

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи



Владыкин Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО АСИНХРОННОГО
ТЯГОВОГО ПРИВОДА МЕТРОПОЛИТЕНА**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Фролов Николай Олегович

Екатеринбург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 КРАТКИЙ ОБЗОР АСИНХРОНОГО ПРИВОДА И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ	12
1.1 Современное состояние асинхронного привода метрополитена	12
1.2 Оптимизация как способ анализа и синтеза асинхронных приводов подвижного состава	19
1.3 Математическая модель двигателя с учетом отдельных эффектов	22
1.4 Современные способы повышения эффективности и оптимизации электроприводов.....	26
Выводы по первой главе и постановка задач	31
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЯГОВОГО ПРИВОДА МЕТРО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ЕГО НАГРУЖЕНИЯ.....	33
2.1 Разработка математической модели автоматизированных тяговых расчетов для участка обращения с учетом изменчивости внешних факторов.....	33
2.2 Анализ внешних и внутренних факторов работы вагонов метрополитена	41
2.3 Анализ работы вагонов метрополитена в условиях нестабильности эксплуатационных факторов.....	44
2.4 Нормальный и граничный режимы эксплуатации привода вагонов метро	51
Выводы по второй главе	55
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИВОДА, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЦИКЛИЧНЫМ СПОСОБОМ.....	57
3.1 Разработка спектральной математической модели инвертора.....	57
3.1.1 Статическая математическая модель мостового трехфазного инвертора.....	57

3.1.2 Широтно-импульсная модуляция инвертора в асинхронной области изменения скорости вращения ротора	60
3.1.3 Широтно-импульсная модуляция инвертора в синхронной области изменения скорости вращения ротора	65
3.1.4 Энергия потерь инвертора.....	67
3.2 Определение жизненного цикла инвертора	69
3.3 Математическое моделирование асинхронного двигателя с учетом специальных эффектов	74
3.4 Определение жизненного цикла обмотки статора машины	79
3.5 Математическая модель редуктора для определения его оптимального передаточного отношения	81
Выводы по третьей главе.....	88
4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ	89
4.1 Основные принципы оптимизации системы привода.....	89
4.1.1 Описание принятой системы расчета системы привода	89
4.1.2 Анализ результатов определения статических циклов эксплуатации привода	92
4.2 Оптимизация передаточного отношения редуктора по критерию минимальности централи	95
4.2.1 Выбор основных конструктивных параметров редуктора исходя из ограничений	95
4.2.2 Карта эффективности редуктора	101
4.2.3 Сопротивление движению поезда при различных передаточных отношениях редуктора.....	102

4.3 Оптимизация конструктивных параметров двигателя и преобразователя по критерию энергоэффективности	105
4.3.1 Учет температурного состояния обмотки двигателя	105
4.3.2 Оптимизация конструктивных параметров асинхронного двигателя	109
4.3.3 Оптимизация мощности привода	122
4.4 Оценка стоимости привода	127
4.5 Методика выбора конструктивных параметров привода по критерию минимального энергопотребления	129
Выводы по четвертой главе	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	137
ПРИЛОЖЕНИЕ А Причинно-следственная диаграмма внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на энергопотребление вагонов метрополитена	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты сравнения расчетных и измеренных величин вращающего момента, мощности и эффективности привода IM890210 с инвертором INV105 при постоянной частоте модуляции инвертора 500 Гц	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Асинхронный привод получает все большее распространение на рельсовом транспорте за счет простой конструкции и высокой надежности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. При этом возникает огромный интерес со стороны оператора в приобретении с одной стороны недорогих, а с другой стороны эффективных тяговых приводов подвижного состава.

Активное использование подвижного состава (ПС) с уже типовым асинхронным тяговым приводом, в который входит частотный преобразователь, асинхронный двигатель и редуктор, несомненно, помогает понизить уровень энергопотребления в силу ряда причин и, следовательно, снизить долю в общих расходах на электроэнергию, а также уменьшить уровень эксплуатационных расходов на обслуживание тягового привода по сравнению с коллекторным приводом. Но как быть, если активное использование асинхронного привода по-прежнему ставит задачу снизить уровень потребления электроэнергии на еще более низкий уровень, при этом, не увеличивая статью эксплуатационных расходов?

Приложимость одного типа привода на большом количестве участков эксплуатации явным образом дает понять, что из-за различных профилей пути привод может быть как недоиспользован, так и приближаться к граничным или бустерным условиям эксплуатации, что ведет к повышенному энергопотреблению за счет работы в режиме далеко от номинального. Кроме того, недоиспользование мощностей на некоторых участках приводит к наличию постоянно неиспользуемых резервов привода, которые могут быть «изъяты» заводом-изготовителем. Гибкая система проектирования, позволяющая оптимизировать конструкционные параметры привода под любой участок эксплуатации, позволит упростить поиски оптимальных параметров привода и его способов управления, тем самым сокращая имеющиеся резервы мощности и проектируя привод на эксплуатацию в большей степени в номинальном режиме его работы. В результате этого возмо-

жен переход на более низкую мощность инвертора, что сопряжено с соответствующим изменением материальной базы двигателя. Это повлечет улучшение энергоэффективности привода, изменение его стоимости и, тем самым, может привести к снижению капитальных вложений заказчика.

Таким образом, разработка методики определения наилучших величин основных конструкционных параметров по критерию энергоэффективности обуславливает актуальность работы, ставит дальнейшие цели и задачи.

Объект исследования. Системы тяги, асинхронный тяговый привод подвижного состава метрополитена.

Область исследования. Метод снижения потерь электроэнергии, улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава, оптимизация тягового привода вагонов метро по критерию наименьшего энергопотребления.

Степень разработанности темы. Исследования в области оптимизации тягового привода подвижного состава по различным критериям связаны с вопросами общего проектирования инверторного привода подвижного состава. Значительный вклад в развитие теории асинхронных машин внесли следующие ученые: В. Я. Беспалов, И. Больдеа, А. И. Вольдек, В. Гамата, Б. Геллер, А. С. Курбасов, С. А. Насар, и др. Вопросами параметризации инверторного привода занимались Г. Скарпетовский, П. Г. Колпахчян, А. С. Мазнев, Р. Т. Шрейнер, Д. И. Попов, С. С. Чернов, И. Я. Браславский, В. Н. Поляков, В. Г. Макаров, А. С. Сандлер, К. Н. Вакуленко, Ю. П. Петров, Ю. Г. Соколов и др.

Вышеупомнянутые авторы также занимались исследованиями, посвященными моделированию асинхронного тягового привода общегражданского назначения, а также аналитическому описанию процессов его работы, что может быть принято во внимание лишь в качестве предварительного выбора основных параметров привода и его характеристик на начальном этапе проектирования системы «тяговый преобразователь – асинхронный двигатель». Современным подходом к проектированию тягового привода электроподвижного состава (ЭПС) может служить проведение системного дизайна при численном моделировании компонентов привода. К сожалению, в отечественных работах, использующих данных под-

ход, принятые расчетные модели требуют доработки. В частности они не учитывают высокую вариативность режимов работы электропривода в диапазонах изменения момента и скорости, а также зависимости эффективности привода от выбранного передаточного числа редуктора. В свою очередь это сильно влияет на стоимость привода, его энергопотребление и др.

Цель и задачи. Цель работы состоит в разработке методики выбора наилучшего конструкционного сочетания рабочих параметров привода вагонов метрополитена по критерию энергопотребления для заданных условий эксплуатации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проанализированы факторы, влияющие на энергопотребление подвижной единицы, и выполнено моделирование изменчивости загрузки вагона метрополитена в зависимости от станции, ее удаленности от центра, времени и направления;
- выполнено моделирование нормальных и граничных режимов работы привода с применением тяговых расчетов заданного участка линии метрополитена;
- предложена методика по поиску наилучшей совокупности параметров для привода вагонов метрополитена по критерию наименьшего энергопотребления, а именно: передаточного отношения редуктора, числа витков обмотки статора, длины активной части ротора, максимальной частоты модуляции инвертора, мощности преобразователя, мощности двигателя;
- выполнено компьютерное моделирование системы «инверторный преобразователь – асинхронный двигатель – редуктор»;
- определена наилучшая конструкция магнитной системы двигателя, позволяющая улучшить жизненный цикл преобразователя и энергоэффективность привода;
- экспериментально исследована и подтверждена адекватность используемой математической модели для поиска наилучшего сочетания параметров асинхронного тягового привода по критерию энергоэффективности.

Научная новизна. Научная новизна заключается в разработке методики выбора наилучшего сочетания параметров системы «тяговый преобразователь – асинхронный двигатель – редуктор» по критерию энергоэффективности по заданным условиям эксплуатации вагонов метрополитена.

Основные результаты исследования:

– Разработана квазистатическая математическая модель движения вагонов метрополитена применительно к нормальным и граничным режимам работы с использованием статистической модели загрузки поезда. Отличительной особенностью модели является временная и дистанционная изменчивость пассажиропотока радиальной линии метро в соответствии с определяющими факторами, которые влияют на энергоэффективность привода и жизненный цикл преобразователя.

– Введено понятие блокирующего контура двигателя, ограничивающего количество возможных вариантов привода при работе с одним передаточным отношением редуктора. Предложен коэффициент относительного объема машины, как обобщенный критерий оценки продолжительности жизненного цикла преобразователя и энергоэффективности привода при синтезе системы.

– Разработана методика сравнительной оценки различных систем асинхронного тягового привода, которая отличается возможностью определения наилучшего сочетания конструктивных параметров привода по критериям энергоэффективности, сроку службы преобразователя и стоимости материалов.

– Доказана эффективность использования предложенной методики для выбора наилучшего сочетания параметров по критерию энергопотребления при оптимальном конструировании привода вагонов метрополитена.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– Разработанная математическая модель загрузки вагона метрополитена позволяет при проведении комплексного моделирования привода учитывать реалистичное значение загрузки вагона метро. Это дает возможность выбрать необходимую и достаточную мощность преобразователя, исходя из требуемой величины его жизненного цикла, и, тем самым, снизить стоимость преобразователя и всего привода в целом.

– По результатам проведенных исследований определено, что режим движения с выбегом более эффективен по сравнению с режимом поддержания максимальной скорости (на 1,8 % в принятых условиях задачи), что говорит о практической ценности его преимущественного использования в эксплуатации вагонов метрополитена.

– Блокирующий контур машины позволяет определить ограниченное количество допустимых вариантов привода при работе с одной величиной передаточного отношения редуктора. Его использование позволяет снизить время на поиск энергоэффективного варианта привода за счет снижения количества рассматриваемых вариантов.

– Коэффициент относительного объема машины позволяет установить количественную связь между условным объемом машины, совокупностью ее основных конструктивных параметров (активная длина, число витков, диаметр ротора, индукция в воздушном зазоре), передаточным отношением редуктора, мощностью инвертора и его жизненным циклом, а также энергоэффективностью привода на этапе выбора его наилучших конструктивных параметров.

– Методика оптимизации асинхронного тягового привода позволяет определить наилучшую совокупность его конструктивных параметров исходя из заданных условий нагружения, режимов работы и жизненного цикла по критерию минимального энергопотребления на этапе его проектирования.

– Результаты исследования признаны и использованы в компании ООО «Сименс» (г. Москва), Россия, Siemens AG (г. Нюрнберг), Германия.

Методология и методы исследования. Оптимизация системы «инверторный преобразователь – асинхронный двигатель – редуктор» основывается на численном моделировании установившихся режимов работы тягового привода описываемых дифференциальными уравнениями процессов, происходящих в асинхронном приводе при работе с заданными условиями движения. Адекватность компьютерной модели подтверждается результатами сравнения расчетов с данными эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритм определения режима работы тягового привода и статистическая модель загрузки вагона с учетом временной и дистанционной изменчивости пассажиропотока;
- компьютерная модель асинхронного привода;
- обобщенный критерий оценки энергоэффективности и продолжительности жизни при сравнении систем привода с различным конструктивным исполнением;
- методика выбора оптимального сочетания рабочих параметров тягового привода по критерию минимального энергопотребления.

Степень достоверности результатов подтверждается сходимостью результатов теоретических исследований с результатами экспериментальных данных, а также результатами внедрений предложений автора на предприятиях.

Обоснованность результатов проведенных исследований подтверждается строго доказанными и корректно используемыми положениями фундаментальных (физика, теоретические основы электротехники) и прикладных наук (теория тяги поездов, тяговые электрические машины, теория автоматического управления). Расхождение расчетных и экспериментальных данных составило не более 7 %.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на конференциях и семинарах:

- на IX Международной научно-практической конференции по интеграции образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования (Екатеринбург, УрГУПС, 2017);
- на Всероссийской научной конференции аспирантов «Техника и технологии наземного транспорта» (Екатеринбург, УрГУПС, 2018);
- на Всероссийской научно-технической конференции «Наука и образование транспорту» (Екатеринбург, УрГУПС, 2018).

Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях кафедры «Электрическая тяга» (Екатеринбург, УрГУПС, в 2014-2017 гг.) и семинаре аспирантов УрГУПС (Екатеринбург, УрГУПС, в 2016 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них шесть – в изданиях, рекомендованных ВАК к публикации результатов диссертации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, который состоит из 113 наименований, приложений. Общий объем работы составляет 154 страницы, включает 70 рисунков и 12 таблиц.

1 КРАТКИЙ ОБЗОР АСИНХРОННОГО ПРИВОДА И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

1.1 Современное состояние асинхронного привода метрополитена

Вопросами общей теории электропривода занимается значительное количество ученых [1 - 5]. При этом каждый конкретный электропривод может быть функционально показан с помощью следующей блок-схемы (рисунок 1.1) его процессов.

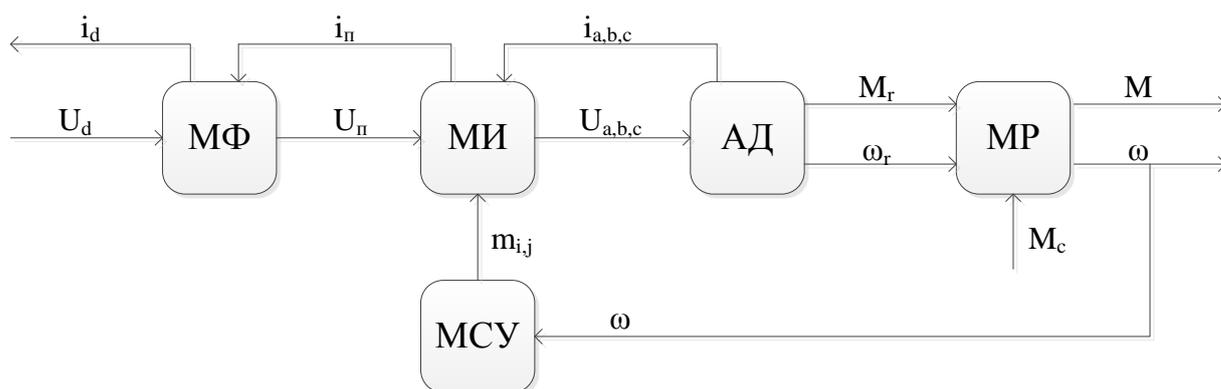


Рисунок 1.1 – Блок-схема функционирования асинхронного привода

Блок-схема показывает последовательное расположение функциональных элементов асинхронного привода, к которым относят преобразователь частоты ПЧ (состоящий из инвертора МИ и фильтра МФ), асинхронный двигатель (АД), редуктор (МР) и систему управления (МСУ) с необходимым набором датчиков. Так входной (заданный) параметр – скорость либо перемещение непрерывно сравнивается с фактическим ее значением, считываемым датчиком скорости либо перемещения, формируя при этом требуемый электромагнитный момент АД. Последний в свою очередь сравнивается с реализованным тяговым моментом на основе считанных векторов токов и потокосцеплений обмоток фаз двигателя, а так-

же скорости либо перемещения, формируя заданный вектор напряжения или тока статора для ПЧ. Преобразователь, обрабатывая полученные сигналы, формирует вектора напряжения статора или тока статора машины. Далее электромагнитный момент двигателя через механическое передаточное сообщение (муфта и/или редуктор) передается на объект управления (колесная пара).

Процессы изменения углового перемещения ротора двигателя связаны с быстроходной шестерней редуктора основным законом электропривода

$$M_{el.t} - M_r = J_t \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (1.1)$$

где J_t – суммарный момент инерции вращающихся частей привода, Н·м²;

ω_r – угловая частота вращения ротора, рад/с.

Для формирования пары «скорость-момент» в рамках заданной тяговой характеристики в зависимости от используемого алгоритма в МСУ происходит регулирование привода, что особенно характерно для тяговых машин подвижного состава (поддержание постоянства скорости). Для вспомогательных приводов с асинхронным двигателем могут быть реализованы несколько иные способы управления, позволяющие изменять момент и скорость по заранее известным характеристикам (например, для работы компрессора или вентиляторов охлаждения).

При формировании заданных векторов напряжения или тока статора АД в зависимости от назначения привода в ПЧ используются два способа регулирования: скалярное и векторное. Первый применяется во вспомогательных машинах, последний нашел активное применение в тяговых машинах и основан на изменении модуля векторов потокосцепления статора, основного потокосцепления, потокосцепления ротора, тока статора и их взаимного расположения [3, 6].

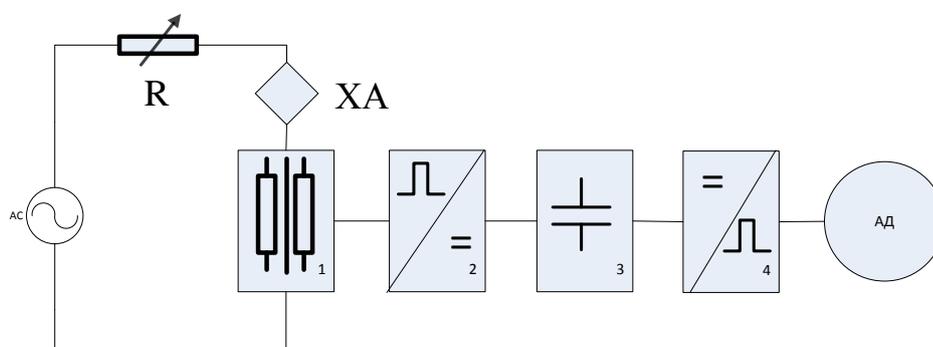
Частотные преобразователи для асинхронных электроприводов могут быть различны по схемному решению, элементной базе и формируемому напряжению. На транспорте, в основном, распространены преобразователи частоты со звеном постоянного тока, поскольку помимо роста требований к качеству преобразова-

ния электроэнергии для нужд электропривода, становится актуальным вопрос об их влиянии на контактную сеть.

Главным образом, изменения схемного характера стали причиной перехода на следующие «ключи»: биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), полевые транзисторы (MOSFET), запираемые тиристоры (IGCT, GTO).

На приводной технике железных дорог распространено использование преобразователей частоты со звеном постоянного тока и автономными инверторами напряжения (АИН) или автономными инверторами тока (АИТ) с широтно-импульсной модуляцией ключей на базе IGBT. Между звеном постоянного тока и сетью устанавливается входной фильтр. Способность рекуперации энергии приводов с АД является постоянным требованием, указываемым в технических заданиях операторов подвижного состава.

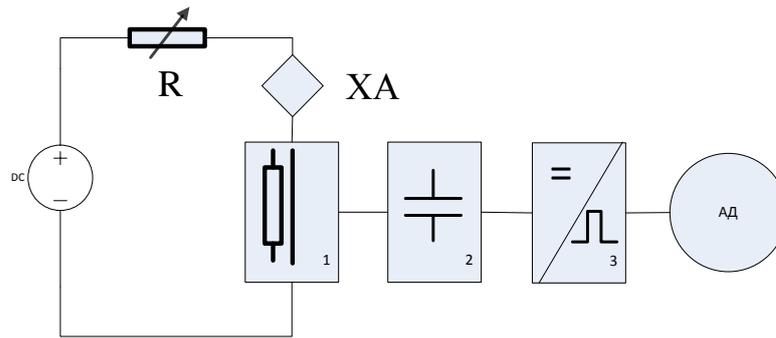
Внешний вид структурных схем частотного тягового регулируемого электропривода с асинхронным двигателем и короткозамкнутым ротором представлен на рисунке 1.2 и 1.3.



1 – тяговый трансформатор; 2 – четырехквadrантный преобразователь;

3 – фильтр; 4 – инвертор; АД – асинхронный двигатель

Рисунок 1.2 – Структурная схема электрической части асинхронного привода на переменном токе



1 – реактор; 2 – фильтр; 3 – инвертор; АД – асинхронный двигатель

Рисунок 1.3 – Структурная схема электрической части асинхронного привода на постоянном токе

Возможность получения практически любой формы выходного напряжения, в том числе и синусоидального, позволяет сократить общее количество высших гармоник привода. Получение синусоидальной кривой напряжения преобразователя частоты сопряжено с его низкой эффективностью из-за линейного режима работы при синусоидальном сигнале управления. Указанный факт заставляет использовать различные режимы переключения ключей, для повышения КПД преобразователя, что определяет прямоугольную форму напряжения [3].

Переключение ключей автономных инверторов зачастую осуществляется по 120- либо 180 градусному закону коммутации и реализуется через трехфазную мостовую схему с шестью ключами и обратными диодами.

Основным недостатком используемого способа управления ключами является несинусоидальность выходного напряжения преобразователя, что сопряжено с наличием множества высших гармоник напряжения. Синтез полей двигателя, создаваемых основной и высшими гармониками напряжения инвертора и полей от собственных гармоник двигателя, приводит к огромной величине потерь машины за счет неравномерности поля в воздушном зазоре. Использование алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволяет сократить величину высших гармоник напряжения инвертора и тем самым повысить эффективность всего привода.

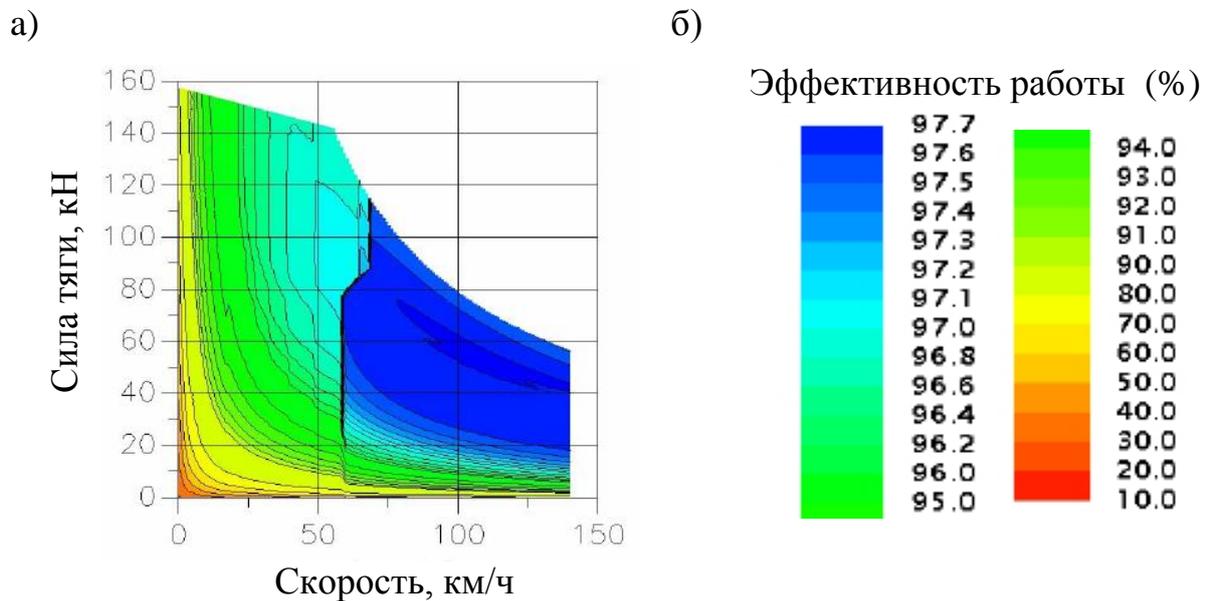
Основными производителями преобразовательной и приводной техники являются АВВ (Швейцария и Швеция), Alstom (Франция), Bombardier Transportation (Канада), EIA Control Techniques (Великобритания), Delta Electronics (КНР), Hitachi (Япония), КЕВ (Германия), Mitsubishi Electric (Япония), Schneider Electric (Франция), Siemens (Германия), TSA (Австрия), Toshiba (Япония) и др. К отечественным производителям преобразовательной техники относятся «Веспер», «Триол», «Сапфир», «Гамем», НТЦ «Приводная техника» и др.

Указанные фирмы обладают технологиями регулирования скорости посредством реализации скалярного или векторного управления моментом, задания величины выходного напряжения инвертора от частоты основной гармоники напряжения $U_1 = f(f_b)$, а также степени изменения скорости при разгоне и торможении при настройке ПИД-регулятора. На карте эффективности (рисунок 1.3) представлена зависимость эффективности ЧП на базе IGBT от скорости движения и величины силы тяги. Как можно заметить, большая область диаграммы имеет эффективность 94 - 97,7 % [7].

В качестве основных направлений развития частотных преобразователей могут служить рост мощности транзисторов и тиристоров, унификация элементов частотных преобразователей и их модульное построение, разработка систем управления, реализующих пониженное энергопотребление, рост частоты переключения ключей, эффективное использование охлаждения и реализация частотных преобразователей AC-DC и DC-DC на общей основе. Такой подход в проектировании новых преобразователей определенно направлен на снижение их стоимостных и эксплуатационных показателей, а также к упрощению обслуживания таких преобразователей в процессе жизненного цикла. При этом стоит обратить внимание на следующие показатели качества ЧП:

- надежность работы электронных микросхем;
- габариты реализации;
- воздушный поток и габариты радиатора охлаждения;
- статические и динамические характеристики (способность конкурировать с приводом постоянного тока);

- реализация систем самодиагностики и защиты;
- удобство обслуживания.



а) область работы; б) эффективность работы

Рисунок 1.3 – Карта эффективности частотного преобразователя локомотива Bombardier Transportation BR 185 серии TRAXX

Из всего многообразия видов асинхронных двигателей наибольшее распространение в приводной технике железных дорог получил трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором. При эксплуатации этой машины непрерывно происходит слежение за состоянием двигателя и режимом его работы за счет наличия большого количества датчиков (скорости, температуры, вибрации и т.д.). Такие мероприятия позволяют не допускать снижения надежности ввиду вмешательства внешних факторов [8]. В современных приводах с векторным управлением число датчиков машины сведено к минимуму. Например, для регулирования скорости и момента трехфазного АД необходимо и достаточно использовать два датчика тока даже в условиях частой эксплуатации в граничных режимах.

В зависимости от целей проектирования в приводной технике ЖД используются различные по исполнению механические передачи и редукторы (либо не используются вовсе), что позволяет с одной стороны повысить надежность, энергоэффективность (КПД) и качественные показатели системы управления при от-

сутствии механических передач, с другой стороны снизить массогабаритные показатели. Анализируя вышесказанное, становится заметно, что асинхронный привод представляет собой сложную нелинейную электромеханическую систему, совместная работа которой с микропроцессорными системами управления позволяет решать задачи на высоком уровне надежности и эффективности.

К требованиям к приводу современного подвижного состава относятся в первую очередь экономичность и невысокая величина первоначальных инвестиций и капитальных вложений, поскольку компании-операторы обращают особое внимание на стоимость жизненного цикла подвижной единицы, которая определяется, в том числе, и тяговым приводом. Для удовлетворения выше обозначенным требованиям необходима минимизация таких параметров, как масса и объем элементов привода при сохранении или увеличении ускорения и замедления в большем диапазоне изменения скоростей тяговой характеристики. При снижении габаритов электропривод также должен сохранить или уменьшить величину создаваемой шумовой нагрузки. Немаловажным фактором является при этом надежность и коэффициент технической готовности, а также удобство обслуживания [9, 10].

В связи с этим для каждого из компонентов привода определяются собственные предельные величины, на которые обращается внимание при проектировании.

Для тягового преобразователя такого рода ограничениями могут стать температура ключей инвертора (не более 125 °С для IGBT-транзисторов) и его жизненный цикл (определяется техническим заданием и соизмерим с жизненным циклом всей подвижной единицы), а также величина воздушного потока вентилятора охлаждения инвертора, который должен быть достаточен для охлаждения ЧП, но при этом шумовая нагрузка создаваемая вентилятором, должна оставаться в пределах принятых норм.

Тяговый двигатель, несмотря на простоту своей конструкции в сравнении с инвертором, имеет следующие ограничения:

- температура обмоток двигателя должна соответствовать классу изоляции;

- жизненный цикл должен соответствовать требованию технического задания;
- опрокидывающий момент должен превышать величины требуемого момента при максимальной скорости на резервную величину;
- плотность тока проводника должна быть соизмерима с температурными ограничениями класса обмотки;
- плотность потока в магнитопроводе не должна превышать значения, величина которого приводит к электромагнитной несовместимости;
- уровень шумовой нагрузки (самовентилируемая машина) должен соответствовать техническому заданию;
- допустимость вписывания в тележку и колесную пару по габаритным размерам.

Редуктор тяговой передачи ограничен:

- допустимостью вписывания в тележку по габаритам;
- достаточностью клиренса между нижней точкой корпуса редуктора и головкой рельса, что определяется техническим заданием при условии равномерности износа зубчатых колес.

1.2 Оптимизация как способ анализа и синтеза асинхронных приводов подвижного состава

Современные требования в разработке новых приводов подвижного состава заставляют обращать внимание на параметры энергопотребление, что обусловлено желанием компаний-операторов, и объясняется высокими эксплуатационными расходами, трендами рынка, а также стратегическими документами [10, 11]. При этом в качестве энергопотребления выступает величина, отражающая количество потребленной энергии за промежуток времени и используемая для определения параметра энергоэффективности.

Низкий уровень энергопотребления может быть достигнут при параметрах привода, полученных с помощью функции качества и последующей ее минимизации (или максимизации) в зависимости от критериев поиска.

$$Q = f(a, b, c \dots x), \quad (1.2)$$

где $a, b, c \dots x$ – критерии поиска.

В связи с этим представить высокоэффективный тяговый привод, довольно сложно без компонентной оптимизации отдельных частей привода и дальнейшего его синтеза. Покомпонентная оптимизация позволяет определить максимально возможный достижимый уровень эффективности элемента привода, а общая картина распределения потерь (в случае оптимизации по энергопотреблению) поможет выбрать основной объект оптимизации. Оптимизация, как правило, проводится по отдельным, заранее известным критериям и может преследовать как одну, так и несколько целей.

Отдельные авторы считают [12], что исходя из анализа функциональной схемы (см. рисунок 1.1) можно выделить несколько этапов, на которых задача оптимизации может быть поставлена отдельно.

К первому этапу оптимизации привода относят параметрическую оптимизацию конструктивных параметров, материалов, параметров обмотки и магнитной части двигателя, передаточного отношения редуктора с целью снижения общего энергопотребления и всех видов потерь, а также массы, объема и конечной стоимости.

Особое место занимают механические передачи привода и анализ их эффективности в том случае, если привод работает с частым изменением скорости и момента.

Повышения эффективности работы редуктора без улучшения качества материалов можно добиться за счет параметрической оптимизации шестерен. При оптимизации могут быть затронуты следующие параметры редуктора: распределение передаточного отношения при многоступенчатости, модуль зацепления,

число зубьев колеса, отношение ширины зубца к диаметру шестерни (разумеется, при наличии ограничений).

Учитывая ограниченность используемого пространства для установки многоступенчатого редуктора на подвижных единицах ЖД, задача оптимизации распределения передаточного числа может быть решена несколькими способами. Один из них за счет полного использования габаритов зубчатого колеса тихоходной ступенью с учетом клиренса.

Таким образом, для решения задач первого этапа автор [12] предполагает использование обобщенных физических величин комплексного типа с учетом ряда ограничений, накладываемых на объект оптимизации.

На втором этапе затрагивается преобразователь частоты, а также его система управления и охлаждения. Оптимизируется частота модуляции ключей инвертора, форма кривой напряжения и ее спектральный анализ, применяемые модели переключения ключей, оптимизируется характеристика частоты модуляции от основной частоты напряжения ($f_p = f(f_b)$), масса и габариты индуктивности фильтра звена постоянного тока.

Решение задач второго этапа уже требует анализа функции нескольких аргументов (1.2) и может быть получено с помощью математических моделей. При этом для получения результата необходим поиск абсолютного экстремума при обозначении конкретного критерия поиска и учете необходимых ограничений. Для этого могут быть использованы методы оптимизации, такие как: генетический алгоритм, метод роя частиц и пр.

На третьем этапе анализируется режим работы привода, обращается внимание на степень и быстроту изменчивости пары «момент-скорость», проводится анализ необходимости использования конкретной величины мощности, анализируются нормальный и граничный режимы эксплуатации.

На четвертом этапе производится поиск оптимального управления токами асинхронной машины при уже известной паре момента и скорости вращения. По-

иск оптимального состояния завершают, когда мощность потерь всей системы минимальна, в случае оптимизации, к примеру, по критерию энергопотребления.

Решение на четвертом этапе достигается при решении функций и уравнений Лагранжа, уравнений динамического программирования (Беллмана) [3].

Последний, пятый этап, предполагает оптимальное управление моментом и скоростью при постоянном изменении последней. Здесь может быть оптимизирован магнитный поток машины в зависимости от скорости и момента.

Задачи пятого этапа подлежат решению методами интерполяции и математического программирования.

Необходимо обратить внимание на то, что деление является условным, и между всеми этапами существует тесная связь. При постоянстве накладываемых ограничений режим работы привода и комбинация момента и скорости сильно влияют на конструктивные параметры, определяемые в течение первого и второго этапов оптимизации. В дальнейшем габариты привода при вычисленных конструктивных параметрах оказывают влияние на динамику электропривода и изменяют результаты последующих этапов.

Таким образом, деление на этапы является относительным и, в конечном итоге, для получения общего оптимума должны быть последовательно рассмотрены все шаги с необходимым количеством ограничений при известных критериях поиска. Немаловажным остается тот факт, что, помимо электромеханических и электромагнитных процессов, важно рассматривать и термодинамические процессы системы, поскольку именно они зачастую задают одно из ограничений при проектировании.

1.3 Математическая модель двигателя с учетом отдельных эффектов

Математическая модель, позволяющая корректно описать изучаемый процесс, является основным средством в изучении электромеханических, электро-

магнитных, термодинамических и др. процессов, проходящих в приводе. Так, при исследовании процессов повышения энергоэффективности тягового асинхронного электропривода особо значимыми становятся математические модели как ЧП, так и АД с редуктором.

Современное описание электромеханических процессов привода базируется на трех различных методах математического описания явлений:

- с помощью теории электрических цепей, основой которых выступают уравнения Кирхгофа;
- с помощью теории полей, основой которых выступают уравнения Максвелла;
- комбинированный подход, основой которого являются как уравнения Кирхгофа, так и уравнения Максвелла.

Последний подход считается по мнению авторов [13 - 32] наиболее перспективным, поскольку способен более точно описывать процессы преобразования энергии в системе привода с АД. Основой метода является рассмотрение магнитного поля в воздушном зазоре двигателя, после чего с помощью дифференциальных уравнений описывается баланс напряжений в статоре и роторе. Решение этих дифференциальных уравнений позволяет получить величины потокосцепления и токов электродвигателя. При этом величину электромагнитного момента получают после определения токов или потокосцепления по известной формуле.

В зависимости от цели решаемой задачи в дальнейшем с помощью выражения (1.1) описывают динамику электропривода либо рассчитывают по уже заранее известной зависимости требуемого момента от скорости величину потерь в приводе.

Вопросы динамики электропривода подробно рассмотрены в работах [23, 26, 33] и описываются уравнениями электромеханического преобразования энергии в трехфазных осях. Ввиду наличия непостоянных членов в уравнениях баланса напряжения статора и ротора и наличия токов как зависимых членов уравнения электромагнитного момента система дифференциальных уравнений будет являться нелинейной [26]. Нелинейность системы уравнений приводит к отсутствию

точного решения, но благодаря численным методам решение может быть получено, причем с достаточной точностью для исследовательской деятельности.

Вопросы статики электропривода рассмотрены в работе [16]. Основным отличием уравнений статики от уравнений динамики является отсутствие переменных времени.

Для анализа электромагнитных процессов и создания систем управления АД при численном моделировании используются методы преобразования координат [26], с помощью которых можно упростить дифференциальные уравнения в трехфазных осях с переменными членами и привести их к системе дифференциальных уравнений в двухфазных неподвижных либо вращающихся осях.

Основы преобразования координат, их математического описания и теории обобщенной электрической машины были сформулированы еще в первой половине XX века и нашли отражение в трудах зарубежных ученых Р. Парка, Г. Крона, Д. Уайта и др. и отечественных А. А. Горева, Г. Н. Петрова и др. Из множества преобразований координат наиболее часто используемым является преобразование Парка-Горева.

Сохранение величины результирующей МДС, магнитного потока на полюс и фазу, также как и числа витков обмотки статора при преобразовании координат позволит в дальнейшем, аппроксимируя уравнения, учитывать нелинейность насыщения магнитопровода электродвигателя. Учет нелинейности насыщения магнитопровода дает возможность создавать более корректные математические модели, которые необходимы при исследовании задач энергоэффективности привода и поиска оптимального состояния.

При преобразовании координат зачастую используют допущения, которые снижают качество моделирования. Такими при преобразовании Парка являются отсутствие насыщения магнитопровода и потерь в стали машины.

Для учета эффекта насыщения магнитопровода двигателя в статических и динамических процессах используют следующие методы: метод статических индуктивностей [34] и метод динамических индуктивностей. Математический аппарат последнего заметно отличается от первого и не находит должного распро-

странения. Автор [26] выполнил сравнение методов при расчете переходных процессов пуска АД без преобразователя при равных условиях и показал, что разница в результатах незначительна. По мнению авторов [16, 32, 35], взаимосвязь между насыщением магнитопровода и током намагничивания может быть определена непостоянством коэффициента между ними, при этом связь между потоками рассеяния статора и ротора двигателя и соответствующими токами должна быть неизменной ввиду неизменности величин индуктивности статора и ротора АД. Другие варианты аппроксимации зависимости насыщения магнитопровода от тока намагничивания описываются в работах [21, 36].

Общие потери АД складываются из множества составляющих, одной из которых выступают потери в стали, которые в дальнейшем подразделяются на потери на гистерезис и потери на вихревые токи. Доля потерь в стали в общих потерях тяговой машины МВПС может составлять до 18 %, что требует обратить на них внимание при исследовании вопросов энергосбережения и оптимизации.

Существуют различные подходы в учете влияния вихревых токов на величину потерь электрических машин. Так, в [26] вихревые токи учитываются за счет введения двух интегральных контуров в схему замещения. Параметры введенных интегральных контуров, как правило, получают в результате эксперимента, что довольно трудно выполнимо, поскольку возможно определить только общий параметр сердечника как статора, так и ротора машины без возможности дальнейшего разделения.

В работе [37] с целью определения эффективности работы была разработана модель, позволяющая учитывать потери асинхронной машины, работающей в динамическом режиме. Эффективность машины была улучшена благодаря техникам оптимизации с использованием контроллеров с нечеткой логикой.

Другим методом учета потерь в стали является расширение классической «Т»-образной схемы замещения АД за счет дополнительного параллельного или последовательного подсоединения к цепи намагничивания сопротивлений. Но ввиду того, что при питании АД от ЧП указанные сопротивления являются функциями двух переменных, дальнейший расчет усложняется [38, 39].

Следующим автором [40] предлагается предварительное разделение потерь в стали на составляющие и использование постоянных коэффициентов для потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов. Определение указанных выше коэффициентов проводится либо численными, либо экспериментальными методами по известным методикам.

В случае применения теории многообмоточного трансформатора, что отражено в работе [3], возможен учет потерь в стали исходя из представления основного потока машины как параметра, состоящего из основного потока и потока рассеяния. Насыщение магнитопровода в этом случае учитывается введением в математическую модель коэффициента, учитывающего эффект насыщения.

Краткий обзор показывает, что многие предложенные авторами методики учета потерь в стали и эффекта насыщения магнитопровода требуют достаточных усилий для их реализации.

1.4 Современные способы повышения эффективности и оптимизации электроприводов

Повышение эффективности электроприводов возможно при использовании параметров привода, которые могут быть найдены из решения либо задач оптимизации и поиска неиспользуемых резервов двигателя, либо применения новых материалов и технологий [34, 41, 42], а также преобразователей частоты с высокой эффективностью [43]. Современные ЧП на полупроводниковых элементах IGBT, GTO, MOSFET позволяют повысить эффективность электропривода также исходя из применяемых алгоритмов управления.

Несмотря на то, что рост энергоэффективности стал возможен благодаря численному моделированию процессов и системной оптимизации, в некоторых случаях интерес к энергоэффективности не проявляется и, тем самым, реализуются неэффективные способы управления АД [44].

В последнее время исследования в области оптимизации электропривода и оптимального управления им становятся все более актуальными, в особенности для снижения стоимости и получения максимальной эффективности. Основными исследователями в этой области стали В.Н. Поляков, А. С Мазнев, Р.Т. Шрейнер, И.Т. Беннеран, Д. И. Попов, С.Г. Обухов, Е.Е. Чаплыгин и др. [44 - 48].

Создание электромагнитного момента электродвигателя может быть осуществлено с применением некоторых методов оптимизации. Первый из них основан на управлении с поддержанием минимума тока статора, следующий – на поддержании минимума общих потерь системы. Основным недостатком этих методов является недостаточное быстродействие при реализации силы тяги.

При необходимости реализации высокой динамики в электроприводе с асинхронным двигателем все чаще используют формирование электромагнитного момента с постоянством потокосцепления ротора и намного реже с постоянством основного потокосцепления и потокосцепления статора. Формирование электромагнитного момента с постоянством потокосцепления ротора нашло активное применение ввиду того, что на изменение электромагнитного момента требуется минимальное количество мгновенной мощности при постоянстве потокосцепления.

В работах [11, 49] показан способ оптимизации тягового привода с помощью конечного программного продукта, как TrEnO и MATLAB/Simulink, который позволяет вести расчеты по эффективности и распределению мощности с учетом режима работы и термодинамических явлений в тяговом приводе. Показано, что использование такого подхода является актуальным при решении задач быстрого прототипирования и поиска оптимальных решений как в области тягового подвижного состава железных дорог, так и автомобильной индустрии.

В другой работе [50] автор рассматривает задачу оптимизации с учетом предельных законов регулирования. Здесь регулирование позволяет при заданной величине одного параметра подобрать оптимальное значение другого.

В [51] отмечены недостатки предыдущей работы, и проведена оптимизация одновременно нескольких геометрических параметров асинхронной машины при

помощи конечно-элементного метода. С помощью квази ньютоновского метода расчета оптимизирована конструкция магнитной части для минимальных потерь мощности машины.

Авторами [52, 53] были выполнены основные исследования в области повышения энергоэффективности электроприводов переменного тока при управлении магнитным потоком. Одним из результатов явилось подтверждение необходимости учета эффекта насыщения машины при рассмотрении задач оптимизации и энергоэффективности системы.

В работе [54] при оптимизации геометрии машины с постоянными магнитами особое внимание обращалось на режимы работы проектируемой машины. При учете указанного аспекта, по словам авторов, возможность повышения эффективности возрастает до 10 %, что также сопряжено со снижением издержек при производстве привода.

В работе [55] автором предложена модель АД, которая учитывает потери в меди и в стали как в статоре, так и в роторе электродвигателя. Кроме того, автором учтены дополнительные потери и потери на трение. Рассмотрено оптимальное управление при постоянстве потока ротора АД в аналитическом виде. Выполнено упрощение для практического использования, но с помощью рассматриваемого способа невозможно с должной точностью получить результат во всем диапазоне регулирования.

Авторы работы [56] с помощью расчета потерь двигателя методом конечных элементов и последующего определения карты распределения температуры методами вычислительной гидродинамики добиваются повышения эффективности электрической машины на 1,5 % за счет оптимизации ее геометрических параметров. Выбор дизайна машины с использованием процесса оптимизации позволяет снизить ток намагничивания и потери в стали ротора.

Автору [44] удалось показать особенность оптимального управления по критериям минимального тока статора и минимальной мощности потерь. Она заключается в независимости от скорости оптимальных величин потокосцеплений статора, главного потокосцепления, потокосцепления ротора, токов статора и ро-

тора, а также абсолютного скольжения. Показано, что оптимальные параметры зависят от величины требуемого электромагнитного момента.

Все перечисленные выше модели рассматривали лишь оптимизацию АД, а не всего привода в целом, что говорит о частном случае решения задачи оптимизации при рассмотрении всей подвижной единицы. Учет потерь входного фильтра, инвертора, редуктора, а также производственного механизма (в случае подвижной единицы – это сопротивление движению поезда) позволяет получить полную картину эффективных зон работы привода и оптимизировать его режимы работы.

Особо отмечается работа [16], в которой автор рассмотрел электропривод как систему, состоящую из преобразователя и асинхронной машины с учетом режима ее работы. Проведена оптимизация системы в статическом режиме работы по критерию минимума потерь всей системы с помощью численных методов, но, кроме того, предложены и аналитические способы решения подобных задач. Автор проанализировал также влияние режимов работы АД на величину потерь в ЧП и обратил внимание на тот факт, что АД обладает рядом экстремумов при рассмотрении критериев качества его работы. Наличие экстремумов двигателя (ток статора и потребляемая мощность) определяет экстремум некоторых составляющих потерь компонентов ЧП.

