные двигатели с постоянными магнитами в составе мотор-колес электротранспортных средств.

Предмет исследования – алгоритмы управления электроприводом с использованием синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе электротехнического комплекса для работы в расширенном скоростном диапазоне.

Цель работы – повышение эффективности работы синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе мотор-колес транспортного средства.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Анализ возможного увеличения диапазона рабочих скоростей системы электропривода за счёт подключения двух двухуровневых преобразователей частоты к началам и концам обмоток синхронного двигателя с постоянными магнитами, используя аккумуляторную батарею и буферный конденсатор в качестве независимых источников энергии;

2. Разработка алгоритма управления для синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе двух двухуровневых преобразователей частоты, аккумуляторной батареи и буферного конденсатора для работы в широком диапазоне скоростей;

3. Разработка алгоритма определения необходимой мощности синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе мотор-колёс транспортного средства;

4. Разработка алгоритма выбора оптимальных параметров буферного конденсатора для предложенной топологии системы электропривода в составе электротехнического комплекса транспортного средства;

5. Анализ влияния разработанной топологии системы электропривода на динамику движения транспортного средства;

6. Имитационное моделирование переходных процессов разработанной топологии системы электропривода в составе электротехнического комплекса транспортного средства;

7. Оценка эффективности предлагаемой системы в сравнении с существующими топологиями.

Научная новизна:

1. Разработана система электропривода в составе электротехнического комплекса транспортного средства с использованием синхронных двигателей с постоянными магнитами в качестве тяговых агрегатов для мотор-колес, которая обеспечивает повышение динамики транспортного средства за счёт использования буферного конденсатора в качестве компенсатора противо-ЭДС электродвигателя;

2. Разработаны методики определения оптимальных параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами, а также буферного конденсатора для разработанной системы электропривода в составе мотор-колёс на основе заданных динамических характеристик транспортного средства;

3. Выявлены отличия механической характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе предложенной системы электропривода, которые заключается в увеличении максимальной скорости в режиме постоянства момента с увеличением максимального момента в режиме постоянства мощности и установлена зависимость механической характеристики от уровня напряжения конденсаторной батареи;

4. Выявлена зависимость изменения уровня пульсаций напряжения буферного конденсатора, токов статора синхронного двигателя с постоянными магнитами, а также выходного момента на валу ротора от ёмкости буферного конденсатора разработанной системы электропривода.

Теоретическая и практическая значимость представляют следующие основные результаты работы:

1. Разработанные алгоритмы позволяют обеспечить эффективное управление приводом при его работе в режиме ослабленного

поля с целью обеспечения повышения максимальной рабочей скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами;

2. Разработана структура электропривода, включающая в себя синхронный электродвигатель с постоянными магнитами с разомкнутой обмоткой статора, главный и вспомогательный преобразователь частоты, а также буферный конденсатор;

3. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в учебный процесс Горного университета, а также приняты к внедрению в ООО «Невский машиностроитель», что подтверждается соответствующими актами.

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, математическим и имитационным моделированием переходных процессов в программном пакете *MATLAB/Simulink*. Построение математических моделей преобразователей частоты, электродвигателя, а также системы управления базируется на основных положениях теории автоматизированного электропривода, теории систем автоматического управления, теоретических основ электротехники.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обеспечение расширения диапазона рабочих скоростей синхронного двигателя с постоянными магнитами, входящего в состав электротехнического комплекса транспортного средства с использованием мотор-колёс, достигается за счёт использования разработанного алгоритма управления двумя преобразователями частоты, которые позволяют использовать буферный конденсатор, входящий в состав предложенной топологии системы электропривода, в качестве источника реактивной мощности;

2. Методика расчёта параметров электротранспорта, включая характеристики электромотора и ёмкости конденсаторной батареи для системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с подключением преобразователей частоты к началу и концу обмоток статора, должна базироваться на применении разработанных алгоритмов расчёта, определяющих заданное расширение диапазона регулирования крутящего момента на валу ротора.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования и удовлетворительной сходимостью результатов имитационного моделирования работы электропривода, включающего в себя синхронный электродвигатель с постоянными магнитами с разомкнутой обмоткой статора, главный и вспомогательный преобразователь частоты с использованием буферного конденсатора. Использовано сравнение полученных автором результатов и установлена их сходимость с результатами исследований отечественных и зарубежных учёных.

