

На правах рукописи



Владыкин Алексей Владимирович

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент

Фролов Николай Олегович

Официальные оппоненты:

Мазнев Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), профессор кафедры «Электрическая тяга», Заслуженный изобретатель РФ, Почетный железнодорожник, Действительный член Академии электротехнических наук РФ, Почетный работник Октябрьской железной дороги.

Попов Денис Игоревич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Защита состоится «14» декабря 2018 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат <https://www.usurt.ru>.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 далеком 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 возможен 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.

Вышеупомянутые авторы также занимались исследованиями, посвященными моделированию асинхронного 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 данный подход, 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 установленных 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 выполненной работы оценивалась сопоставлением результатов численного моделирования асинхронного привода с экспериментальными данными, которые были получены лабораторно. Расхождение расчетных и экспериментальных данных составило не более 7 %.

Обоснованность результатов проведенных исследований подтверждается строго доказанными и корректно используемыми положениями фундаментальных (физика, теоретические ос-

новы электротехники) и прикладных наук (теория тяги поездов, тяговые электрические машины, теория автоматического управления).

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.).

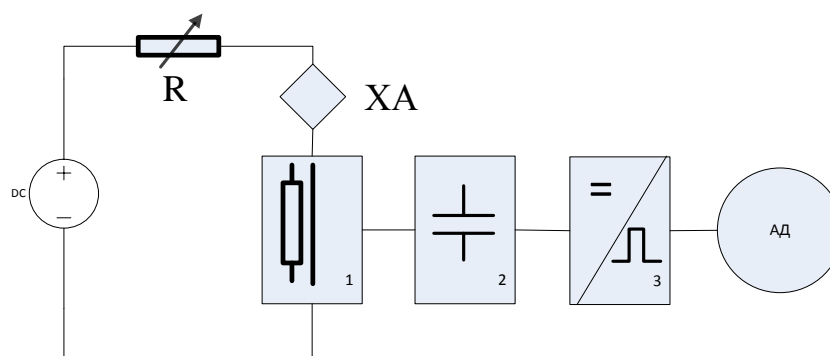
Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них шесть – в изданиях, рекомендованных ВАК к публикации результатов диссертации.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы исследования, отмечается ее научное и практическое значение, связанное с необходимостью поиска наилучшей совокупности параметров для тягового привода ЭПС, а также определены цель и задачи исследования.

В первой главе диссертационной работы осуществлен краткий обзор текущего состояния привода (рис. 1), а также исследований в области частотного преобразователя, оптимизации асинхронного двигателя и редуктора и оптимизации привода в целом.



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

Рисунок 1 – Элементы тягового привода МВПС

Учет множества эксплуатационных ситуаций, приводящих к нарушению работы привода, обеспечивается за счет введения ограничений на допустимую величину отдельных параметров. В связи с этим для каждого из компонентов привода определены собственные предельные величины, накладываемые при проектировании. Для тягового преобразователя такого рода ограничениями являются: температура ключей инвертора и его жизненный цикл, а также величина воздушного потока вентилятора охлаждения инвертора. Тяговый двигатель, несмотря на свою простоту конструкции, имеет следующие ограничения при проектировании: температура обмотки двигателя и ее жизненный цикл, опрокидывающий момент, плотность тока проводника, плотность потока в магнитопроводе, уровень шумовой нагрузки (самовентилируемая машина) и допустимость вписывания в тележку и колесную пару по габаритным размерам. Редуктор тяговой передачи ограничен допустимостью вписывания в тележку по габаритам, достаточностью клиренса и пр.

Во второй главе работы определен алгоритм для автоматизации тяговых расчетов в системе Matlab и проведены тяговые расчеты ПС метрополитена с учетом внешних факторов для нескольких режимов работы (таблица 1).

Тяговые расчеты автоматизированного электропривода проводились с учетом изменчивости во времени действующих внешних факторов (рис. 2) радиальной линии метрополитена. Это позволило описать действительный способ ведения поезда машинистом, тем самым определяя реальные условия эксплуатации привода при постоянстве ускорения как в режиме тяги, так и в режиме торможения (максимальное значение – $1,2 \text{ м/с}^2$).