В работе [57] автором построена модель электропривода, в которой рассматриваются потери как в электродвигателе, так и в выпрямителе и в инверторе. После этого проведена общая оптимизация системы по критерию минимума потерь.

Использование генетического алгоритма при решении задачи оптимизации позволило одним авторам [58] достичь 25 % снижения стоимости асинхронной машины, другим [59] повысить ее эффективность за счет изменения плотности магнитного потока в воздушном зазоре машины. При сравнении автором [60] генетического алгоритма оптимизации асинхронного двигателя с методом роя частиц, а также с обычным методом проектирования двигателей получено, что метод роя частиц проще в реализации и более надежен. Кроме того, метод роя ча-

стиц позволил авторам получить более качественное решение задачи оптимизации по критерию стоимости. Тем самым, случайный подбор конструктивных параметров двигателя дает положительный результат в улучшении технико-экономических показателей привода и скорости разработки, но без возможности понимания его внутренних процессов.

Что касается оптимального управления электроприводом с АД по критериям минимума потребляемого тока, то исследования в этой области были проведены учеными А.Ю. Афанасьев, И.Т. Беннеран и др. [15, 61].

В работе [15] автором предложена модель АД при управлении с минимальной мощностью потерь электродвигателя. Решалась задача оптимального регулирования АД с учетом токов Фуко в магнитопроводе статора.

Автором [61] была решена задача оптимизации асинхронного электродвигателя по критерию минимума потерь.

Теоретические исследования, проведенные автором [62], основаны на мгновенном определении оптимального коэффициента мощности для работы двигателя с минимальными потерями за счет изменения тока статора. Особенно подчеркивается, что такой подход эффективен при работе с низкими значениями момента. Лабораторные исследования асинхронного двигателя, работающего с переменной нагрузкой [63], дают возможность повысить энергоэффективность привода на 1 - 2 % за счет управления с нечеткой логикой и необходимого и достаточного использования мощности.

При рассмотрении задач оптимизации по минимуму тока статора в некоторых работах [15, 16, 37, 61] не рассматривался эффект насыщения магнитопровода. В работе [61] недостаточно была учтена мощность потерь от токов Фуко при изменении частоты основной гармоники напряжения в области регулирования привода. Многими авторами не были учтены при оптимизации машины потери на «скин»-эффект в обмотках, а также потери от несинусоидальности магнитного поля и от пазности статора и ротора.

Неучтенность отдельных параметров и неполное рассмотрение системы привода ставит задачу поиска оптимального состояния частотного электроприво-

да с учетом потерь в ЧП, АД, редукторе, а также с учетом основного и дополнительного сопротивлений движению подвижной единицы. Критерием оптимизации при этом целесообразно выбрать энергопотребление.

Выводы по первой главе и постановка задач

Обзор научных работ показал, что несмотря на широкое распространение электроприводов с асинхронным электродвигателем задача снижения энергопотребления по-прежнему является актуальной. Кроме того, существующие работы по оптимизации асинхронного двигателя и привода в целом главным образом направлены на поиск наилучших способов и алгоритмов управления. Наиболее целесообразный подход к решению задач оптимизации систем тягового привода с асинхронным тяговым двигателем заключается в комплексном системном моделировании с последующей оптимизацией как конструктивного состояния, так и алгоритмов управления. Однако в отечественных работах, использующих подобный подход, принятые расчетные модели требуют развития, в частности, они не учитывают возможность оптимизации конструктива привода, его режим работы и изменение эффективности редуктора в пределах тяговой характеристики, что может негативно отразиться на адекватности результатов расчета и не позволит комплексно оптимизировать тяговый привод. В работе же обращается внимание на выбор оптимального сочетания конструктивных параметров привода по критерию энергоэффективности.

В соответствии с вышеизложенным в работе ставится цель: разработать с помощью численного моделирования процессов электропривода методику поиска оптимального состояния всех его элементов, а именно: ЧП, АД и редуктора. В качестве критерия оптимизации принимается минимальный расход электроэнергии электропривода для заданных условий эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать методику по поиску наилучшей совокупности конструктивных параметров для привода вагонов метрополитена по критерию наименьшего энергопотребления, а именно: передаточного отношения редуктора, числа витков обмотки статора, длины активной части ротора, максимальной частоты модуляции инвертора, мощности преобразователя.

2. Выполнить компьютерное математическое моделирование системы «инверторный преобразователь – асинхронный двигатель – редуктор».

3. Исследовать и подтвердить адекватность используемой математической модели для поиска наилучшего сочетания параметров асинхронного тягового привода по критерию энергоэффективности.

4. Проанализировать факторы, влияющие на энергопотребление подвижной единицы, и выполнить моделирование изменчивости загрузки вагона метрополитена в зависимости от станции, ее удаленности от центра, времени и направления.

5. Выполнить моделирование нормальных и граничных режимов работы привода с применением тяговых расчетов для заданного участка линии метрополитена.

6. Определить наилучшую конструкцию магнитной системы двигателя, позволяющую повысить жизненный цикл преобразователя и энергоэффективность привода.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЯГОВОГО ПРИВОДА МЕТРО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ЕГО НАГРУЖЕНИЯ

2.1 Разработка математической модели автоматизированных тяговых расчетов для участка обращения с учетом изменчивости внешних факторов

Тяговые расчеты вагонов метро являются основной задачей науки «Теория тяги поездов» и основываются на математической модели процесса движения материальной точки (поезда метро) при учете некоторого количества допущений (основные: отсутствие продольных, поперечных, вертикальных колебаний, постоянный по величине диаметр колес колесных пар), начальных условий (времени, скорости и координаты пути) и принятых ограничений (основные: скорость, сила тяги, масса состава). Задача тяговых расчетов считается решенной, если получены все три величины: ускорение a , скорость v и путь s с течением времени [64].

Основные уравнения движения материальной точки:

$$\frac{dv}{dt} = K_1 \cdot f, \quad (2.1)$$

$$\frac{ds}{dt} = K_2 \cdot v, \quad (2.2)$$

где K_1, K_2 – переменные коэффициенты, зависящие от массы состава;

f – удельная равнодействующая сила поезда, Н/кН.

В общем случае результирующая сила равна

$$f = f_k - w_0 - w_i - k_T \cdot b_T, \quad (2.3)$$

где f_k – удельная сила тяги подвижной единицы, Н/кН;

w_0 – удельная сила сопротивления движению, Н/кН;

w_i – удельная сила сопротивления движению от уклона, Н/кН;

k_T – коэффициент реализации тормозной силы;

b_T – удельная тормозная сила, Н/кН.

В режиме тяги

$$f_{(T)} = f_k - w_0 - w_i. \quad (2.4)$$

В режиме выбега

$$f_{(B)} = -w_{0x} - w_i, \quad (2.5)$$

где w_{0x} – удельная сила сопротивлению движению поезда на холостом ходу, Н/кН.

В режиме торможения:

– экстренного (коэффициент торможения $k_T = 1$)

$$f_{(ЭТ)} = -w_0 - w_i - b_T; \quad (2.6)$$

– служебного (коэффициент торможения $k_T = 0,8$)

$$f_{(СТ)} = -w_0 - w_i - 0,8 \cdot b_T. \quad (2.7)$$

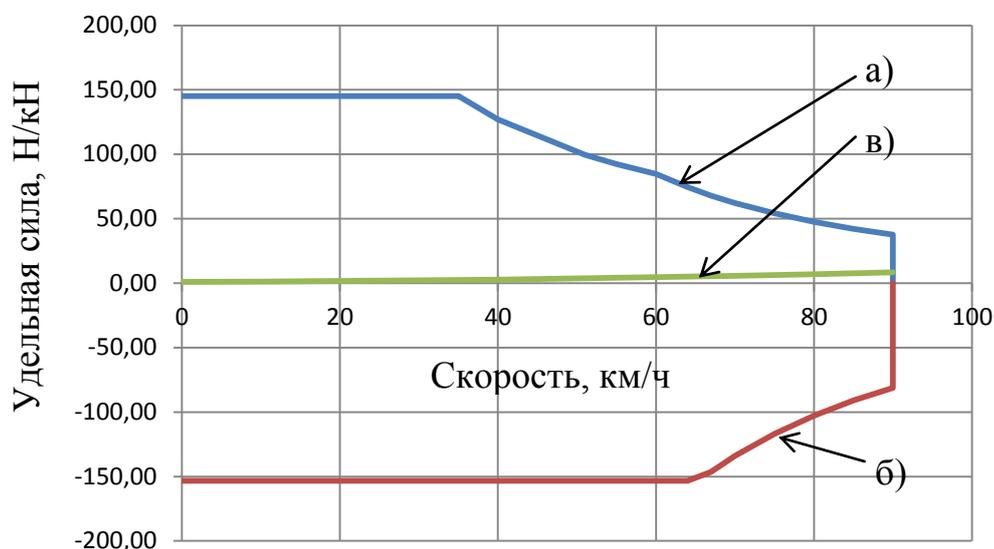
Принимаемые ограничения

$$V_i = \min \left(\begin{matrix} V_{\text{доп}} \\ V_{\text{ПС}} \end{matrix} \right), \quad (2.8)$$

где V_i , $V_{\text{доп}}$ – текущее и допустимое значения скоростей движения подвижной единицы, км/ч;

$V_{\text{ПС}}$ – конструкционная скорость подвижной единицы, км/ч.

Величины удельных равнодействующих сил показаны на рисунок 2.1. Силы тяги и торможения выбирались из условия наиболее часто встречающихся тяговых характеристик для метрополитенов.



- а) удельная тяговая характеристика; б) удельная тормозная характеристика;
в) удельная характеристика основного сопротивления движению

Рисунок 2.1 – Удельные силы, действующие на поезд

Решение задачи тяговых расчетов сводится к применению метода кусочно-линейной аппроксимации нелинейной зависимости удельной результирующей силы поезда от скорости $f(V)$ методом численного интегрирования (Рунге-Кутта) подынтегральной функции при решении дифференциальных уравнений первого порядка (2.1).

На рисунке 2.2 приведена блок-схема математической модели процесса движения поезда, с учетом уравнений (2.1...2.8) и показано, что режим ведения поезда при производстве тяговых расчетов (решение основных уравнений движения поезда (2.1) и (2.2)) определяется положением ключа QS , которому соответствует три режима: тяга, выбег и торможение.

Алгоритм выбора режима ведения поезда при производстве тяговых расчетов определяется способом управления тяговым приводом и предполагает выбор

любых значений пары F_{ki} и V_i в пределах границ выбранной тяговой характеристики.

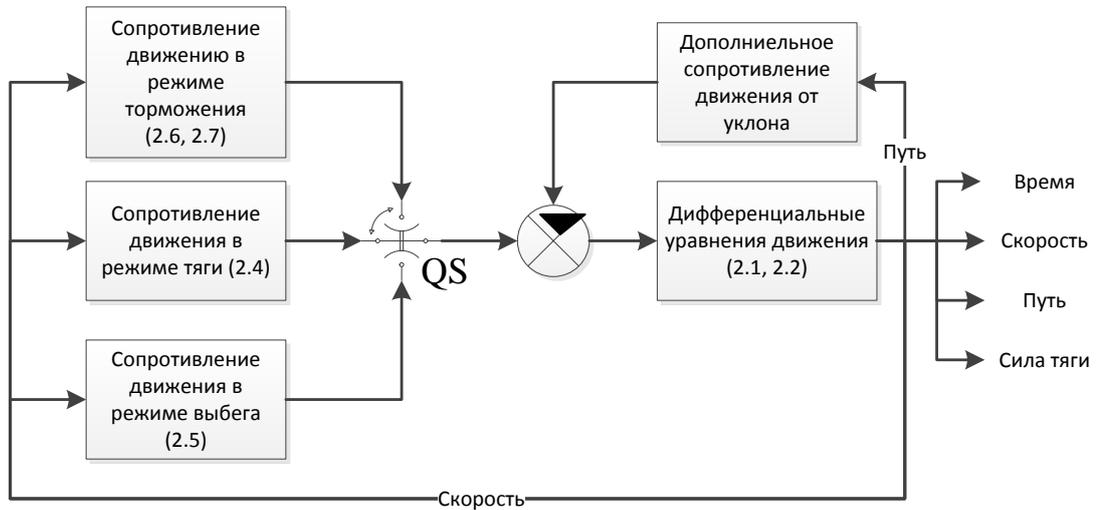


Рисунок 2.2 – Блок-схема математической модели процесса движения поезда

Система автоматического регулирования (САР) предполагает наличие двух контуров регулирования: внутреннего, с регулированием по току (напряжению) двигателя, и внешнего, с регулированием по скорости движения. Регулирование происходит за счет преобразования сигнала внешнего контура в сигнал внутреннего контура. Учитывая, что постоянная времени тягового двигателя примерно на три порядка меньше постоянной времени поезда [64], то в структурной схеме САР внутренний контур регулирования можно представить в качестве пропорционального динамического звена с коэффициентом передачи $K_{ТД}$ – рисунок 2.3. Схема САР может быть принята за основу алгоритма тяговых расчетов, поскольку позволяет рассчитывать все координаты поезда в процессе движения.

Управляющим элементом регулятора скорости выбрано апериодическое звено 1-го порядка, которое позволяет ограничить интенсивность нарастания тока, а значит, и силы тяги, создаваемой тяговыми двигателями.

Объединение структурной схемы САР (рисунок 2.3) и математической модели процесса движения поезда (рисунок 2.2) может стать основой для создания алгоритма производства тяговых расчетов с автоматическим выбором пары F_{ki} и

V_i в пределах границ выбранной тяговой характеристики (рисунок 2.4). Использование дополнительных блоков в схеме необходимо для задания ограничений по скорости движения, также для выбора режима работы и значений пары F_{ki} или B_{ki} и V_i (ВРР) и для ограничения максимальных значений силы тяги и торможения (МС).

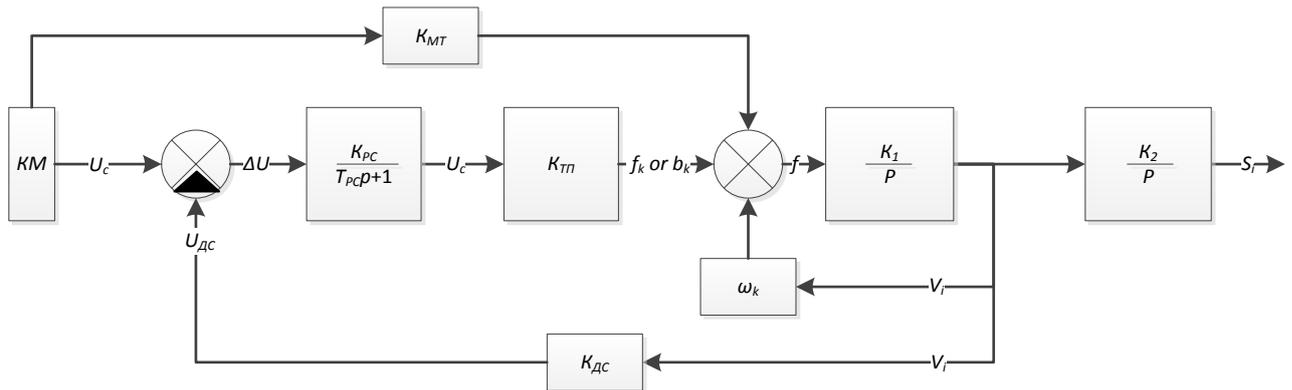


Рисунок 2.3 – Структурная схема САР скорости поезда

Блок ОС представляет собой табличную зависимость допустимой скорости движения по участку от координаты пути. Блок ВРР может быть представлен как линейная зависимость без зоны нечувствительности (отсутствует элемент ВС), т.е. с отсутствием режима выбега, а также может быть представлен нелинейной зависимостью 1-2-3-4. Заданная максимальная тяговая характеристика в удельной форме представляет собой блок МС. По знаку и величине выходного напряжения регулятора скорости (РС) выбирается режим работы и требуемое значение силы тяги или торможения по следующему алгоритму:

– на участке 1-2 нелинейной характеристики блока ВРР реализуется режим тяги.

При этом, если $f_k < f_{k \max}(V)$, то

$$f_k = K_{\text{ТП1}} \cdot U_y, \quad (2.9)$$

а если $f_k > f_{k \max}(V)$, то

$$f_k = f_{k \max}(V), \quad (2.10)$$

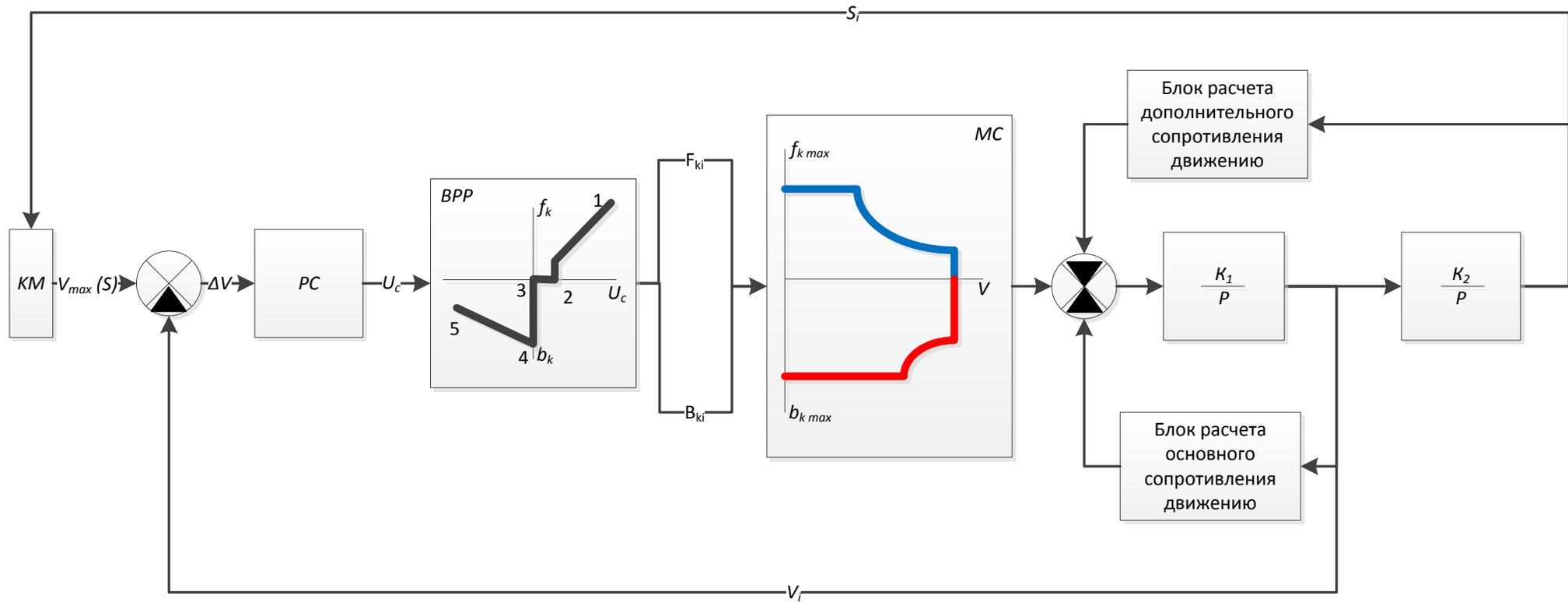


Рисунок 2.4 – Структурная схема алгоритма выполнения тяговых расчетов

где $f_{k \max}(V)$ – предельная тяговая характеристика в удельной форме.

– на участке 2 – 3 блока ВРР реализуется режим выбега, когда $f_k = 0$ и $b_T = 0$.

– на участке 3 – 4 блока ВРР реализуется режим электрического торможения. При этом, если $b_T < b_{T \max}(V)$, то

$$b_T = K_{тп2} \cdot U_y, \quad (2.11)$$

а если $b_T > b_{T \max}(V)$, то

$$b_T = b_{T \max}(V), \quad (2.12)$$

где $b_{T \max}(V)$ – предельная тормозная характеристика в удельной форме.

Таким образом, работа элемента сравнения, РС, блока ВРР и ограничения скорости обеспечивает автоматический выбор режимов движения поезда и сил тяги либо торможения.

Моделирование режима ведения поезда требует функциональную схему алгоритма тяговых расчетов. Такая схема приведена на рисунок 2.5.

Здесь блок регулятора скорости выполнен как апериодическое звено первого порядка и задает интенсивность нарастания тяговой либо тормозной силы. Далее моделируется работа нелинейного блока выбора режима движения и реализации уравнений математической модели процесса движения всех трех режимов: тяги, выбега и торможения. Пропорциональные звенья с коэффициентами передачи $K_{тп1}$ и $K_{тп2}$ моделируют работу тягово-тормозного привода в различных режимах ведения поезда.

Таким образом, данная функциональная схема алгоритма тяговых расчетов с автоматическим выбором режима ведения поезда и прикладываемой силы позволяет смоделировать любой режим ведения поезда, что было реализовано средствами системы Matlab.

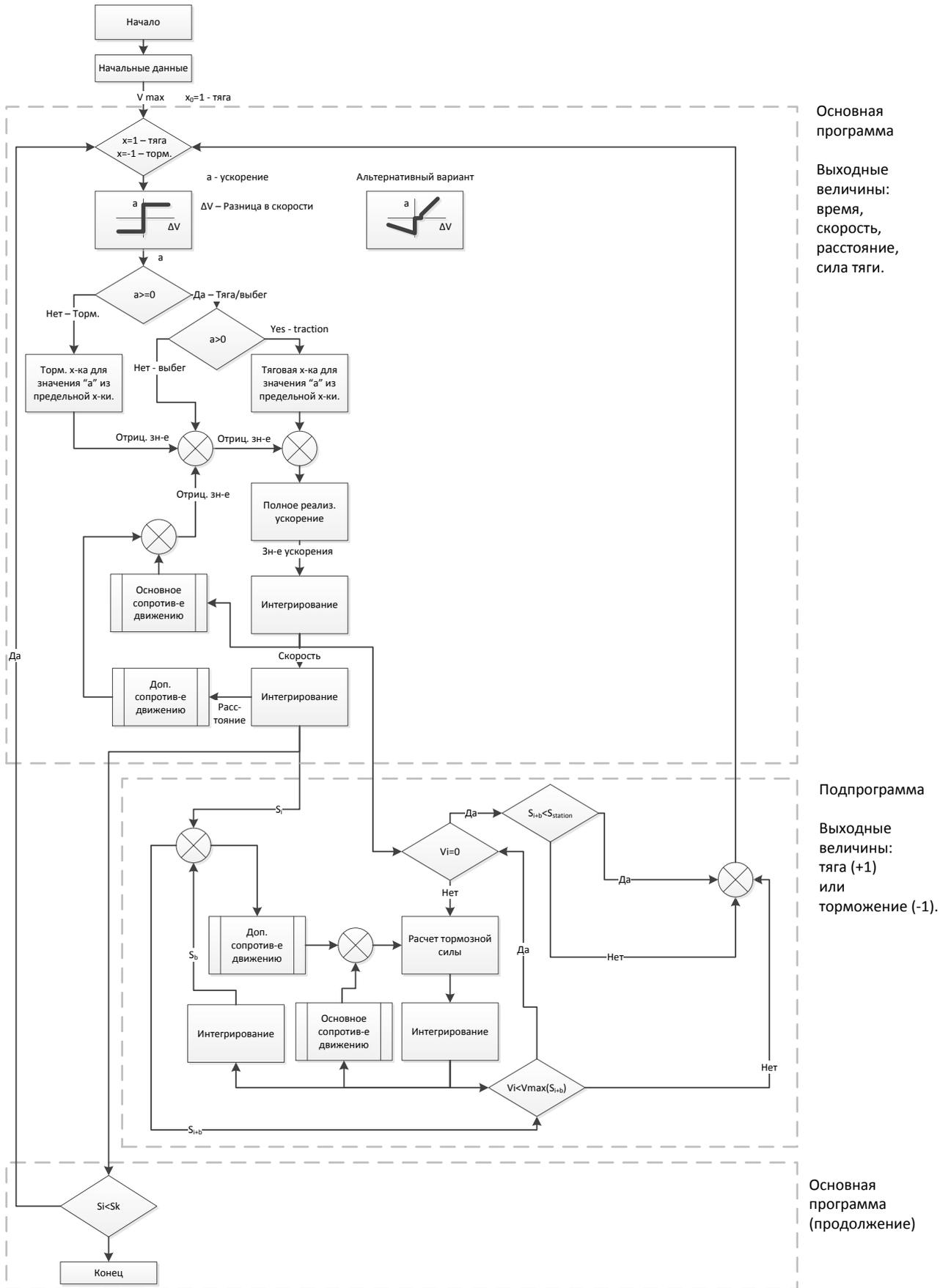


Рисунок 2.5 – Функциональная схема алгоритма выполнения тяговых расчетов

2.2 Анализ внешних и внутренних факторов работы вагонов метрополитена

Использование инновационных путей развития железнодорожного транспорта общего пользования с общей ориентацией на научно-технологическое направление [65] строго прописано в стратегиях развития рельсового транспорта [10, 65]. При поиске ответа на все еще актуальные задачи, такие как: 1) снижение энергопотребления на тягу поезда; 2) снижение уровня потерь в компонентах подвижной единицы; 3) эффективное использование кинетической энергии поезда, – поставленные в стратегии и сформулированные еще в XX веке, подлежат решению через более детальное изучение внешних и внутренних факторов [8]. Количество этих факторов, а также глубина их учета в моделях нуждаются в должной проработке в зависимости от поставленных целей. Указанные направления активно разрабатываются проектными институтами и ведущими фирмами в области проектирования и производства подвижного состава, чтобы снизить удельные показатели потребления энергии на тягу на 10 - 15 % [65].

Как указано в работах [10, 65], оптимизация энергопотребления подвижной единицы может стать одним из направлений поиска резервов и повышения эффективности как со стороны ведения поезда, позволяя грамотно использовать его кинетическую энергию, так и со стороны используемых компонентов, снижая общий уровень потерь.

Зачастую требование высокой производительности работ в тяговом хозяйстве приводит к неэффективному ведению поезда и высоким текущим затратам на его эксплуатацию в дальнейшем. В конечном итоге высокая стоимость эксплуатации подвижной единицы заставляет проводить анализ структуры затрат, в которой особое место занимает энергопотребление. Учитывая тенденции к снижению использования энергоресурсов, в результате потребления которых происходит рост содержания углекислого газа (CO_2) в атмосфере, ведущие мировые фирмы по производству, в частности, подвижного состава стараются снизить указанную ве-

личину до предельно низких значений. Но снижение энергопотребления, как задача, также ставится и для эксплуатационных локомотивных депо, эксплуатирующих подвижной состав, с целью проработки путей грамотной эксплуатации и расходования кинетической энергии поезда. В то же время перед заводами-производителями стоит точно такая же задача, заставляя их искать резервы при проектировании, применяя новые технологии и разрабатывая системы активной помощи машинисту.

Получение реальных (близких к эксплуатационным) значений энергопотребления подвижной единицы и в конечном итоге концепции энергопотребления поезда возможно при решении задачи определения общей (без учета аварийных или граничных режимов) модели движения поезда. Используемая модель должна быть способна в полной мере описать жизненный цикл подвижной единицы в нормальных или близких к нормальным условиям эксплуатации. Для построения этой модели необходимо четкое представление о количестве и способах влияния внешних и внутренних факторов, оказывающих прямое или косвенное воздействие на исследуемый показатель.

Проведена оценка влияния внешних и внутренних факторов по отношению к энергопотреблению подвижной единицы метрополитена в режиме ведения поезда на участке обращения. Кроме того, показаны стороны хозяйственной деятельности (оператор ПС и производитель), которые способны повлиять на изменение энергопотребления поезда. В качестве определения внешних факторов, которые имеют наибольшее влияние при расчете энергопотребления, было принято следующее (в особенности при использовании асинхронного привода ПС):

- ежемесячное изменение величины пассажиропотока в течение года, а также ежедневное изменение величины пассажиропотока в течение недели и почасовое изменение величины пассажиропотока в течение дня характеризуют величину изменчивости загрузки вагона при заданной плотности;

- число поездов, используемое на участке обращения в выходной и будний день (определяет наполняемость вагона), а также их изменение в течение какого-либо интервала определяют эффективность использования вагона поезда;

- изменение величины привлекательности станций для пассажира определяет величину флуктуации пассажиропотока в зависимости от станции и задает модель поведения изменчивости пассажиропотока для каждой линии метрополитена;
- изменение величины пассажиропотока по направлениям также рассматривается в зависимости от расположения на линии станции с наибольшим пассажиропотоком;
- изменение времени стоянки на станции в зависимости от величины пассажиропотока при посадке и высадке поезда, последовательности этих операций, числа и ширины дверного проема;
- изменение величины ускорения как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения;
- изменение времени движения в режиме выбега между станциями либо режима движения с поддержанием скорости движения в зависимости от расписания, действующих ограничений, протяженности станции и невыполнения графика движения;
- параметры пути участка обращения, где основными являются: уклон, ограничения скорости, расстояние между станциями, частота и радиус кривых пути, движение воздушных масс и высота тоннеля над уровнем моря;
- эффективность привода подвижной единицы (его мощность, масса и инерционность, эффективность инвертора, двигателя и редуктора), конструкционные параметры привода, диаметр по кругу катания колесной пары;
- гибкость расписания, предполагающая движение как по уже сформированному расписанию, так и учет опозданий: определение величины минимального интервала движения с отсутствием задержки;
- отдельные требования технического задания компании-оператора (задание экстремального (граничного) режима работы и максимальной скорости движения на участке обращения).

Более подробным образом факторы, оказывающее влияние на величину энергопотребления, изображены на причинно-следственной диаграмме Исикавы

(Приложение А.1) и разделены по степени изменчивости по отношению к энергопотреблению на три группы: первая группа факторов не предполагает их изменчивость, вторая и третья характеризуют изменчивые факторы. Последние факторы подразделяются в зависимости от стороны (оператор ПС и производитель), способной на них повлиять.

Структурирование факторов дает понять, что энергопотребление зависит как от оптимизированности конструкционных параметров привода, так и от эксплуатационных режимов работы, а также показывает, что первое имеет прямое отношение к качеству проектирования привода, т.е. к производителю, а второе – к качеству эксплуатации, т.е. уже к компании-оператору.

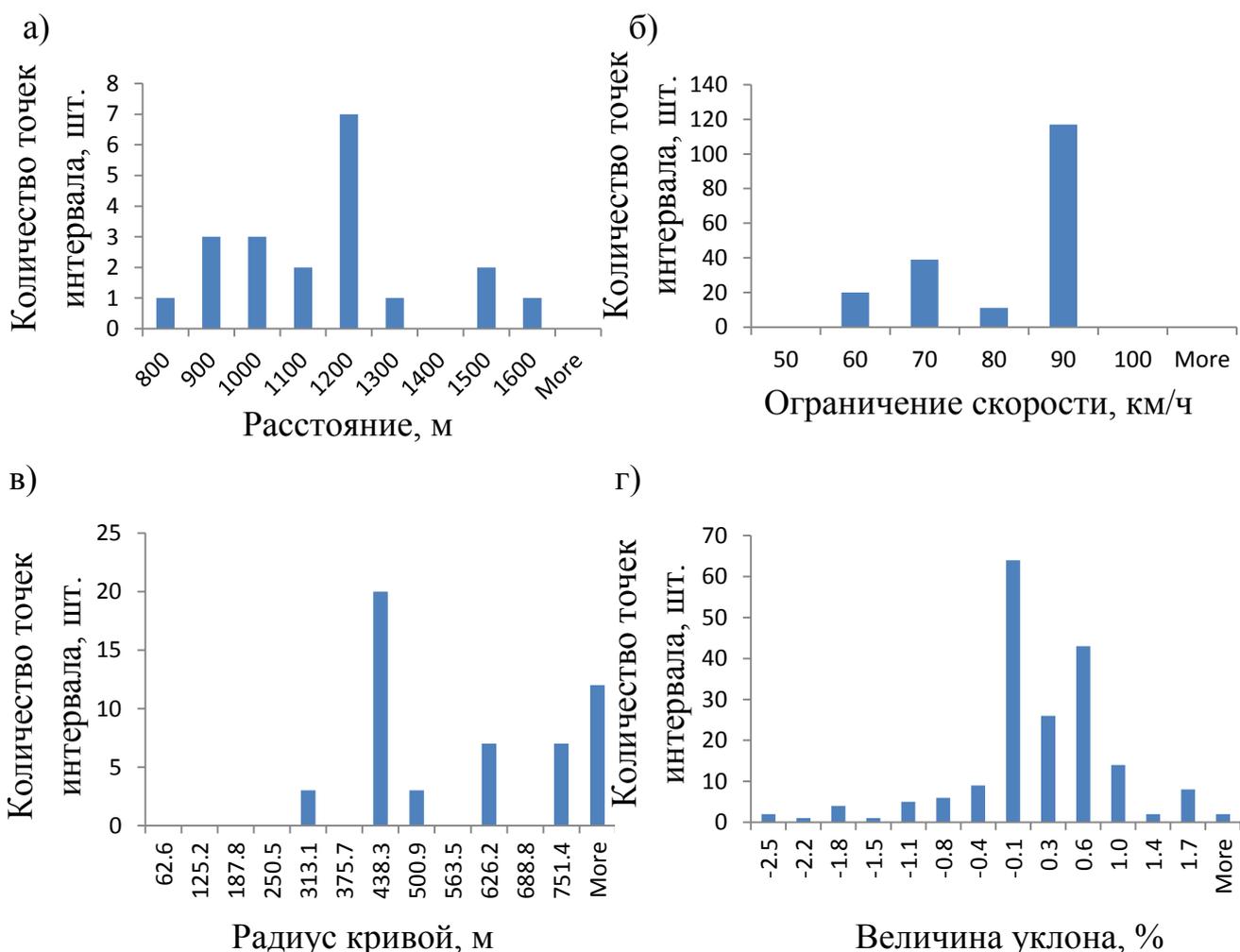
2.3 Анализ работы вагонов метрополитена в условиях нестабильности эксплуатационных факторов

Рассмотрены в работе вагоны метро средней вместимости с осевой нагрузкой порядка 11...14 т предполагает общую конфигурацию состава до 6 вагонов и пассажиропоток до 50 тыс. человек в час в одном направлении с эксплуатационной скоростью до 100 км/ч. Подвижной состав такого типа занимает место между вагонами метро с высоким пассажиропотоком (до 100 тыс. пассажиров в час, в одном направлении, с конфигурацией до 8 вагонов) и трамваями. К метро средней вместимости относится метро в таких городах как: София (Болгария), Торонто (Канада), Варшава (Польша), Копенгаген (Дания), Прага (Чехия) и др. [66, 67].

Для выполнения тяговых расчетов был разработан участок обращения радиальной линии метро со средней длиной участка в 1031 м и параметрами, изображенными на рисунок 2.6. Участок включает в себя совокупность различных линий метро.

Изменение пассажиропотока такого типа метро в течение года на радиальных линиях, обусловленное сезонными социально-экономическими закономерностями, может достигать 23 % от максимально возможного уровня. Колебание пас-

сажиропотока, характерное для летних месяцев [68-72] и скачкообразное изменение уровня пассажиропотока к концу недели задают поведение, которое необходимо учесть в модели загрузки вагона. Вместе с тем, из-за сильного изменения рассматриваемого параметра в течение недели при составлении модели нагрузки целесообразно разделять пассажиропотоки в рабочие и выходные дни.

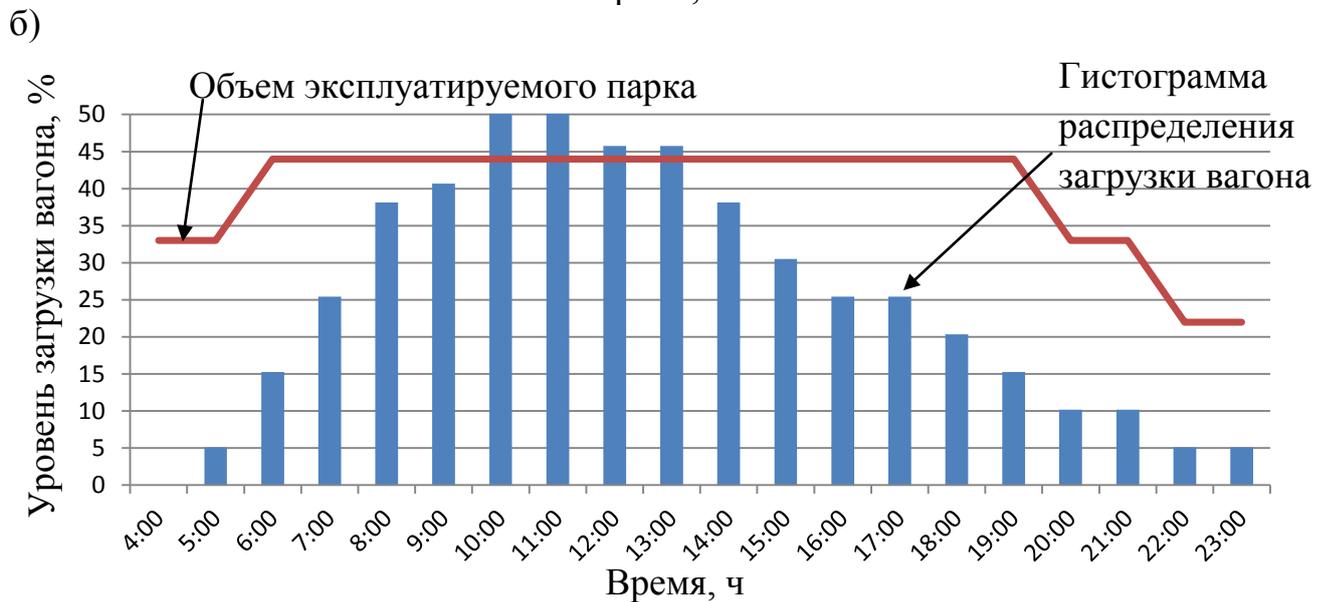
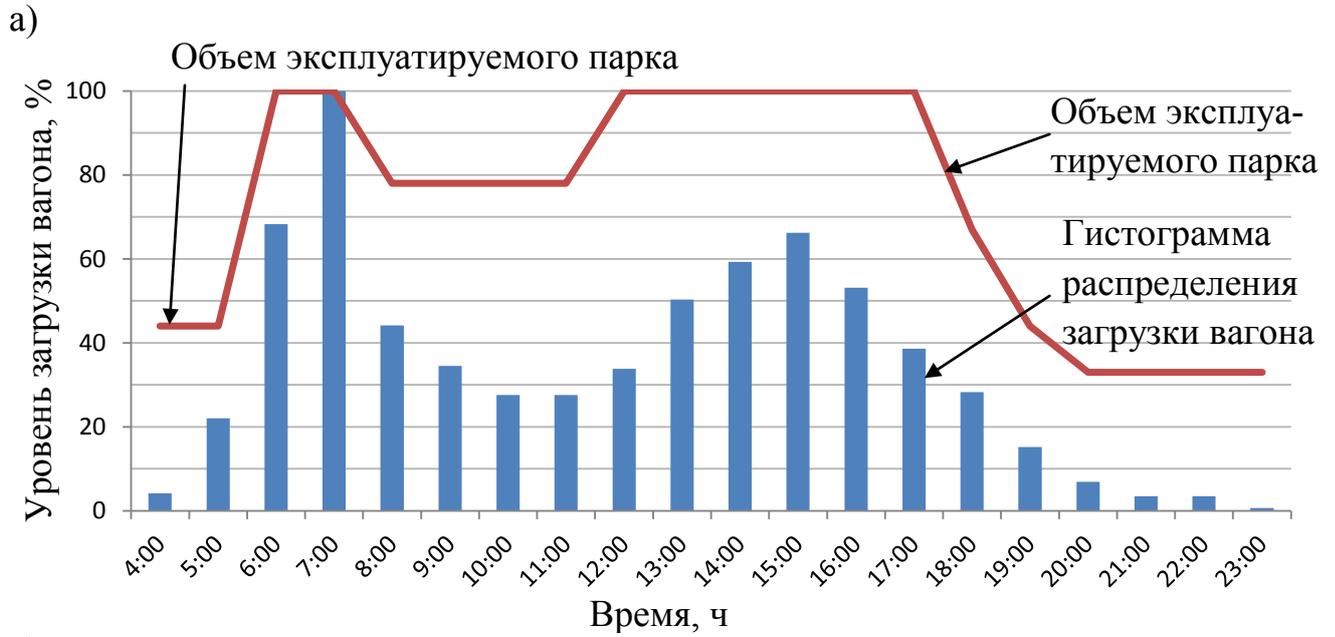


а) гистограмма расстояния между станциями; б) гистограмма ограничений скорости; в) гистограмма радиуса кривых; г) гистограмма крутизны уклонов участка

Рисунок 2.6 – Параметры пути участка обращения поезда метро

На основе полученных данных из годового отчета метрополитенов [24-72] были получены следующие зависимости загрузки вагона и количества эксплуатируемого подвижного состава от времени суток в будни и выходные дни (рисунок 2.7).

Анализируя изменение пассажиропотока в метро в течение рабочего дня, из рисунка 2.7 (а) можно заметить несколько экстремумов, что приводит к необходимости использования различного по количеству вагонов подвижного состава в промежуточное время.



а) изменение пассажиропотока в будний день; б) изменение пассажиропотока в выходной день

Рисунок 2.7 – Зависимость загрузки вагона и количества обслуживающего подвижного состава от времени суток

Невозможность точного соответствия эксплуатируемой величины подвижного состава контуру пассажиропотока определяет резервы мест в поезде и сни-

жает его экономическую эффективность, причем зависимость может быть выражена линейно при прочих равных условиях [73]. Высокая пассажировместимость вагона, при плотности 7 чел/м², соответствующая максимально возможной и максимально эффективной с точки зрения прибыли перевозчика, а также энергопотребления [73] также не приемлема, поскольку снижает комфорт пассажиров уже в ближайшей перспективе. В связи с этим снижение эксплуатируемого объема парка не является решением задачи, но может быть оптимизировано, к примеру, за счет эксплуатации поездов без машиниста.

Пассажиропоток является определяющей величиной нагрузки поезда. Зная пассажировместимость или максимальную плотность, можно определить нагрузку на весь поезд, которая в свою очередь зависит как от рассмотренного выше пассажиропотока, так и от привлекательности станции для пассажиров. Нагрузка будет различна в разные месяцы, дни недели и время суток.

При наиболее массовом передвижении пассажиров в течение буднего дня (с 7 до 9 часов) в процентном выражении загрузка поезда на радиальной линии метрополитена (что соответствует равной для каждой станции привлекательности) может быть представлена в следующем виде (рисунок 2.8).

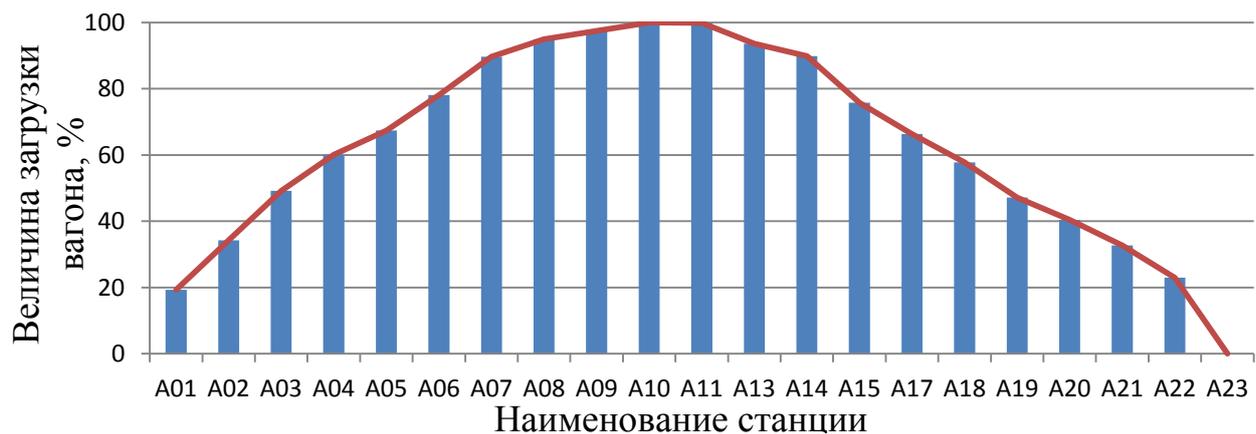


Рисунок 2.8 – Загруженность вагона метро в одном из направлений при равной привлекательности станций

Подробное рассмотрение пассажиропотока в отдельности по различным временным параметрам, а также анализ радиальной линии участка обращения поездов и дальнейший их синтез позволили создать модель, характерной особенностью

стью которой является непостоянство загрузки вагона по направлению и по времени (рисунок 2.9). Использование такой модели в тяговых расчетах позволяет описать реальный режим эксплуатации поезда в течение его жизненного цикла, а также оценить возможность продолжения работы при наступлении граничного режима.