Апробация диссертационной работы проведена на научно-практических мероприятиях с докладами: международная конференция «Наука, образование, общество», 2017 – Тамбов; III всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2017 – Кузбасс; IV всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2018 – Кузбасс; IV международная научно-практическая конференция «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке», 2017 – Новосибирск; международная конференция «13ый Коллоквиум молодых студентов Фрайберг-Санкт-Петербург», 2018 – Фрайберг, Германия; международная конференция «*International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2019*», 2019 – Санкт-Петербург; международная конференция «*International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering EECE-2019*», 2019 – Санкт-Петербург; международная конференция «*2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2020 ElConRus)*», 2020 – Санкт-Петербург.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении математического и имитационного моделирования работы системы

электропривода с использованием синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе мотор-колёс, подключённых к тяговым батареям через главный преобразователь частоты со стороны начал обмоток статора и буферным конденсаторным батареям через вспомогательный преобразователь частоты к концам обмоток статора; обобщении и обработке экспериментальных данных; формулировке основных научных положений и выводов, а также в подготовке текстов научных публикаций и диссертации.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 2 статьях — в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях — в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка. Содержит 123 страницы машинописного текста, 40 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 134 наименований и четырёх приложений на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** проанализированы основные топологии трансмиссий транспортных средств. Рассмотрено применение мотор-колес в качестве тягового агрегата электротранспорта. Приведён сравнительный анализ характеристик электродвигателей для их использования в составе с мотор-колёсами.

Согласно проведённому анализу современных исследований, для работы в составе мотор-колес могут быть использованы электродвигатели, параметры которых соответствуют следующим требованиям: высокий крутящий момент на низких скоростях; широкий диапазон регулирования скорости; высокий коэффициент удельной мощности. Электродвигатели, соответствующие вышеобозначенным критериям, представлены следующими типами: асинхронный электродвигатель; синхронный двигатель с постоянными магнитами; бесщеточный двигатель постоянного тока (вентильный электродвигатель); вентильный реактивный электродвигатель.

Описан объект исследования, на основе которого был выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) в качестве тягового электромотора в составе мотор-колес, так как данный тип электродвигателей имеет высокий коэффициент удельной мощности, низкую инерционность ротора, высокий крутящий момент на низких скоростях, высокий КПД (благодаря отсутствию обмоток в роторе), а также имеет возможность работать в широком скоростном диапазоне, в том числе в режиме ослабленного поля.

Согласно сравнительному анализу, топология СДПМ с разомкнутой обмоткой статора, использованием вспомогательного преобразователя частоты (ПЧ) и буферного конденсатора в качестве вторичного источника энергии является наиболее перспективным решением для использования в составе транспортного средства при наличии мотор-колёс, так как не способствует появлению токов нулевой последовательности, а также имеет наименьший вес и стоимость.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма управления СДПМ с использованием двух преобразователей частоты и буферным конденсатором. Представлено математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами. Получены законы формирования управляющих токов для СДПМ во вращающейся системе координат $d - q$. Содержание второй главы раскрывает первое защищаемое положение.

На основании полученных законов формирования управляющих токов для СДПМ, был разработан алгоритм управления СДПМ

в составе системы электропривода с двумя ПЧ и буферным конденсатором в качестве вторичного источника энергии, схема которого представлена на рисунке 1, где $S_1 - S_6$ – полупроводниковые ключи ПЧ №1 и ПЧ №2; U_{batt} – уровень напряжения аккумуляторной батареи; U_{cap} – уровень напряжения буферного конденсатора; i_a, i_b, I_c – измеряемые значения токов статора; $\omega_{set}, \omega_{ref}$ – заданное и измеряемое значения скорости вращения ротора СДПМ.