Таблица 1 – Режимы работы вагонов метрополитена

Режим работы	Резерв времени*	Уровень моторизации, %	Сила при торможении, %	Температура окружающей среды, °С	Уровень загрузки вагона
По расписанию	Макс.	66	80	25	Модель, рис. 3
С минимальным интервалом	Мин.	66	80	25	Модель, рис. 3
Граничный режим 1	Мин.	50	100	40	Модель, рис. 3
Граничный режим 2	0	66	100	40	Постоянный уровень 100 %
Граничный режим 3	Мин.	50	100	40	Скачок загрузки**

* – разница между временем, затраченным на движение по участку без выбега и с выбегом при определенной величине загрузки вагона и без учета профиля пути;

** – скачкообразное изменение пассажиропотока, характеризуемое 100 % загрузкой вагона на отдельных участках пути.

Используемая модель загрузки вагона была определена на основе непостоянства пассажиропотока метрополитена с течением времени и направления (для частного случая см. рис. 3). Величина загрузки определялась исходя из плотности загрузки – 7 чел/м^2 . Кроме того, в модели используется поэлементный расчет сопротивления движению и вращающихся масс, позволяющий оценить степень влияния этих параметров на ускорение ПС при изменении конструктивных пара-

метров двигателя и редуктора. Величины моментов инерции, основного сопротивления движению принадлежат конкретным геометрическим размерам передачи и параметрам охлаждения.

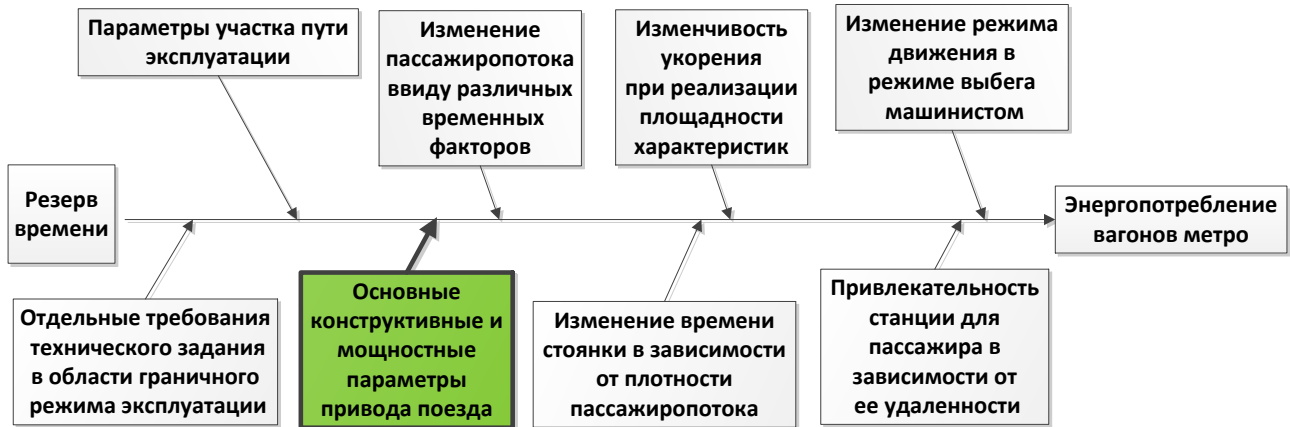
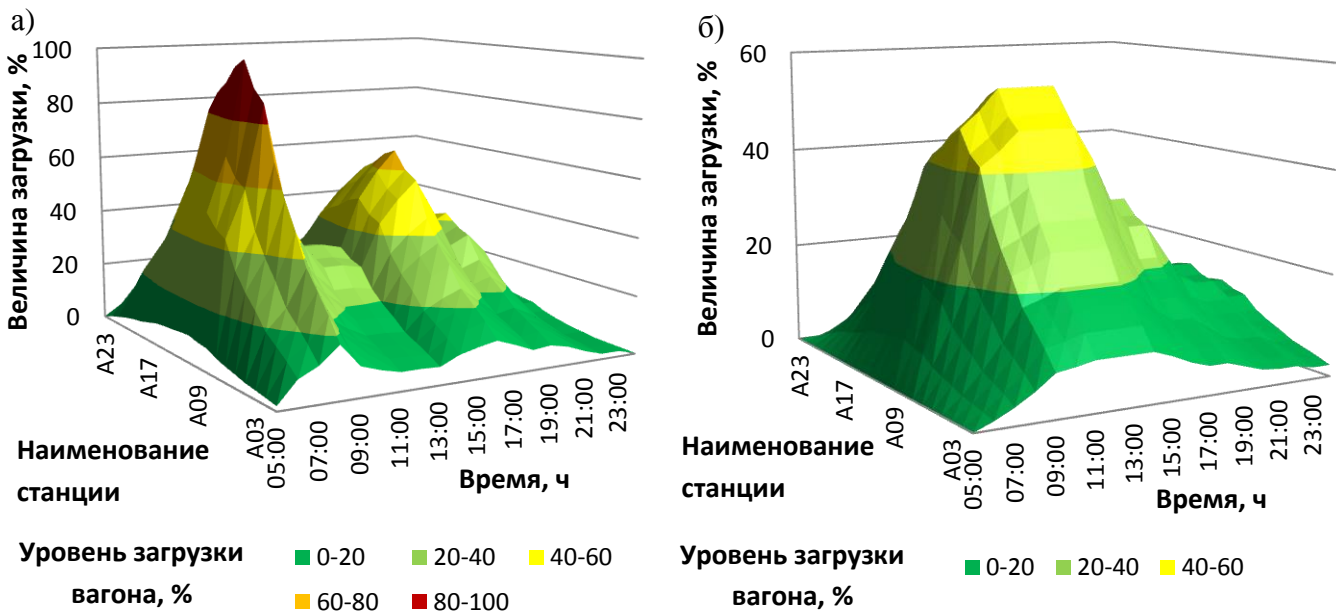