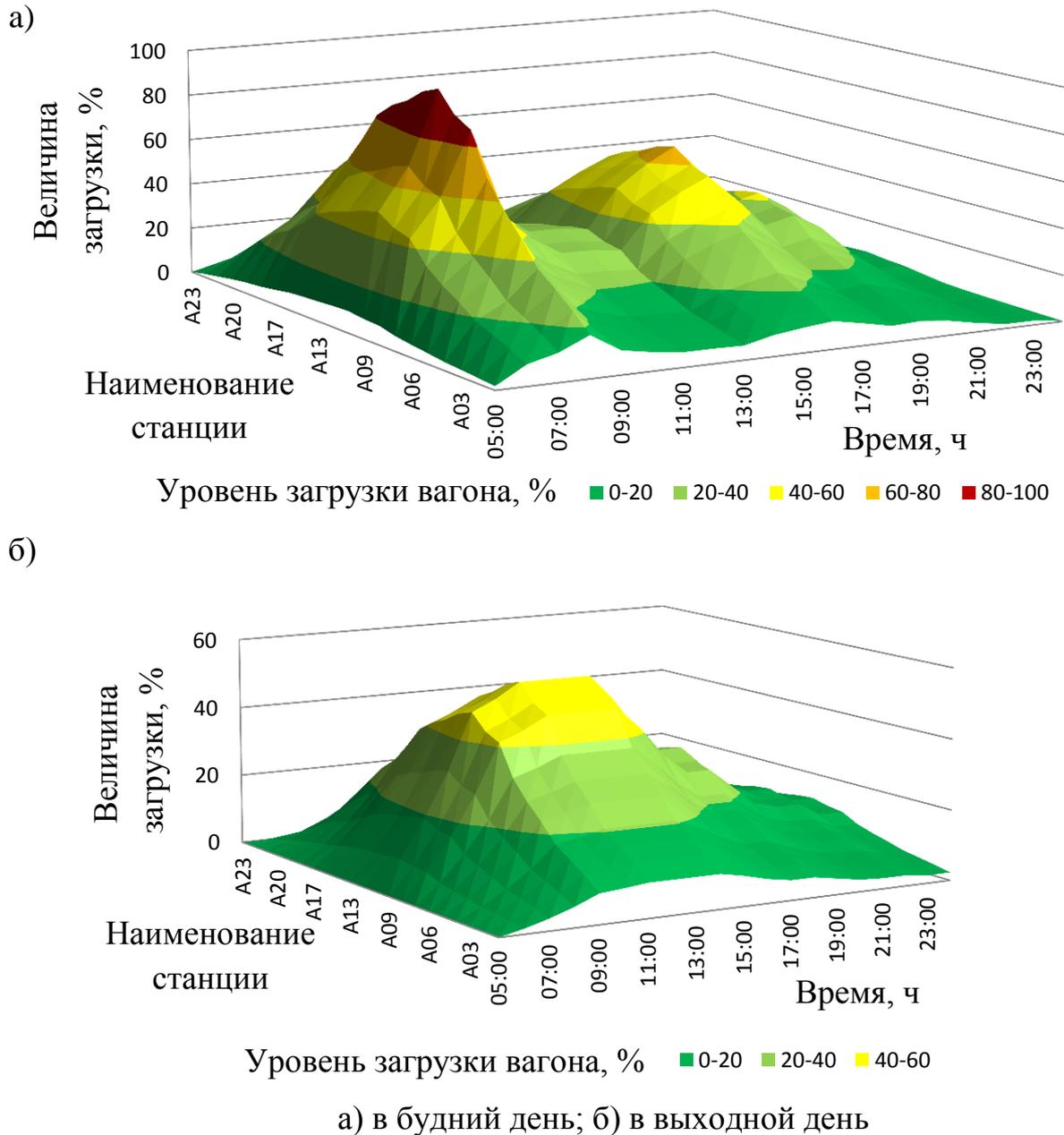
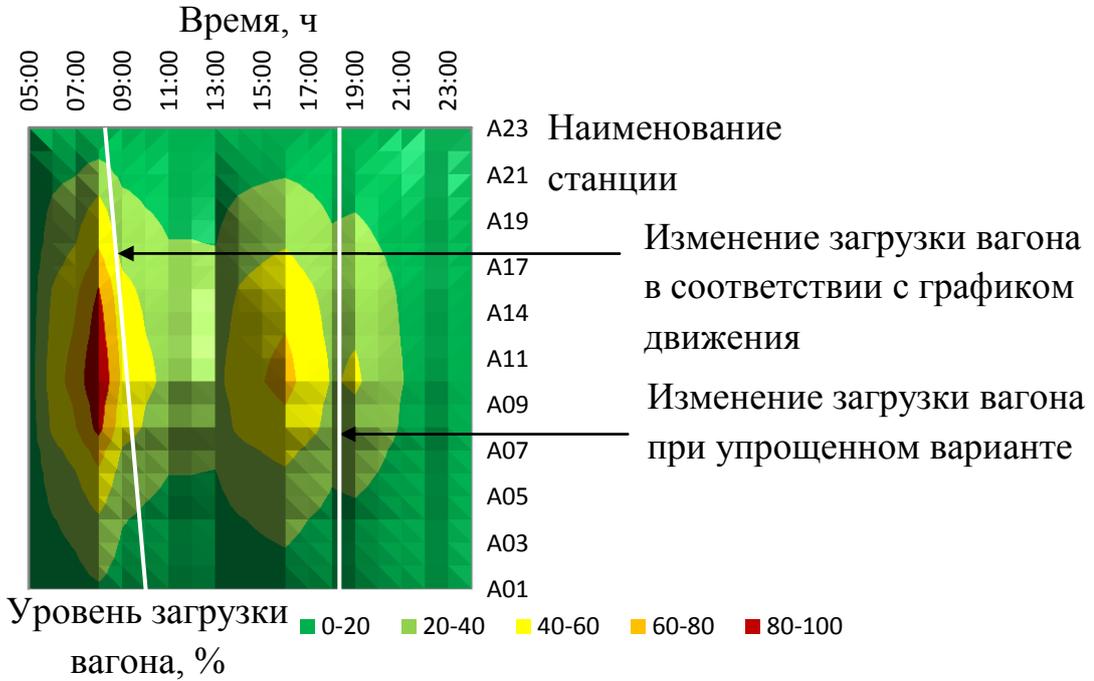


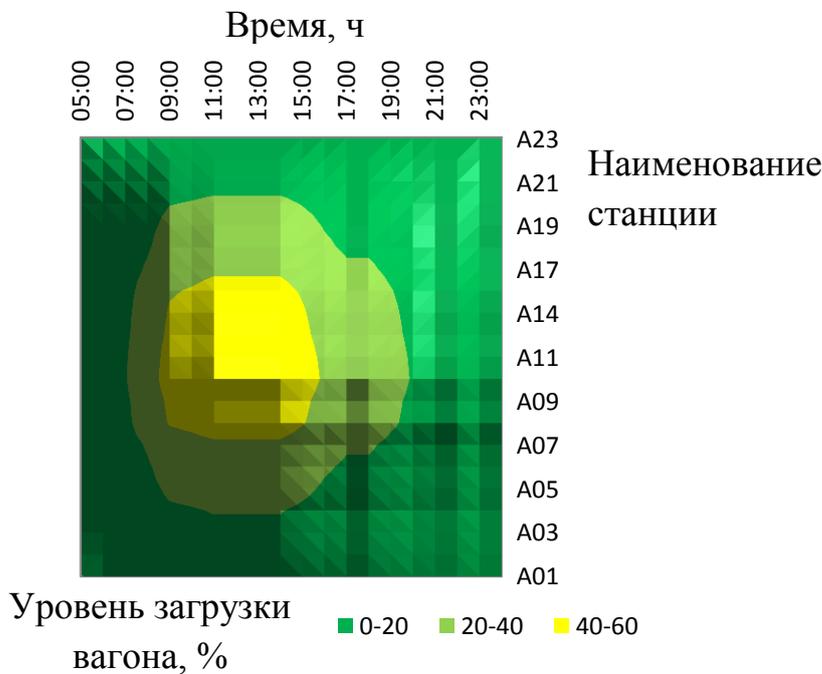
Рисунок 2.9 – Распределение загрузки вагона по времени и направлению

Непрерывное изменение величины загрузки вагона в реальности в будний и выходной день происходит также с учетом фактора работы по «нитке» графика движения (рисунок 2.10).

а)



б)



а) в будний день; б) в выходной день

Рисунок 2.10 – Временной фактор изменения загрузки вагона

Учет данного момента не позволяет реализовать движение по кривой загрузки вагона, изображенной на рисунке 2.8. Это говорит о том, что величина загрузки вагона на начальном и конечном этапе движения поезда имеет более низкое значение. В связи с трудоемкостью учета этого факта и незначительности его влияния на энергопотребление, модель загрузки вагона метро была упрощена для выполнения тяговых расчетов.

Высокая детальность распределения нагрузки вагона при производстве тяговых расчетов приведет к огромному объему расчетных данных и потребует в дальнейшем большой расчетной мощности. Для снижения объема данных была упрощена модель (см. рисунок 2.9) путем объединения уровней загрузки на пять неравных частей, и проведен анализ адекватности упрощенной модели исходному варианту.

Детальная почасовая изменчивость нагрузки, изображенная на рисунок 2.7, может быть представлена в виде экспоненциальной зависимости (рисунок 2.11), которая представляет собой вес каждого уровня загрузки вагона в общем объеме с учетом буднего и выходного распределения. При упрощении модели и разбиении ее на несколько частей распределение упрощенной модели должно максимально точно повторять распределение исходной модели.

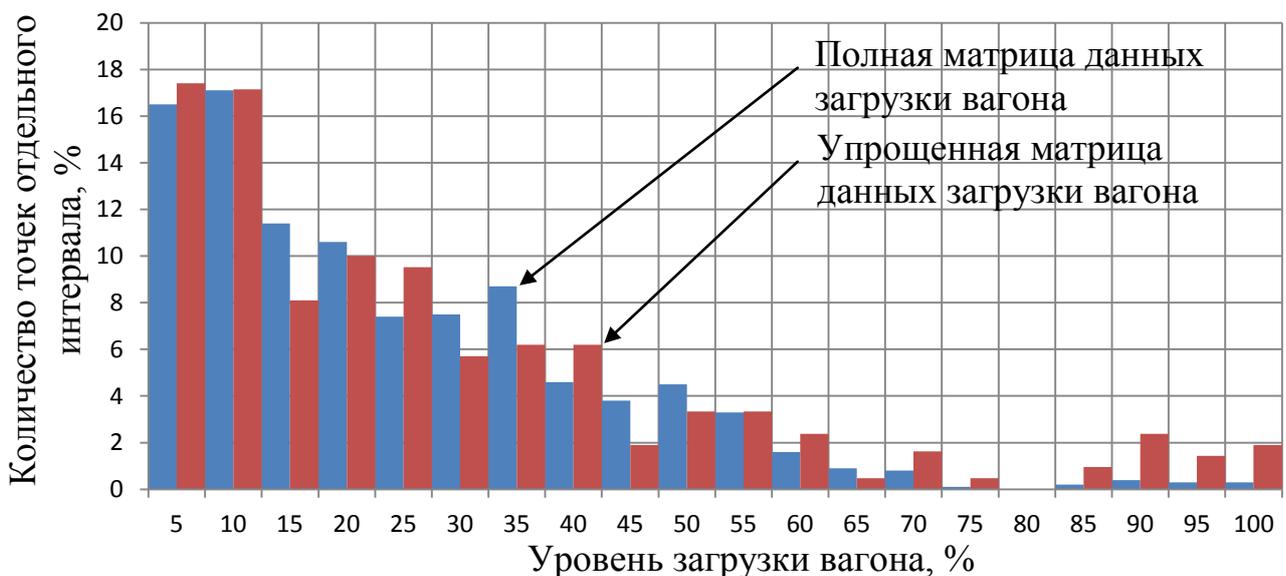


Рисунок 2.11 – Вес отдельного уровня загрузки вагона в общем объеме

Стоит отметить, что исследование коэффициента корреляции между упрощенной и полной матрицей данных загрузкой вагона заключалось в его максимизации, что привело к разбиению общего пассажиропотока на пять частей с весовыми коэффициентами 8 %, 24 %, 38 %, 55 % и 100 %. Коэффициент корреляции между действительной и модельной величиной составляет 94 % [73]. Среднее значение загруженности вагона метро составляет 25,1 %.

2.4 Нормальный и граничный режимы эксплуатации привода вагонов метро

Реальный способ ведения электропоезда, позволяющий в дальнейшем определить величины тягового усилия при движении в каждой точке пути и рассчитать показатель энергопотребления, может быть выбран по-разному и в действительности определяется характером ведения поезда машинистом. При составлении модели нужно учитывать движение согласно действующему расписанию, а также движение, не приводящее к задержкам последующих поездов при минимально возможном интервале движения.

С целью последующих термодинамических расчетов рассматривается несколько режимов движения: режим нормальной и граничной эксплуатации, основные параметры которых представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Режимы работы вагонов метрополитена

Режим работы	Резерв времени	Уровень моторизации, %	Момент при торможении, %	Температура окружающей среды, °С	Уровень загрузки вагона
1	2	3	4	5	6
По расписанию	Макс.	66	80	25	Модель
С минимальным интервалом	Мин.	66	80	25	Модель

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6
Граничный режим 1	Мин.	50	100	40	Модель
Граничный режим 2	0	66	100	40	100%
Граничный режим 3	Мин.	50	100	40	Скачок пассажи-ропотока

К нормальному режиму эксплуатации в данном случае относятся режимы движения, которые преобладают в процессе ежедневной эксплуатации. Из таблицы 2.1 видно, что движение по расписанию, точно также как и движение с минимальным интервалом, относится к нормальному режиму эксплуатации. Кроме того, величина замедления при торможении меньше на 20 % величины максимального ускорения в режиме тяги, что связано с частым недоиспользованием максимальной мощности и комфортом.

Граничные режимы эксплуатации необходимы для проверки привода соответствию заданным ограничениям в экстремальных условиях эксплуатации. Сюда относят в первую очередь температурные изменения обмоток двигателя.

В качестве максимального резерва времени выступает разница между прибытием по расписанию и прибытием с полным отсутствием выбега и реализацией точек тяговой характеристики с заданным ускорением и замедлением. Величина резерва времени напрямую зависит от величины загрузки вагона (рисунок 2.12 б). Минимальный резерв времени определяется исходя из максимального по длине туннеля на участке обращения (наибольшего по длине блок-участка) и параметров ЭПС, кроме того, зависит от реализованной системы сигнализации и изображено на рисунок 2.12 (а).

Высокое значение резерва времени при движении по расписанию позволяет оптимизировать использование подвижного состава как со стороны энергопотребления, так и со стороны жизненного цикла привода. При этом стоит обратить внимание на то, что движение по расписанию не всегда описывает действитель-

ную поездную обстановку и в часы пик, при опоздании, приводит к движению по удалению.

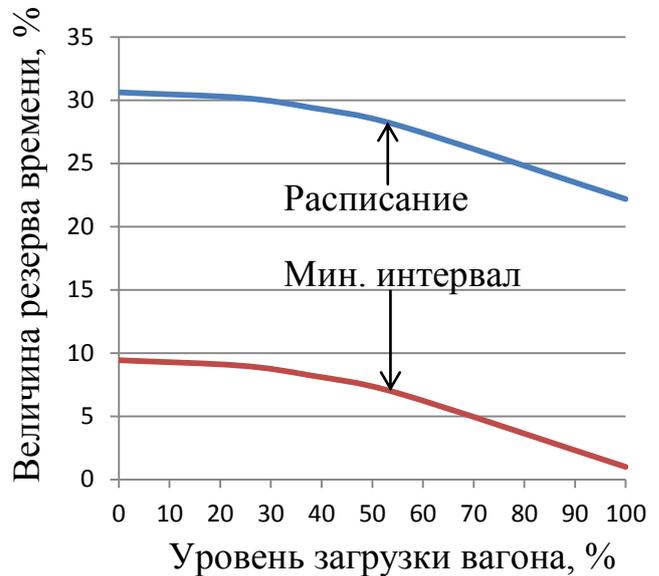
а)



Макс. время движения = $f(\text{время в пути} + \text{остановка})$

Макс. время движения определяет минимальный интервал между поездами на участке обращения для обеспечения отсутствия опоздания последующих поездов.

б)



а) к понятию мин. резерва времени; б) распределение резерва времени в зависимости от загрузки вагона

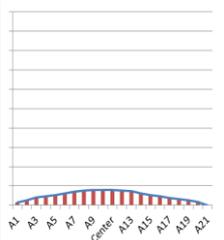
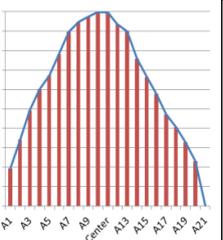
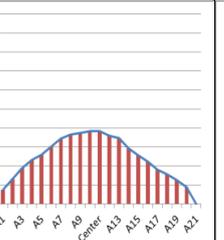
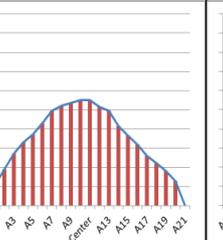
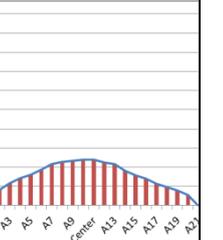
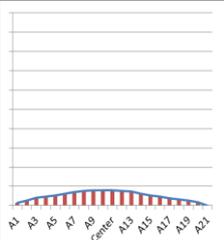
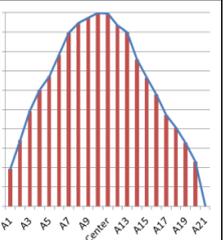
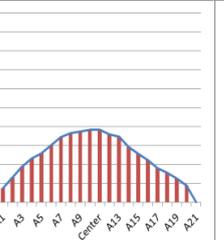
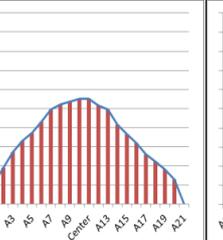
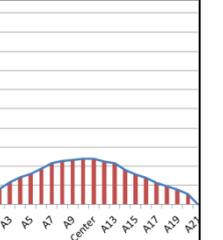
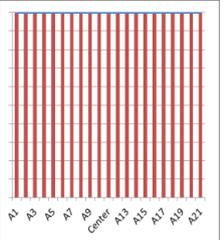
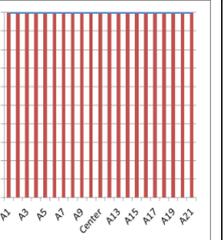
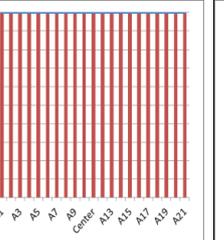
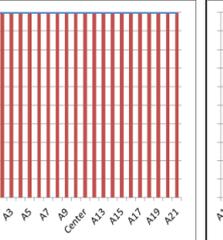
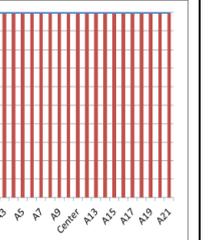
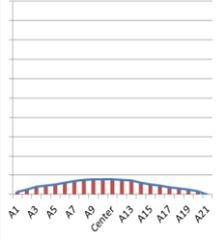
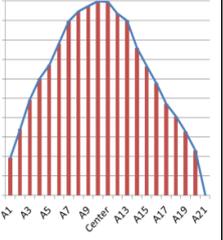
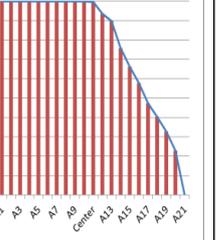
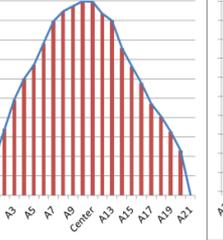
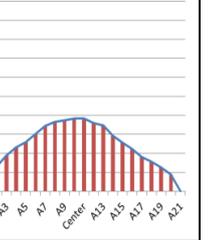
Рисунок 2.12 – К определению резерва времени

Резерв времени, принятый за нуль, при работе в соответствии с граничным режимом 2 (см. таблицу 2.1) в действительности может лишь существовать на участке обращения с высоким интервалом движения и полной загрузкой вагона, что практически не встречается, поскольку полная загрузка вагона всегда сопряжена с минимальным интервалом движения. Но, тем не менее, его учет необходим, поскольку именно такое требование достаточно часто встречается в техническом задании компании-оператора.

Модели загрузки вагонов при различных режимах эксплуатации представлены в таблице 2.2. Каждая модель загрузки вагона при любом режиме работы представляет собой совокупность пяти последовательных элементов изменений массы состава в зависимости от станции. Каждый элемент модели предполагает 40 минутное движение в одном направлении и характеризует конкретное время суток. Между элементами моделируется стоянка на 3...5 минут, вызванная сменой

направления движения. Такая же последовательность имеет место при движении в обратном направлении.

Таблица 2.2 – Модели загрузки вагонов при различных режимах эксплуатации

Режим работы	Элементы последовательности изменения загрузки вагона				
По расписанию/ С мин. интервалом	8 % макс. значение	100 % макс. значение	38 % макс. значение	55 % макс. значение	24 % макс. значение
					
Граничный режим 1	8 % макс. значение	100 % макс. значение	38 % макс. значение	55 % макс. значение	24 % макс. значение
					
Граничный режим 2	100 % макс. значение	100 % макс. значение	100 % макс. значение	100 % макс. значение	100 % макс. значение
					
Граничный режим 3	8 % макс. значение	100 % макс. значение	100 % макс. значение	100 % макс. значение	38 % макс. значение
					

Основываясь на реальных данных эксплуатации, а - также благодаря созданной модели процессов движения вагонов метрополитена и модели загрузки вагона с учетом временной и дистанционной изменчивости пассажиропотока,

становится возможным предсказать поведение поезда, подобрать конструкционные параметры и оптимизировать расписание. Созданные модели также помогут рассчитать максимально эффективный способ эксплуатации поездов на участке, возможность реализации которого может быть осуществлена в большей степени на метро с автоматическим управлением, либо же при ведении поезда с помощью системы информирования машиниста.

Выводы по второй главе

Определение нагрузки на тяговый привод поезда, основанное на учете внешних факторов, позволит оптимизировать его по разным критериям, в том числе, и по энергопотреблению, а также более точно спрогнозировать действительный жизненный цикл как преобразователя, так и двигателя. Для этого были решены следующие задачи и получены результаты:

1. Исходя из данных годовых отчетов метрополитенов София (Болгария), Торонто (Канада), Варшава (Польша), Копенгаген (Дания), Прага (Чехия), Москва (Россия) и Санкт-Петербург (Россия) по пассажиропотоку была разработана математическая модель загрузки вагона метрополитена, позволяющая в отличие от существующих моделей учитывать ее изменчивость в зависимости от расположения станции на линии, ее удаленности от центра, времени и направления движения, а также непостоянства количества подвижного состава на участке обращения. Установлено, что средняя загрузка поезда метро со средней вместимостью составила 25,1 % (340 человек).

2. На основе диаграммы Исикавы были проанализированы основные факторы, влияющие на энергопотребление привода вагонов метрополитена, в результате было установлено, что к наиболее значимым со стороны производителя относятся: максимальная частота модуляции инвертора, число витков обмотки статора, активная длина и диаметр ротора двигателя, а также передаточное отношение редуктора; со стороны оператора – режим работы.

3. Исходя из проведенного статистического исследования был разработан участок обращения вагонов метро с усредненными параметрами пути, радиальным типом линии и осевой нагрузкой 11...14 т, характерный для метрополитена с пассажиропотоком до 50 тыс. чел. в час в одном направлении. На разработанном участке проведены тяговые расчеты, по которым было установлено, что максимальная плотность точек эксплуатации лежит в промежутке 53 - 85 % от максимальной скорости движения при нормальном режиме работы и отсутствии силы тяги после разгона или при поддержании максимальной скорости движения. Определено, что режим движения с выбегом эффективен на 1,8 % при сравнении с режимом поддержания максимальной скорости (в заданных условиях эксплуатации).

4. Была выделена цикличность при эксплуатации в нормальном и граничном режиме работы, что позволяет определить функцию периодического нагружения всех компонентов привода и рассчитать их жизненный цикл.

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИВОДА, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЦИКЛИЧНЫМ СПОСОБОМ

3.1 Разработка спектральной математической модели инвертора

3.1.1 Статическая математическая модель мостового трехфазного инвертора

Качество электроэнергии, потребляемой двигателем, обеспечивается за счет применения различных способов широтно-импульсной модуляции инвертора на базе полностью управляемых транзисторов IGBT в пределах изменения основной частоты напряжения.

Для решения задач оптимизации итерационными методами подходят спектральные математические модели, обладающие следующими преимуществами [4, 46, 48, 74]:

- моделирование только установившегося режима инвертора;
- высокая производительность модели;
- простота изменения параметров схемы и алгоритмов управления.

Метод спектрального моделирования основан на Булевых операциях сравнения управляющего и опорного сигналов, в результате чего получают функции переключения m_i ключей трехфазного инвертора.

Функции переключения m_i описывают состояние каждого из ключей и могут принимать значения 1 при открытом состоянии ключа T_i и 0 при закрытом. Для записи уравнений схемы замещения инвертора (рисунок 3.1) вводится средняя точка (т. D – т. O).

При работе на симметричную активно-индуктивную нагрузку будут справедливы следующие утверждения при отсутствии короткого замыкания в фазе:

$$\begin{aligned}
 m_{1a} + m_{2a} &= 1, \\
 m_{1b} + m_{2b} &= 1, \\
 m_{1c} + m_{2c} &= 1.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

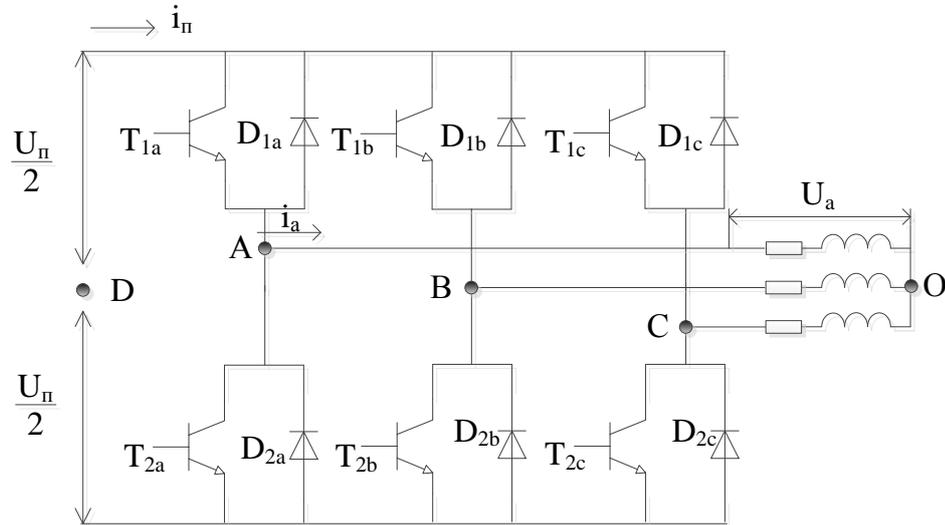


Рисунок 3.1 – Трехфазный мостовой инвертор

Напряжения по отношению к средней точке инвертора будут выглядеть:

$$\begin{aligned}
 u_{a0} &= u_n \cdot (m_{1a} - m_{2a}), \\
 u_{b0} &= u_n \cdot (m_{1b} - m_{2b}), \\
 u_{c0} &= u_n \cdot (m_{2c} - m_{1c}).
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

где u_n – напряжение звена постоянного тока.

При соединении нагрузки звездой напряжение в т. O выглядит

$$u_0 = \frac{1}{3} \cdot (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}).
 \tag{3.3}$$

Тогда фазные напряжения инвертора примут вид:

$$\begin{aligned}
 u_a &= u_{a0} - u_0, \\
 u_b &= u_{b0} - u_0, \\
 u_c &= u_{c0} - u_0.
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

В свою очередь линейные напряжения будут выражаться:

$$\begin{aligned} u_{ab} &= u_{a0} - u_{b0}, \\ u_{bc} &= u_{b0} - u_{c0}, \\ u_{ca} &= u_{c0} - u_{a0}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Потребляемый инвертором ток

$$i_n = i_a \cdot m_{1a} + i_b \cdot m_{1b} + i_c \cdot m_{1c}, \quad (3.6)$$

с учетом того, что

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (3.7)$$

Фазные токи инвертора:

$$i_a = \frac{u_a}{Z}, i_b = \frac{u_b}{Z}, i_c = \frac{u_c}{Z}, \quad (3.8)$$

где Z – полное сопротивление цепи нагрузки.

При этом величина тока фазы i_i для последующих расчетов разделяется на ток через транзистор i_{Ti} и ток через диод i_{Di} .

В качестве полного сопротивления цепи выступает значение сопротивления, полученное из схемы замещения асинхронного двигателя, обмотка статора которого имеет соединение «звезда».

Приведенное математическое описание позволяет делать анализ при любой схеме переключения ключей трехфазного инвертора при известном поведении функции переключения m_i .

Функция переключения является результатом работы логического устройства – компаратора, который непрерывно сравнивает управляющий u_c и опорный сигналы u_m . Последний формируется генератором линейно изменяющегося напряжения.

$$\begin{aligned}
 m_i(\omega) &= 1, \text{ если } u_c(\omega) > u_m(\omega), \\
 m_i(\omega) &= 0, \text{ если } u_c(\omega) \leq u_m(\omega).
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Использование различных способов модуляции выходного напряжения инвертора позволяет изменять величину основной гармоники. При этом изменение ее величины происходит при минимальном содержании высших гармоник в спектре. Ниже рассмотрены наиболее часто встречаемые способы модуляции напряжения в асинхронной и синхронной области изменения основной гармоники напряжения статора, которые отличаются максимальной величиной напряжения первой гармоники, а также гармоническим составом.

3.1.2 Широтно-импульсная модуляция инвертора в асинхронной области изменения скорости вращения ротора

Областью применения асинхронной модуляции при управлении приводом является период его разгона, при этом могут использоваться несколько ее видов.

Синусоидальная ШИМ использует управляющий сигнал u_c :

$$\begin{aligned}
 u_{cA} &= A \cdot \sin(\omega t), \\
 u_{cB} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right), \\
 u_{cC} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right).
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

где A – коэффициент модуляции;

ωt – угловая частота (зависит от частоты первой гармоники напряжения f_b).

На рисунке 3.2 представлены выходные параметры инвертора при заданном законе управления за один период при $u_n = 730$ В, $A = 0,9$, $f_b = 3$ Гц. Максимальное значение напряжения первой гармоники при модуляции синусоидальной

ШИМ составляет $0,7854u_n$ без учета его снижения в зависимости от частоты переключения ключей.

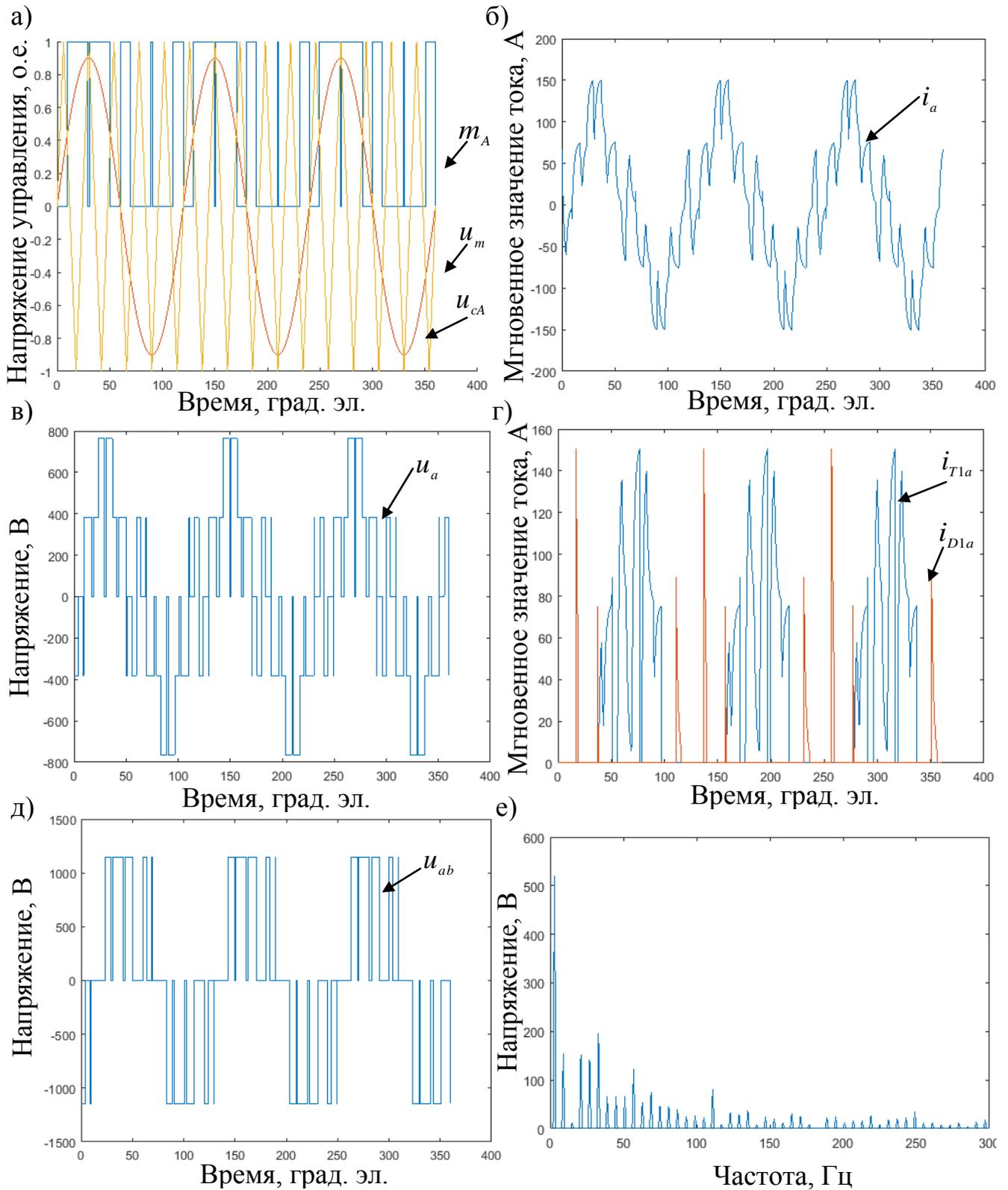


Рисунок 3.2 – Выходные характеристики и сигналы управления при реализации синусоидальной ШИМ (а, б, в, г, д, е)

На рисунке 3.3 представлены выходные параметры инвертора при синусоидальной ШИМ с инъекцией третьей гармоники за один период при $u_n = 730$ В, $A = 0,9$, $f_b = 3$ Гц.

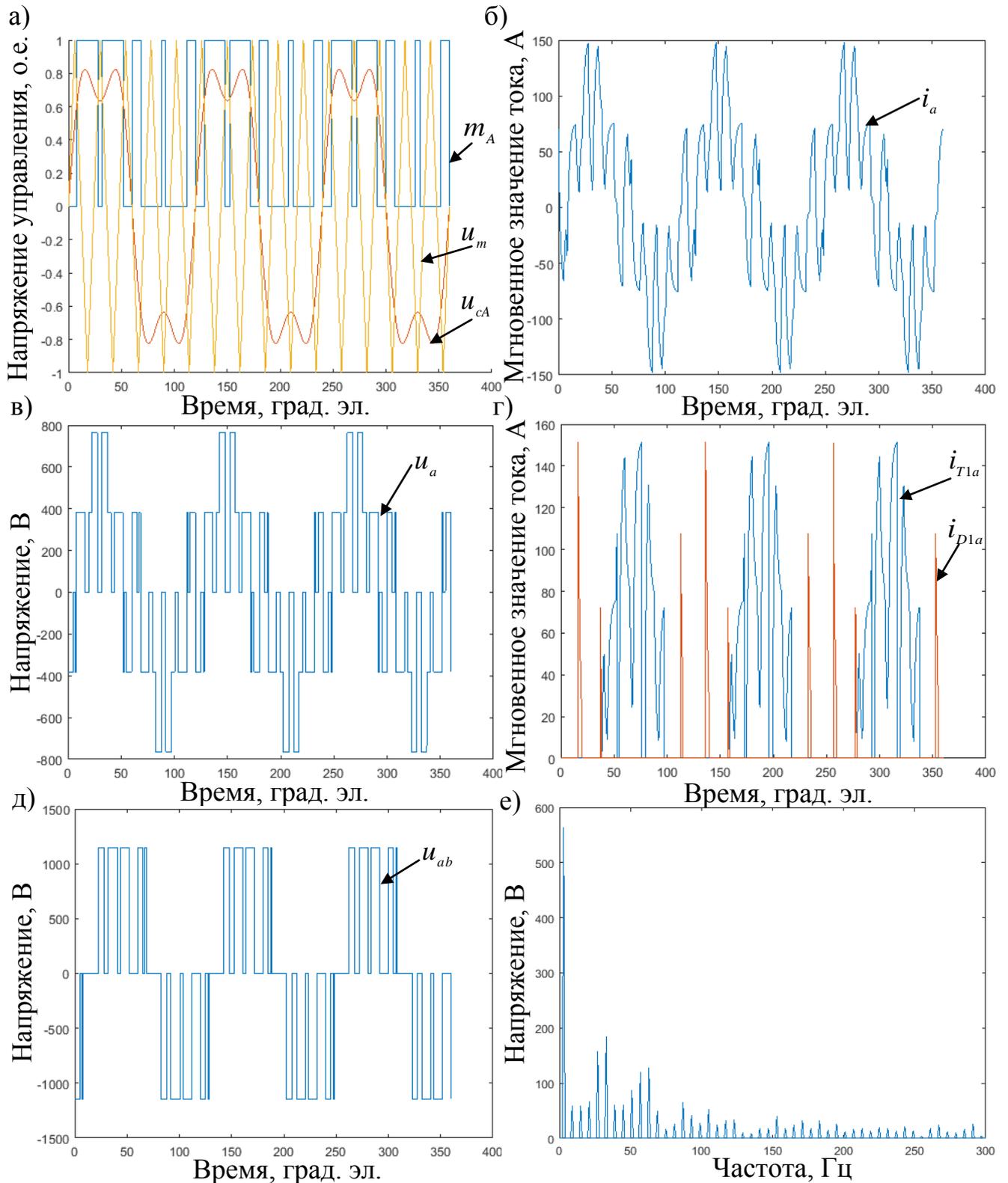


Рисунок 3.3 – Выходные характеристики и сигналы управления при реализации синусоидальной ШИМ с инъекцией третьей гармоники (а, б, в, г, д, е)

Синусоидальная ШИМ с инъекцией третьей гармоники использует управляющий сигнал u_c :

$$\begin{aligned} u_{cA} &= \frac{A}{k} \cdot (\sin(\omega t) - (1-k)\sin(3 \cdot \omega t)), \\ u_{cB} &= \frac{A}{k} \cdot \left(\sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) - (1-k)\sin(3 \cdot \omega t) \right), \\ u_{cC} &= \frac{A}{k} \cdot \left(\sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right) - (1-k)\sin(3 \cdot \omega t) \right), \end{aligned} \quad (3.11)$$

где $k = \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)$.

Максимальное значение напряжения первой гармоники при модуляции синусоидальной ШИМ составляет $0,9u_n$ без учета его снижения в зависимости от частоты переключения ключей.

Векторная ШИМ использует управляющий сигнал u_c :

$$\begin{aligned} u_{cA} &= A \cdot \sin(\omega t) + \Delta u, \\ u_{cB} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) + \Delta u, \\ u_{cC} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right) + \Delta u, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где Δu – сигнал предмодуляции.

Векторная ШИМ нашла самое широкое распространение среди асинхронных алгоритмов управления приводом за счет наилучшего использования напряжения звена постоянного тока, поэтому она используется в наибольшей области изменения частоты основной гармоники напряжения. Продолжительность использования векторной ШИМ зависела от величины потерь в приводе и при сравнении ее с синхронными алгоритмами управления для одной и той же частоты основной гармоники напряжения выбирался тот алгоритм, при работе с которым потери в приводе были минимальны.

На рисунке 3.4 представлены выходные параметры инвертора при заданном законе управления за один период при $u_n = 730$ В, $A = 0,9$, $f_b = 3$ Гц.

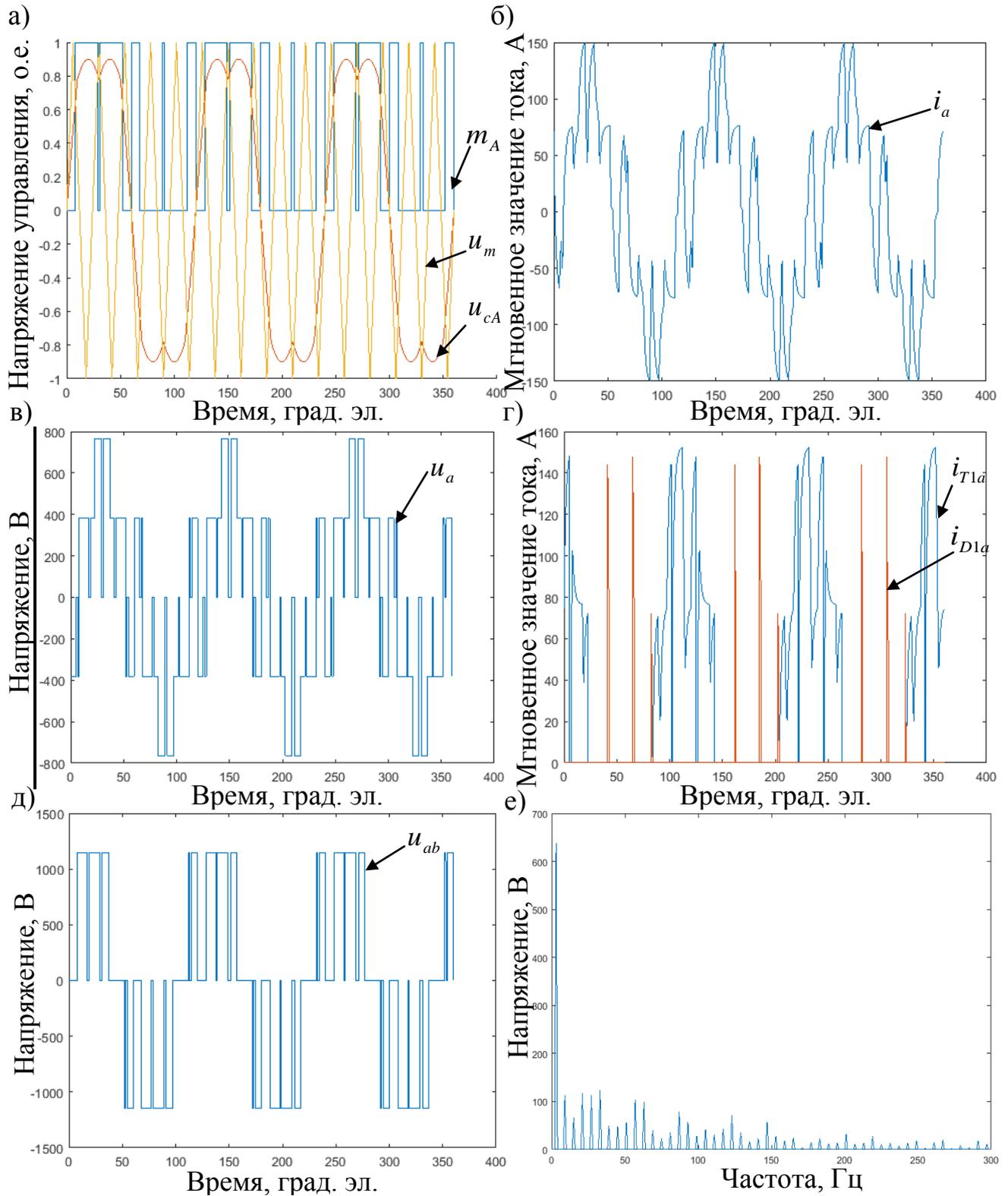


Рисунок 3.4 – Выходные характеристики и сигналы управления при реализации векторной ШИМ (а, б, в, г, д, е)

Сигнал предмодуляции Δu на каждом шаге интегрирования может быть определен следующим образом:

$$\begin{aligned}
 u_{\max} &= \max\left(\sin(\omega t), \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right), \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right)\right), \\
 u_{\min} &= \min\left(\sin(\omega t), \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right), \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right)\right), \\
 \Delta u &= -\left(\frac{u_{\max} - u_{\min}}{2} + u_{\min}\right).
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Максимальное значение напряжения первой гармоники при модуляции векторной ШИМ составляет $0,907 u_n$ без учета его снижения в зависимости от частоты переключения ключей, что более чем на 15 % выше значения при использовании синусоидальной ШИМ.

3.1.3 Широтно-импульсная модуляция инвертора в синхронной области изменения скорости вращения ротора

Область применения синхронной модуляции при управлении приводом – период разгона и период ослабления поля.

Сигнал модуляции для каждой фазы останется таким же, как при синусоидальной модуляции, но, например, с формой прямоугольного импульса.

При снижении количества импульсов в полупериоде амплитуда напряжения основной гармоники будет расти и достигнет своего максимума (u_n) при ШИМ с однократным тактовым импульсом и наоборот.