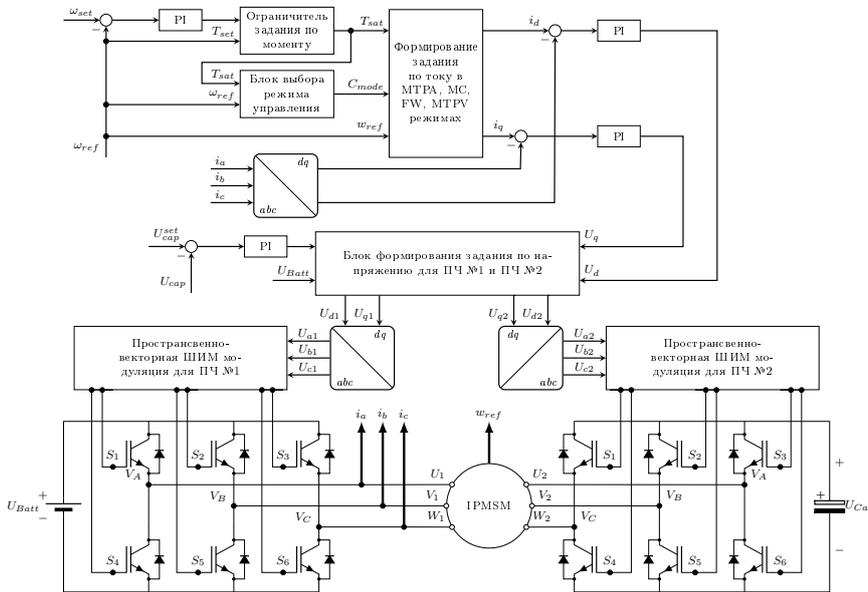


Рисунок 1 – Схема топологии для управления СДПМ с разомкнутой обмоткой статора и буферным конденсатором для работы в режиме сильного ослабления поля

В соответствии с рисунком 1, алгоритм управления, на основании входных параметров (режим управления « C_{mode} », текущая скорость электродвигателя « ω_{ref} » и заданное значение момента на валу « T_{ref} ») генерирует управляющей вектор тока во вращающейся системе координат $d - q$ в соответствии с выбранным оптимальным режимом управления. Далее, управляющее значение токов сравнивается с сигналом обратной связи и поступает на соответствующий

вход ПИ регулятора, тем самым формируя управляющий вектор напряжения U_m . Блок задания по напряжению для ПЧ №1 и ПЧ №2 формирует независимые векторы напряжения для каждого из преобразователей частоты в соответствии с векторной диаграммой, представленной на рисунке 2.

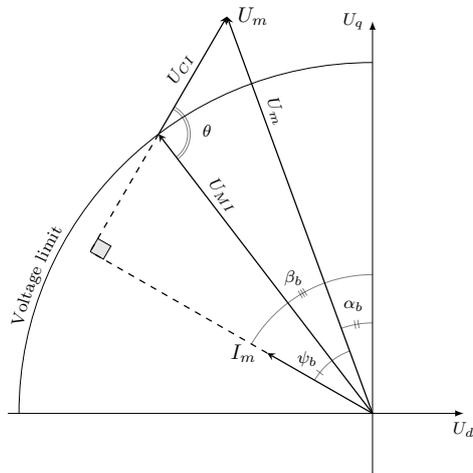


Рисунок 2 – Векторная диаграмма СДПМ с разомкнутой обмоткой статора и буферным конденсатором

Конечные уравнения для формирования задания напряжения относительно вращающейся системы координат $d - q$, в соответствии с рисунком 2, для ПЧ №1 могут быть получены согласно уравнениям (1 и 2):

$$U_{MI}^d = U_m \cos(\psi_b) \cos(\beta_b) - U_m (\sin(\psi_b) - U_{react}) \sin(\beta_b), \quad (1)$$

$$U_{MI}^q = U_m \sin(\psi_b) \cos(\beta_b) + U_m (\sin(\psi_b) - U_{react}) \cos(\beta_b), \quad (2)$$

где U_{MI}^d, U_{MI}^q – управляющее задание напряжений для ПЧ №2; U_m – результирующий вектор напряжения. Для ПЧ №2 уравнения формирования задания напряжения могут быть получены в соответствии с

формулами (3 и 4):

$$U_{CI}^d = U_{cap}^{set} \cos(\beta_b) + U_{react} \sin(\psi_b), \quad (3)$$

$$U_{CI}^q = U_{cap}^{set} \sin(\beta_b) - U_{react} \cos(\psi_b), \quad (4)$$

где U_I^d, U_I^q – управляющее задание напряжений для ПЧ №2; U_{cap} – уровень напряжения буферного конденсатора; U_{cap}^{set} – заданное значение уровня напряжения конденсатора, которое формируется как отношение выходного сигнала ПИ регулятора, входом которого является разница заданного и текущего уровня напряжения.