Неизменная величина максимальной частоты модуляции инвертора определяет множество участков синхронной модуляции с различным значением тактовых импульсов за полупериод.

На рисунке 3.5 представлены выходные параметры инвертора при заданном законе управления за один период при $u_n = 730$ В, $A = 0,9$, $f_b = 3$ Гц.

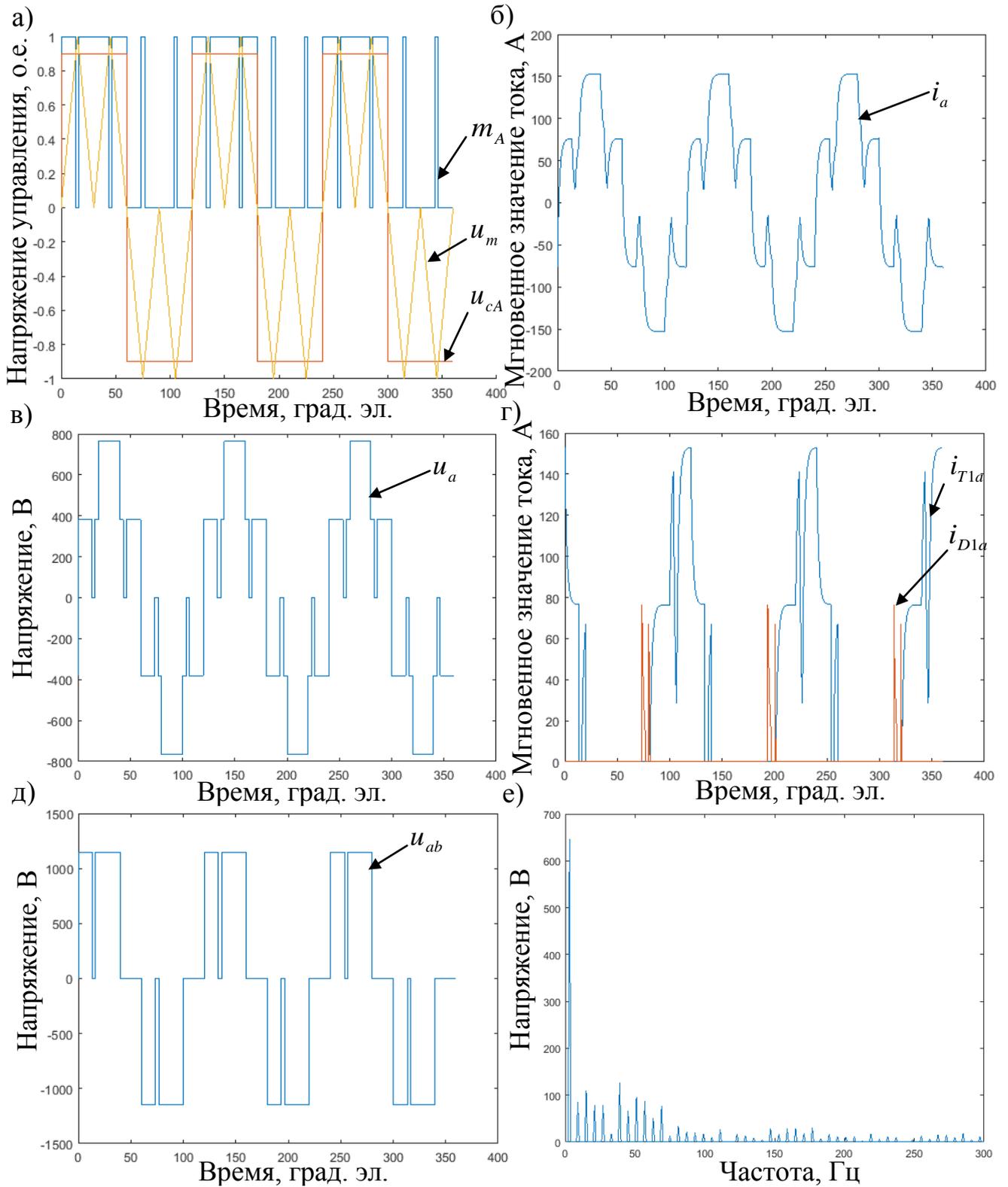


Рисунок 3.5 – Выходные характеристики и сигналы управления при реализации ШИМ с полным импульсом (а, б, в, г, д, е)

Как правило, наиболее продолжительным участком является модуляция с однократным импульсом, позволяющая максимальным образом сократить число

переключения ключей инвертора и, тем самым, увеличить жизненный цикл инвертора.

На рисунке 3.6, например, представлены сигналы управления при пятикратных (3.6 а) и при однократных тактовых импульсах (3.6 б) при неоптимальных углах переключения ключей инвертора.

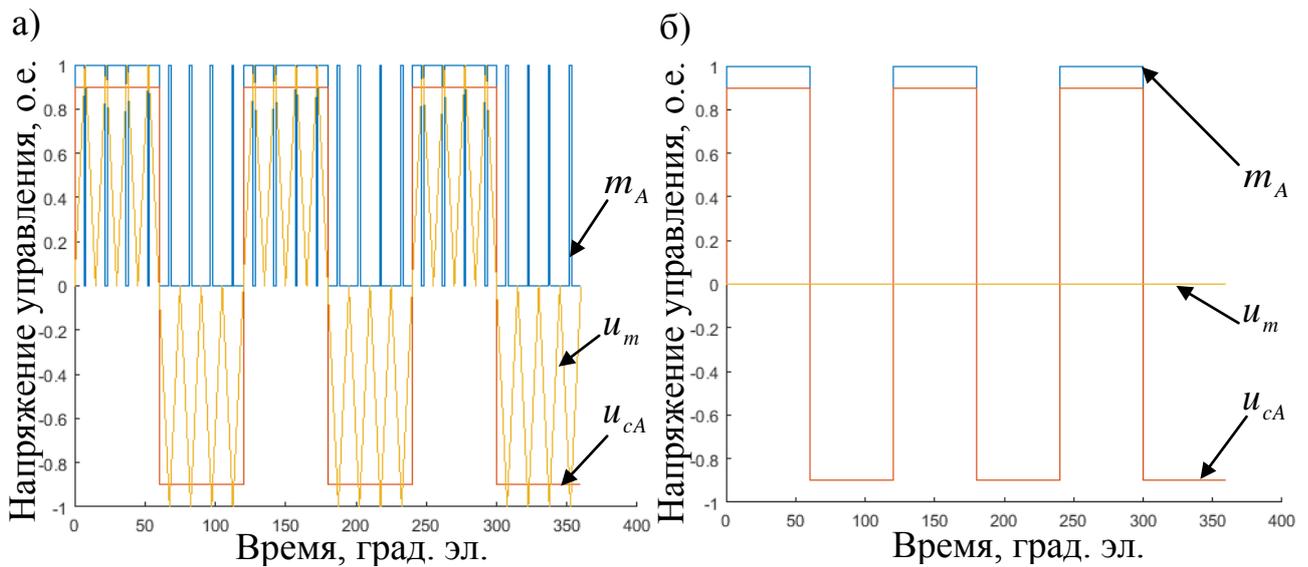


Рисунок 3.6 – Сигналы управления при реализации ШИМ с полным импульсом

Представленный способ управления не является оптимальным с точки зрения энергоэффективности. Для этого проводится оптимизация углов переключения ключей, но эта работа уже выходит за рамки текущего исследования. Указанные методы модуляции использованы в асинхронной и синхронной области модуляции при изменении частоты основной гармоники напряжения инвертора.

3.1.4 Энергия потерь инвертора

Спектральное математическое моделирование позволяет рассчитать величину фазного тока, а также разделить ее на составляющие, протекающие по обратному диоду и транзистору одного IGBT. Принимая во внимание цикл работы,

их количество (на основе режима работы ЭПС, описанного в главе 2), а также величину тока, представляется возможным определить статические и коммутационные потери, возникающие в одном модуле IGBT. Статическими потерями будут потери при пропускании тока через транзистор или диод в открытом состоянии и определяются активным сопротивлением элемента и величиной протекающего тока. Коммутационные потери определяются потерями при включении и выключении транзистора и диода, а также частотой их включения.

Расчет статических потерь основан на использовании интерполированных вольтамперных характеристик на каждом шаге интегрирования как транзистора, так и диода с учетом их фактических температур t_{Tj} и t_{Dj} [4].

$$\Delta u_{Ti} = f(i_{Ti}, t_{Tj}), \quad (3.14)$$

$$\Delta u_{Di} = f(i_{Di}, t_{Dj}), \quad (3.15)$$

где Δu_{Ti} , Δu_{Di} – падение напряжения на транзисторе и диоде соответственно i -ой ветви одной фазы.

Учитывая (3.14) и (3.15), статические потери мощности ΔP_{S_IGBTi} и энергетические потери одного модуля IGBT будут определяться суммой потерь на каждом из элементов модуля.

$$\Delta P_{S_IGBTi} = \Delta u_{Ti} \cdot i_{Ti} + \Delta u_{Di} \cdot i_{Di}, \quad (3.16)$$

$$\Delta W_{S_IGBTi} = \Delta W_{Ti} + \Delta W_{Di} + \Delta t_{Ti} \cdot \Delta u_{Ti} \cdot i_{Ti} + \Delta t_{Di} \cdot \Delta u_{Di} \cdot i_{Di}, \quad (3.17)$$

где ΔW_{Ti} , ΔW_{Di} – потери энергии транзистора и диода соответственно на предыдущем шаге интегрирования;

Δt_{Ti} , Δt_{Di} – время протекания тока по транзистору и диоду соответственно.

Расчет мощности динамических потерь во многом зависит от модели управления и основан на использовании функции потерь энергии для каждого элемента модуля от величины тока, частоты модуляции и фактической температуры.

$$\Delta P_{Ti} = \Delta P_{TON} f(i_{Ti}, t_{Tj}, f_m) + \Delta P_{TOFF} f(i_{Ti}, t_{Tj}, f_m), \quad (3.18)$$

$$\Delta P_{Di} = \Delta P_{DiOFF} f(i_{Di}, t_{Dj}, f_m), \quad (3.19)$$

где ΔP_{TiON} , ΔP_{TiOFF} – мощность потерь энергии на транзисторе i -ой ветви одной фазы при включении и выключении соответственно;

ΔP_{DiOFF} – мощность потерь энергии на диоде i -ой ветви одной фазы при выключении;

f_m – частота модуляции на шаге интегрирования.

Общая мощность потерь мостового инвертора ΔP определяется как сумма статических и динамических потерь на каждом из ключей.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^6 (\Delta P_{S_IGBTi} + \Delta P_{Ti} + \Delta P_{Di}). \quad (3.20)$$

Расчет мощности потерь инвертора позволяет учитывать потерю энергии преобразователем, несмотря на то, что используется понятие «идеальные ключи» при спектральном моделировании. За счет дополнительного введения в схему преобразователя сопротивлений с переменной величиной удастся учитывать в модели статические и динамические потери инвертора.

3.2 Определение жизненного цикла инвертора

Колебания температуры в полупроводниковых структурах приводят к разрушению паяных соединений, расслаиванию чипов, появлению трещин на основании и пр. В связи с этим актуален вопрос, связанный с анализом жизненного цикла инвертора в эксплуатации и, как правило, рассматриваемый при известных параметрах циклограммы нагружения.

Определение действительной величины потери жизненного цикла в эксплуатации возможно при известных значениях потерь жизненного цикла, полученных лабораторно при постоянной амплитуде температуры элементов инвертора. Для этого с помощью метода «дождя» сравниваются полученные эксперимен-

тально диапазоны температур и соответствующее им количество циклов нагружения с потерями жизненного цикла при постоянных амплитудах температуры. При определении остаточной величины жизненного цикла компонентов инвертора используется следующая последовательность [40, 75, 76]:

- определение температурной циклограммы нагружения;
- расчет количества циклов и соответствующего диапазона температур при реалистичном режиме работы;
- сравнение с величинами потерь жизненного цикла при различных диапазонах температуры нагружения по методу Мэнсона;
- расчет остаточной величины жизненного цикла.

Расчет общего уровня потерь энергии как на тиристорах, так и на диодах, описанный выше, позволяет определить их температуру при известной температурной модели, параметры для которой, как правило, указываются в технических данных. Как отмечалось ранее, для определения количества циклов температурного нагружения из всего объема данных должен определяться вектор локальных экстремумов. Локальные экстремумы и эксплуатационные значения температуры транзистора мостового инвертора при неполном цикле реалистичного режима работы представлены на рисунке 3.7.

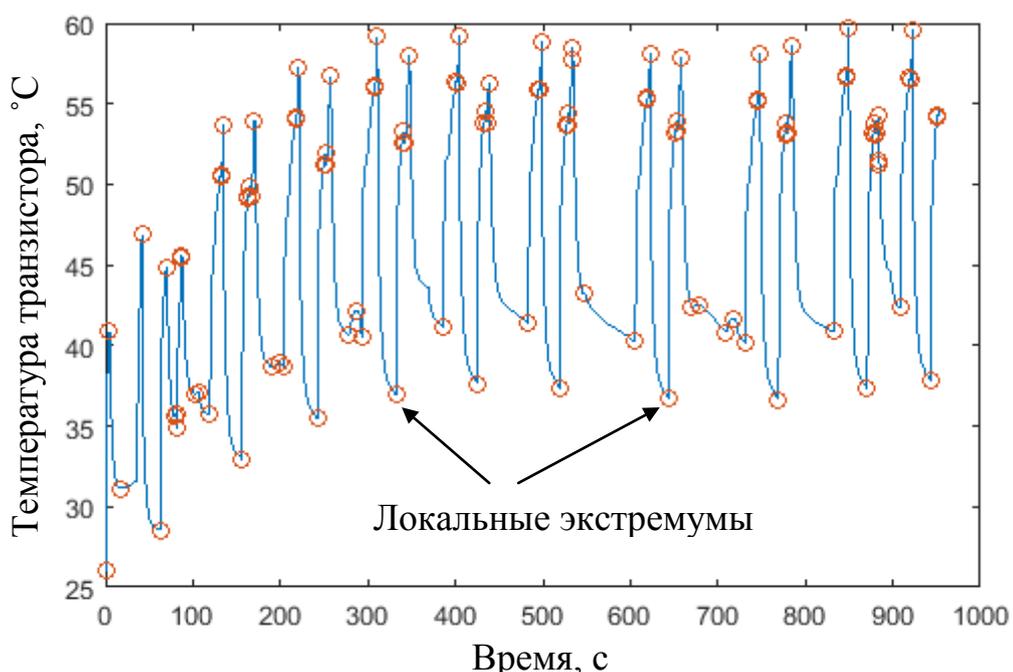


Рисунок 3.7 – Температурная циклограмма нагружения транзистора

Большой объем данных анализируется с использованием только вектора локальных экстремумов. Для этого в каждом полупериоде определяются значения минимальной и максимальной температуры, а также амплитудное и среднее значения (рисунок 3.8).

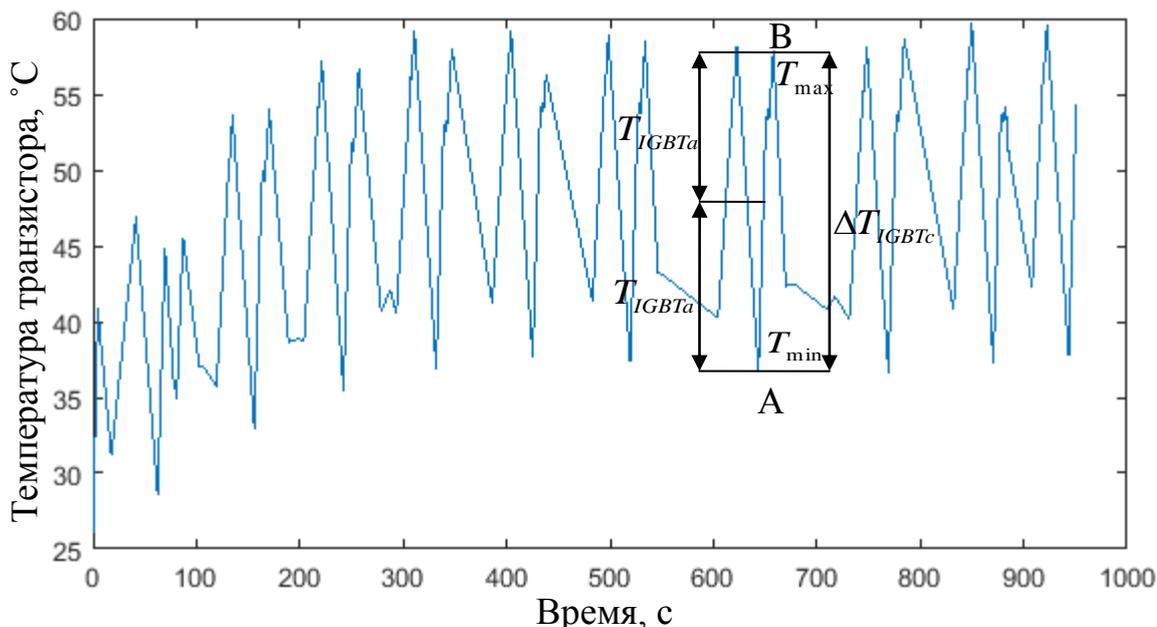


Рисунок 3.8 – Экстремальная температурная циклограмма нагружения транзистора

Анализ температурных циклограмм проводится одним из методов схематизации процессов нагружения. Наиболее распространенный среди них – это метод «дождя». Он позволяет определить количество циклов нагружения, а также соответствующее им среднее значение температуры. Беспорядочная температурная кривая (см. рисунок 3.8) является наиболее частым случаем эксплуатационных измерений. На ее основе, как описывалось выше, определяются для каждого полупериода (например, АВ) основные параметры цикла [77].

Амплитуда полупериода АВ

$$T_{IGBTa} = \left| \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right|. \quad (3.21)$$

Среднее значение температуры за полупериод АВ

$$T_{IGBTm} = \left| \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right|. \quad (3.22)$$

Изменение температуры за полупериод АВ

$$\Delta T_{IGBTc} = T_{\max} - T_{\min}. \quad (3.23)$$

Рассмотрение полного режима работы, представленного на рисунке 3.9, при определенных параметрах привода и на основании матрицы «дождя» дает возможность построить гистограмму циклов нагружения (рисунок 3.10).

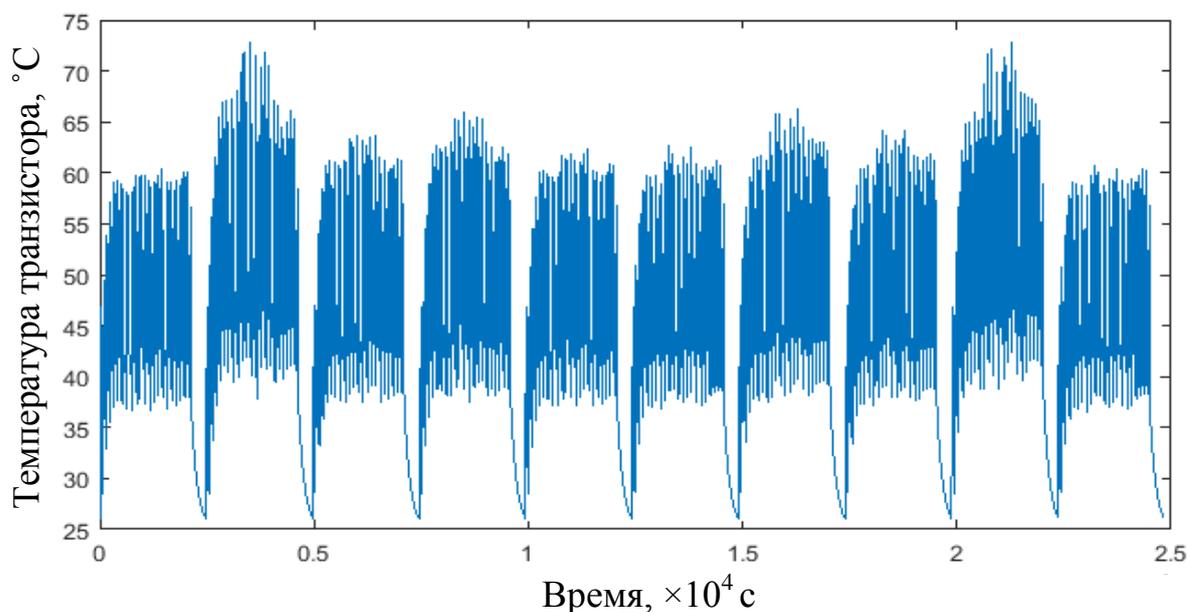


Рисунок 3.9 – Изменение температуры транзистора при реалистичном режиме работы

В конечном итоге при анализе циклограммы температурного нагружения методом «дождя» [78] удастся получить матрицу, значения которой определяют частоту появления отдельных величин температур, их среднее значение, амплитуду и изменение температуры.

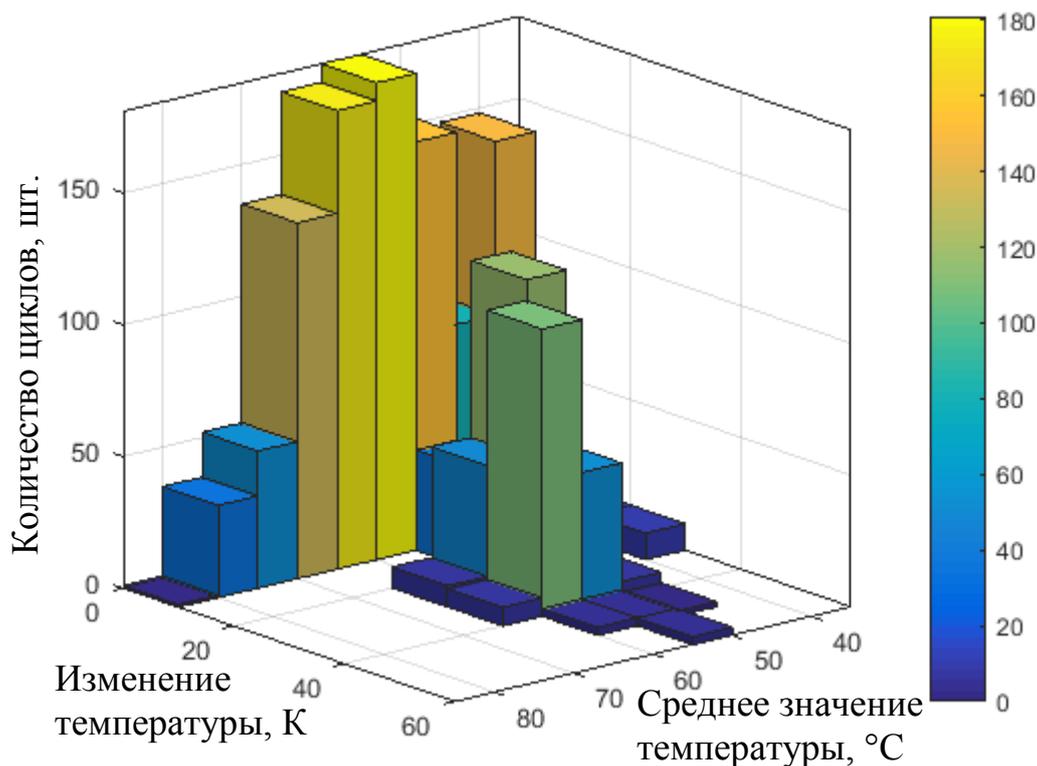


Рисунок 3.10 – Гистограмма циклов нагружения при реалистичном режиме работы

Зависимость количества циклов до повреждения в зависимости от изменения температуры в каждом цикле описывается законом Мэнсона. Но для определения параметров формулы должны быть проведены лабораторные исследования для нескольких температур работы полупроводниковых структур и выявлено количество циклов, при которых, как правило, 10 % [79] образцов выходят из строя. Количество циклов до повреждения рассчитывается на основе абсолютного и среднего значений температуры N [80]

$$N = A \cdot \Delta T_a^\alpha \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_b \cdot T_m}\right), \quad (3.24)$$

где A – постоянная величина, получаемая экспериментально для каждого конкретного модуля;

α – постоянная величина, значение которой зависит от степени изменчивости температурной циклограммы;

E_a – энергия активации;

k_b – постоянная Больцмана.

Остаточная величина жизненного цикла рассчитывается аддитивным методом, предполагая, что последовательность циклов не влияет на результат. При этом каждый температурный цикл отнимает долю жизненного цикла, соответствующую амплитуде и изменчивости температуры в нем.

Полное повреждение B может быть рассчитано как сумма повреждений B_i за каждый цикл i , исходя из их максимального количества n , определенного с помощью метода «дождя».

$$B = \sum_{i=1}^n B_i . \quad (3.25)$$

В свою очередь повреждение B_i рассчитывается для каждого цикла как

$$B_i = \frac{n_i}{N_i} , \quad (3.26)$$

где n_i – количество циклов соответствующих одному среднему значению;

N_i – количество циклов до повреждения, рассчитанных в соответствии с законом Мэнсона.

Конец жизненного цикла компонента инвертора наступает при величине повреждения B , равной 100 %.

3.3 Математическое моделирование асинхронного двигателя с учетом специальных эффектов

подавляющее большинство теоретических описаний динамики электропривода приводится без учета потерь в магнитопроводе на перемагничивание, а также «скин»-эффекта и пр. При анализе работы машин большой мощности, в особенности при расчете их энергопотребления, учет перечисленных потерь позво-

лит более точно следовать ограничениям, которые накладываются при проектировании. Расчет энергопотребления двигателя возможно осуществить в квазистатическом режиме в зависимости от требуемой силы тяги или торможения, скорости движения подвижной единицы и продолжительности пребывания в конкретном режиме работы [3, 12, 39, 81, 82].

Для этого на рисунке 3.11 представлена схема замещения АД в случае питания синусоидальным напряжением с учетом эффекта насыщения магнитопровода и «скин»-эффекта тока в обмотке ротора (активные сопротивления ротора не приведены к статору). Схема замещения подходит для расчета АД при симметричном напряжении питания сети.

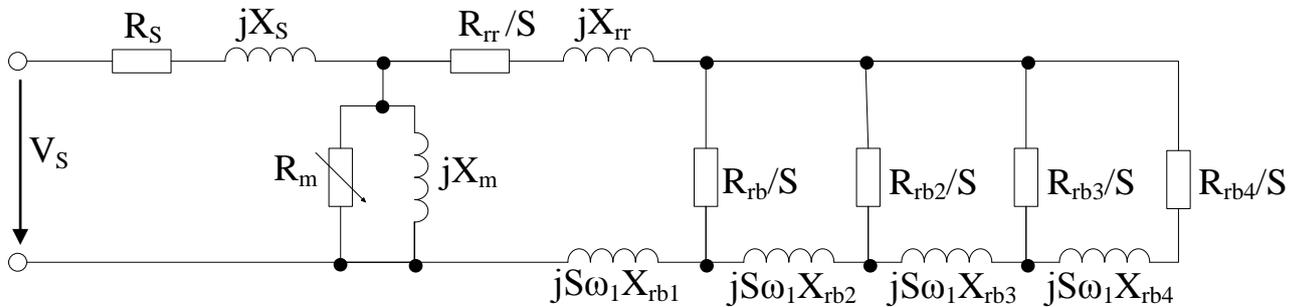


Рисунок 3.11 – Схема замещения АД

Число параллельных ветвей, позволяющих учесть «скин»-эффект в роторе, варьируется и зависит как от формы паза ротора, так и от максимальной частоты основной гармоники питающего напряжения.

Активное сопротивление обмотки статора R_s

$$R_s = \frac{l_t}{\sigma_m} \frac{1}{A_{sb}} \frac{W_s}{a} K_r \quad (3.27)$$

где σ_m – электропроводность материала;

l_t – общая длина витка, включая лобовую часть;

A_{sb} – площадь поперечного сечения проводника обмотки статора;

a – число параллельных ветвей обмотки статора;

W_s – число витков обмотки статора;

K_r – коэффициент вытеснения тока, зависящий от обмотки и частоты питающего напряжения.

Поле рассеяния анализируется по принципу суперпозиции, при этом расчету подвергается пазовое и лобовое рассеяние статора и ротора, а также дифференциальное и «зиг-заг» рассеяние от токов высших гармоник.

Индуктивность рассеяния обмотки статора L_s

$$L_s = \frac{2\mu_0 (W_s \cdot k_0)^2}{q_1 p} \lambda_s \quad (3.28)$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

q_1 – число пазов на полюс и фазу;

p – число пар полюсов;

λ_s – коэффициент проводимости потокосцепления рассеяния;

W_s – число витков обмотки статора;

k_0 – обмоточный коэффициент.

Коэффициент проводимости потокосцепления рассеяния как статора, так и ротора состоит из суммы коэффициентов проводимости рассеяния паза, лобовой части, дифференциального и «зиг-заг» рассеяния. Он зависит от геометрии магнитной части двигателя, а также типа обмотки и достаточно подробно приведен в [39, 94, 99, 101].

Эквивалентное сопротивление цепи намагничивания Z_m

$$Z_m = \frac{R_m \cdot j\omega_1 L_m}{R_m + j\omega_1 L_m}, \quad (3.29)$$

где ω_1 – частота вращения поля статора.

R_m – магнитное сопротивление;

L_m – взаимная индуктивность.

Активное сопротивление ротора R_r

$$R_r = R_{rr} + R_{rb}, \quad (3.30)$$

где R_{rr} – активное сопротивление короткозамкнутого кольца;

R_{rb} – эквивалентное активное сопротивление обмотки ротора.

Активное сопротивление короткозамкнутых колец обмотки ротора R_{rr}

$$R_{rr} = \frac{2 N_r}{\sigma_m A_{rr}} \frac{1}{\left(2 \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{N_r}\right)\right)} \quad (3.31)$$

где N_r – число пазов ротора;

A_{rr} – площадь поперечного сечения короткозамкнутого кольца;

p – число пар полюсов.

Активное сопротивление одной ветви схемы замещения R_{rbi}

$$R_{rbi} = \frac{l_p}{\sigma_m \cdot b_{ij} \cdot h_{ij}} \quad (3.32)$$

где b_{ij} – ширина j -ого слоя проводника ротора;

h_{ij} – высота j -ого слоя проводника ротора.

Индуктивное сопротивление ротора L_r

$$L_r = L_{rr} + L_{rb}, \quad (3.33)$$

где L_{rr} – индуктивное сопротивление короткозамкнутого кольца;

L_{rb} – эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки ротора.

Индуктивное сопротивление одной ветви L_{rbi}

$$L_{rbi} = \frac{\mu_0 \cdot l_p \cdot h_{ij}}{b_{ij}} \quad (3.34)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Принято нелинейным изменение индуктивного сопротивления обмотки в рассматриваемой области характеристики.

Уравнения, описывающие статический режим работы машины, примут вид

$$\begin{bmatrix} \vec{V} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j\omega_1(L_s + Z_m) & j\omega_1 Z_m \\ j(\omega_1 - \omega_r)Z_m & R_r + j(\omega_1 - \omega_r)(L_r + Z_m) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vec{I}_s \\ \vec{I}_r \end{bmatrix}, \quad (3.35)$$

где \vec{V}_s – фазное напряжение обмотки статора;

R_s – активное сопротивление обмотки статора;

L_s – индуктивность рассеивания обмотки статора;

\vec{I}_s, \vec{I}_r – ток статора и ротора соответственно.

Уравнения статического режима работы позволяют определить величины токов в машине при известной паре параметров требуемого вращающего момента и скорости движения (частоты вращения ротора) при известной оптимальной зависимости изменения магнитного потока машины от величины момента.

При оценке энергоэффективности машины важно учитывать потери как в обмотках статора и ротора, магнитопроводе, так и механические потери. Их учет также позволяет более точно оценить температурное состояние машины, позволяя оценить достаточность температурного класса изоляции и спрогнозировать ее температурное старение.

Описание расчета потерь в АД и КПД детально описано в [39, 94, 99, 101] источниках, поэтому не приводится в работе.

Вращающий момент двигателя M

$$M = \frac{3p \cdot R'_r I_r'^2}{s \cdot \omega_1} \quad (3.36)$$

где R'_r, I_r' – приведенные к обмотке статора соответственно сопротивление и ток ротора;

s – скольжение.

При использовании переменных значений скорости и силы тяги (момента) в течение определенного промежутка времени необходимая электрическая мощность в двигательном режиме

$$P_{eldr} = \frac{P_{mech}}{\eta(M_i, \omega_{ri})} = \frac{M_i \cdot \omega_{ri}}{\eta(M_i, \omega_{ri})} \quad (3.37)$$

где P_{mech} – требуемая механическая мощность привода на обode колеса, определяемая из тяговых расчетов;

M_i, ω_{ri} – момент и частота вращения ротора в момент времени i ;

$\eta(M_i, \omega_{ri})$ – совокупная эффективность привода в зависимости от эксплуатационной точки.

Электрическая мощность в тормозном режиме

$$P_{eldr} = P_{mech} \cdot \eta(M_i, \omega_{ri}). \quad (3.38)$$

Энергопотребление привода

$$EC = \int_0^{end} P_{eldr} dt \quad (3.39)$$

где end – длительность движения по участку.

3.4 Определение жизненного цикла обмотки статора машины

Частые изменения величин вращающего момента двигателя при работе в реалистичном режиме эксплуатации приводят к цикличности температурных процессов. Цикличность в режиме работы позволяет более точно учесть потери жизненного цикла обмотки и определить ее ресурс для выбранного изоляционного класса.

В связи с тем, что температура окружающей среды не постоянна в течение года, ее абсолютное значение было увеличено на 60 % при реалистичном режиме работы (см. таблицу 2.1) для двадцати процентов цикла (рисунок 3.12). Известные значения мощности потерь в определенные временные моменты цикла дают возможность получить абсолютное значение температуры обмотки.

Расчет температурного старения изоляции может быть проведен с помощью уравнения Аррениуса [76]

$$LT = A \cdot \exp^{\frac{-E_A}{R \cdot T}}, \quad (3.40)$$

где A – коэффициент, учитывающий частоту столкновений молекул;

T – температура;

R – универсальная газовая постоянная.

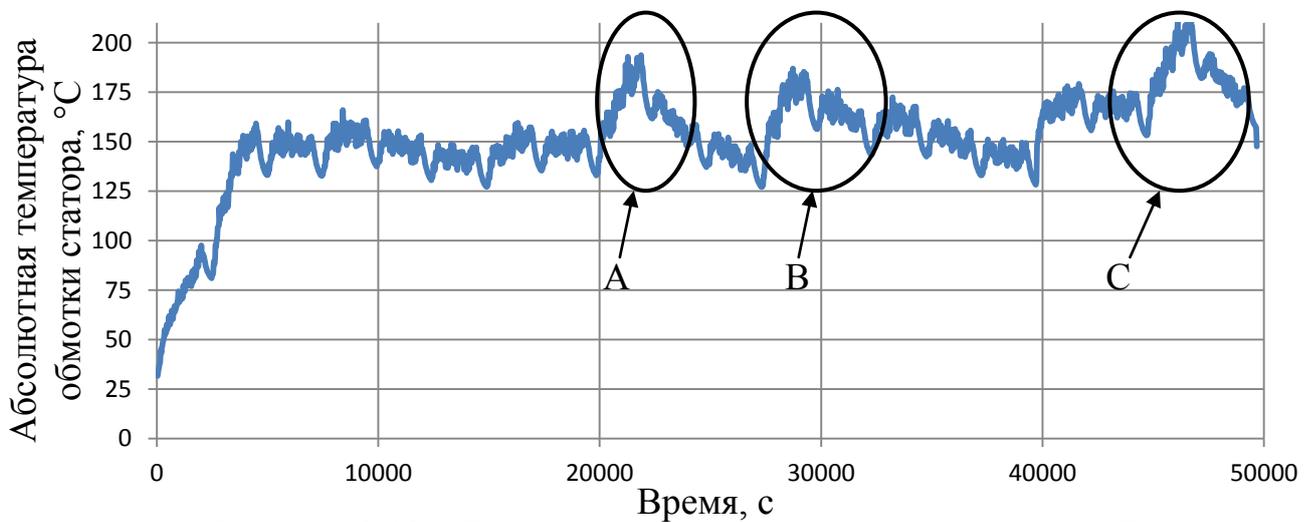


Рисунок 3.12 – Температурный цикл обмотки статора АД

Распределение абсолютных температур АД представлено на рисунке 3.13.

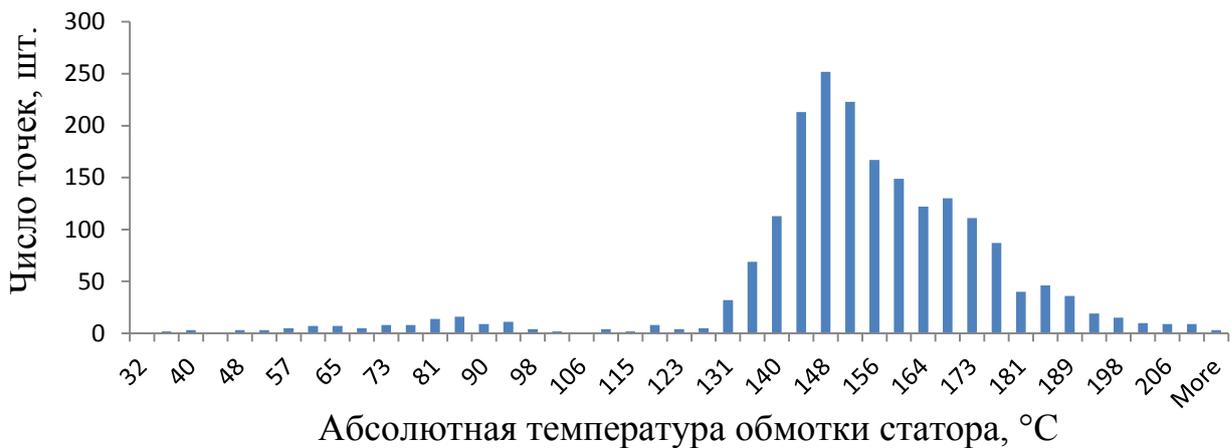


Рисунок 3.13 – Гистограмма распределения абсолютных температур АД при реалистичном режиме работы

Жизненный цикл изоляции при постоянном значении температуры LT [76]

$$LT = LT_0 \cdot 2^{\frac{TI - \vartheta_c}{HIC}}, \quad (3.41)$$

где LT_0 – относительное значение жизненного цикла, обычно $LT_0 = 20000$ ч;

TI – относительное значение температуры;

ϑ_c – абсолютное значение температуры обмотки;

HIC – коэффициент снижения на половину (halving index).

Величины TI и HIC определяются лабораторным способом для каждого вида изоляции за счет ее ускоренного температурного старения.

Остаточная величина жизненного цикла B рассчитывается аддитивным методом по (3.25), предполагая, что последовательность циклов не влияет на результат. Старение изоляции при i -ом значении (см. рисунок 3.13) абсолютной температуры B_i

$$B_i = \frac{LT}{LT_0} \int_{t_1}^{t_2} 2^{\frac{TI - \vartheta_c}{HIC}} dt, \quad (3.42)$$

где t_1 и t_2 – временные границы одного значения абсолютной температуры.

Величина B_i показывает, как сильно температурный всплеск в пределах временных границ t_1 и t_2 влияет на жизненный цикл изоляции машины. Конец жизненного цикла наступает при $B = 100$ %.

При количестве циклов, соответствующих 40 годам эксплуатации, и при 150 тыс. км. годового пробега температурные скачки A , B и C (см. рисунок 3.12) приводят к 6, 8 и 10 %-ой потере жизненного цикла соответственно.

3.5 Математическая модель редуктора для определения его оптимального передаточного отношения

Системы тягового привода ЭПС, в особенности с самовентилируемой машиной, представляют собой объект с огромным потенциалом оптимизации как

электрических, так и термодинамических параметров. При этом они непосредственно связаны с передаточным механизмом – редуктором, изменение основных параметров которого приводит к изменению поведения всей системы.

Цилиндрические косозубые редукторы, применяемые на тяговом подвижном составе, как одно- так и двухступенчатого исполнения играют важную роль в системах электропривода. В то же время они дают возможность применения техник оптимизации, что позволяет в отдельных случаях повысить точность исполняемых функций за счет применения минимального углового хода (низкая погрешность), а также снизить массу и размеры. Это позволяет снизить конечную стоимость продукта без снижения качественных характеристик исполнительного механизма, к которым относят эффективность, надежность и ресурс.

Параметры цилиндрического косозубого редуктора, как и любого исполнительного механизма, допускается выбирать при условии соответствия их допустимым пределам по скорости и передаваемому моменту с учетом снижения рабочей длины окружности на поверхности катания колес и уравнений связи между значениями переменных. Следует иметь в виду, что внешними ограничивающими параметрами при проектировании могут выступать: масса, габаритные размеры, стоимость и уровень шумовой нагрузки. Кроме внешних или функциональных параметров рассматриваются общие ограничения следующего рода:

– Параметрические, задают минимальные и/или максимальные параметры оптимизируемой величины O_i .

$$O_{iMIN} \leq O_i \leq O_{iMAX}. \quad (3.43)$$

При проектировании системы «ТП-АД-Р» возникает вопрос об оптимальности передаточного отношения для одноступенчатых редукторов, а также оптимальности распределения передаточного отношения по ступеням для двухступенчатых редукторов и последующего влияния редуктора на систему привода.

– Дискретизирующие, вносят требования стандартов, норм, а также физическую сущность. В данном случае минимальное значение зубьев шестерни, число зубьев колес, отсутствие общего знаменателя в их величинах. Величины модуля и

точности изготовления определяются в соответствии с обозначенными требованиями.

$$O_i \in \{o_{j1}, o_{j2} \dots o_{j\max}\}, \quad (3.44)$$

где o_j – дискретное значение параметра.

Учитывая, что к современному подвижному составу предъявляются требования по удобству использования и соответствию высоты пола подвижной единицы высоте платформы, это приводит к наложению дополнительных параметрических ограничений при проектировании исполнительного механизма. Вписывание системы тягового привода в тележку состава с «низким» полом ввиду учета наличия на участках эксплуатации станций с низким уровнем платформ предполагает выбор систем привода с редуктором, занимающим пониженный объем пространства тележки. Такому требованию удовлетворяет двухступенчатый редуктор.

Двухступенчатость редуктора позволяет удовлетворять требованию минимальности клиренса между корпусом редуктора и головкой рельса при минимальном радиусе колес колесной пары, а также достаточности общей централи редуктора для вписывания тягового двигателя в пространство тележки.

При проектировании редукторов с различным передаточным отношением используется стандартная последовательность расчета редуктора [83], которая состоит из нескольких этапов (рисунок 3.14).

Указанная последовательность проектирования требует заранее определенных параметров кинематической схемы. Таким образом, количество зубьев шестерни и зубчатого колеса должно быть определено для требуемой величины передаточного отношения. В дальнейшем при заданных величинах мощности (крутящего момента и частоты вращения) становится возможным определить потери в ступени редуктора, предварительно рассчитав геометрические параметры передачи по известной методике (ISO/TR 14179-2:2001(E), ГОСТ 16532-70).

Общая картина (при постоянстве модуля и угла зацепления) допустимых вариантов передаточных отношений одноступенчатого цилиндрического косозубого редуктора представлена на рисунке 3.15.

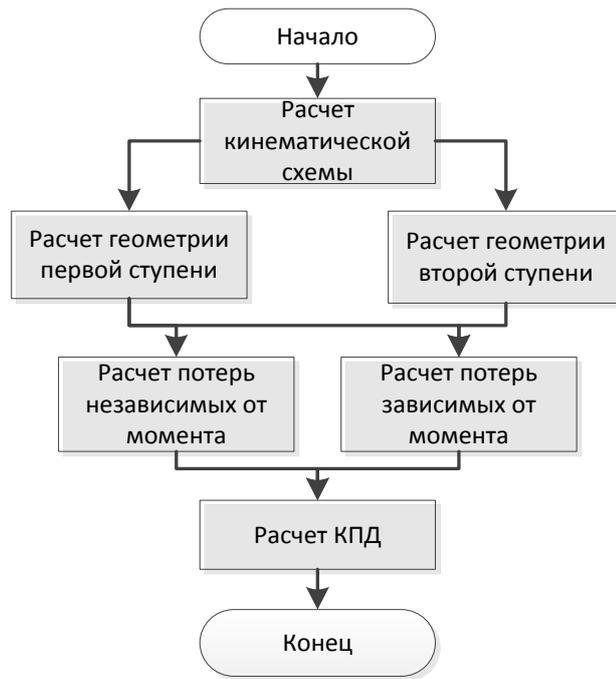


Рисунок 3.14 – Схема проектирования двухступенчатого редуктора при заданной кинематической схеме и постоянных внешних параметрах

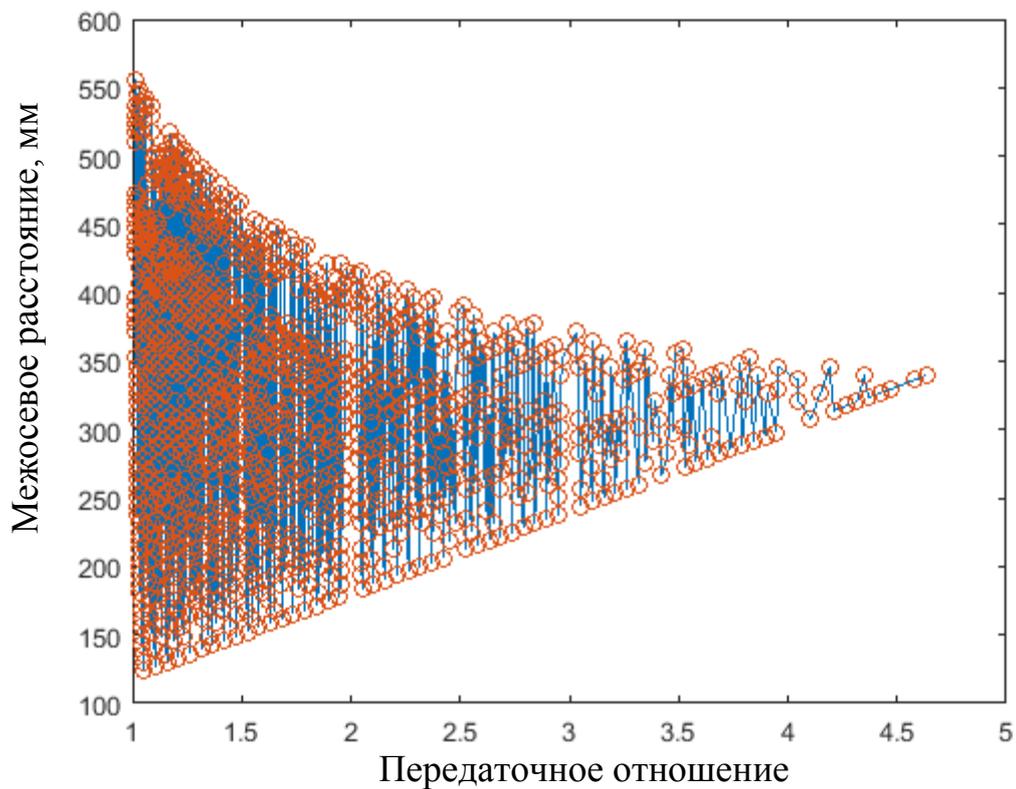


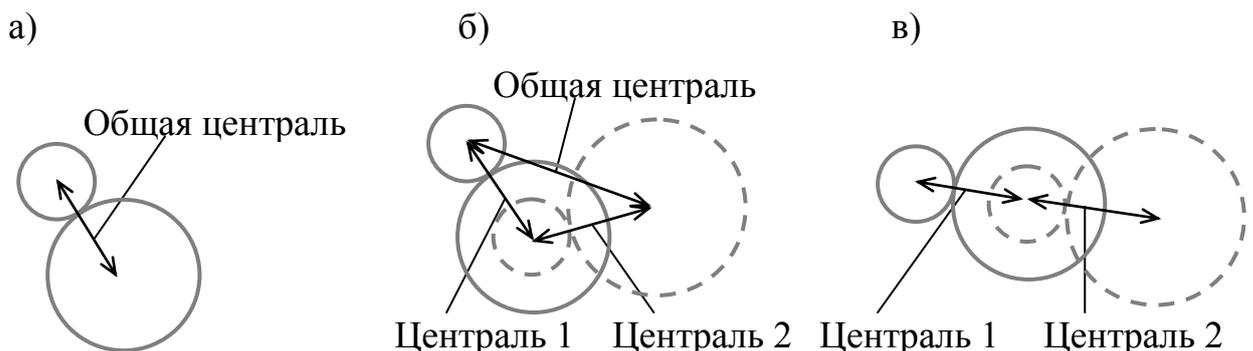
Рисунок 3.15 – Допустимые варианты распределения передаточных чисел одноступенчатого редуктора в зависимости от межосевого расстояния при постоянном значении модуля

Как можно заметить, одной величине передаточного отношения соответствует множество вариантов пар числа зубьев шестерни и зубчатого колеса. При работе такой пары зацепления и выборе величины модуля и других необходимых параметров может быть рассчитана централь редуктора. С ростом передаточного отношения общее количество доступных вариантов одной ступени редуктора снижается, что говорит о необходимости к переходу на двухступенчатый вариант исполнительного механизма. Одной из причин роста передаточного отношения является необходимость реализации компактных вариантов исполнения редуктора и двигателя.

Область допустимых вариантов одноступенчатого редуктора ограничена минимальным z_p и максимальным значением z_g зубьев шестерни и зубчатого колеса соответственно. Для представленного на рисунке 3.15 распределения

$$z_p \in [19...88], z_g \in [19...88]. \quad (3.45)$$

Компактность исполнения редуктора, т.е. величины общей централи, а также пространственного расположения системы «АД-Р» может варьироваться лишь при многоступенчатом исполнении редуктора (см. рисунок 3.16).



- а) одноступенчатый редуктор (общая централь неизменна);
- б) двухступенчатый редуктор (варьируемая общая централь);
- в) двухступенчатый редуктор (наибольшая общая централь)

Рисунок 3.16 – К пояснению пространственного расположения системы «АД-Р»

Выбор любой кинематической пары и ее параметров из множества допустимых вариантов распределения числа зубьев шестерни и зубчатого колеса для каждой ступени редуктора позволяет выполнить в соответствии с рисунком 3.14, расчет карты его эффективности. Для этого каждая точка на выбранной тяговой характеристике при постоянном значении внешних параметров редуктора (рисунок 3.17) циклично рассчитывается по схеме 3.14.

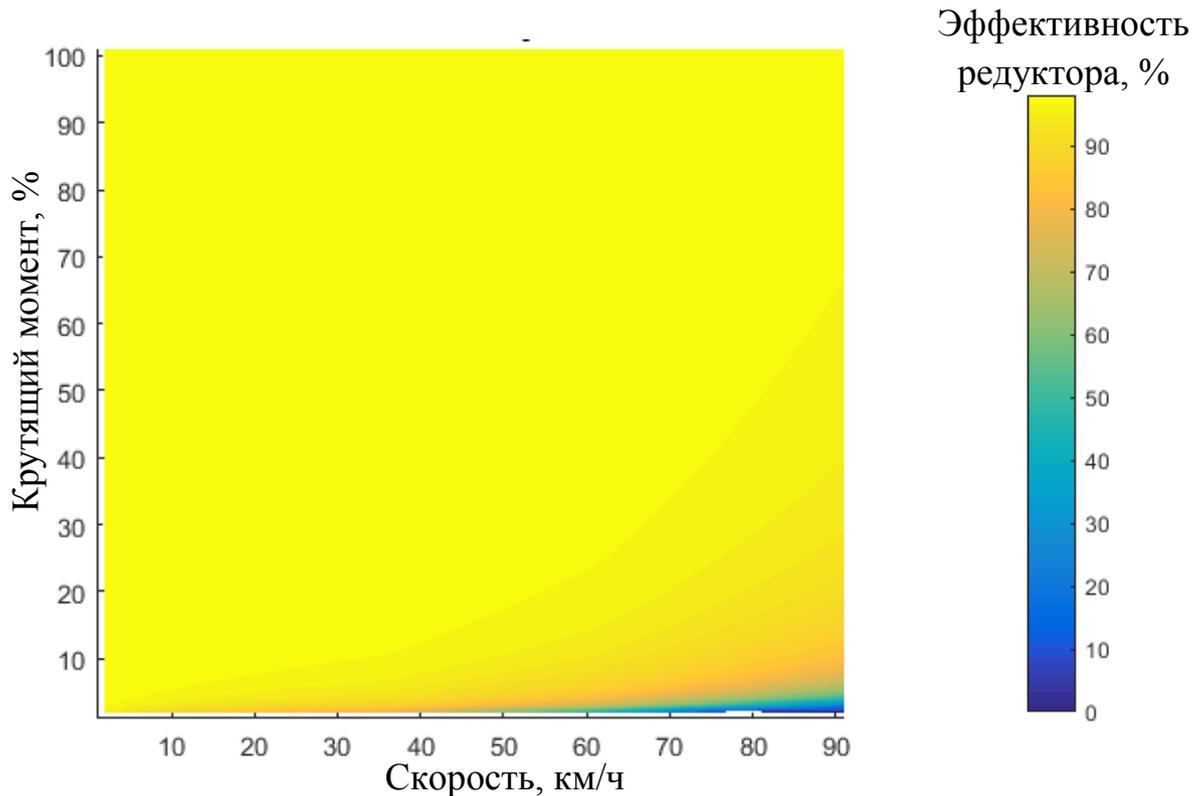
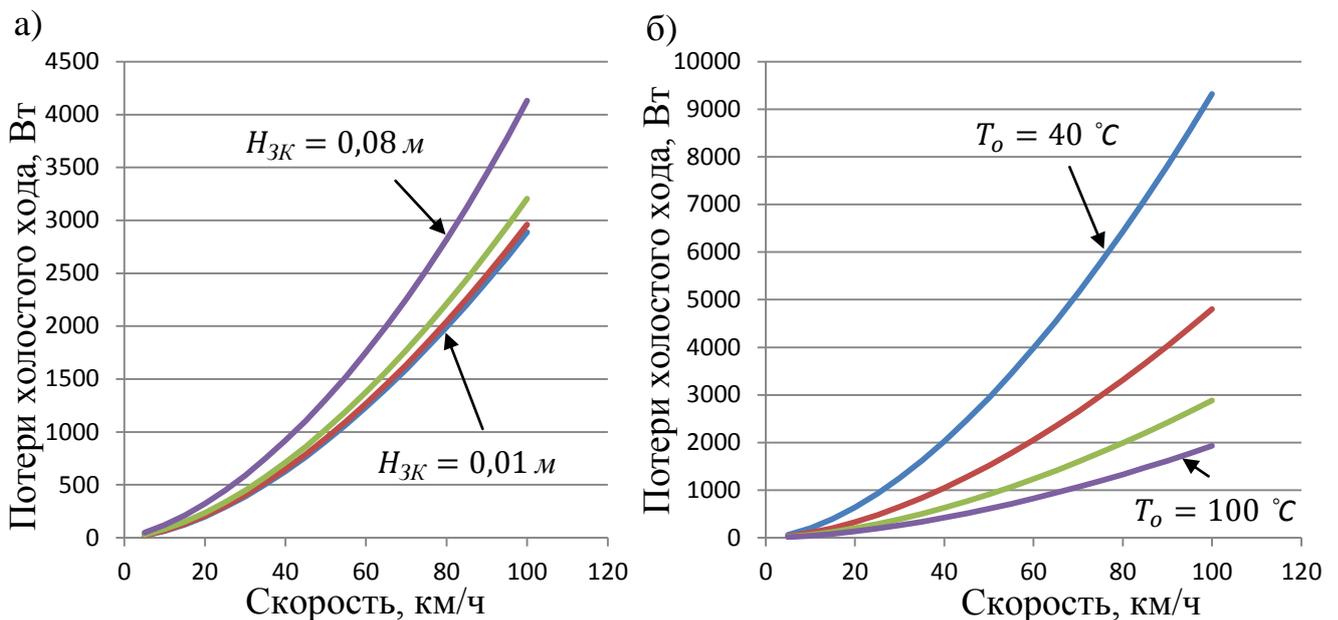


Рисунок 3.17 – Карта эффективности двухступенчатого редуктора в тяговой области выбранной тяговой характеристики

Получившаяся карта эффективности указывает на высокие значения эффективности редуктора практически во всей области тяговой характеристики. Особо стоит отметить потери холостого хода, влияние которых становится заметно при высокой скорости движения подвижной единицы и низких значениях тягового момента (см. рисунок 3.17). Такие потери сильно зависят от распределения масляных потоков внутри редуктора, температуры масла, его вязкости и выбранных подшипников ступеней редуктора, а также их количества. Распределение масляных потоков в значительной мере зависит от уникальности конструкции и не может быть смоделировано в условиях данной задачи.

Изменение потерь холостого хода двухступенчатого редуктора в зависимости от глубины погружения зубчатого колеса тихоходной ступени в масляную ванну, а также температуры масла, но без учета особенностей распределения масляных потоков приведено на рисунке 3.18.

Как можно заметить, величина глубины погружения ($H_{3К}$) так же как и температура масла, значительно влияют на уровень потерь холостого хода редуктора, изменяя их величину в несколько раз, что говорит о необходимости учета температуры масла (T_o) при различных режимах эксплуатации.



а) уровень потерь при погружении в масляную ванну;

б) уровень потерь при росте температуры масла

Рисунок 3.18 – Рост уровня потерь холостого хода двухступенчатого редуктора в тяговой области выбранной тяговой характеристики

Для упрощения задачи достаточно рассмотреть среднее значение как температуры масла, так и величины погружения большого зубчатого колеса тихоходной ступени в масляную ванну при работе на участке. Построение более точных моделей требует внедрения термодинамических моделей редуктора и учета как температуры, так и глубины погружения на каждом шаге интегрирования.

В дальнейшем расчет позволит учитывать изменчивость эффективности редуктора в любой точке тяговой характеристики, что даст возможность повысить точность при расчете параметров энергоэффективности подвижного состава.

Выводы по третьей главе

1. В результате спектрального математического моделирования мостового трехфазного инвертора с различными способами коммутации в асинхронной и синхронной области изменения частоты основной гармоники напряжения асинхронного двигателя с различной максимальной частотой модуляции в квазистатическом режиме определен спектральный состав выходного напряжения инвертора, по которому определяется квазистатическое значение тока двигателя для каждой точки эксплуатации, полученных по результатам тяговых расчетов.

2. Показано, что для определения остаточной величины жизненного цикла инвертора по методу Мэнсона, целесообразно использовать метод схематизации процессов нагружения – метод «дождя», в результате чего, для рассматриваемого примера, наибольшее число циклов имеет амплитуду менее $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, при среднем значении температуры $50\dots70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Для учета «скин»-эффекта в обмотке короткозамкнутого ротора в зависимости от формы его паза следует использовать математическую модель двигателя с расширенной схемой замещения. Так были учтены потери в машине при больших максимальных частотах основной гармоники напряжения, достигающих до 240 Гц . По результатам термических расчетов показано, что остаточный жизненный цикл обмотки статора двигателя при его эксплуатации в нормальном режиме работы достаточно проводить аддитивным методом, при этом скачки температуры в цикле нагружения $170\dots200\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводят к $6 - 10\%$ потере жизненного цикла обмотки.

4. Разработана математическая модель, в которой впервые реализована возможность выбора конструктивных параметров цилиндрического редуктора как с одной, так и с двумя ступенями при постоянном значении модуля. На основе этой модели составлена карта эффективности двухступенчатого редуктора в пределах тяговой характеристики и показано, что эффективность редуктора зависит от расположения требуемой точки эксплуатации.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

4.1 Основные принципы оптимизации системы привода

4.1.1 Описание принятой системы расчета системы привода

Развитие математических моделей всего привода представляет интерес, как для научных институтов, так и для индустрии, где они могут быть использованы для реализации быстрого прототипирования, уточнения параметров компонентов и последующей оптимизации всей системы.

Задача оптимизации предполагает выбор наилучшего варианта из множества решений системы, который соответствует заявленному критерию оптимизации. Для решения такой задачи определяют целевую функцию Q , при этом система может быть как однокритериальной (4.1), так и многокритериальной (4.2) [8].

$$Q = f(x) \equiv \{x_1, x_2 \dots x_{\max}\}, \quad (4.1)$$

где x_i – переменная величина проектирования.

В результате решения задачи оптимизации численно выводятся переменные величины проектирования $\{x_1, x_2 \dots x_{\max}\}$ при экстремальном поведении функции с учетом принятых ограничений.

Рост числа критериев оптимизации системы ведет к росту числа целевых функций, каждая из которых зависит от переменных величин проектирования. Последующий поиск экстремума позволит определить оптимальные параметры системы.

$$O = f(Q) \equiv \{Q_1, Q_2 \dots Q_{\max}\}. \quad (4.2)$$

Многокритериальная оптимизация значительно усложняет задачу и может быть упрощена за счет рассмотрения условного экстремума одной целевой функции в уравнении (4.2) в предположении, что остальные целевые функции лежат в определенной области значений [83].

Разная размерность функций при многокритериальной оптимизации решается за счет перехода к относительным единицам и записи уравнения составной целевой функции O .

$$O = k_1 Q_1(x_{11}, x_{21} \dots x_{\max 1}) + k_2 Q_2(x_{12}, x_{22} \dots x_{\max 2}) \dots k_n Q_n(x_{1n}, x_{2n} \dots x_{\max n}), \quad (4.3)$$

где $k_{1..n}$ – коэффициенты веса каждой целевой функции, $\sum_1^n k_i = 1$.

На рисунке 4.1 приведена блок-схема создания матриц данных, основанная на существующих математических моделях ее компонентов.

Блок-схема включает в себя четыре подпрограммы, каждая из которых выполняется последовательно друг за другом:

а) Подпрограмма «Тяговые расчеты» выполняет расчет участка обращения с учетом его особенностей и особенностей ведения поезда в различных эксплуатационных ситуациях.

б) Подпрограмма «Редуктор» выполняет расчет эффективности редуктора в области заданной тяговой характеристики в соответствии с его конструктивными параметрами.

в) Подпрограмма «Двигатель» выполняет расчет электрических и термодинамических параметров двигателя. Электрические параметры рассчитываются на основе заданной силы тяги, времени ее приложения и скорости (подпрограмма «Тяговые расчеты»), а термодинамические на основе потерь двигателя и продолжительности их существования.

г) Подпрограмма «Преобразователь» выполняет расчет электрических и термодинамических параметров инвертора с учетом требуемого тока двигателя и параметров входного фильтра при реализуемой схеме управления.

д) Подпрограмма «Сбор данных» проверяет на каждом итерационном шаге наличие нарушения ограничений по предельным характеристикам, а также массогабаритным и термодинамическим пределам компонентов, в случае его появления рассчитываемый вариант не заносится в базу данных.

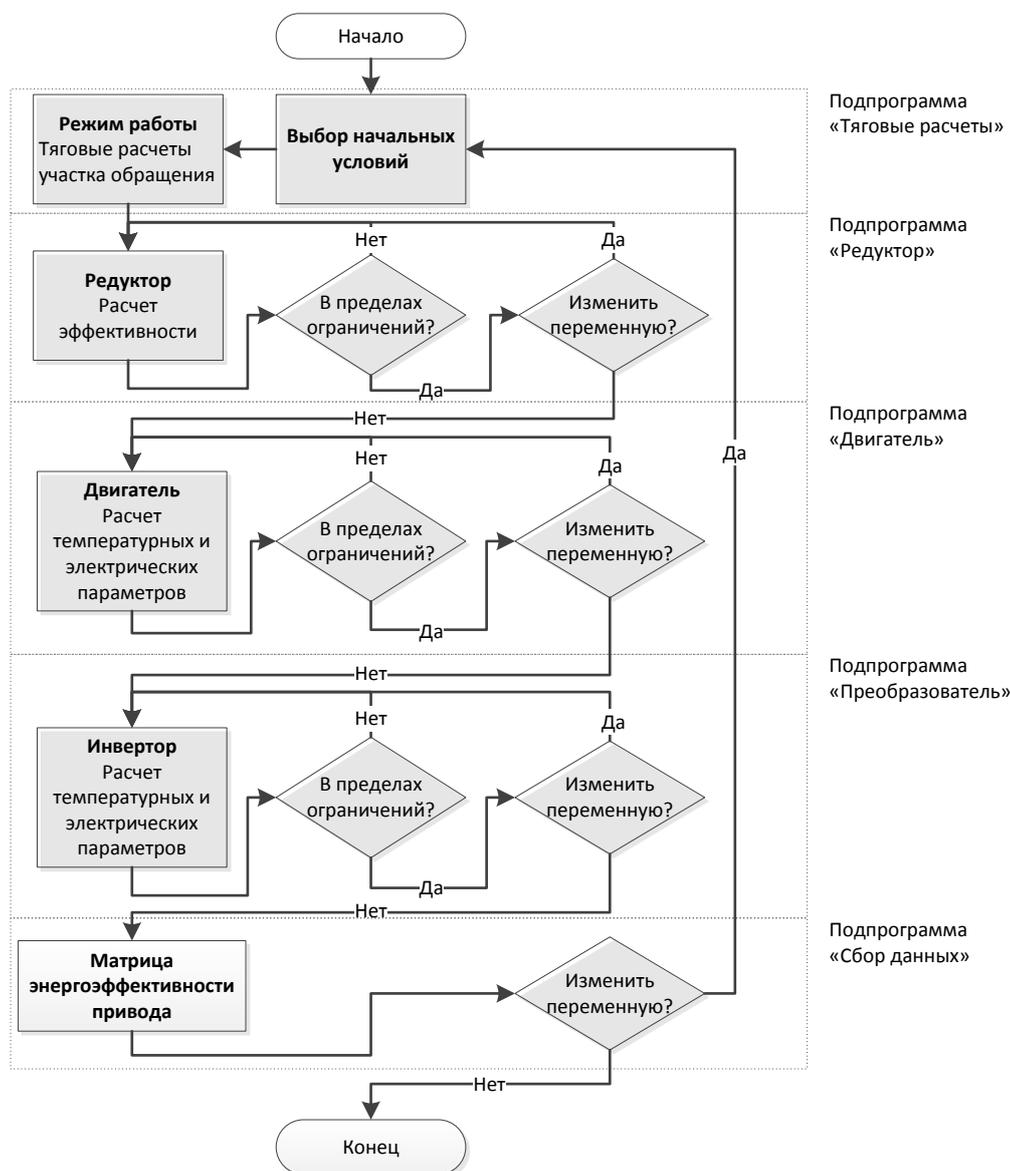


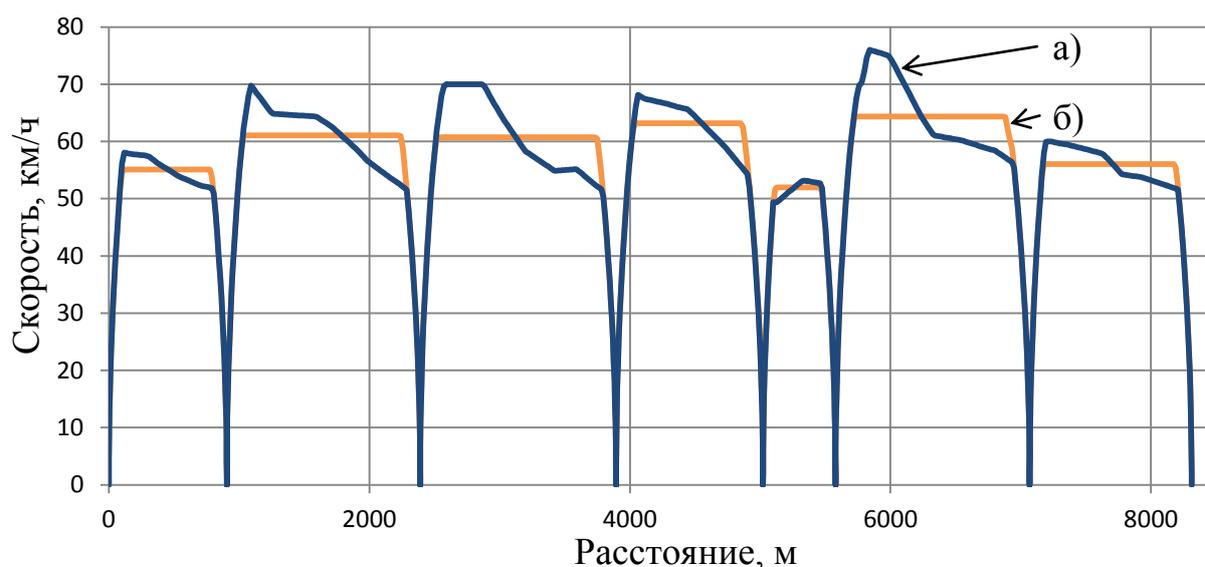
Рисунок 4.1 – Блок-схема сбора данных для оптимизации привода

В последующем созданная матрица значений энергоэффективности при различных параметрах привода может быть проанализирована на наличие как локальных экстремумов, так и общего экстремума методом роя частиц, генетического алгоритма и пр.

В дальнейшем компоненты рассматриваются в указанном выше порядке.

4.1.2 Анализ результатов определения статических циклов эксплуатации привода

При рассмотрении реалистичного режима движения рассматривается несколько сценариев управления, при этом заслуживающими внимание являются следующие сценарии: движение с поддержанием постоянной скорости и полное отсутствие тягового момента (режим выбега). В первом случае двигателем создается вращающий момент направленный на компенсацию сил сопротивления движению, во втором – полное отсутствие тягового усилия. На рисунке 4.2 показано отличие при движении с различным сценарием управления для части участка обращения.



а) полное отсутствие тягового момента; б) поддержание максимальной скорости

Рисунок 4.2 – Движение при различных сценариях реализации силы тяги

Цикл нагружения, постоянные точки которого показаны на рисунке 4.3, находится в пределах ограниченной области выбранной тяговой характеристики при условии движения с минимальным интервалом и выбранной стратегии управления. Под стратегией управления подразумевается скорость изменения ускорения и его величина в режимах разгона и торможения. В случае реализации их постоянных величин можно заметить, что для поездов метро характерна реализация

силы по границе характеристики и большой разброс рабочих точек при 53 - 85 % максимальной скорости при небольшом значении резерва времени (в примере среднее значение 6 %). Снижение резерва времени приведет к сдвигу части точек цикла нагружения в сторону больших скоростей и наоборот.

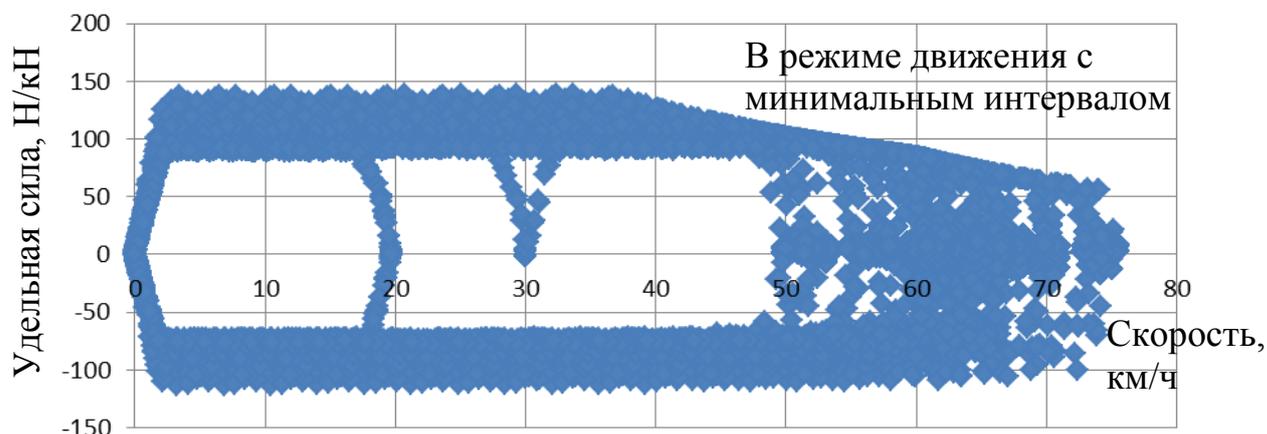
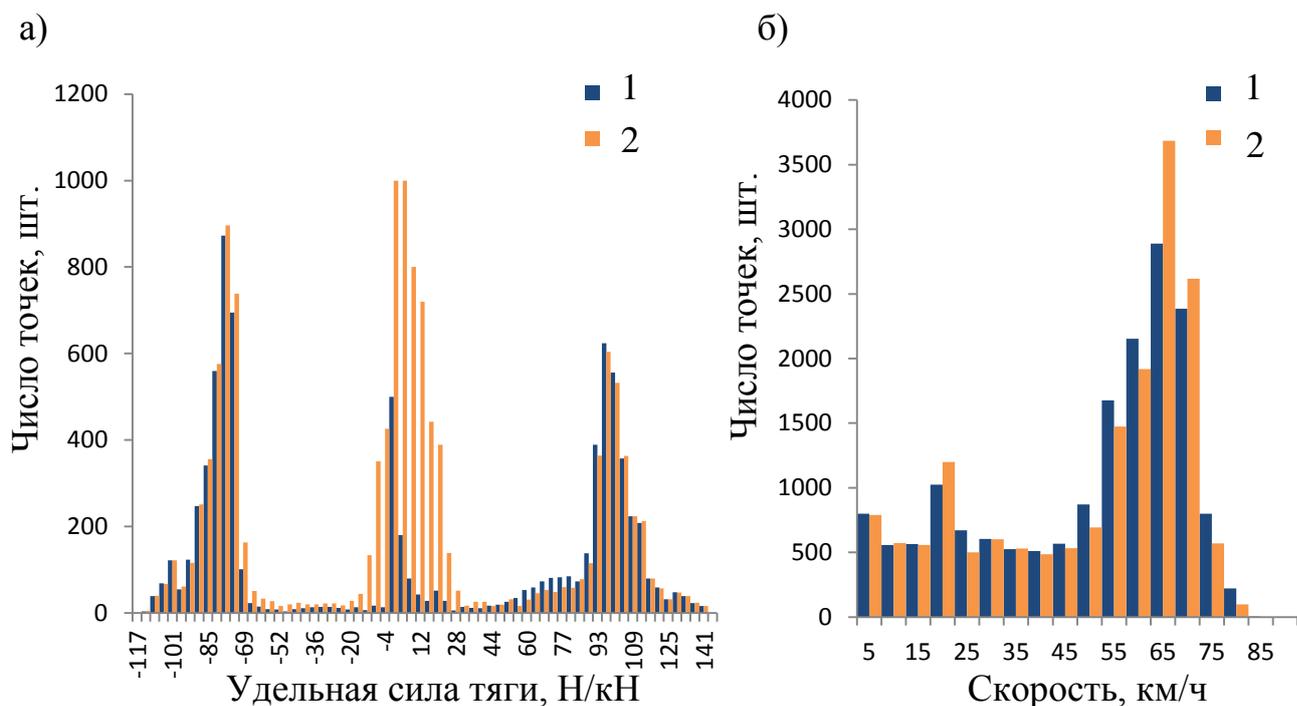


Рисунок 4.3 – Распределение рабочих точек на тяговой характеристике

Отличие двух видов движения удобно представить на гистограммах удельной силы тяги и скорости поезда на всем участке обращения. Как видно из рисунка 4.4, поддержание максимальной скорости сопровождается наличием рабочих точек в области низких значений силы тяги, а также реализация более низких значений скорости поезда на участке. Низкие значения силы тяги сопровождаются низкой эффективностью двигателя, а более низкое значение скорости более высокой эффективностью всего состава.

Случай поддержания тягового момента будет интересен при рассмотрении температурных расчетов двигателя, другой же – при рассмотрении жизненного цикла преобразователя, поскольку паузы в его работе приводят к колебаниям температуры «ключа».

Конфигурация поезда для метро средней вместимости с осевой нагрузкой 11...14 т, состоящей из 6 вагонов приведена в таблице 4.1 при работе в области, которая ограничена выбранной тяговой характеристикой (см. рисунок 2.1). Во всех вариантах привода, если это не обговорено отдельно, рассматривается возможность применения двухступенчатого редуктора. Кроме того, учитывается применение различных инверторов в качестве переменной проектирования.



1- полное отсутствие тягового момента; 2 - поддержание максимальной скорости
 Рисунок 4.4 – Гистограммы распределения удельной силы тяги (а) и скорости (б)

Таблица 4.1 – Возможные конфигурации инвертора системы привода метро

Тип инвертора	Конфигурация привода	Максимальная частота модуляции, Гц							
		500	600	700	800	900	1000	1100	1200
INV101	1С4М*	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
INV103	1С2М**								
INV105	1С4М*								

* – 1 инвертор на 4 двигателя;
 ** – 1 инвертор на 2 двигателя.

Номинальная мощность инверторов приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Номинальная мощность инверторов

Параметр	Единица измерения	Тип инвертора		
		INV101	INV103	INV105
Номинальная мощность	кВт	400	200	600

4.2 Оптимизация передаточного отношения редуктора по критерию минимальности централи

4.2.1 Выбор основных конструктивных параметров редуктора исходя из ограничений

Определение оптимальных параметров редуктора производится при их изменении в допустимых пределах, которые определяются в данном случае пределами выбранной тяговой характеристики. В условиях решаемой задачи общими выступают ограничения функционального, дискретизирующего и параметрического характера. Кроме общих ограничений, описанных в главе 3, приняты во внимание специальные ограничения параметрического характера, к которым относятся: допустимая величина клиренса корпуса редуктора, допустимая величина пространства тележки для вписывания двигателя и редуктора с учетом диаметра двигателя.

Удовлетворение первому ограничению достигается за счет ограничения диаметра колеса тихоходной (второй) ступени редуктора с точки зрения передаточного отношения; второе – за счет поддержания общей минимальной величины централи на достаточном и необходимом уровне (см. рисунок 3.16 б).

В связи с этим, в условиях принятых ограничений необходимо соответствовать минимальности межосевого расстояния ступени, что способствует также снижению массы и момента инерции передаточного механизма, и, в конечном итоге, дает возможность повысить быстродействие системы и снизить энергопотребление ЭПС, в особенности, в режимах работы с частым ускорением и замедлением. Соответствие требованиям минимальности межосевого расстояния приведет также и к минимизации стоимости редуктора при одном и том же передаточном отношении. Указанная задача требует для своего решения использование техники оптимизации.

Математическим решением задачи оптимизации будет являться определение вектора одних параметров редуктора, при которых другие параметры принимают экстремальные значения:

$$\begin{aligned} extr &\leftarrow F(X, P), \\ f_i(X, P) &\leq \| = \| \geq const_j, \\ x_{i_{\min}} &\leq x_i \leq x_{i_{\max}}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где X, P – вектор оптимизируемых и неоптимизируемых параметров редуктора;

f_i – аналитическая зависимость между выше обозначенными векторами;

$const_j$ – постоянные величины, характеризующие пределы проектирования передачи;

i, j – количество пределов проектирования и длина вектора оптимизируемых параметров соответственно.

Выбор передаточного отношения при построении системы тягового привода может происходить без должного представления общей картины распределения передаточных отношений редуктора. Это значит, что высока вероятность использования редукторов, не соответствующих наименьшим массогабаритным показателям. Общая картина распределения передаточного отношения (см. рисунок 3.15), позволяет увидеть и выбрать оптимальные варианты ступени редуктора, отличающиеся наименьшим межосевым расстоянием и, соответственно, пониженными величинами массы, момента инерции и стоимости при прочих равных условиях и одинаковом передаточном отношении (рисунок 4.5). Достичь квазимиимальности централи одноступенчатого редуктора можно также, воспользовавшись известными методиками распределения передаточного отношения по ступеням [58], например, используя минимальное допустимое значение зубьев шестерни.

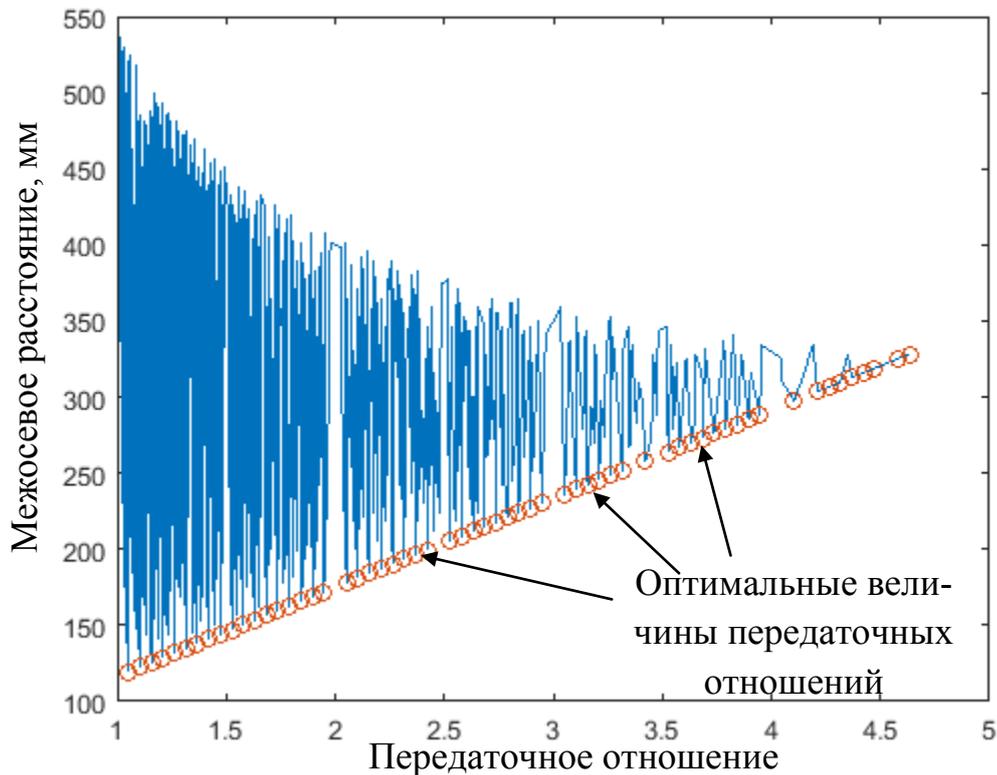


Рисунок 4.5 – Оптимальные значения передаточного отношения одноступенчатого редуктора при постоянстве модуля ступени

Практической значимостью представления распределения передаточных чисел является выбор не только абсолютных минимумов централи редуктора, соответствующих конкретному передаточному отношению, но и близких промежуточных вариантов.

Проектирование двухступенчатых редукторов, используя принцип минимальности зубьев шестерни при одинаковой или различной величине модуля зацепления одной ступени, дает матрицу вариантов передаточных чисел редуктора. При этом большая часть элементов матрицы не является оптимальным решением задачи с точки зрения минимальности межосевого расстояния.

В связи с этим, для нахождения оптимизированных по одинаковому критерию ступеней двухступенчатого тягового редуктора и с учетом различных по значению модулей ступеней были скомбинированы оптимальные передаточные числа каждой из ступеней с учетом ранее принятых ограничений. Получившееся распределение передаточных отношений в зависимости от общей величины межосевого расстояния двухступенчатого редуктора (см. рисунок 3.16 в) представлено на

рисунке 4.6. Стоит отметить, что вариант сравнения редукторов по схеме (см. рисунок 3.16 в) предпочтительный, т. к. при прочих равных условиях позволяет определять минимальную общую длину редуктора и, соответственно, меньший вес. В дальнейшем рассматривается только этот вариант, но стоит отметить, что при вписывании привода в тележку, как правило, схема изменяется на вариант, представленный на рисунке 3.16 (б).

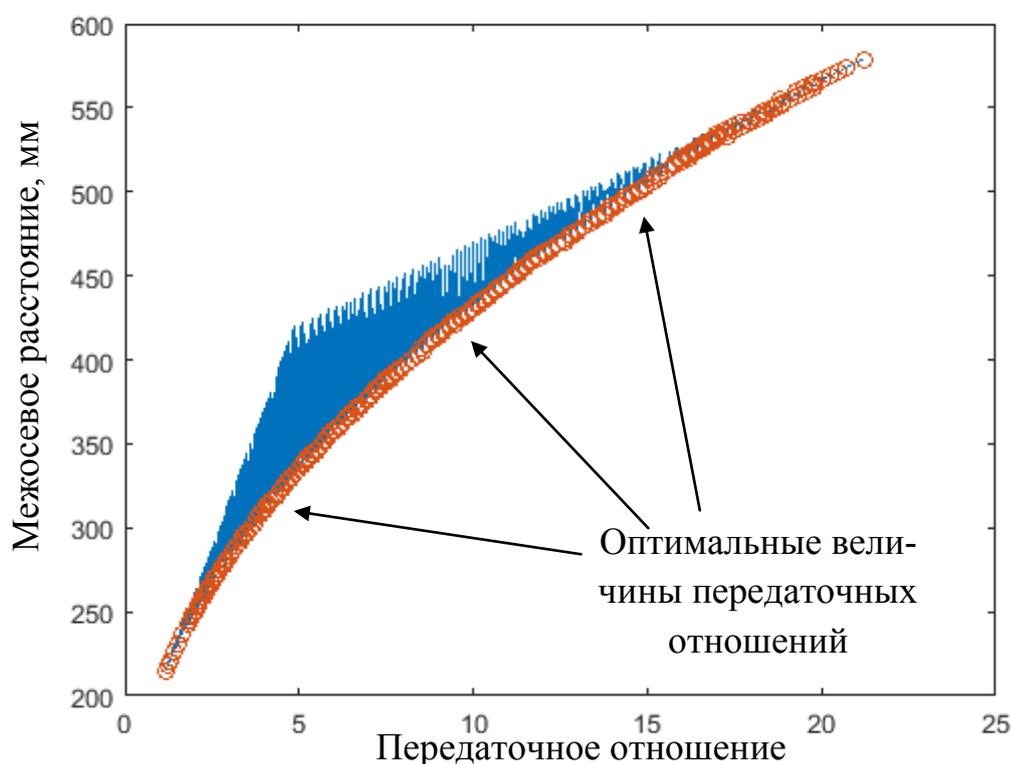


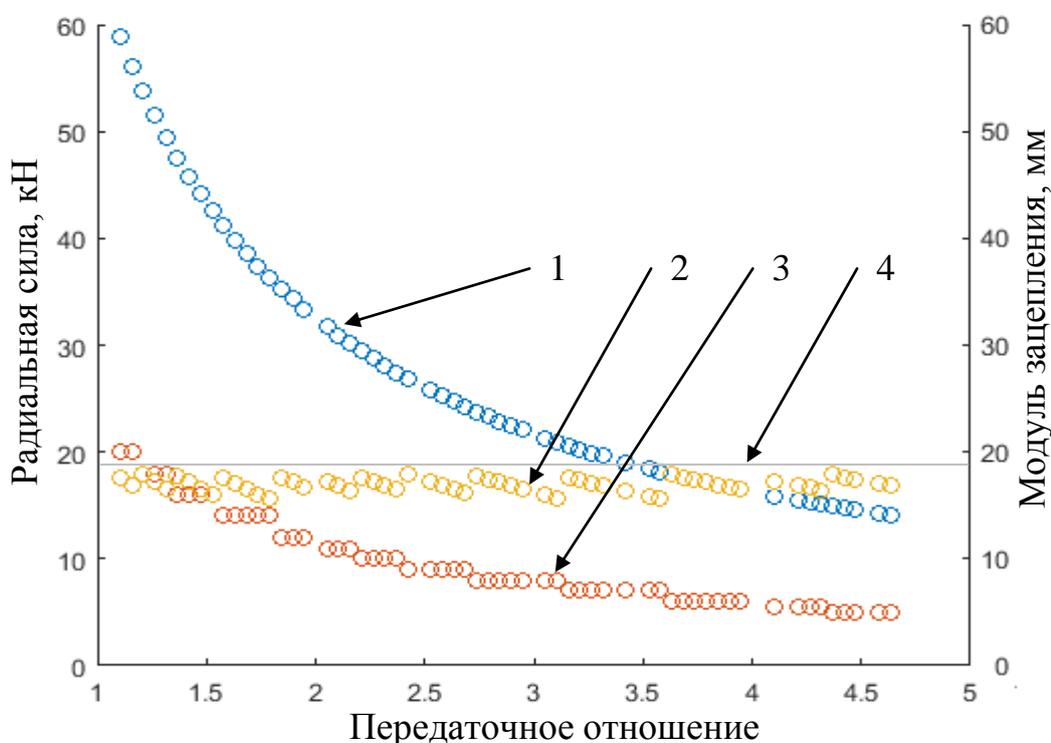
Рисунок 4.6 – Оптимальные значения передаточного отношения двухступенчатого редуктора при постоянстве модуля каждой ступени

Как видно из рисунка 4.6, сложение оптимальных вариантов одноступенчатых редукторов дает множество квазиоптимальных вариантов передаточных чисел двухступенчатой передачи, следовательно, для определения передач, соответствующих заявленному критерию, требуется последующий этап оптимизации.

Полученное распределение позволяет для различных величин модуля зацепления на каждой из ступеней двухступенчатого редуктора определить оптимальную величину передаточного отношения, а также соответствующее число зубьев шестерни и зубчатого колеса, что позволит в дальнейшем перейти к расчету карты эффективности редуктора.

Стоит заметить, что кривая оптимального передаточного отношения в зависимости от межосевого расстояния не имеет области насыщения, при которой каждое последующее значение передаточного отношения будет приводить к значительному изменению межосевого расстояния. В связи с этим, необходимо уточнить величину централи ступеней и учесть значение модуля.

На рисунке 4.7 приведена кривая изменения радиальной силы в зубцах для тихоходной ступени. При этом принимается во внимание только оптимальная пара передаточного отношения двухступенчатого редуктора. Параметры зацепления быстроходной ступени определяются аналогично.



1 – радиальная сила при постоянстве модуля; 2 – радиальная сила при переменном значении модуля; 3 – значение модуля в зависимости от передаточного отношения; 4 – предельная радиальная сила

Рисунок 4.7 – К определению модуля тихоходной ступени передачи

Стоит отметить, что постоянство модуля ступени в случае изменения передаточного отношения приводит к изменению радиальной силы в зубцах передачи, и при достижении максимума механического напряжения модуль должен быть изменен.