Амплитуда реактивной составляющей управляющего вектора напряжения U_{react} , которую может компенсировать ПЧ №2, находится в соответствии с уравнениями (5 и 6):

$$U_{react} = k_d U_m \sin(\psi_b), \quad \text{если } U_m \sin(\psi_b) < U_{cap}/\sqrt{3}, \quad (5)$$

$$U_{react} = k_d U_{cap}/\sqrt{3}, \quad \text{если } U_m \sin(\psi_b) \geq U_{cap}/\sqrt{3}, \quad (6)$$

где k_d - коэффициент, фиксирующий положение вектора U_m относительно вектора тока I_m который равен «1» при значениях угла $\psi_b \geq 0$ и «-1» при значениях угла $\psi_b < 0$.

Третья глава посвящена расчёту характеристик силовой установки электротранспортного средства, который включает в себя алгоритм определения параметров СДПМ, необходимых для достижения заданных динамических характеристик транспортного средства, выбору типа конденсаторной батареи, а также методу определения её минимально необходимой ёмкости.

Определение электрических параметров СДПМ, на основании полученных необходимых характеристик крутящего момента и скорости электродвигателя, осуществляется, опираясь на характеристики серийно производимых СДПМ. Корректировка параметров производится с учётом следующих ограничений:

- максимальное значение амплитуды тока напряжения СДПМ ограничены параметрами используемого источника (тяговой батареи);

- достижение постоянства мощности возможно при сохранении соотношения $\psi_{pm} = L_d I_m \max$.

Максимальное значение колебаний уровня напряжения звена постоянного тока вспомогательного преобразователя частоты определяется на основании диаграммы векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), представленной на рисунке 3.

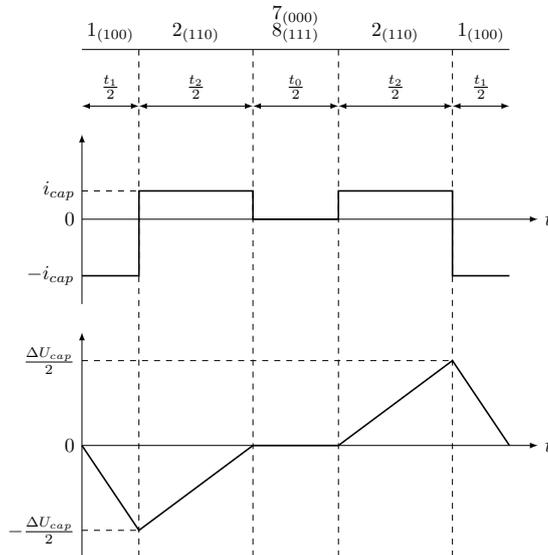


Рисунок 3 — Объединённая диаграмма пространственно-векторной ШИМ

В соответствии с рисунком 3, t_0 , t_1 , t_2 – время включения базовых векторов напряжения, которые, могут быть найдены в соответствии с уравнениями (7–9):

$$t_1 = m\sqrt{3}\frac{T_{sw}}{2} \sin(\pi/3 - \vartheta), \quad (7)$$

$$t_2 = m\sqrt{3}\frac{T_{sw}}{2} \sin \vartheta, \quad (8)$$

$$t_0 = \frac{T_{sw}}{2} \left(1 - \sqrt{3}m \sin(\pi/3 + \vartheta) \right), \quad (9)$$

где T_{sw} – полный период включения ШИМ, значение которого обратно пропорционально частоте включений ШИМ: $1/f_{sw}$; ϑ – угол поворота ротора электродвигателя.

В соответствии с рисунком 3 и уравнениями (7–9), изменение уровня напряжения за период может быть найдено по формуле (10):

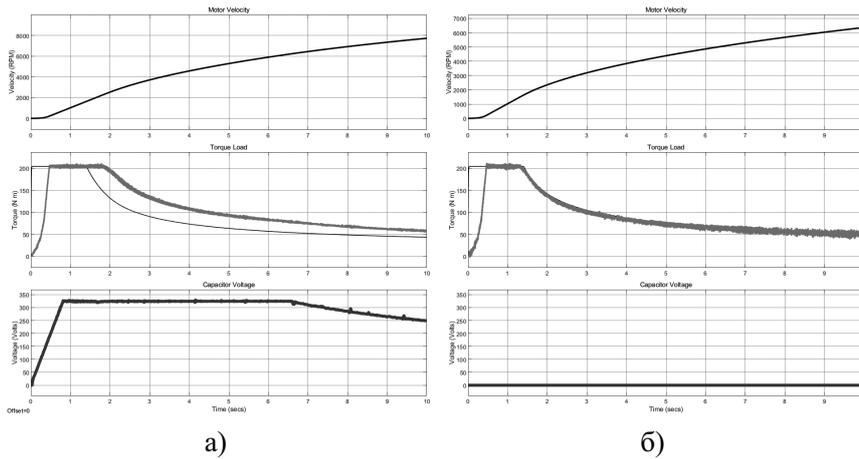
$$\Delta U_{cap} = \frac{\sqrt{3}mT_{sw}I_{cap}\sin(\vartheta)}{2C}. \quad (10)$$

Максимальное значение отклонения напряжения находится при значении угла $\vartheta = \pi/2$ и значением коэффициента модуляции равным 1. Таким образом конечная формула нахождения минимального значения ёмкости буферного конденсатора может быть найдена в соответствии с уравнением (11):

$$C = \frac{\sqrt{3}I_{cap}}{2f_{sw}\Delta U_{cap}}. \quad (11)$$

Четвёртая глава посвящена имитационному моделированию системы электропривода, которая включает в себя СДПМ с разомкнутой обмоткой статора, главный и вспомогательный преобразователь частоты, а также буферный конденсатор и приводит в движение транспортное средство с использованием мотор-колёс в качестве тяговых агрегатов. Моделирование проводилось с использованием параметров серийного электромобиля Nissan Leaf. Параметры синхронных двигателей, а также ёмкость буферных конденсаторов определялась на основании алгоритмов, рассмотренных в главе 3. Содержание третьей и четвёртой глав раскрывают второе защищаемое положение.

Предел максимальных колебаний напряжения буферного конденсатора при определении его ёмкости был установлен на значении 5%. На основании полученных результатов, можно отметить, что колебания напряжения звена постоянного тока удерживается пределах 20 В, что соответствует значению в 5% при использовании значения ёмкости конденсаторной батареи (рисунок 4, а). В сравнении с топологией со стандартным преобразователем частоты с подключением



а) $C_{cap} = C_{nom}$; б) $C_{cap} = 0$

Рисунок 4 — Графики выходных характеристик скорости, крутящего момента на валу и уровня напряжения конденсатора в зависимости от значения ёмкости буферного конденсатора конца обмоток статора по схеме «Звезда» (рисунок 4, б), можно отметить, что конечная максимальная скорость увеличивается на 17.2%, в то время как крутящий момент на валу ротора повышается на 16.6%. При этом скоростной диапазон в режиме постоянства момента увеличился на 34%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышение эффективности работы синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе мотор-колес транспортного средства с увеличением диапазона рабочих скоростей. По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведён анализ возможного увеличения диапазона рабочих скоростей системы электропривода за счёт подключения двух

двухуровневых преобразователей частоты к началам и концам обмоток синхронного двигателя с постоянными магнитами, используя аккумуляторную батарею и буферный конденсатор в качестве независимых источников энергии.

2. На основе полученных уравнений формирования управляющих токов синхронного двигателя с постоянными магнитами, разработан алгоритм управления для системы электропривода электротехнического комплекса в составе двух двухуровневых преобразователей частоты, аккумуляторной батареи и буферного конденсатора для работы в широком диапазоне скоростей с возможностью контроля уровня напряжения звена постоянного тока вспомогательного преобразователя частоты, на основе которого разработана программа для ЭВМ и получено свидетельство о ее государственной регистрации № 2020615693 «Программа расчета управляющих токов во вращающейся системе координат $d-q$ в зависимости от заданных параметров скорости и крутящего момента для синхронного двигателя с постоянными магнитами».