Выбор действительного модуля позволит уточнить кривую оптимального передаточного отношения (см. рисунок 4.6) в зависимости от общей длины межосевого расстояния. На рисунке 4.8 представлена зависимость общего межосевого расстояния для одноступенчатого и двухступенчатого редукторов с учетом изменения модуля и квазипостоянства радиальной силы при работе с одинаковым крутящим моментом.

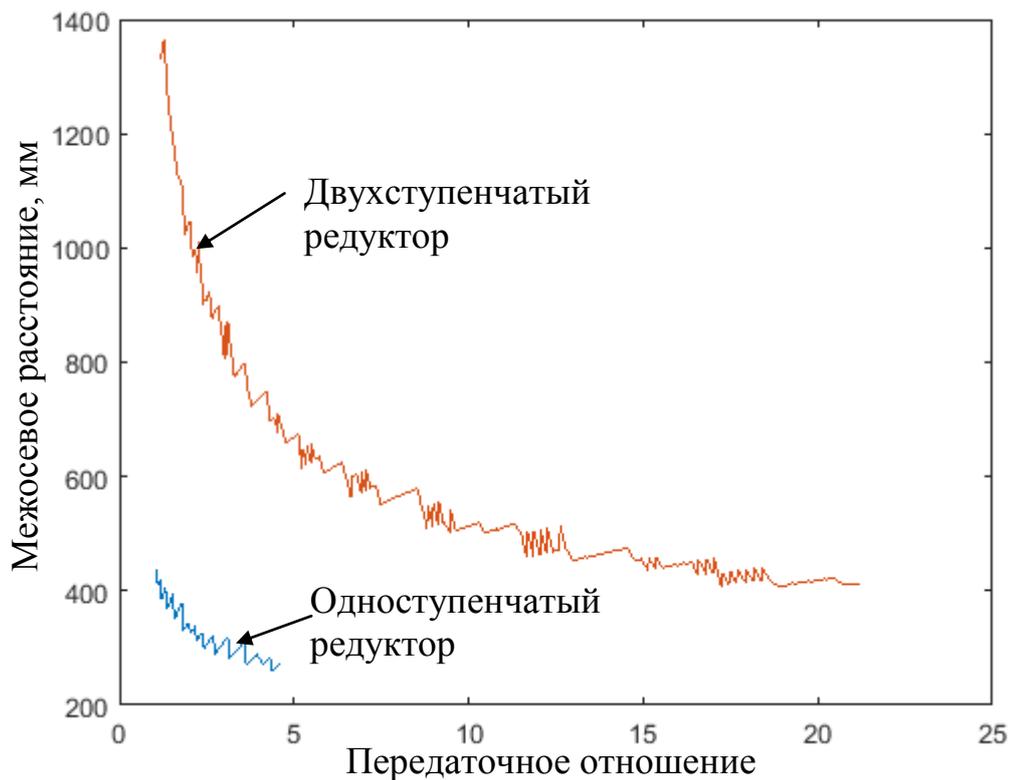


Рисунок 4.8 – Общее межосевое расстояние редуктора при оптимальном передаточном отношении и модуле для одноступенчатого и двухступенчатого редуктора

При сравнении уточненных межосевых расстояний одноступенчатого и двухступенчатого редукторов с переменным значением модуля видно, что:

- минимальными массогабаритными показателями обладают одноступенчатые редукторы, но при ограниченном передаточном отношении;
- с ростом передаточного отношения межосевое расстояние снижается;
- наблюдается эффект насыщения, при котором прослеживается незначительное снижение межосевого расстояния при росте передаточного отношения.

Указанные особенности действительны в выбранных пределах максимального и минимального числа зубьев колес.

4.2.2 Карта эффективности редуктора

Карта эффективности, представленная на рисунке 3.17, не отражает наиболее эффективные области работы передаточного механизма. Для построения системы управления, отличающейся эффективным использованием компонентов привода, необходимо наглядно выделить границы зон наибольшей эффективности каждого компонента. Известно, что в последовательных системах, которой и является система «ТП–АД–Р» общая эффективность определяется произведением эффективностей каждого из элементов системы. Поэтому четкое представление области наибольшей эффективности, а также стремление к использованию алгоритмов управления, реализующих точки эксплуатации в области тяговой характеристики с наивысшей эффективностью, будет способствовать наименьшему энергопотреблению.

На рисунке 4.9 разделение карты эффективности (см. рисунок 3.17) на зоны с высокой (более 80 %) и низкой эффективностью позволяет выявить высокоэффективные режимы эксплуатации привода. Создание режима движения с ограничением реализации отдельных точек в области низких значений момента и высокой скорости способствует росту эффективности всей системы.

Стоит отметить, что область до 80 % выбрана условно и может быть изменена. Кроме того, эта область зависит от температуры масла, фактического распределения масляных потоков и т.д., поэтому может быть как увеличена, так и уменьшена.

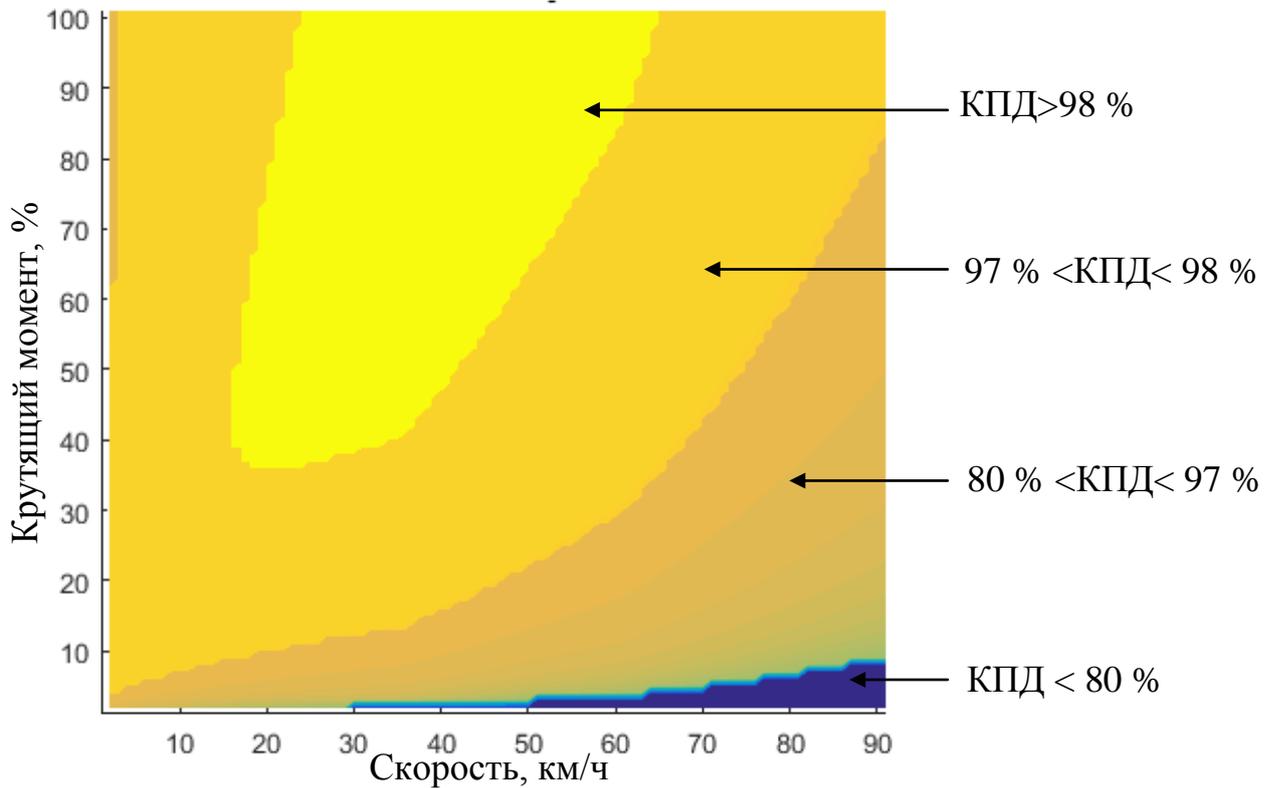


Рисунок 4.9 – Карта эффективности двухступенчатого редуктора

4.2.3 Сопротивление движению поезда при различных передаточных отношениях редуктора

При оптимизации системы с применением различных по величине передаточных отношений происходит изменение величин сопротивления движению подвижной единицы за счет изменения величины вращающихся масс и сопротивления воздуха при росте угловой скорости вентилятора самовентилируемого двигателя. Приведенный момент инерции элементов системы к ротору двигателя при двухступенчатом варианте редуктора, J_{red}

$$J_{red} = J_R + J_{Cl} + J_{Gred} + J_{Dred} + J_{WSred}, \quad (4.5)$$

где J_R – момент инерции ротора двигателя;

J_{Cl} – момент инерции муфты;

J_{Gred} – приведенный момент инерции редуктора;

J_{Dred} – приведенный момент инерции тормозного диска;

J_{WSred} – приведенный момент инерции колесной пары.

С учетом передаточного отношения и применения двухступенчатого варианта редуктора приведенный момент инерции, J_{red}

$$J_{red} = J_R + J_{Cl} + J_{P1} + \frac{J_{G1}}{i_1^2} + \frac{J_{P2}}{i_1^2} + \frac{J_{G2}}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \frac{J_D}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \frac{J_{WSred}}{i_1^2 \cdot i_2^2}, \quad (4.6)$$

где J_{P1} , J_{G1} – момент инерции шестерни и зубчатого колеса быстроходной ступени;

J_{P2} , J_{G2} – момент инерции шестерни и зубчатого колеса тихоходной ступени;

i_1 , i_2 – передаточное отношение быстроходной и тихоходной ступени соответственно.

Передаточные числа, так же как и моменты инерции колес редуктора, ротора двигателя (при изменении активной длины машины) являются переменными величинами и определяются для каждого выбранного варианта передаточного отношения.

Распределение вариантов приведенного к валу ротора двигателя момента инерции редукторов (без учета валов) с оптимизированными параметрами зацепления, показанных на рисунке 4.6, с учетом переменной величины модуля зацепления, представлено на рисунке 4.10.

Снижение вращающихся масс также может стать критерием оптимизации при условии важности быстродействия системы. В этом случае для облака вариантов двухступенчатого редуктора (см. рисунок 4.6) определяются соответствующие варианты приведенного момента инерции, и определяются передаточные отношения, при которых приведенный момент инерции минимален.

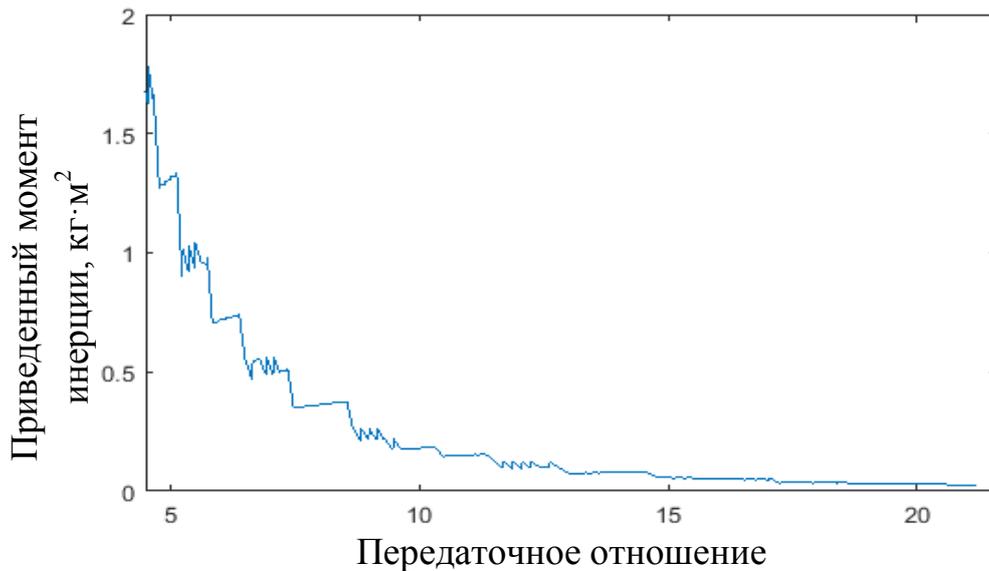
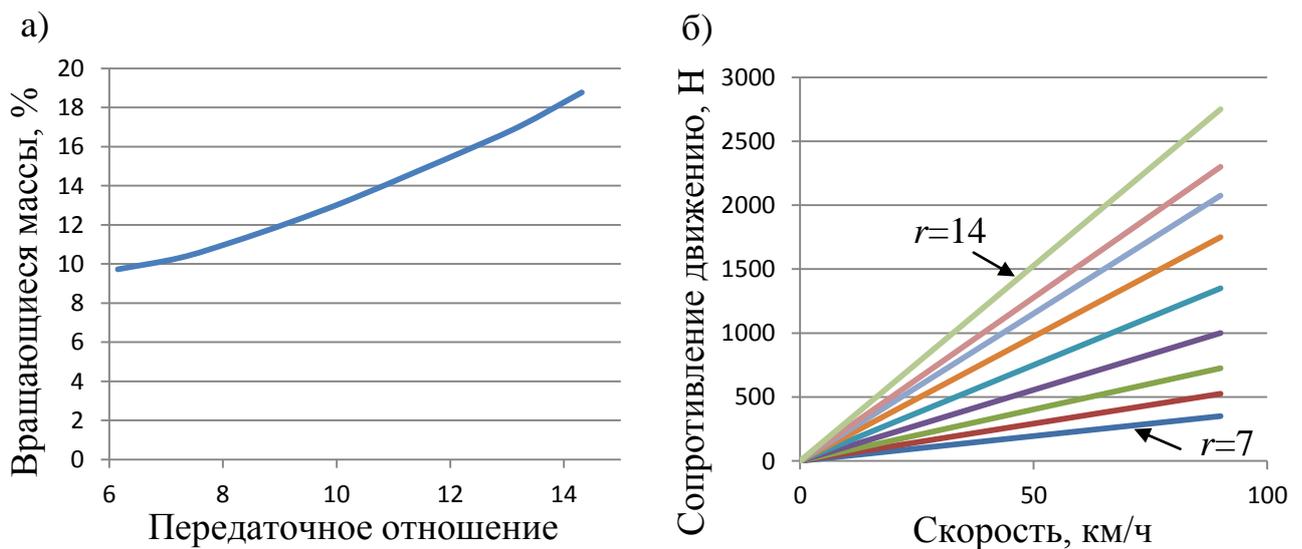


Рисунок 4.10 – Приведенный момент инерции двухступенчатого редуктора

Для нужд тяговых расчетов (коэффициенты (2.1) и (2.2)) рассчитывается величина вращающихся масс в зависимости от порожней массы состава. На рисунке 4.11 а) приведена зависимость величины вращающихся масс от передаточного отношения (r) при одной и той же длине активной части ротора АД, а также изменение потерь на трение вентилятора при росте передаточного отношения редуктора для самовентилируемой машины (рисунок 4.11 б).



а) к изменению вращающихся масс (например, при активной длине $l_{Fe} = 180$ мм);

б) к изменению потерь на трение вентилятора ($l_{Fe} = 180$ мм)

Рисунок 4.11 – К изменению величины передаточного отношения редуктора

4.3 Оптимизация конструктивных параметров двигателя и преобразователя по критерию энергоэффективности

4.3.1 Учет температурного состояния обмотки двигателя

При рассмотрении машин с самовентиляцией, использование различных передаточных чисел редуктора приводит к отличным максимальным угловым скоростям вращения вентилятора, что сказывается на эффективности охлаждения и, соответственно, на температуре машины. Эффективность охлаждения машины зависит как от величины падения давления, так и от величины воздушного потока, создаваемого вентилятором двигателя. Изменение величины падения давления в зависимости от создаваемого воздушного потока в общем виде приведено на рисунке 4.12.

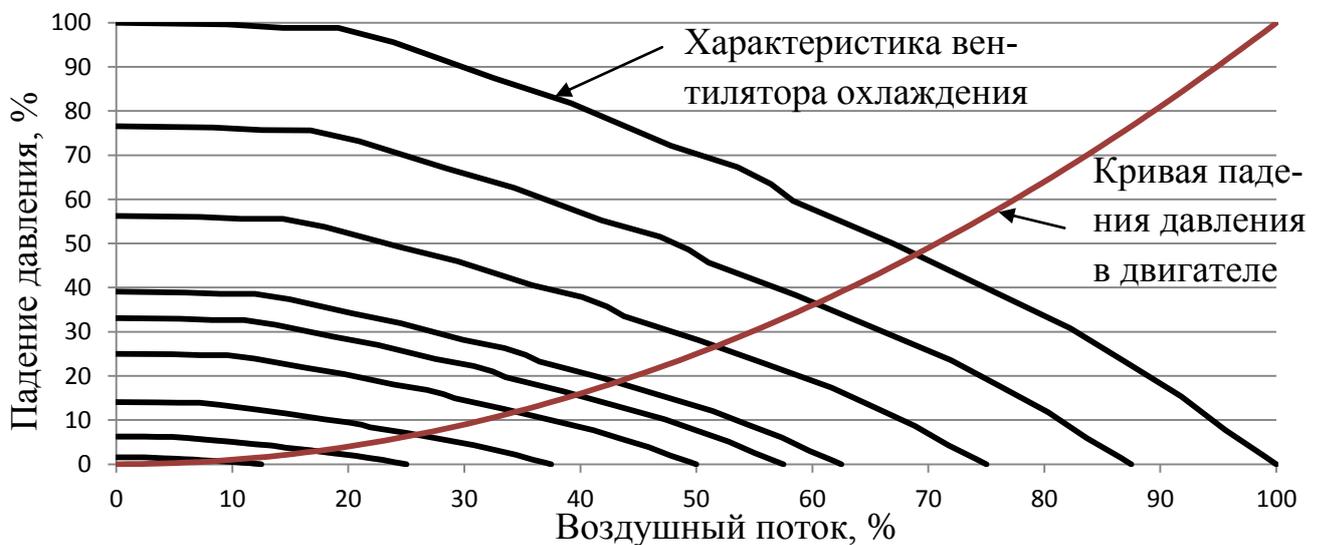


Рисунок 4.12 – Характеристика вентилятора двигателя

Повышение максимальной частоты вращения при неизменной геометрии машины увеличит значение воздушного потока и падение давления внутри машины, что приведет к более эффективному охлаждению и наоборот. Известно, что реалистичный режим работы характеризуется эксплуатационными точками (см. рисунок 4.3) с высокой и низкой угловой скоростью вентилятора, что говорит о

непостоянности эффективности охлаждения. Стоит заметить, что неизменная интенсивность охлаждения и режим работы приводят к различным температурным распределениям в обмотках (рисунок 4.13), зависящих от параметров машины.

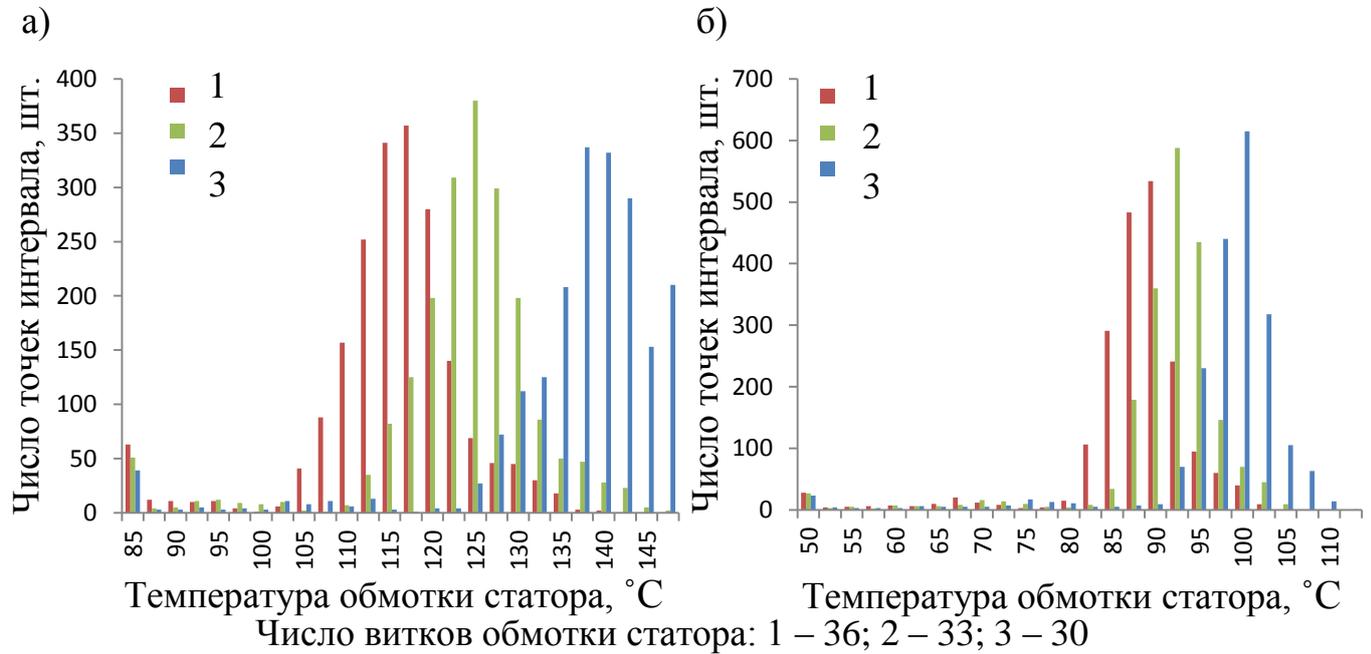


Рисунок 4.13 – Гистограммы распределения температур в реалистичном режиме работы при длине активной части $l_{Fe}=130$ мм (а), при длине активной части $l_{Fe}=180$ мм (б)

Из анализа температур двигателя в реалистичном режиме работы (см. рисунок 4.13) видно, что рост числа витков и длины активной части позитивно сказывается на температурном распределении обмоток и всей машины, сдвигаясь в область более низких значений.

Важно (таблица 4.3) при расчете значений энергопотребления учитывать температуру обмоток в режиме работы, поскольку, как известно, это приводит к изменению активного сопротивления фаз обмотки машины и ее выходных характеристик [3].

$$R_i = R_{i0}(1 + \alpha_i(T_i - 20)), \quad (4.7)$$

где R_i – активное сопротивление i -ой обмотки;

R_{i0} – активное сопротивление i -ой обмотки статора или ротора при температуре 20 °С;

α_i – коэффициент температурного сопротивления;

T_i – температура обмотки;

i – обмотка статора или ротора.

Учет изменения температуры в режиме работы может быть выполнен итерационными методами.

Таблица 4.3 – Изменение энергопотребления приводами с учетом температурного состояния обмоток двигателя на примере конфигурации 1С4М

Параметр	Длина активной части двигателя, мм					
	130	140	150	160	170	180
Средняя температура обмотки статора, °С	91					
Энергопотребление без учета температуры АД в режиме работы, %	104,5	102,5	101,2	100,0	99,2	98,5
Средняя температура обмотки статора, °С	114	105	99	94	90	87
Энергопотребление с учетом температуры АД в режиме работы, %	105,7	103,2	101,5	100,0	99,0	98,2

Согласно таблице 4.3 значения энергопотребления являются завышенными при отсутствии учета температурного состояния обмоток для более длинных исполнений машины и наоборот. Разница значений энергопотребления максимальна при минимальной рассматриваемой длине активной части ротора и достигает 1,2 %.

Высокие температуры обмотки, проявляющиеся при реалистичном режиме работы и низких максимальных частотах вращения, не позволяют следовать требованиям достаточности жизненного цикла машины. В связи с этим варианты привода с высокой температурой обмотки не могут быть рассмотрены далее. По результатам расчетов жизненного цикла (см. главу 3.2.2), обмоток, средняя тем-

пература которых выше 151 °С (таблица 4.4) в реалистичном режиме работы, не соответствуют критерию достаточности жизненного цикла.

Таблица 4.4 – Изменение средней температуры обмотки статора (°С) в зависимости от передаточного числа и параметров машины при частоте модуляции 500 Гц

Передаточное отношение редуктора	Число витков обмотки статора, единиц	Активная длина двигателя, мм					
		130	140	150	160	170	180
14,3	30	104	97	91	87	83	80
	33*	96	90	85	82	79	76
	36	91	86	–	–	–	–
13,2	30	114	106	99	94	91	90
	33*	105	98	92	88	85	82
	36	99	93	88	85	82	79
12,3	30	124	114	106	100	95	92
	33*	113	105	98	93	89	86
	36	106	99	93	89	86	83
11,5	30	135	123	114	107	101	97
	33*	122	112	105	99	94	91
	36	114	105	99	94	90	87
	42	106	–	–	–	–	–
10,2	30	160	148	138	126	118	112
	33*	149	134	124	115	109	104
	36	137	124	115	108	103	98
	42	124	115	108	–	–	–
9,1	30	202	180	164	150	139	130
	33*	175	162	147	135	127	119
	36	167	148	136	126	119	112
	42	147	134	125	117	112	107
8,1	33*	215	195	176	159	146	137
	36	205	180	161	147	137	129
	42	180	160	146	136	128	121
	48	171	156	145	–	–	–
7,2	36	244	213	187	169	156	145
	42	221	193	172	158	147	138
	48	211	187	171	158	150	142

* – при большем числе параллельных ветвей.

Следует иметь в виду, что варианты привода с повышенной средней температурой обмотки при работе в режиме граничной эксплуатации определенно выйдут за пределы температурного класса, что значительно увеличит темпы старения изоляции.

Проводимый учет температурной нестабильности обмоток помогает оценить влияние изменения сопротивления на уровень общих потерь машины, ее КПД и т.д. В дальнейшем все значения эффективности привода приводятся с учетом температурного состояния обмотки статора и ротора.

4.3.2 Оптимизация конструктивных параметров асинхронного двигателя

Распределение потока энергии поезда представлено на рисунке 4.14. Здесь энергия контактной сети W_{line} расходуется в режиме тяги на потери привода: в редукторе W_{Gear} , в двигателе W_{Motor} , в промежуточном звене инвертора W_{DClink} и в самом инверторе W_{inv} , а также на вспомогательные нужды W_{Aux} . В режиме торможения энергия тратится на покрытие потерь привода, а также собственные нужды W_{Aux} , но только в том случае, если имеется такая потребность. Кроме того, рекуперированная энергия возвращается в сеть при наличии потребителей, либо сжигается на реостатах. Отдельно рассматривается потеря энергии на преодоление сопротивления движения, которая зависит как от геометрических параметров двигателя, так и редуктора.

Предложенная схема работы является достаточно сложной в реализации и требует для расчета наличия циклограмм включения/выключения вспомогательного оборудования, а также учета наличия/отсутствия потребителей энергии при движении поезда по участку пути (в случае учета потерь в контактной сети в зависимости от удаленности поезда от питающего фидера).

Для упрощения поставленной задачи энергопотребление поезда рассматривается на уровне привода, без учета расхода энергии на вспомогательные нужды. Степень рекуперации рассматриваемой системы при этом составляет 100 %.



Рисунок 4.14 – Круговая диаграмма распределения энергии ЭПС

В связи с тем, что оценивается не полный расход энергии поезда, а лишь та ее часть, приходящаяся на привод, уместно будет использовать процентное выражение энергопотребления привода поезда при изменении его конструктивных параметров. В этих условиях распределение потерь энергии в компонентах тягового привода, например, с числом витков обмотки статора, равном 30 и передаточном отношении редуктора, равным 13,3, но при различной активной длине, представлено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Распределение потерь энергии в приводе при различной активной длине машины в реалистичном режиме работы

Параметр	Активная длина двигателя, мм					
	130	140	150	160	170	180
1	2	3	4	5	6	7
Потери в режиме тяги (%) в:						
редукторе	7,8	7,9	7,9	7,9	8,0	8,0
двигателе	37,6	36,1	34,7	33,6	33,0	32,2
входном дросселе	47,0	47,1	47,1	47,2	47,4	47,6
инверторе	7,6	7,3	6,9	6,6	6,4	6,2

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6	7
Потери в режиме рекуперации (%) в:						
редукторе	10,6	10,7	10,8	10,8	10,9	10,9
двигателе	51,9	49,3	46,8	44,8	43,4	42,2
входном дросселе	27,9	28,4	28,9	29,3	29,8	30,1
инверторе	9,6	8,7	8,1	7,6	7,2	6,9

Параметры привода, используемые для построения таблицы 4.5, определяют уровень потерь привода, основная часть которых приходится как на входной дроссель, так и на двигатель. Высокие потери во входном дросселе обусловлены требованиями технического задания по снижению помех в контактном проводе и могут быть изменены. Стоит отметить, что задача выбора параметров сетевого фильтра не ставилась, поскольку его параметры сильно зависят от конкретного технического задания. Учитывая постоянство активного сопротивления дросселя, величина общих потерь будет зависеть от параметров асинхронного двигателя и редуктора.

Для определения энергопотребления привода, зная конкретные эксплуатационные точки (см. рисунок 4.3), необходимо воспользоваться картой эффективности привода. Карта является обобщенной эффективностью как редуктора, так и двигателя, инвертора и сетевого фильтра с учетом сопротивления движению для различных скоростей движения в пределах тяговой и тормозной характеристик. Использование алгоритма (см. рисунок 4.1) позволяет получить значение эффективности каждого из компонентов привода при возможных работоспособных вариантах синтеза АД и редуктора. Карта эффективности двигателя в режиме тяги представлена на рисунке 4.15 и в режиме рекуперации на рисунке 4.16.

Одним из способов повышения эффективности вагонов метро является использование реалистичного режима работы привода в процессе проектирования поезда, поскольку только так возможно сопоставить частые эксплуатационные точки с областью, в которой наблюдается наивысшая эффективность привода поезда.

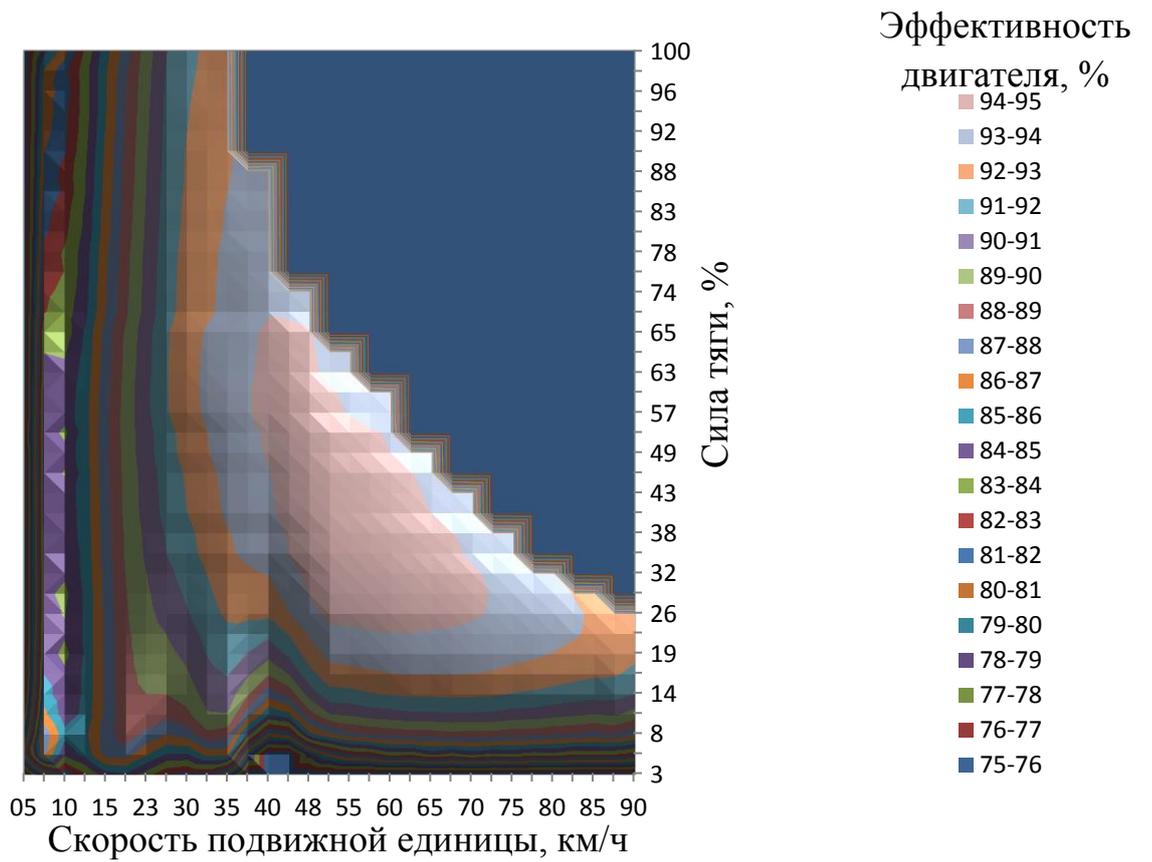


Рисунок 4.15 – Карта эффективности двигателя в режиме тяги

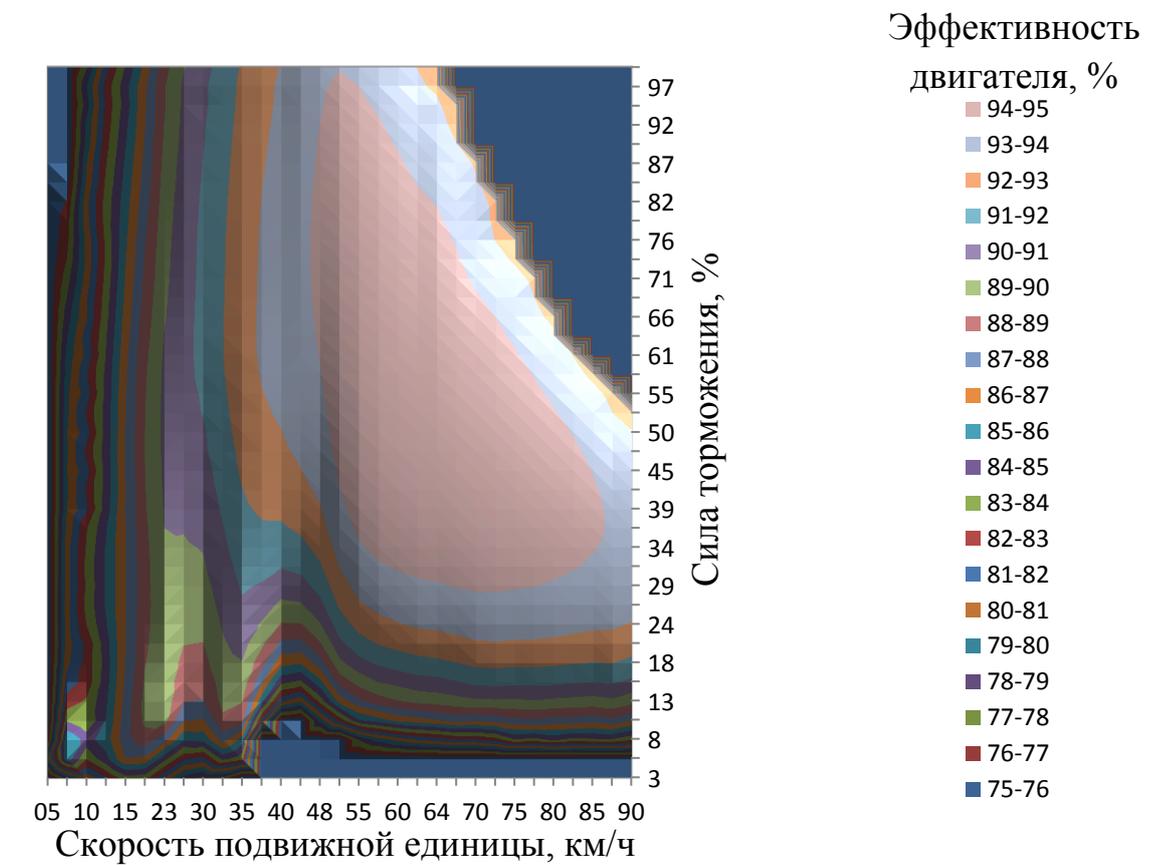


Рисунок 4.16 – Карта эффективности двигателя в режиме рекуперации

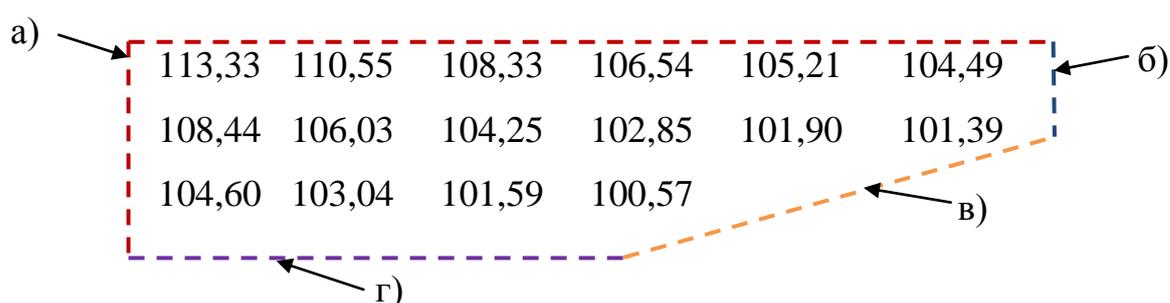
При проектировании привода с одной величиной передаточного отношения редуктора (таблица 4.6) необходимо ввести понятие блокирующего контура двигателя. Принимая в учет ограничения, накладываемые техническим заданием, внешний вид контура будет выглядеть как на рисунке 4.17. Блокирующим контуром в данном случае является ограничение параметрического характера, при котором в дальнейшем невозможно изменение параметров двигателя привода ввиду достижения предельных значений ограничений, накладываемых при проектировании.

Стоит заметить, что расчетные значения эффективности привода отличаются от экспериментальных не более чем на 7 % (Приложение Б).

Таблица 4.6 – Различие в энергопотреблении поезда при параметрах привода с постоянным значением передаточного числа, равным 13,2

В процентах

Число витков обмотки статора, единиц	Активная длина ротора, мм					
	130	140	150	160	170	180
30	113,33	110,55	108,33	106,54	105,21	104,49
33	108,44	106,03	104,25	102,85	101,90	101,39
36	104,60	103,04	101,59	100,57	–	–



Ограничение: а) по жизненному циклу инвертора; б) по габаритам двигателя;
в) по опрокидывающему моменту; г) по плотности тока

Рисунок 4.17 – Блокирующий контур двигателя при параметрах привода с постоянным значением передаточного числа (значения в процентах)

Изменение эффективности привода при различных передаточных числах редуктора и частоте модуляции инвертора 500 Гц представлено в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Относительная эффективность привода (%) при различных передаточных числах редуктора и 500 Гц частоты модуляции инвертора

Передаточное отношение редуктора	Число витков обмотки статора, единиц	Активная длина двигателя, мм					
		130	140	150	160	170	180
14,3	30	112,42	110,14	108,28	106,74	105,75	105,01
	33*	108,06	106,07	104,55	103,41	102,75	102,25
	36	104,63	103,44	–	–	–	–
13,2	30	113,33	110,55	108,33	106,54	105,21	104,49
	33*	108,44	106,03	104,25	102,85	101,90	101,39
	36	104,60	103,04	101,59	100,57	–	–
12,3	30	116,35	112,67	110,29	108,19	106,67	105,78
	33*	110,74	107,71	105,82	104,15	103,04	102,38
	36	106,21	104,35	102,88	101,56	100,76	100,31
11,5	30	118,98	114,63	111,76	109,30	107,53	106,12
	33*	112,26	109,00	106,71	104,82	103,48	102,36
	36	107,84	105,21	103,38	101,86	100,88	100,00
	42	103,11	–	–	–	–	–
10,2	30	119,07	119,19	115,77	112,48	109,99	108,08
	33*	117,41	112,68	109,56	106,94	105,11	103,64
	36	111,88	107,87	105,35	103,28	101,86	100,67
	42	105,27	102,72	101,07	–	–	–
9,1	30	134,56	127,27	122,28	118,13	115,15	112,26
	33*	124,18	119,18	115,26	111,69	109,24	107,05
	36	118,89	113,62	110,12	107,18	105,26	103,51
	42	110,56	106,84	104,43	102,42	101,25	100,05
8,1	33*	132,67	125,54	119,98	115,42	112,28	109,50
	36	126,12	119,10	114,32	110,68	108,03	105,82
	42	116,74	111,55	107,93	105,13	103,30	101,66
	48	112,65	108,81	106,10	–	–	–

* – при большем числе параллельных ветвей.

Распределение энергоэффективности в зависимости от параметров машины для любого из преобразователей не дает четкого представления о наилучшем выборе ее параметров. Для решения этой проблемы был введен особый коэффициент относительного объема машины k_{Mref} [84], полученный путем перемножения

отдельных параметров привода. Значение k_{Mref} позволяет оценить изменение жизненного цикла в зависимости от параметров машины.

$$k_{Mref} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot r \cdot D^2 \cdot l_{Fe} \cdot B_{\delta}, \text{ мм}^3 \cdot \text{Вб}, \quad (4.8)$$

где N – число витков обмотки статора;

D – диаметр ротора;

r – передаточное отношение;

B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Коэффициент относительного объема был определен статистически, путем наилучшего соотношения коррелируемых параметров привода с жизненным циклом инвертора.

На рисунке 4.18 представлено распределение энергоэффективности привода при различных его параметрах и конфигурации 1С4М при частоте модуляции инвертора 500 Гц.

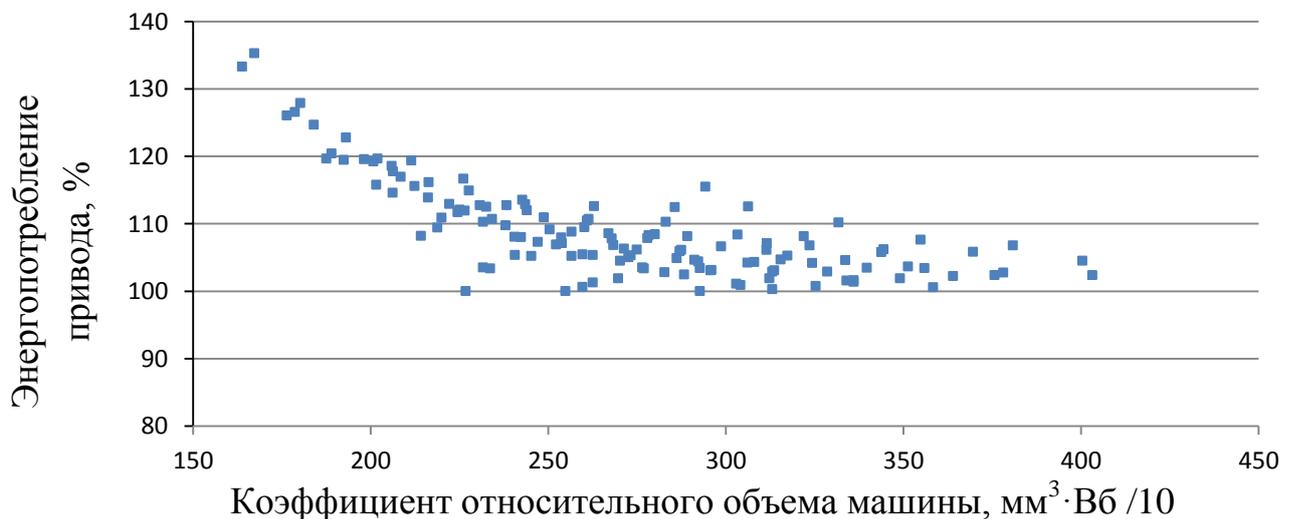


Рисунок 4.18 – Распределение энергопотребления привода при различных его параметрах

Из рисунка 4.18 следует, что энергопотребление снижается при росте коэффициента относительного объема машины и, достигнув минимума, остается неизменным при дальнейшем росте k_{Mref} при отдельных параметрах привода.

Рассмотренные параметры АД и редуктора, соответственно, изменяют срок службы преобразователя. Значения жизненного цикла преобразователя INV105 при различных передаточных числах редуктора и частоте модуляции инвертора 500 Гц представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Изменение жизненного цикла (лет) преобразователя INV105 при различных передаточных числах редуктора и модуляции инвертора 500 Гц

Передаточное отношение редуктора	Число витков обмотки статора, единиц	Активная длина двигателя, мм					
		130	140	150	160	170	180
14,3	30	39,8	52,2	66,5	83,0	97,5	108,0
	33*	56,2	83,3	102,0	118,0	131,0	138,0
	36	95,2	111,0	–	–	–	–
13,2	30	30,9	40,8	53,6	68,7	82,6	93,7
	33*	45,6	69,6	87,7	104,0	120,0	128,0
	36	81,9	101,0	118,0	132,0	144,0	149,0
12,3	30	24,2	32,1	42,8	54,1	68,1	79,5
	33*	36,3	55,3	71,4	87,1	104,0	113,0
	36	68,3	85,7	103,0	120,0	133,0	144,0
11,5	30	15,3	25,1	32,8	42,8	53,8	64,2
	33*	29,4	43,5	57,0	70,5	86,6	98,6
	36	53,0	68,7	85,0	104,0	118,0	130,0
	42	99,3	–	–	–	–	–
10,2	30	6,9	11,6	18,9	27,9	34,9	42,4
	33*	18,0	28,2	37,1	47,9	59,2	69,6
	36	34,2	44,9	58,7	73,6	90,0	102,0
	42	73,3	90,7	107,0	–	–	–
9,1	30	3,0	5,1	8,3	13,6	21,1	28,7
	33*	6,2	13,4	22,7	31,6	39,7	47,2
	36	18,7	30,1	39,3	50,0	61,5	71,4
	42	49,5	64,2	79,7	95,1	110,0	120,0
8,1	33*	2,2	5,4	9,1	15,0	23,6	30,8
	36	6,8	12,6	22,0	32,6	40,2	46,8
	42	31,0	41,2	51,9	65,4	78,1	86,7
	48	55,9	68,4	85,0	–	–	–

* – при большем числе параллельных ветвей.