3. Разработан алгоритм определения необходимой мощности синхронного двигателя с постоянными магнитам в составе мотор-колёс транспортного средства, позволяющий достичь заданных параметров максимального ускорения, а также возможности осуществления движения при значении менее, либо равным заданному максимальному уклону дорожного полотна.

4. Определён оптимальный тип буферной конденсаторной батареи (по критериям устойчивости к механическим воздействиям, стоимости, электрическим характеристикам) для системы с использованием двух преобразователей частоты, соответствующий условиям его эксплуатации, а также разработан алгоритм подбора минимальной ёмкости буферного конденсатора, основанный на достижении допустимых значений пульсаций напряжения звена постоянного тока вспомогательного преобразователя частоты.

5. Проведён анализ влияния разработанной топологии системы электропривода на динамику движения транспортного средства,

который показал возможность увеличения конечной скорости электродвигателя в режиме ослабленного поля на 17%, с повышением крутящего момента на валу ротора на 16.6% по сравнению с топологией электропривода с подключением конца обмоток по схеме «Звезда».

6. Разработана модель системы управления электроприводом в составе электротехнического комплекса транспортного средства предложенной топологии в программном пакете *Matlab* и среде разработки *Simulink*.

7. Оценка эффективности предлагаемой системы в сравнении с существующими топологиями показала, что использование разработанной топологии позволяет увеличить скоростной диапазон в режиме постоянства максимального момента на 34% по сравнению с топологией электропривода с подключением конца обмоток по схеме «Звезда».

8. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, приняты к внедрению в ООО «Невский Машиностроитель», а также рекомендованы к внедрению в учебный процесс Горного университета.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. *Лутонин, А. С.* Определение минимальной ёмкости буферного конденсатора для системы электропривода с двойным двухуровневым преобразователем частоты / А. С. Лутонин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 6. — с. 263–270.

2. *Лутонин, А. С.* Система управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с разомкнутой обмоткой статора и буферным конденсатором / А. С. Лутонин, Я. Э. Шклярский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 5. — с. 407–414.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

3. *Lutonin, A.* PMSM control system with open-end winding and floating bridge capacitor / A. Lutonin, Y. Shklyarskiy, P. P.S. // International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2019. — 2019. — P. 323—329.

4. *Lutonin, A.* Operation modes and control algorithms of anisotropic permanent magnet synchronous motor (IPMSM) / A. Lutonin, A. Shklyarskiy, Y. Shklyarskiy // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019). Vol. 140. — EDP Sciences. 2019. — P. 1—5.

5. *Lutonin, A. S.* Control Strategy of Dual Fed Open-End Winding PMSM Drive for Traction Applications / A. S. Lutonin, A. Y. Shklyarskiy, Y. E. Shklyarskiy // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus). — 2020. — P. 746—749.

В прочих изданиях

6. Повышение энергоэффективности электротранспорта с децентрализованной трансмиссией за счет введения системы компенсации проскальзывания колес / А. Лутонин [и др.] // III Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». — 2017. — № 413. — с. 1—6.

7. *Соловьев, С. В.* Система управления синхронным двигателем с постоянными магнитами на базе микроконтроллеров STM32 / С. В. Соловьев, А. С. Лутонин // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». — 2018. — № 331. — с. 1—4.

8. *Lutonin, A.* Control strategy of dual fed openend winding PMSM drive with floating bridge capacitor / A. Lutonin, A. Shklyarskiy, Y. Shklyarskiy // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). — 2018. — Vol. 10, no. 03. — P. 1475—1482.

Патенты

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615693 Российская Федерация. Программа расчета управляющих токов во вращающейся системе координат D-Q в зависимости от заданных параметров скорости и крутящего момента для синхронного двигателя с постоянными магнитами: № 2020614440; заявл. 18.05.20; опубл. 29.05.20, Бюл. № 6 / А. С. Лутонин, Я. Э. Шклярский, А. Я. Шклярский // заявитель Санкт-Петербургский горный университет. — 1 с.