При рассмотрении жизненного цикла преобразователя четко становится видно, что его рост сильно зависит от выбираемых параметров привода, описанных в (4.8) при неизменной геометрии магнитной части машины и ее диаметра. Причем большему значению длины машины и передаточного числа соответствует большая величина продолжительности работы инвертора (рисунок 4.19). Кроме того, рост числа витков обмотки также способствует повышению рассматриваемого показателя k_{Mref} [84].

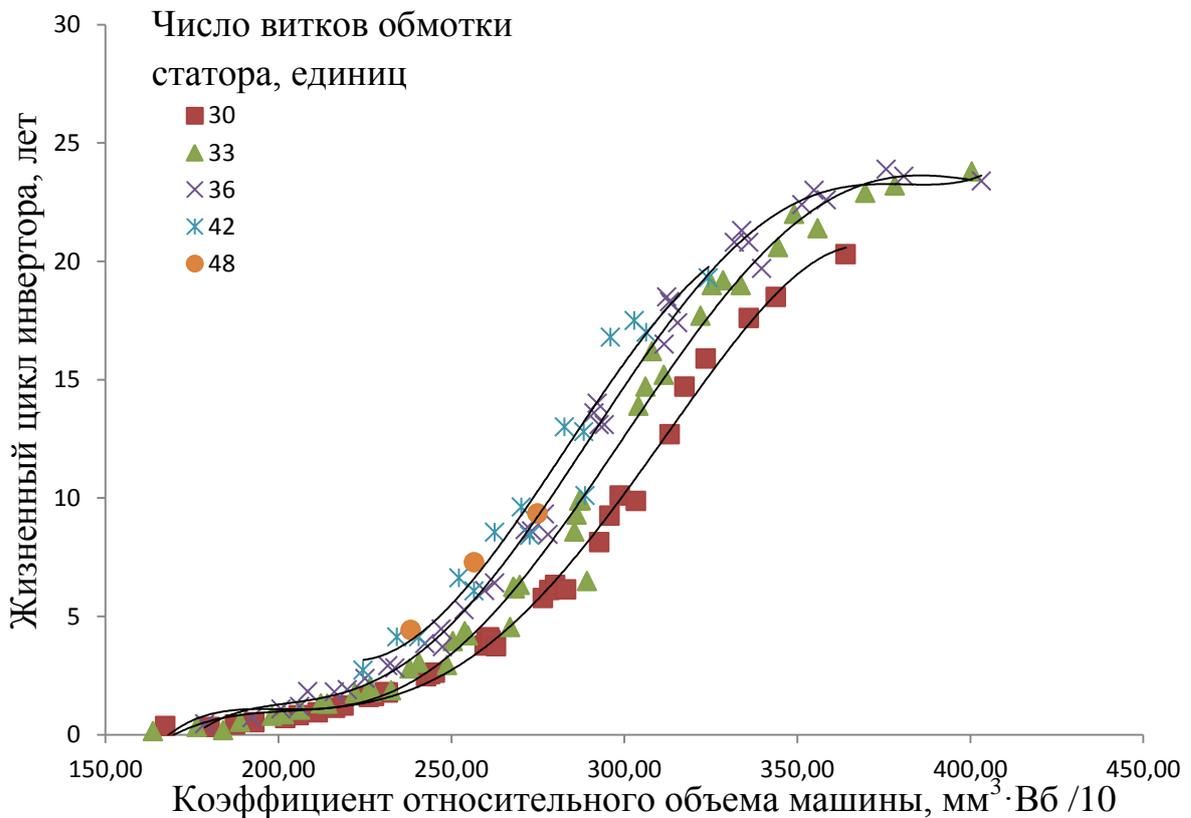


Рисунок 4.19 – Зависимость жизненного цикла инвертора INV101 от относительного коэффициента машины

Из рисунка 4.19 видно, что при больших значениях коэффициента относительного объема наблюдается эффект насыщения продолжительности жизненного цикла инвертора, что объясняется его максимальной способностью выдерживать термические колебания при рассматриваемом режиме работы. Такой подход будет интересен при сравнении приводов, имеющих одинаковую геометрию магнитной части, но различные конструктивные параметры, а также при оценке продолжительности работы инверторов.

Степень использования материалов машины и ее габаритные размеры могут быть определены через магнитную индукцию в воздушном зазоре B_δ и линейную токовую нагрузку A_α . Для этих целей в машинах постоянного и переменного тока используется величина машинной постоянной Арнольда C_A [12].

$$C_A = \frac{n \cdot D^2 \cdot l_{Fe}}{P_{el.t}} = \frac{1}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A_\alpha}, \quad (4.9)$$

где n – частота вращения ротора;

α_δ – коэффициент полюсной дуги.

Для проверки предположения о возможности использования настоящего коэффициента (4.8) были взяты четырехполюсные АД с параметрами обмотки, подходящими к используемой тяговой характеристике. Их основные данные, собственно как и оптимизируемого двигателя, указаны в таблице 4.9. В результате сравнение двигателей, имеющих различные исполнения магнитной части и величины диаметров, возможно с помощью выражения (4.8) и представлено на рисунке 4.20.

Таблица 4.9 – Параметры асинхронных двигателей по отношению к базовому

АД	Число витков, единиц	Передаточное число, единиц	Диаметр ротора, %	Длина активной части, мм	Индукция в воздушном зазоре*, %
1 (базовый)	30...48	8...14	100	130...180	100
2	42...48	7...9	112	170	124
3	40...48	7,5	112	160	104
4	28...36	11...14	108	150...180	101
5	50...60	6...7	127	140	96

* – индукция при скорости подвижной единицы 5 км/ч

Машины, представленные в таблице 4.9, проверялись при соответствующих параметрах подвижной единицы, режимах работы и с одним инвертором INV101 с частотой модуляции 500 Гц.

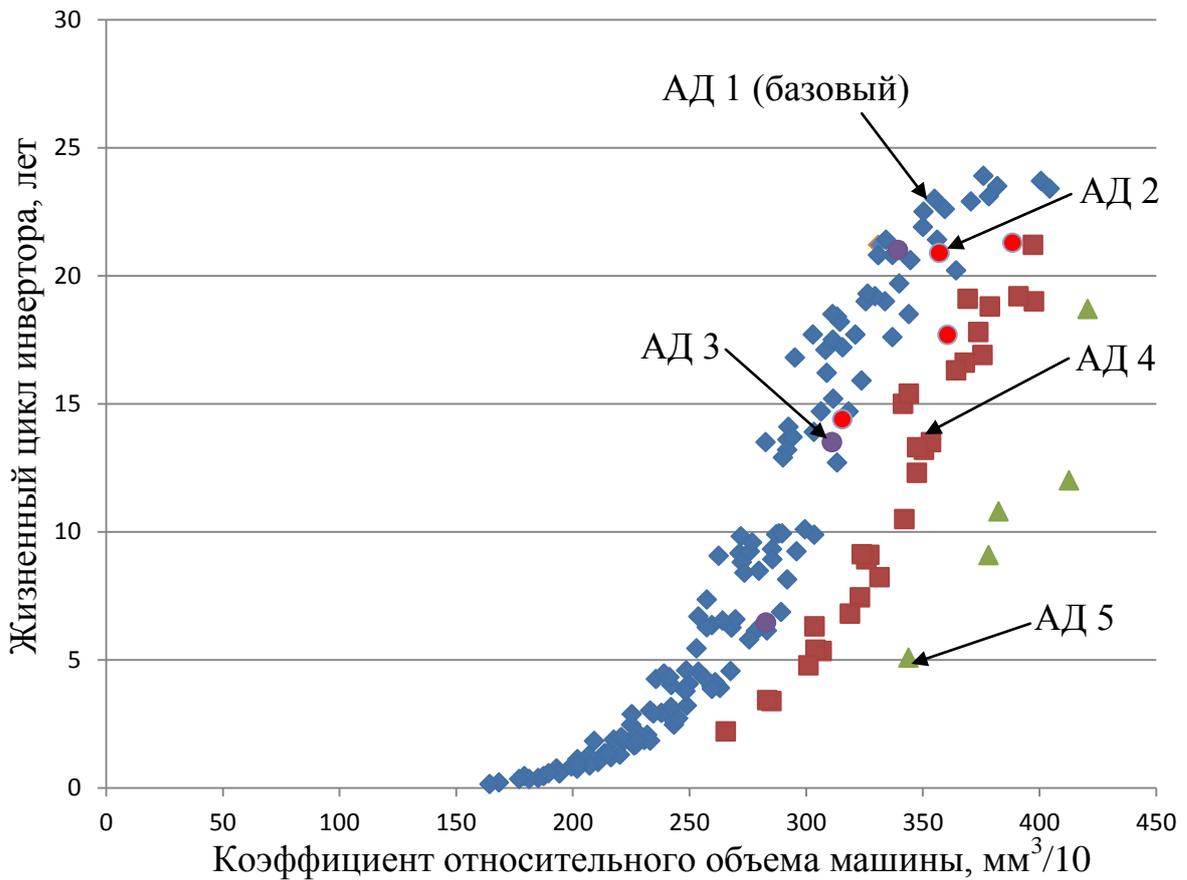


Рисунок 4.20 – Зависимость жизненного цикла инвертора от относительного коэффициента объема машин

Магнитный поток, являясь одной из переменных относительного коэффициента объема машины, позволяет изменять величину жизненного цикла преобразователя. Для инвертора INV101 при изменении только геометрии магнитной части машины эта зависимость показана на рисунке 4.21. Изменение в геометрии магнитной системы, позволяющее увеличить индукцию в воздушном зазоре без роста насыщения магнитопровода и зубцов, позволяет снизить как величину потребляемого тока статором, так и массу меди обмотки (рисунок 4.22).

Рисунок 4.21 показывает, что изменение жизненного цикла инвертора происходит непропорционально изменению потока машины B_δ . При больших значениях B_δ температура обмоток возрастает, что приводит к недостаточности жизненного цикла двигателя.

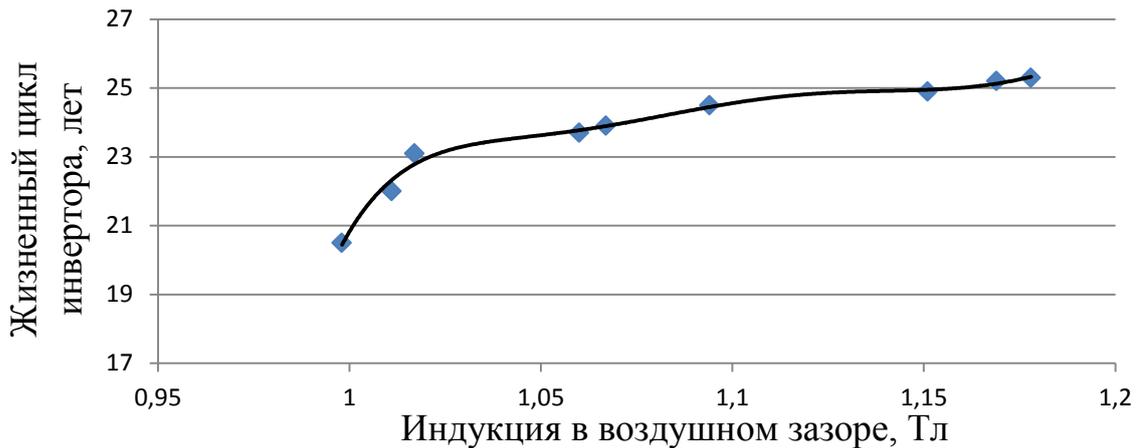


Рисунок 4.21 – Изменение жизненного цикла инвертора INV101 в зависимости от индукции в воздушном зазоре машины

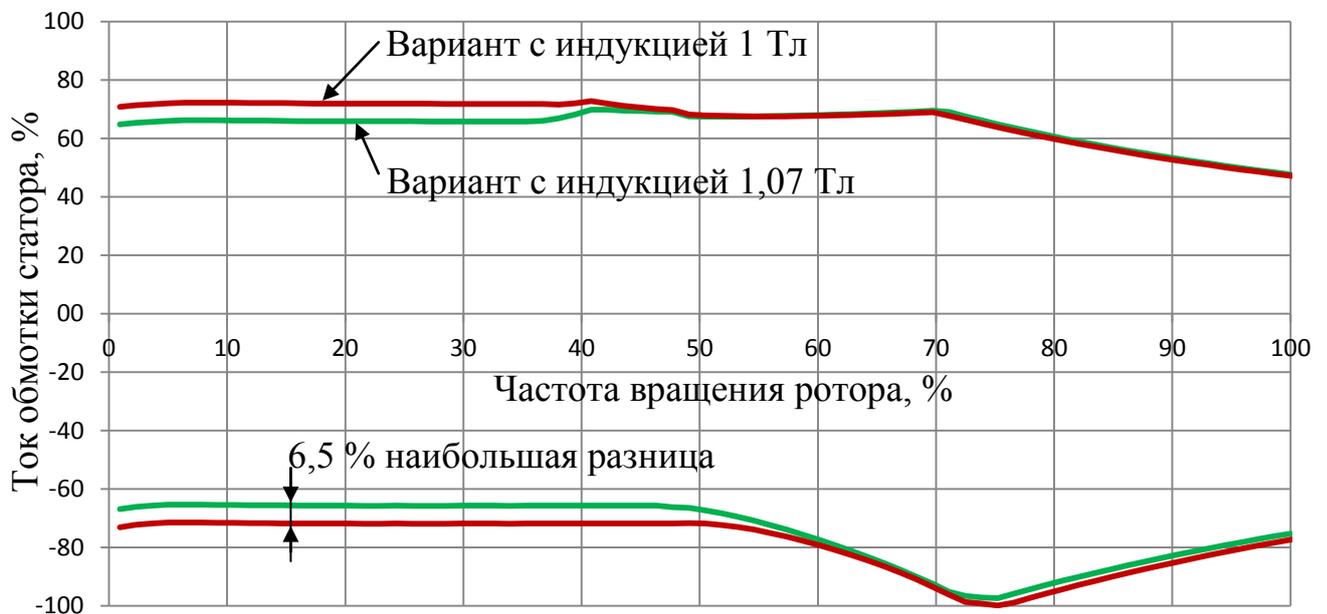


Рисунок 4.22 – Изменение тока статора машины в зависимости от частоты вращения ротора при различной индукции в воздушном зазоре

При работе привода с отличными от INV101 преобразователями с соответствующей конфигурацией (см. таблицу 4.1) при той же тяговой характеристике, том же режиме работы поезда и меняющихся параметрах базового двигателя (см. таблицу 4.9) распределение жизненного цикла инверторов в зависимости от k_{Mref} описывается зависимостями, изображенными на рисунке 4.23. Максимальная частота модуляции на рисунке 4.23 во всех случаях составляет 500 Гц.

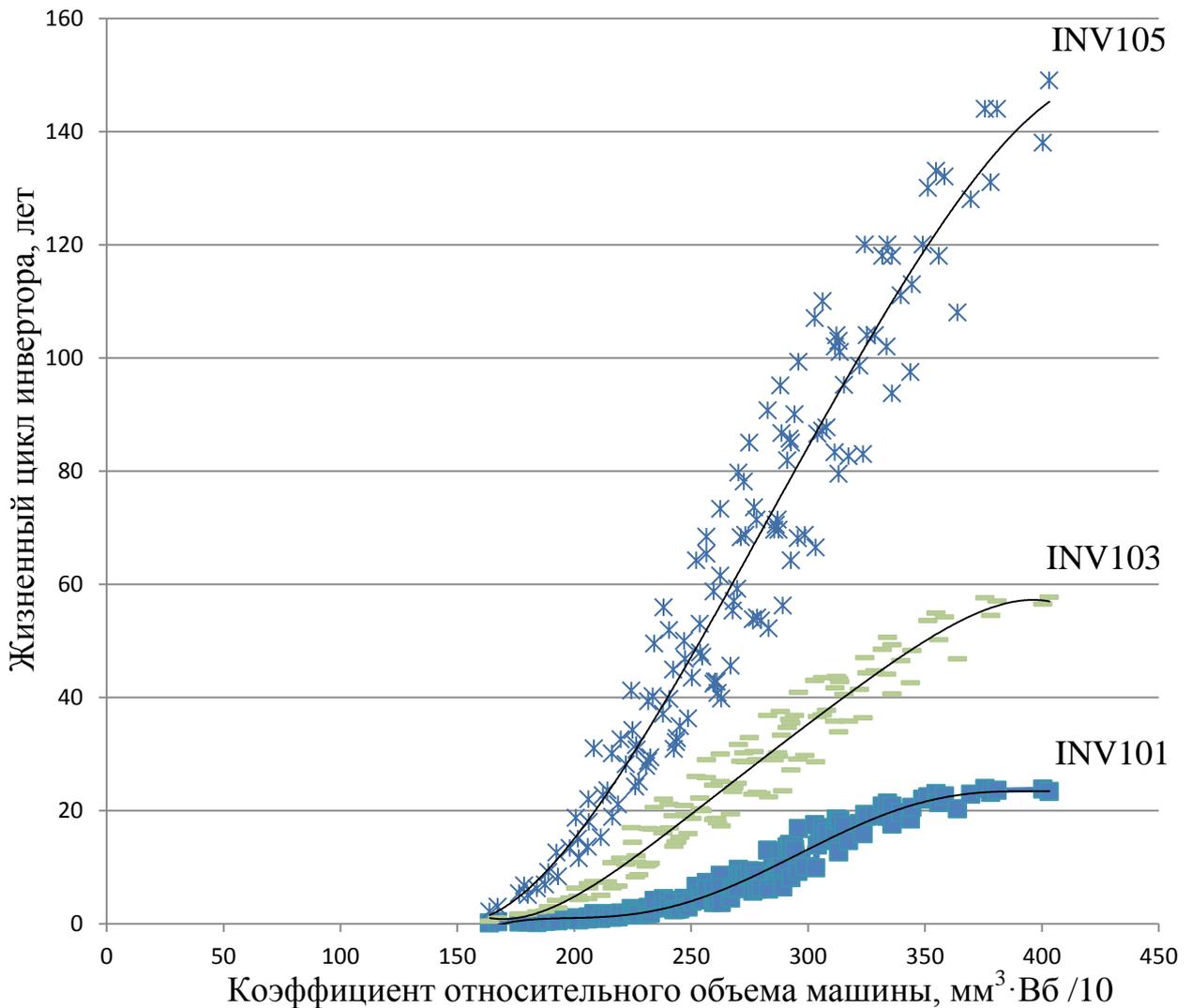


Рисунок 4.23 – Изменение жизненного цикла инверторов при росте относительного коэффициента объема машины

Из рисунка 4.23 видно, что, по меньшей мере, два инвертора (INV101 и INV103) приближаются к максимальной величине жизненного цикла при коэффициенте относительного объема 400 $\text{мм}^3 \cdot \text{Вб} / 10$. При этом стоит заметить, что их жизненный цикл достаточен и может удовлетворить большинство технических заданий. При постоянном коэффициенте относительного объема, особенно при увеличении требуемой мощности привода с выходом за пределы рассматриваемой тяговой характеристики, а также при увеличении частоты модуляции ключей инвертора и др. величины жизненного цикла будут уменьшаться, что потребует уже применения третьего варианта инвертора (INV105).

4.3.3 Оптимизация мощности привода

Изменения в режиме работы привода – постоянный процесс, при котором требуется приложение мощности, с одной стороны достаточной для выполнения работы, а с другой – минимальной, для соблюдения концепций по энергопотреблению [10]. В настоящее время известно, что многими иностранными фирмами предлагается использование отличного от максимального значения ускорения в отдельных режимах эксплуатации. Несомненно, такой подход позволяет снизить энергопотребление, но недостаточно, поскольку для создания силы тяги с требуемым ускорением используются районы эффективности на тяговой характеристике с отличными от максимальных значениями (рисунок 4.24).

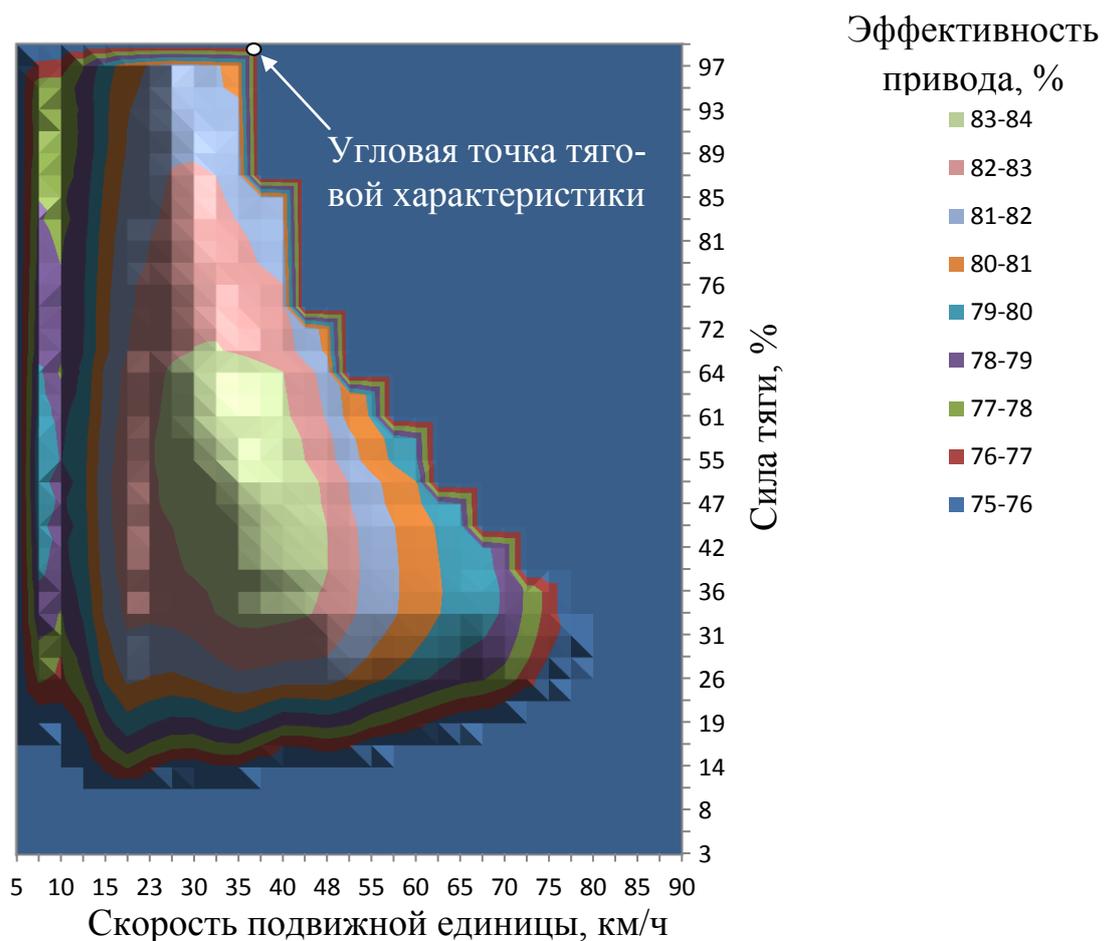


Рисунок 4.24 – Карта эффективности привода в режиме тяги

Для поиска способа управления, позволяющего проводить поезд по участку с максимальной эффективностью (с точки зрения подвижной единицы) необходимо рассматривать карты эффективности всего привода как в режиме тяги (см. рисунок 4.24), так и в режиме торможения (рисунок 4.25).

Представленная эффективность привода является суммарной эффективностью всех его компонентов: входного фильтра, инвертора, двигателя и редуктора. По сравнению с максимальной эффективностью двигателя, достигавшей почти 95 %, общая эффективность привода снизилась почти до 84 %.

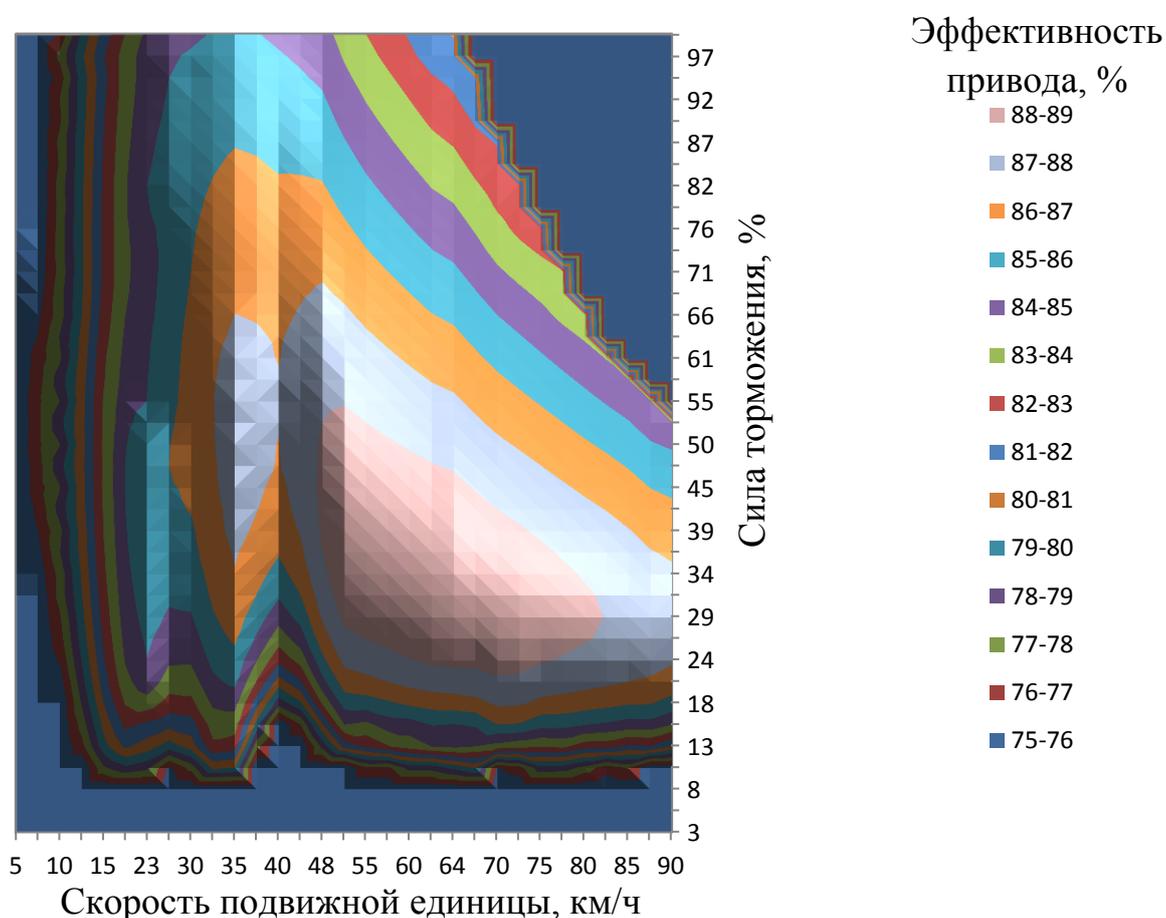


Рисунок 4.25 – Карта эффективности привода в режиме рекуперации

При использовании заданной максимальной тяговой характеристики обеспечивается возможность движения с максимальным требуемым ускорением. В реальных условиях эксплуатации движение с наибольшим ускорением зачастую требуется лишь в часы пик, все остальное время могут быть использованы отличные значения ускорения.

С одной стороны, описанный ранее способ снижения ускорения предполагает его уменьшение, но, вероятно, с поддержанием на постоянном уровне, что требует постоянного значения мощности и не максимальной эффективности. С другой стороны, возможно движение при непостоянном ускорении, но с наивысшей эффективностью привода поезда. Для этого угловая точка (см. рисунок 4.24) смещается в сторону более низких значений скоростей. На рисунке 4.26 показано изменение кривой скорости при движении на участке длиной 800 м в режиме вы бега при поддержании максимальной скорости (а) и при полном отсутствии тягового момента (б).

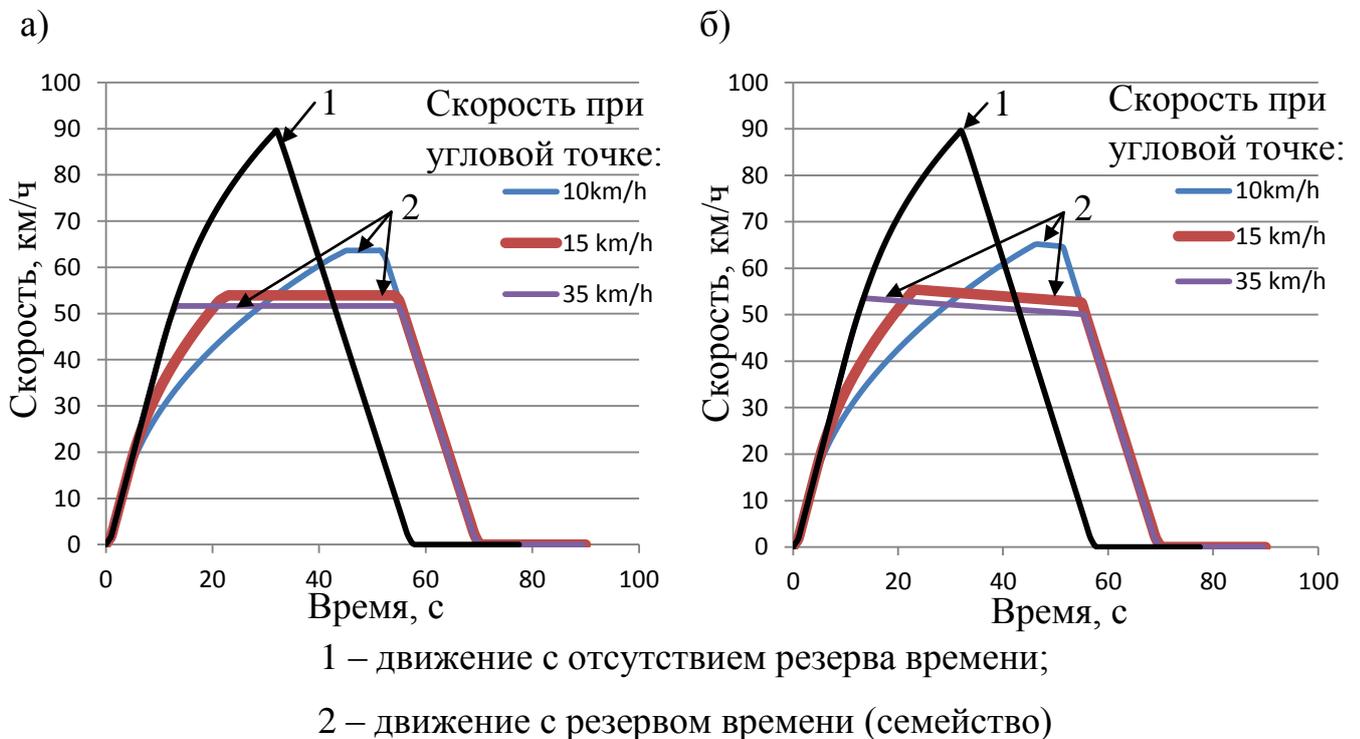
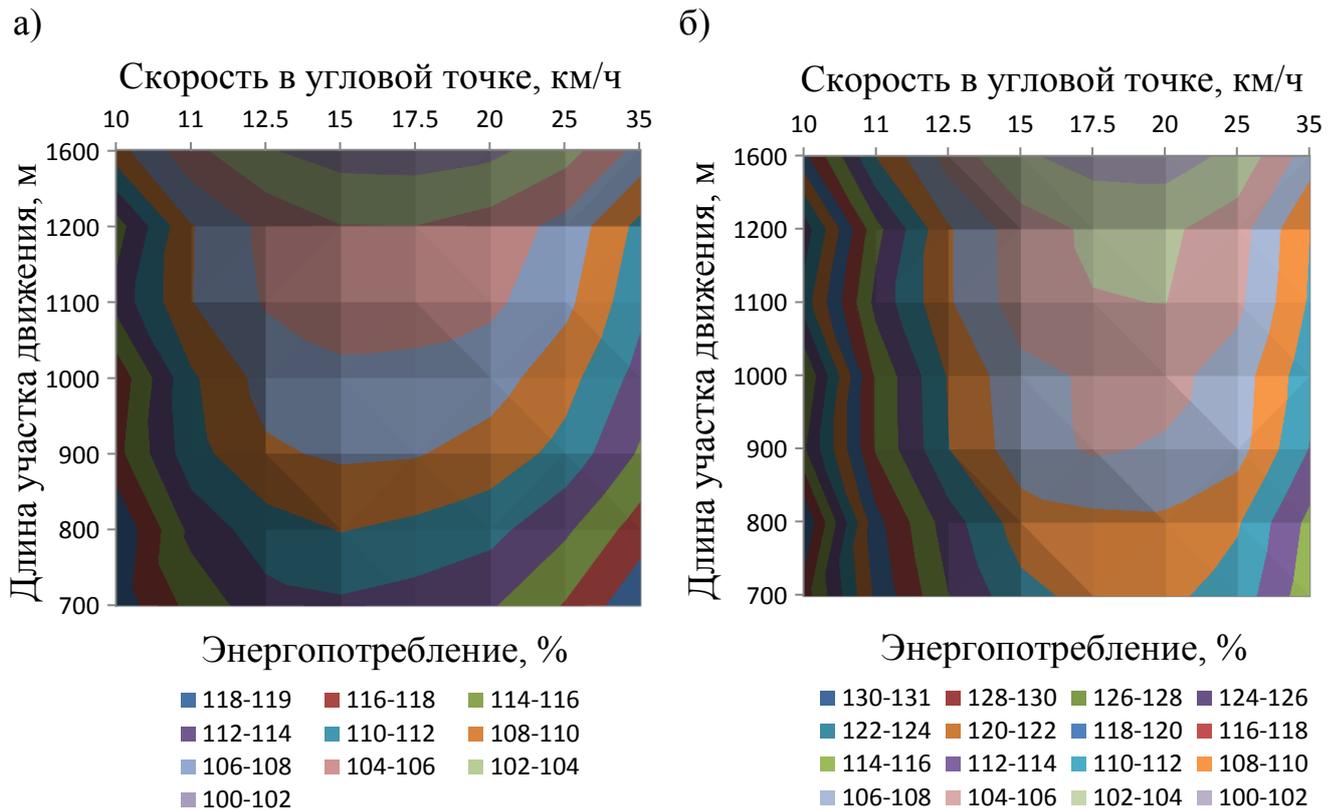


Рисунок 4.26 – Результат тягового расчета участка длиной 800 м при поддержании максимальной скорости (а), при полном отсутствии тягового момента (б)

Для значений силы тяги и скорости для различных длин участков была рассчитана эффективность привода. На рисунке 4.27 показано изменение эффективности привода при изменении скорости, соответствующей угловой точке в режиме тяги, а также на рисунке 4.28 в режиме торможения.



а) при постоянстве скорости в режиме выбега;

б) при отсутствии момента в режиме выбега

Рисунок 4.27 – Изменение эффективности привода в зависимости от положения угловой точки и длины участка в режиме тяги

Как можно заметить, изменяя скорость, соответствующую угловой точке тяговой характеристики в режиме тяги (см. рисунок 2.1), прибыть в точку назначения можно при любом способе ведения поезда за то же время. При этом ускорение изначально остается на прежнем уровне, и далее снижается по сравнению с первоначальным вариантом. Это приводит к тому, что поезду приходится набирать большую скорость при каждом изменении угловой точки, но при этом испытывая меньшие ускорения.

При снижении скорости, соответствующей угловой точке характеристики, можно высчитать такую мощность, которая соответствовала бы наивысшей эффективности всего привода.

Стоит обратить внимание, что для конкретного привода существует такая угловая точка характеристики, при которой наблюдается наивысшая эффективность привода как в режиме тяги, так и в режиме торможения. Отличие по срав-

нению с первоначальной характеристикой составляет до 5 % величины энергопотребления при движении в режиме тяги с постоянством скорости в режиме выбега. Нужно отметить, что в режиме торможения оптимальная угловая точка лежит в диапазоне скоростей, в то время как в режиме тяги она имеет экстремальный характер и может быть выражена одним значением скорости для конкретной длины участка и способа ведения поезда.

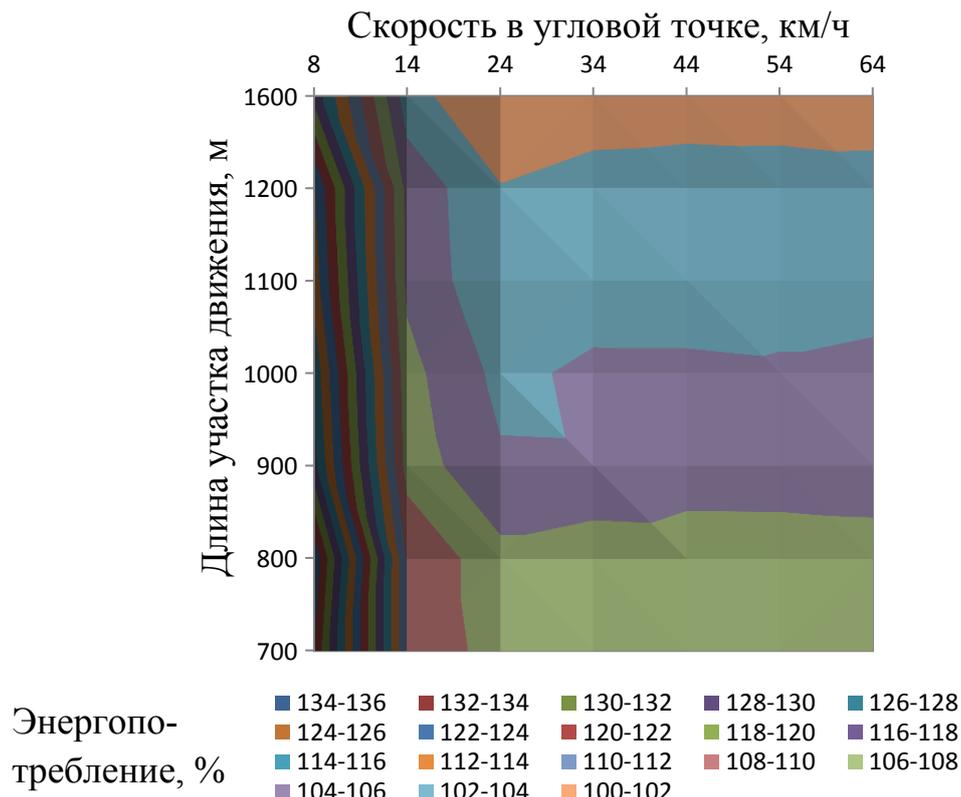
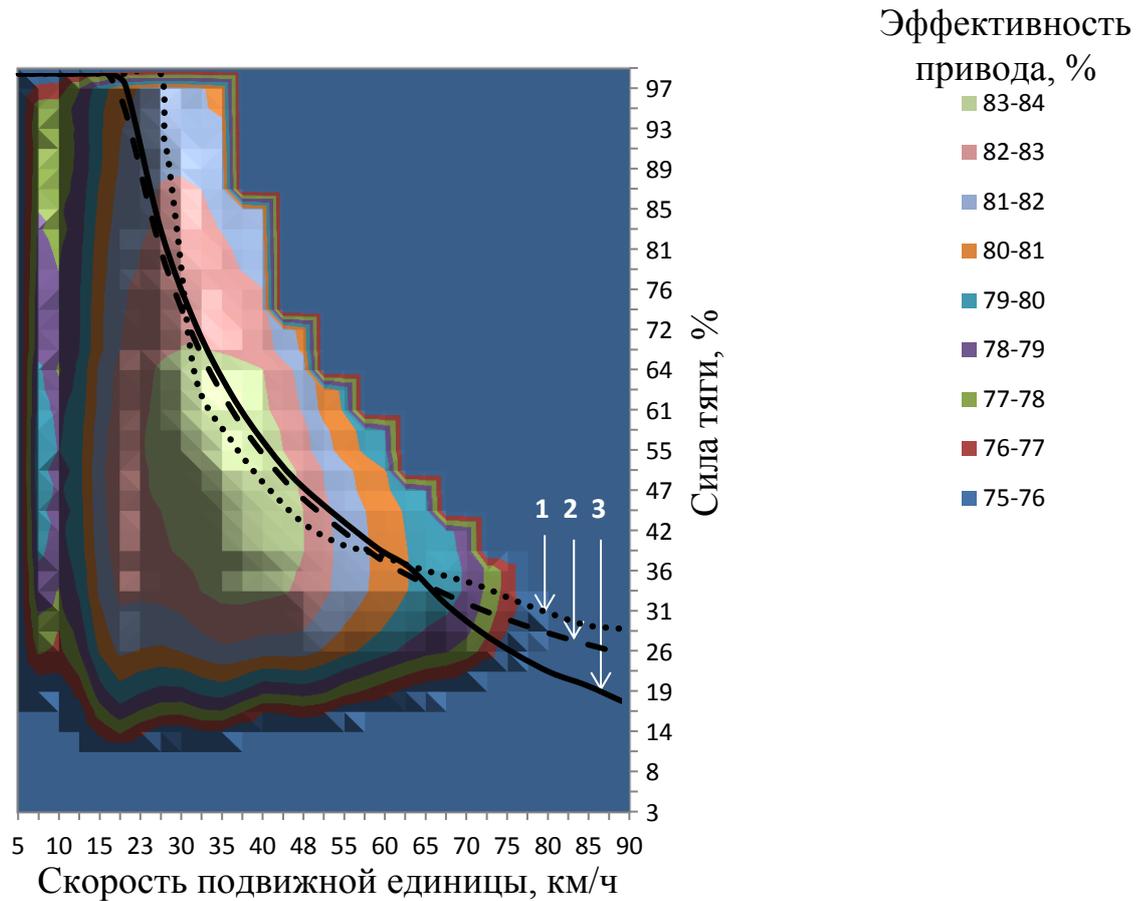


Рисунок 4.28 – Изменение эффективности привода в зависимости от положения угловой точки и длины участка в режиме торможения

Это означает, что в пределах существующей тяговой характеристики, имеется такая характеристика, при которой энергопотребление привода минимально. На рисунке 4.29 изображены кривые, проходящие через максимум эффективности привода в режиме тяги.

Использование оптимальных тяговых характеристик позволит в режимах с частичной нагрузкой на привод снизить величину энергопотребления до 5 % в зависимости от параметров двигателя и увеличить жизненный цикл инвертора (при условии циклического использования) до 210 % (максимальная величина). Внесение такого режима работы привода в жизненный цикл поезда позволит понизить

стоимость за счет использования инвертора с меньшей мощностью (см. рисунок 4.23).



1 – при выборе максимальной эффективности привода;

2 – гиперболическая зависимость; 3 – движение с постоянной мощностью и постоянным опрокидывающим моментом

Рисунок 4.29 – Оптимальная тяговая характеристика в режиме тяги

Такой режим работы может применяться при наличии резерва времени на всех типах ЭПС при условии, что максимальная скорость не будет превышена.

4.4 Оценка стоимости привода

Стоимость привода, оказывающая существенное влияние на выбор параметров привода подвижной единицы, может быть также оптимизирована. При оптимизации проводится оценка дополнительных инвестиций в компоненты при-

вода (при изменении длины активной части, массы меди и т.д.) и их влияние на снижение общего уровня потребления энергии поездом. Стоит заметить, что изменение стоимости привода не отражается линейно на конечной стоимости продукта (подвижной единицы), поэтому изначально должна быть рассчитана конечная стоимость продукта и только потом она может быть корректно учтена на одном уровне с величиной энергопотребления при расчете полной стоимости владения (4.10). Этот процесс достаточно сложен и требует огромного количества коммерческих данных, которые, как правило, не раскрываются. В связи с этим были приняты допущения о величине маржи и дополнительных расходах к производственной стоимости привода.

Распределение стоимости привода в зависимости от его конфигурации показано в таблице 4.10 при средней длине активной части машины. Стоимость входного дросселя не рассматривается, поскольку компонент не изменялся при смене параметров системы.

Таблица 4.10 – Стоимость привода в различных конфигурациях для 66 % моторизации поезда

В процентах

Стоимость	Конфигурация привода		
	1С4М		1С2М
	с инвертором INV101	с инвертором INV105	с инвертором INV103
Инвертор	50	60	65
Двигатель+Редуктор	50	50	50
Итого	100	110	115

Для принятия экономически обоснованных решений при выборе параметров привода акцент делается на определение полной стоимости владения. Этот показатель является оценкой стоимости приобретения и обслуживания материальных ценностей. В стоимость владения может входить огромное количество факторов: первоначальные инвестиции, а также пуско-наладочные работы, администрирование, техническая поддержка, модернизация и т.д.

По причине сложности определения всех факторов было рассмотрено только два из них: стоимость электроэнергии (без учета удорожания) P_e и первоначальные инвестиции I_i . Стоимость владения CO в этом случае составит

$$CO = P_e \cdot E_c \cdot Y + I_i, \quad (4.10)$$

где Y – заявленный срок эксплуатации;

E_c – величина энергопотребления подвижной единицы.

Из таблицы 4.10 видно, что практически во всех конфигурациях инвертор составляет практически половину и более общей стоимости привода. В связи с этим обращается пристальное внимание на методы повышения жизненного цикла инверторов.

4.5 Методика выбора конструктивных параметров привода по критерию минимального энергопотребления

Выбор оптимальных параметров является основной задачей конструктора при принятии решений в процессе проектирования привода. Учитываются не только технические, но и экономические аспекты. Важно конструировать привод с необходимыми и достаточными характеристиками, определяемыми выбранными параметрами.

Использование относительного коэффициента объема привода позволяет наглядно оптимизировать привод сразу по нескольким критериям. К их числу относятся геометрические, стоимостные и пр. параметры. На рисунке 4.30 показан синтез параметров энергопотребления и жизненного цикла, который косвенно относится и к стоимостному параметру.

При, например, двадцатипятилетнем требовании технического задания по критерию жизненного цикла был отброшен вариант конфигурации 1С4М с инвертором INV101 по причине недостаточности срока службы.

По методике, сформулированной ниже и изображенной на блок-схеме 4.31, выбирается три возможных варианта, которые в дальнейшем могут быть сравнены по ценовому критерию. Стоит отметить, что вариант, имеющий повышенный коэффициент объема машины с инвертором INV105, имеет резерв жизненного цикла, который может быть уменьшен за счет увеличения максимальной частоты модуляции инвертора. Повышение коэффициента относительного объема машины приводит к ее удорожанию из-за большего расхода материалов и повышения частоты вращения.

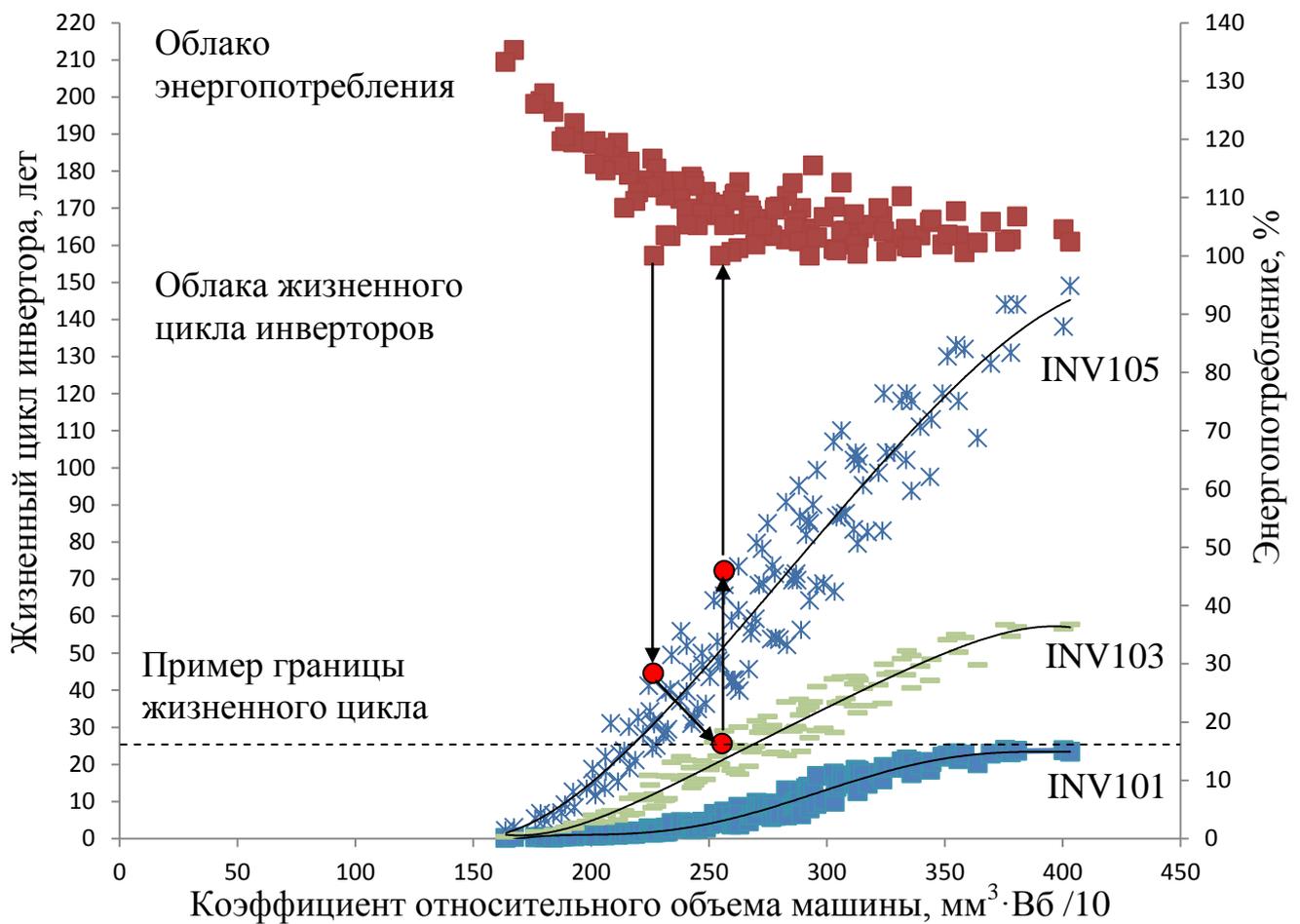


Рисунок 4.30 – К методике оптимизации привода по критериям

На основе рисунка 4.30 была сформирована следующая последовательность процесса оптимизации:

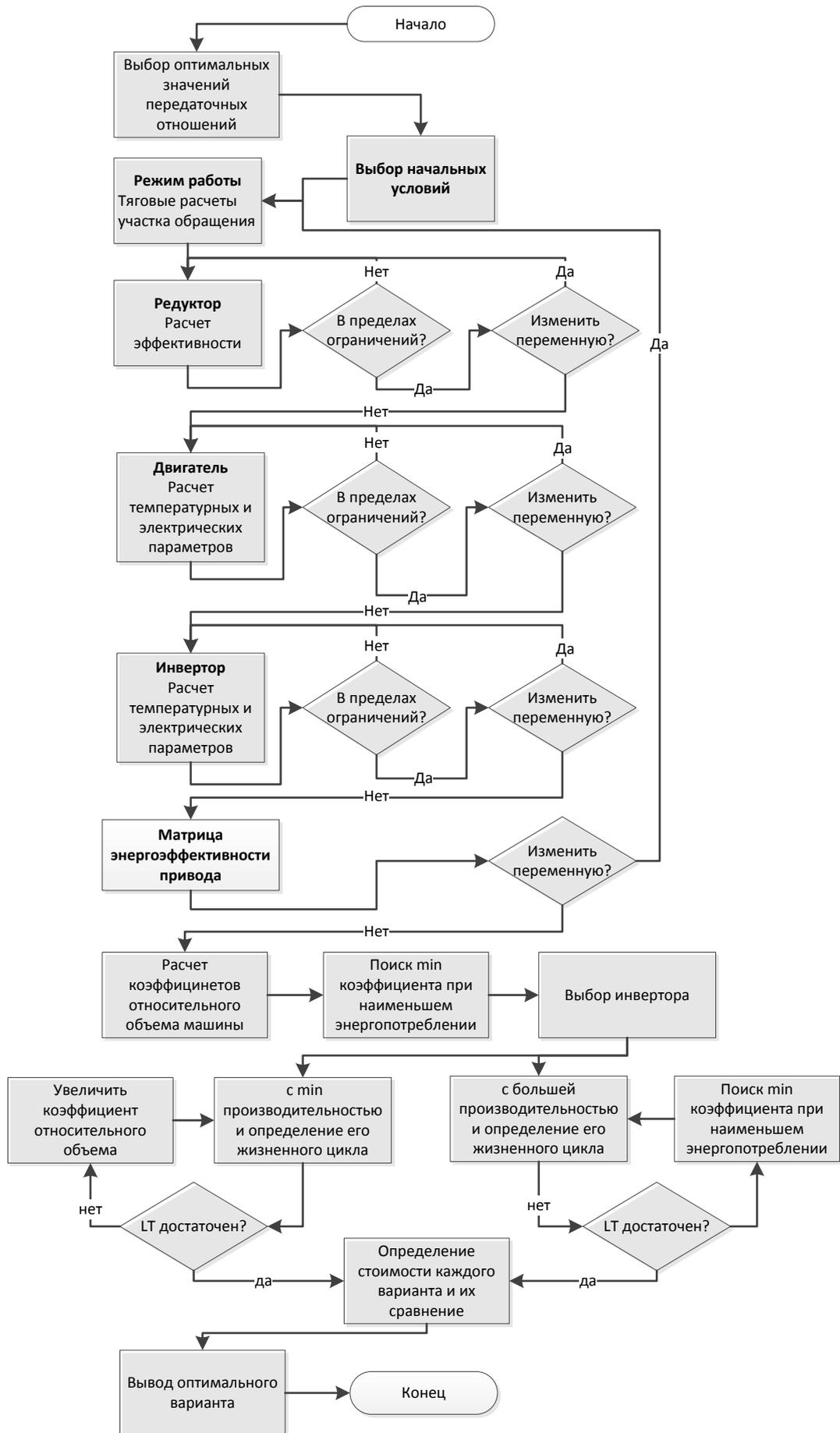


Рисунок 4.31 – Блок-схема оптимизации привода

а) На основе фактических режимов работы определяются наиболее вероятные точки на тяговой характеристике как в нормальном, так и в граничном режиме работы.

б) По критерию минимальности централи и с учетом конструкционных ограничений на параметры зубчатой передачи определяются оптимальные величины передаточных отношений редуктора.

в) Заполняются матрицы данных по энергопотреблению и жизненному циклу инвертора при различных исполнениях исследуемого двигателя, проектируемого по правому нижнему углу блокирующего контура.

г) Расчет коэффициента относительного объема для каждого варианта привода и определение минимального коэффициента, соответствующего наименьшему энергопотреблению привода.

д) Определение жизненного цикла преобразователя с наименьшей требуемой производительностью.

е) При необходимости увеличение жизненного цикла производить за счет повышения этого коэффициента.

ж) Определить жизненный цикл инвертора с более высокой производительностью для привода с наименьшим относительным объемом.

з) При недостаточности жизненного цикла повторить пункт е).

и) Сравнить стоимость реализации вариантов по пункту е) и з) и выбрать наиболее выгодный вариант.

Число расчетных данных может быть заранее сокращено до минимума за счет рассмотрения только приводов, имеющих схожие значения коэффициента относительного объема привода (4.10), рассчитанные для правого нижнего угла блокирующего контура.

Завышенные значения жизненного цикла инверторов могут быть уменьшены за счет роста максимальной частоты модуляции ключей. Зависимость изменения жизненного цикла инвертора INV105 в зависимости от частоты модуляции представлена на рисунке 4.32.

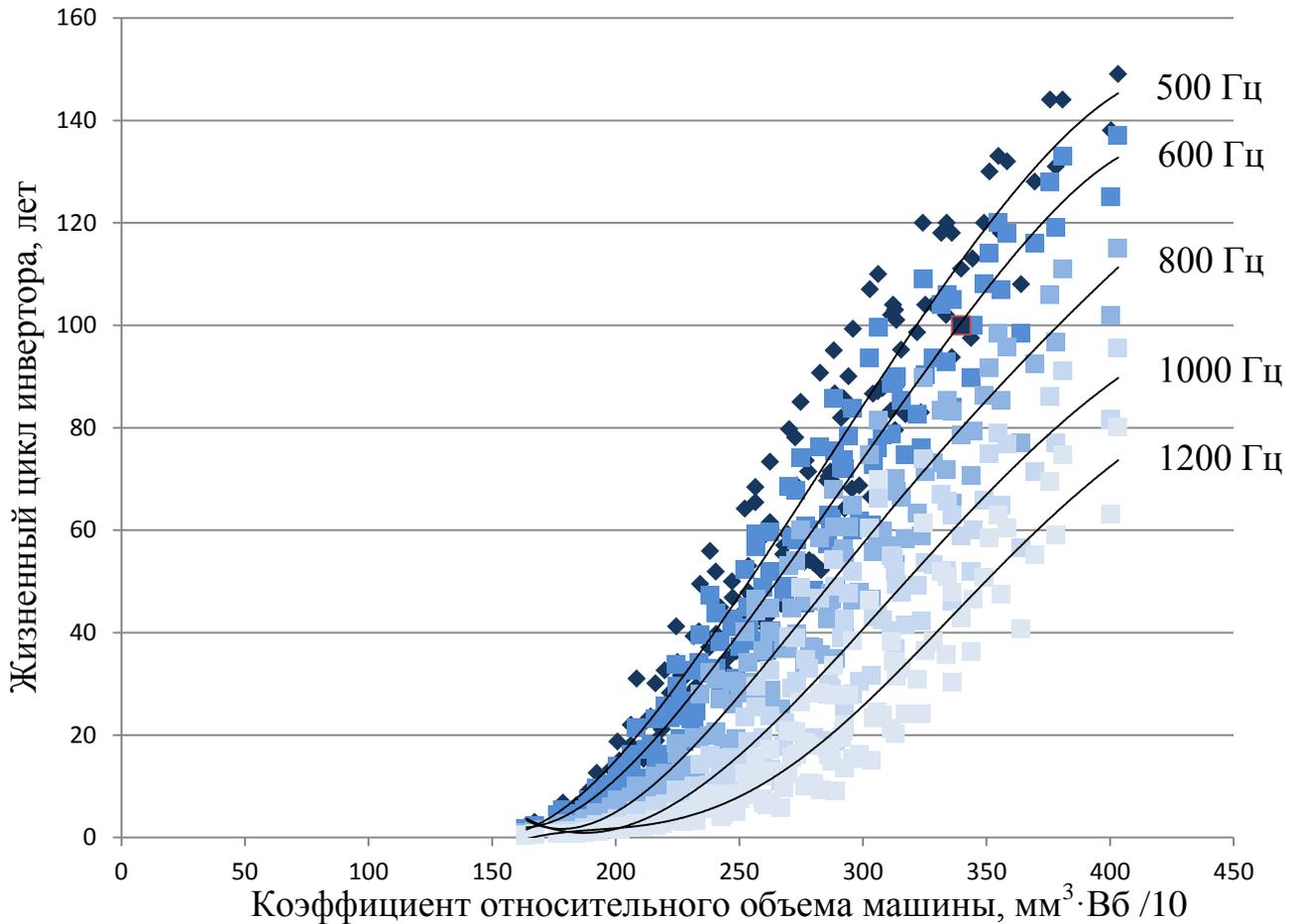


Рисунок 4.32 – Зависимость изменения жизненного цикла инвертора INV105 от коэффициента относительного объема машины при различной максимальной частоте модуляции ключей

Выводы по четвертой главе

1. В результате моделирования редуктора достигнуто максимально возможное снижение инерции вращающихся масс и массы редуктора на 3,3 % (например, при передаточном отношении 14,3), что положительно сказывается на снижении энергопотребления. Это доказывает эффективность предложенного способа оптимизации передаточного отношения как одноступенчатого, так и двухступенчатого редуктора по критерию минимальности централи.

2. Показано, что при выборе конструктивных параметров привода необходимо обращать внимание на изменение температуры обмотки статора, поскольку

при изменении активной длины машины энергопотребление меняется от 0,3 до 1,2 % (для постоянного значения передаточного числа редуктора), а снижение передаточного числа приводит к росту средней температуры обмотки статора от 80...211 °С и последующему увеличению энергопотребления до 12 %.

3. Подтверждена адекватность используемой математической модели для поиска наилучшей совокупности параметров привода с точки зрения его энергопотребления. Отличие расчетных и экспериментальных значений составило не более 7 %.

4. Введенное понятие блокирующего контура, которое задает ограничения функционального характера при проектировании двигателя, действительно позволяет снизить количество рассматриваемых вариантов конструктивных параметров при оптимизации системы привода в среднем на 61 %.

5. Введен коэффициент относительного объема двигателя, позволяющий сравнивать приводы различного исполнения, построенные под одну тяговую характеристику. Полученные результаты позволяют связать параметры двигателя и редуктора с инвертором и его жизненным циклом, что доказывает его применение в области оптимизации инверторного привода ЭПС.

6. Оптимизирована мощность привода в тяговом и тормозном режимах в пределах выбранной тяговой характеристики со сдвигом угловой точки характеристики с 35 км/ч на 18 км/ч. Это позволило достичь 5 % повышения энергоэффективности привода, а также увеличить жизненный цикл инвертора в два раза.

7. На основе разработанной методики произведена оптимизация конструктивных параметров привода IM8907XX для заданных условий нагружения, что позволило добиться повышения его эффективности на 11 %. Это доказывает правильность подходов, примененных в новой методике выбора оптимальных параметров асинхронного привода по критериям энергопотребления и стоимости (косвенно) при изменении рабочих величин привода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие результаты и выводы:

1. Выполнено моделирование изменчивости загрузки вагона метрополитена в зависимости от станции, ее удаленности от центра, времени и направления на основе данных годовых отчетов метрополитенов по пассажиропотоку. По итогам моделирования установлено, что средняя загрузка вагона составляет 25,1 % и она имеет два локальных экстремума 100 % и 68 %, характеризующих пиковые значения пассажиропотока в будние дни.

2. Анализ факторов, влияющих на энергопотребление привода вагонов метрополитена, установил, что к наиболее значимым со стороны производителя относятся: максимальная частота модуляции инвертора, число витков обмотки статора, активная длина и диаметр ротора двигателя, а также передаточное отношение редуктора; со стороны оператора – режим работы.

3. Выполнено моделирование нормальных и граничных режимов работы привода с применением тяговых расчетов радиального участка метрополитена с учетом цикличности движения вагонов метро. Получено распределение эксплуатационных точек в области тяговой характеристики для циклических режимов движения. Определено, что режим движения с выбегом наиболее эффективен по сравнению с режимом поддержания максимальной скорости (на 1,8 % в принятых условиях эксплуатации).

4. Моделирование системы «тяговый преобразователь – асинхронный двигатель – редуктор» в квазистатическом режиме с учетом насыщения магнитопровода, вихревых токов и эффекта вытеснения тока в проводниках ротора позволило учесть потери в машине при высоких значениях частоты основной гармоники напряжения (до 240 Гц).

5. По результатам тепловых расчетов инвертора и двигателя показано, что для определения остаточной величины жизненного цикла инвертора по методу

Мэнсона целесообразно использовать метод схематизации процессов нагружения – «дождя», а для определения остаточного жизненного цикла обмотки статора двигателя, при его эксплуатации в нормальном режиме работы, достаточно использовать аддитивный метод.

6. Введено понятие блокирующего контура машины при проектировании и изменении ее параметров, которое позволяет уменьшить количество рассматриваемых вариантов привода в среднем на 61 %.

7. Введен коэффициент относительного объема машины, позволяющий связать условный объем машины, совокупность ее основных конструктивных параметров (активная длина, число витков, диаметр ротора, индукция в воздушном зазоре) и передаточное отношение редуктора с мощностью инвертора и его жизненным циклом, а также с энергоэффективностью привода. Минимизация этого коэффициента способствует снижению стоимости материалов привода при соблюдении основных критериев.

8. Экспериментально исследована и подтверждена адекватность используемой математической модели для поиска наилучшей совокупности параметров привода с точки зрения его энергопотребления. Отличие расчетных и экспериментальных значений составило не более 7 %.

9. Предложена методика определения наилучшей совокупности параметров асинхронного тягового привода вагонов метрополитена по критерию наименьшего энергопотребления. На основе предложенной методики произведена оптимизация конструктивных параметров привода серии IM8907XX для заданных условий нагружения, режимов работы и заданного жизненного цикла по критерию минимального энергопотребления. Это позволило повысить эффективность привода до 11 %. Показана возможность дальнейшего повышения эффективности системы (до 5 %) при использовании необходимой и достаточной мощности двигателя, что также сопровождается двукратным повышением жизненного цикла инвертора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амирова, С.С. Автоматизированный электропривод с асинхронными двигателями: Учеб. пособие / С.С. Амирова, В.И. Елизаров, В.Г. Макаров. – Казань: Казан. гос. технол. ун-т, 2005. – 223 с.
2. Геллер, Г. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Г. Геллер, В. Гамата // Пер. с англ. – М.: Энергия, 1981 – 352 с.
3. Макаров, В.Г. Асинхронный электропривод с оптимальными режимами работы: монография / В.Г. Макаров. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2010. – 300 с.
4. Пронин, М.В., Воронцов, А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / Под ред. Крутякова Е.А. СПб: «Электросила», 2003. – 172 с.
5. Шубенко, В.А. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением В.А. Шубенко, И.Я. Браславский. / М.: Энергия, 1972. – 200 с.
6. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
7. Dr. Gerster, C., Dr. Meyer, M. Der Antriebstrang von Umrichter-Triebfahrzeugen unter dem Gesichtspunkt der Lebenszykluskosten. / Dr. C. Gerster, Dr. M. Meyer // Bombardier Transportation. – Zuerich, 2003. – S. 1-41.
8. Владыкин, А.В. Вибрация привода как внешний фактор при реализации тягового усилия локомотива / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Инновационный транспорт. – 2015. № 4 (18) – С. 50 – 52. – ISSN: 2311–164X.
9. Марков, А.М., Маркова, Т.А., Никонорова, А.А. Перспективные системы электрической тяги// Труды ППИ №10.3, 2006
10. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 17.06.08 г. № 877-р [Электронный ресурс]. URL: <http://strategy2030.midural.ru/sites/default>

/files/files/strategiya_razvitiya_zheleznodorozhnogo_transporta_v_rossiyskoy_federacii_do_2030_goda.pdf (дата обращения: 05.04.2017).

11. Malvezzi, M. A tool for prediction and optimization of railway traction systems with respect to an expected mission profile / M. Malvezzi, L. Pugi, R. Conti, P. Toni, S. Tesi, E. Meli, A. Rindi // *Chemical Engineering Transactions*, 2013.– P. 721-726.

12. Копылов И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.

13. Адкинс, В.А. Общая теория электрических машин / В.А. Адкинс; пер. с англ. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 272 с.

14. Афанасьев, А.Ю. Моментный электропривод систем управления: дис. ... док. техн. наук: 05.13.05. / Казан. гос. технол. ун-т. – Казань, 1998. – 374 с.

15. Афанасьев, А.Ю. Моментный электропривод / А.Ю. Афанасьев. – Казань: Казанский гос. техн. ун-т, 1999. – 250 с.

16. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

17. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1996. – 297 с.

18. Браславский, И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И.Я. Браславский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.

19. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2004. – 576 с.

20. Беспалов, В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Тр. IV Междунар. (XV Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». – Магнитогорск. 2004. – Ч. 1. – С. 24 – 31.

21. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.
22. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 231 с.
23. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
24. Козярук, А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А.Е. Козярук, В.В Рудаков. – СПб: СПб Электротехническая компания, 2004. – 127 с.
25. Ковач, К.П. Переходные процессы в электрических машинных переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М.: АН СССР, 1962. – 624 с.
26. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
27. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
28. Сю, Д. Современная теория автоматического управления и ее применение / Д. Сю, А. Майер / пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1972. – 544 с.
29. Сандлер, А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
30. Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л. Х. Дацковский и др. / М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
31. Сабинин, Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 126 с.
32. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
33. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайд, Г. Вудсон; пер. с англ. – М., Л.: Энергия, 1964. – 528 с.
34. Панкратов, В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами / В.В. Панкратов. – Новосибирск: НГТУ, 1999. – 66 с.

35. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Академия, 2006. – 304 с.
36. Фильц, Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р.В. Фильц – Киев: Наукова думка, 1979. – 208 с.
37. Palpandian, P. Efficiency Improvement of 3 Phase Induction Motor / P. Palpandian, E. Arunkumar, K. Syril Jennifer Paul // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering – Coimbatore, India, Karpagam, College of Engineering, 2012. – P. 212-222.
38. Домбровский, В.В. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования / В.В. Домбровский, В.М. Зайчик. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
39. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов [и др.]. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
40. Виноградов, А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 56 – 61.
41. Владыкин, А.В. Оптимизация самовентилируемого асинхронного двигателя как область повышения эффективности электропоездов метрополитена / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 18 – 24. – ISSN: 1997-0722.
42. Макаров, Л.Н. Особенности работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе частотного регулирования / Л.Н. Макаров, С.В. Ястреба // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 15 – 18.
43. Ковалев, В.Д. Элементная база силовой полупроводниковой электроники в России. Состояние и перспективы развития / В.Д. Ковалев, Ю.А. Евсеев, А.М. Сурма // Электротехника. – 2005. – № 8. – С. 3 – 23.
44. Поляков, В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420 с.

45. Колпахчян, П.Г. Методология комплексного моделирования и способы управления асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов: Дисс. ... док. техн. наук: 05.22.03 / Южно-российский государственный технический университет (ЮРГТУ (НПИ)). – Новочеркасск: 2006, – 398 с.

46. Обухов, С.Г., Чаплыгин, Е.Е., Кондратьев, Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / Электричество. – 2008. № 7 – С. 23-31.

47. Тумаева, Е.В. Синхронный электропривод с оптимальными режимами работы: дис. ... канд. тех. наук / Е.В. Тумаева. – Нижнекамск, 2006. – 175 с.

48. Holmes, D. Grahame, Lipo, A. Thomas, Pulse width modulation for power converters. Principles and practice. – 2003. P. 724

49. Chinthavali, M. Materials of U.S. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting / M. Chinthavali, T. Burress, C. Ayers, O. Onar, D. Smith, S. Narumanchi // – 2013 P. 1-22.

50. Боченков, Б.М. Оптимизация электропривода переменного тока по векторному критерию качества / Б.М. Боченков, Ю.П. Филюшов // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 13 – 17.

51. Tumbek, M. Optimal design of induction motor with multi-parameter by FEM method / M. Tumbek, Y. Oner, S. Kesler // Pamukkale university, Kinikli, Denizly, Turkey – P. 1053-1056.

52. Онищенко, Г.Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.

53. Эпштейн, И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.

54. Gerling, D. Electric Machine Design Tailored for Powertrain Optimization / D. Gerling, G. Dajaku, K. Mühlbauer // The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition – Shenzhen, EVS25 Symposium, 2010. P. 1-5.

55. Приймак, Б.И. Аналитическое определение энергетически оптимального значения потока ротора асинхронной машины / Б.И. Приймак // Электричество. – 2005. – № 12. – С. 36 – 43.

56. Dr. Vogelsberger, M. A. Thermoefficient traction – energy saving by multi objective traction drives optimization for locomotives / Dr. M. A. Vogelsberger, J. Buscheck, Ao. Univ. Prof. E. Schmidt // – Wien, TU Wien & Bombardier Transportation, 2017. – P. 1-2.

57. Волков, А.В. Оптимальное по минимуму общих потерь мощности управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом с АИН-ШИМ / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Электротехника. – 2008. – № 9. – С. 21 – 33.

58. Cunkas, M. Design optimization of induction motor by genetic algorithm and comparison with existing motor / M. Cunkas, R. Akkava // Mathematical and Computational Applications, Vol. 11, No. 3, 2006. – P. 193-203.

59. Dr. Raghuram, A. Design and optimization of three phase induction motor using genetic algorithm / Dr. A. Raghuram, V. Shashikala // International Journal of Advances in Computer Science and Technology – India, 2013. – P. 70-76.

60. Sakthivel, V. P. Economic design of three-phase induction motor by particle swarm optimization / V. P. Sakthivel, R. Bhuvanewari, S. Subramanian // J. Electromagnetic Analysis & Applications – India, 2010, P. 2. – P. 301-310.

61. Беннеран, И.Т. Автоматизированный асинхронный электропривод с оптимальными режимами работы: дис. ... канд. тех. наук / Казан. гос. технол. ун-т. – Казань, 2002. – 131 с.

62. Sarhan, H. Efficiency optimization of vector-controlled induction motor drive / H. Sarhan // International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2014. – P. 666-674.

64. Розенфельд, В.Е., Исаев, И. П., Сидоров, Н.Н. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

65. Владыкин, А.В. Оптимизация тягового привода как способ снижения капитальных вложений и эксплуатационных расходов / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Транспорт Урала. – 2017. – № 3 (54). – С. 72 – 74. – ISSN: 1815-9400.

66. Bombardier Transportation Products & Services [Электронный ресурс] / Режим доступа <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/metros/Movia-Metro.html/> (Дата обращения 14.02.2017).

67. Bombardier Transportation Products & Services [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/metros/Innovia-Metro.html/> (Дата обращения 14.02.2017).

68. Годовой отчет метрополитена г. Торонто 2013...2016 года [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.ttc.ca/About_the_TTC/Annual_reports.jsp (Дата обращения 17.02.2017).

69. Годовой отчет метрополитена г. Копенгагена 2013...2015 года [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://intl.m.dk/#!/about+the+metro/about+us/metro+service> (Дата обращения 24.02.2017).

70. Годовой отчет метрополитена г. Варшавы 2013...2016 года [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.metro.waw.pl/wydawnictwa> (Дата обращения 04.03.2017).

71. Годовой отчет метрополитена г. Санкт-Петербурга 2014...2016 года [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.metro.spb.ru/ekonomika.html> (Дата обращения 14.03.2017).

72. Годовой отчет метрополитена г. Москвы 2014...2015 года [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://old.mosmetro.ru/press/reports/> (Дата обращения 14.04.2017).

73. Владыкин, А.В. Определение эффективности эксплуатационной деятельности метро с точки зрения энергопотребления тяговым подвижным составом / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Транспорт Урала. – 2017. – № 2 (53). – С. 61 – 63. – ISSN: 1815-9400.

74. Шрейнер, Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 234 с.

75. Nicola, L., Lifetime estimation of IGBT power modules, Master thesis, Aalborg, Denmark 2013.

76. Rothe, R., Hameyer, K. «Life expectancy calculation for electric vehicle traction motors regarding dynamic temperature and driving cycle» / R. Rothe, K. Hameyer // International electric machines and drives, 2011. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5994793/> (Дата обращения 10.03.2017).

77. ASTM Standard E 1049, 1985 (2011). «Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis». West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

78. «Rainflow counts for fatigue analysis», Matlab documentation, [Электронный ресурс] https://www.mathworks.com/help/signal/ref/rainflow.html#mw_46285917-7be6-43bb-bde4-e47dfd30b102_seealso Дата обращения 13.01.2017.

79. Kaminski, N. Циклонагрузочная способность IGBT-модулей АВВ серии HiPak / N. Kaminski, A. Чекмарев / Силовая электроника. – 2006. – № 4 (10). – С. 30-33. – ISSN: 2079-9322.

80. C. Busca, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, S. Munk-Nielsen, L. Helle, T. Abeyasekera and P. Rodriguez, «An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications», in Proceedings of the 22th European Symposium on the Reliability of electron drives_ failure physics and analylis, 2011.

81. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.

82. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

83. Старжинский, В.Е. – Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии / Старжинский В.Е., Шалобаев Е.В. и др. – Минск: Беларус. навука. – 2012. – 769 с.

84. Владыкин, А.В. Выбор оптимальных конструктивных параметров асинхронного привода метрополитена с учетом жизненного цикла инвертора / А.В. Владыкин // Транспорт Урала. – 2018. – № 1 (56). – С. 63 – 68. – ISSN: 1815-9400.

85. Башарин, А.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ / А.В. Башарин, Ф.Н. Голубев, В.Г. Кепперман. – Л.: Энергия, 1971. – 440 с.

86. Венников, В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Венников, Г.В. Венников. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
87. Владыкин, А.В. Математическое моделирование асинхронного тягового привода в системе Matlab/Simulink / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Транспорт Урала. – 2015. – № 2 (45). – С. 82 – 86. – ISSN: 1815-9400.
88. Владыкин, А.В. К вопросу снижения энергопотребления тяговым приводом электропоезда метрополитена / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Транспорт Урала. – 2016. – № 3 (50). – С. 92 – 94. – ISSN: 1815-9400.
89. Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1966. – 576 с.
90. Глазенко, Т.А. Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности / Т.А. Глазенко, В.Н. Хрисанов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
91. Герман-Галкин, С.Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин, В. Д. Лебедев, Б. А. Марков и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
92. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0 / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА Принт, 2001. – 320 с.
93. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
94. Ширинский, С.В. Методы анализа электрических машин. Пособие. С.В. Ширинский. – М.: 2016. – 163 с.
95. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – М.: Академия, 2001. – 463 с.
96. Петров, Л.П. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами / и др. – М.: Энергия, 1970. – 128 с.
97. Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Высшая школа, 2000. – 368 с.

98. Макаров, В.Г. Моделирование и исследование электроприводов. Ч. 1. Разомкнутые системы электропривода: учеб. пособие / В.Г. Макаров. – Казань: КГТУ, 2005. – 260 с.
99. Находкин, М.Д. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин. М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
100. Поздеев, А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
101. Ion Boldea The induction machine design handbook. Second edition. Ion Boldea, Syed A. Nasar. – NW.: CRC Press. 826 P.
102. Собх, М.Н. Энергосбережение в электроприводах периодического движения с силовыми электронными преобразователями: дис. ... канд. тех. наук / М. И. Собх. – Казань, 2010. – 179 с.
103. Трещев, И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И.И. Трещев. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.
104. Фигаро, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фигаро, Л.Б. Павлячек. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
105. Фильц, Р.В. Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин / Р.В. Фильц, П.Н. Лябук. – Львов: Свит, 1991. – 176 с.
106. Хенкок, Н. Матричный анализ электрических машин / Н. Хенкок. – М.: Энергия, 1967. – 225 с.
107. Хайруллин, И.Р. Регулируемый асинхронный вентильный двигатель с автогенераторным инвертором напряжения: дис. на соис. ст. к-та тех. наук / И.Р. Хайруллин. – Казань, 2009. – 168 с.
108. Шуйский, В.П. Расчет электрических машин / В.П. Шуйский; пер. с нем. – Л.: Энергия, 1968. – 732 с.
109. Шрейнер, Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Под. ред. Р.Т. Шрейнера. – Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2008. – 361 с.

110. Blaschke, F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage fuer die TRANSVEKTOR – Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens-Zeitschrift. – 1971. – Bd. 45. – H. 45. – S. 757 – 760.

111. Floter, W., Ripperger, H. Die Transvektorregelung fuer feldorientierten Betrieb einer Asynchronmaschine / W. Floter, H. Ripperger // Siemens-Zeitschrift. – Vol. 45 (1971). – S. 761 – 764.

112. Leonard, W. Control of electrical drives. – Berlin: Springer, 1996. – S. 420.

113. Turner, M.W. Efficient optimization control of AC induction motors: initial laboratory results / Turner M.W., McCormick V.E., Cleland J.G. // EPA, – National risk management research lab., research triangle park, NC, 1996. – P. 1-9.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

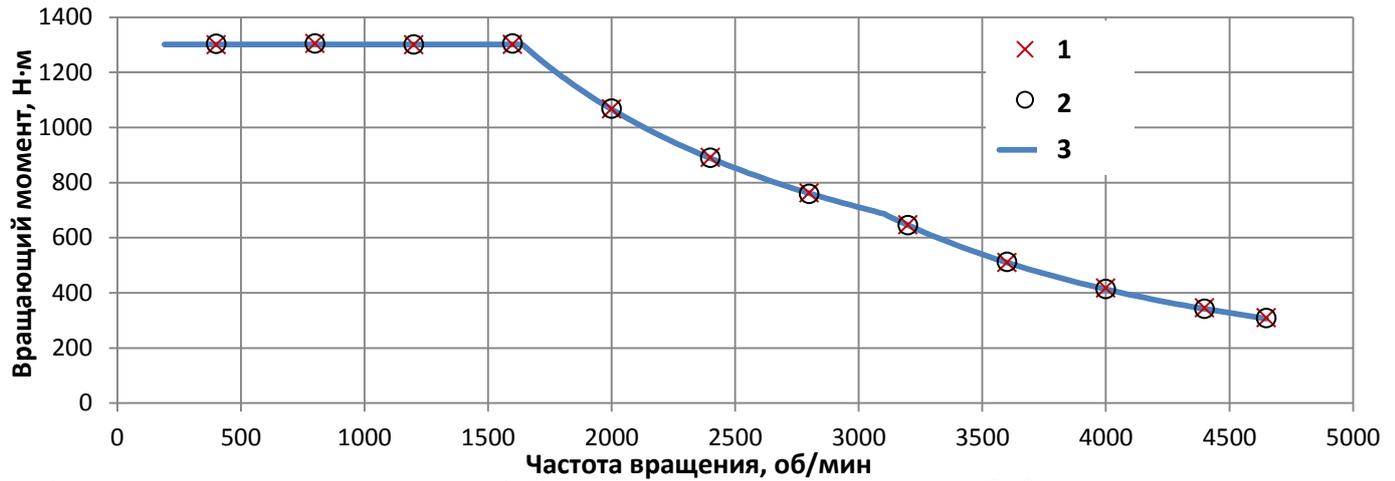
**Причинно-следственная диаграмма внешних и внутренних факторов,
оказывающих влияние на энергопотребление вагонов метрополитена**



Рисунок А.1 – Причинно-следственная диаграмма внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на энергопотребление вагонов метрополитена (для уже существующего участка)

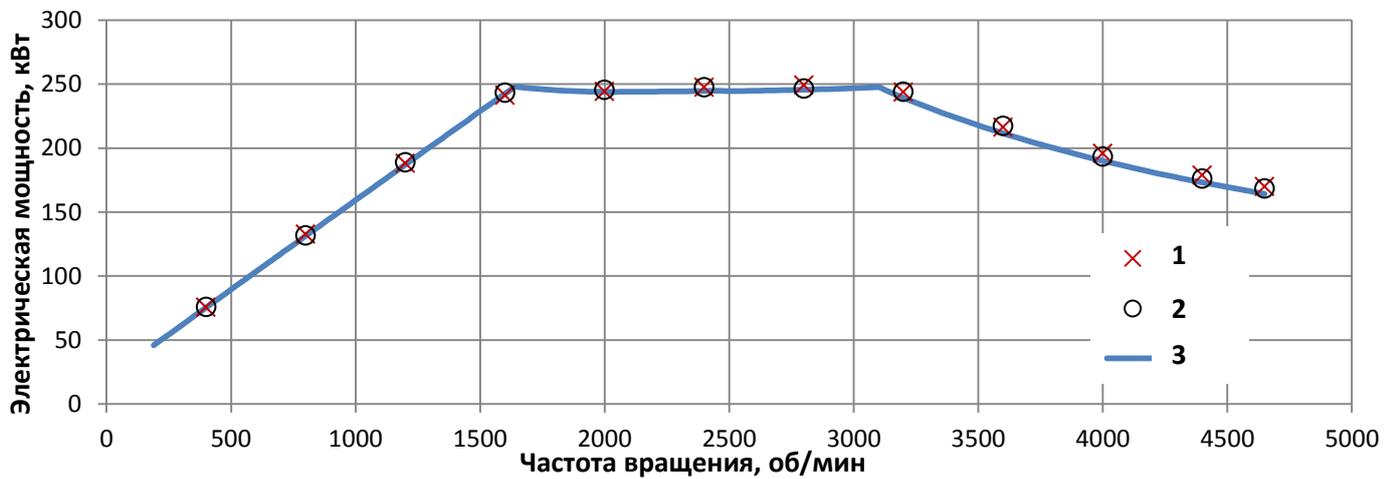
ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

Результаты сравнения расчетных и измеренных величин вращающего момента, мощности и эффективности привода IM890210 с инвертором INV105 при постоянной частоте модуляции инвертора 500 Гц



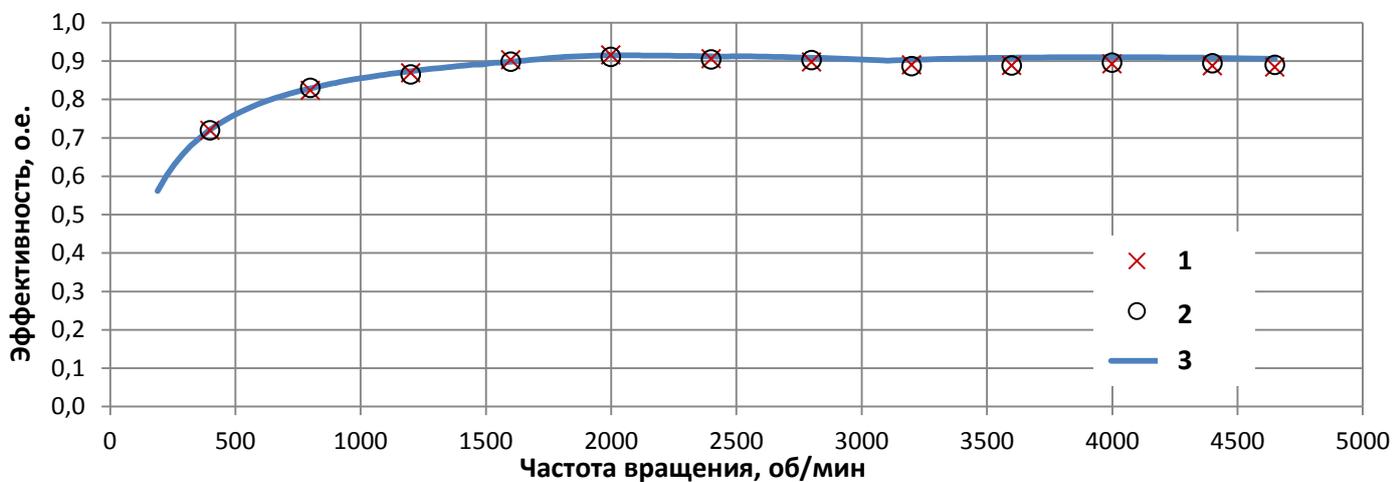
1 – результаты системного теста 1; 2 – результаты системного теста 2; 3 – результаты расчета
Рисунок Б.1 – Вращающий момент в зависимости от частоты вращения ротора

двигателя **IM890210** и **INV105** при частоте модуляции 500 Гц



1 – результаты системного теста 1; 2 – результаты системного теста 2; 3 – результаты расчета
Рисунок Б.2 – Электрическая мощность в зависимости от частоты вращения ротора

двигателя **IM890210** и **INV105** при частоте модуляции 500 Гц



1 – результаты системного теста 1; 2 – результаты системного теста 2; 3 – результаты расчета
Рисунок Б.3 – Эффективность в зависимости от частоты вращения ротора

двигателя **IM890210** и **INV105** при частоте модуляции 500 Гц

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

**Документы, подтверждающие внедрение результатов
диссертационной работы**

SIEMENS

ООО «Сименс», Департамент Мобильность
Большая Татарская, д. 9, 115184 Москва

Имя	Давид Йон
Департамент	MO RS
Телефон	+7 (495) 737-4495
Факс	+7 (495) 737-2325
Сотовый	+7 (916) 416 5440
Иск. №	
Дата	18 января 2018

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчик: Владыкин Алексей Владимирович
2. Предмет внедрения: методика оптимизации тягового привода (инвертор, двигатель, редуктор) и его параметров для нового стандартного привода моторвагонного подвижного состава (МВПС)
3. Место внедрения: ООО «Сименс», Департамент Мобильность
4. Техничко-экономический эффект: методика оптимизации тягового привода по критериям энергопотребления и стоимости дает визуально понять и выбрать оптимальные параметры компонентов привода. Помогает ускорить процесс разработки привода и снизить количество рассматриваемых параметров. Ускорение процесса разработки также способствует снижению времени проектирования и соответствующих с этим расходов.
5. Дата внедрения: 25.11.2017 (использовано для коммерческого предложения)
6. Предложение о дальнейшем использовании: предполагается использовать эту методику в системном дизайне при проектировании новых высокоэффективных систем привода.

С уважением,



Давид Йон
Директор подразделения
«Подвижной состав», Россия
ООО «Сименс»

SIEMENS

Siemens AG, PD LD TD R&D5,
Vogelweiherstr, 1-15, 90480 Nuremberg

Name	Dr. Olaf Koerner
Department	PD LT TD R&D5
Telefon	+49 (911) 433-6066
Mobil	+49 (172) 325 4417
Reference. №	
Date	December 18 th , 2017

Act of results implementation of scientific research work

1. Developer: Vladykin, Alexey Vladimirovich
2. Subject of implementation: Optimization method of a traction drive (inverter, motor, gear), optimized drive parameters of a new standard drive for electrical multiple units (EMU)
3. Place of implementation: Siemens AG, PD LD TD
4. Techno-economic effect: method of drive optimization for energy consumption and cost criteria offers a visual understanding of drive parameters that need to be set for an optimal design. It helps to accelerate the design process of a new drive system and to reduce the number of parameters to be considered. Acceleration in the design process reduces the design time and the corresponding costs.
5. Date of implementation: 25.10.2017 (used for quote).
6. Offers for further use: It is assumed that this method will be used in system design for developing new high effective drive systems.

Best regards,
Siemens AG



Dr. Olaf Koerner
Head of traction motors
PD LD TD Research and Development