Рисунок 2 – Причинно-следственная диаграмма внешних и внутренних факторов оказывающих влияние на энергопотребление вагонов метрополитена

Элементы причинно-следственной диаграммы были разделены на факторы, величины которых фиксированы, квазификсированы и изменчивы в зависимости от стороны процесса: оператор или перевозчик. Основным элементом дальнейшей оптимизации выбран блок основных конструктивных и мощностных параметров привода (см. рис. 2) при квазипостоянстве остальных блоков диаграммы.



а) в будний день; б) в выходной день

Рисунок 3 – Распределение загрузки вагона в одном направлении

Система уравнений движения подвижного состава выглядит следующим образом:

$$\frac{dv}{dt} = K_1 \cdot (f_k - w_0 - w_i - k_r \cdot b_r),$$

$$\frac{ds}{dt} = K_2 \cdot v,$$
(1)

где K_1, K_2 – переменные величины, зависящие от массы состава, размерности и параметров зубчатой передачи;

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 (при необходимости);

b_T – удельная тормозная сила, Н/кН.

Тяговые расчеты были проведены с помощью алгоритма, позволяющего их реализовать при различных способах ведения поезда (выбег и поддержание максимальной скорости движения) и режиме работы (нормальный и граничный) при квазипостоянном влиянии внешних факторов.

Использование результатов расчета, которыми являются требуемая сила тяги либо торможения, время приложения этой силы, а также скорость движения при учете дополнительных параметров, позволяет в дальнейшем более детально анализировать режим работы привода и проводить оптимизацию его работы по любому критерию. Определение частых точек пары силы тяги F_{ki} и скорости V_i в пределах выбранной тяговой характеристики (рис. 4) позволяет выявить параметры нагружения системы, характерные для конкретного режима работы.

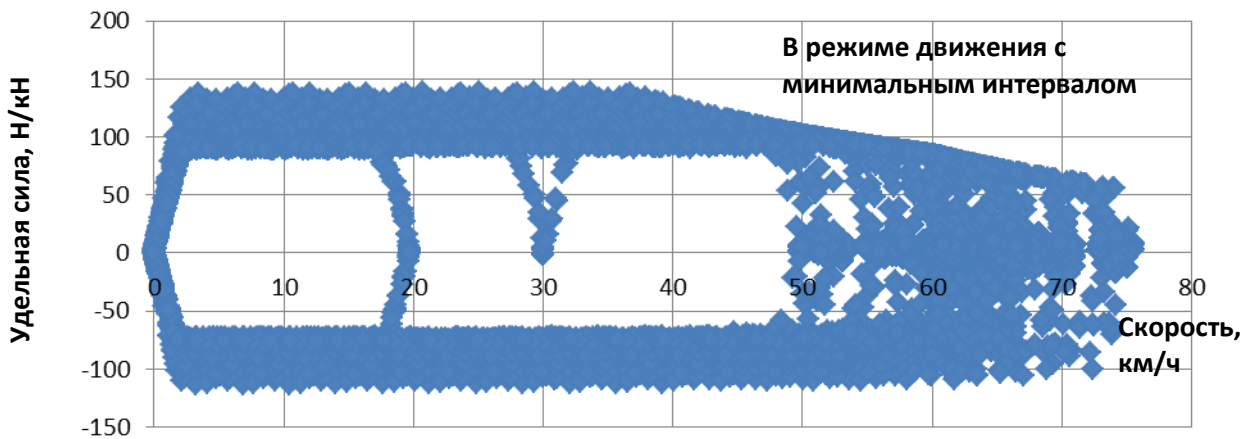


Рисунок 4 – Распределение рабочих точек на тяговой характеристике

Проведенный анализ работы подвижного состава метрополитена задает объем факторов, величины которых необходимо учитывать при проведении тяговых расчетов, поскольку их влияние на показатель энергопотребления значительно. Также их учет поможет точнее спрогнозировать действительный жизненный цикл преобразователя и двигателя.

В третьей главе рассматривалось моделирование системы привода в статичном режиме работы. Анализ работы компонентов проводился в соответствии с внешними, функциональными и общими ограничениями параметрического и дискретизирующего рода. Ограничения первого рода задают минимальные и/или максимальные параметры оптимизируемой величины O_i .

$$O_{iMIN} \leq O_i \leq O_{iMAX}. \quad (2)$$

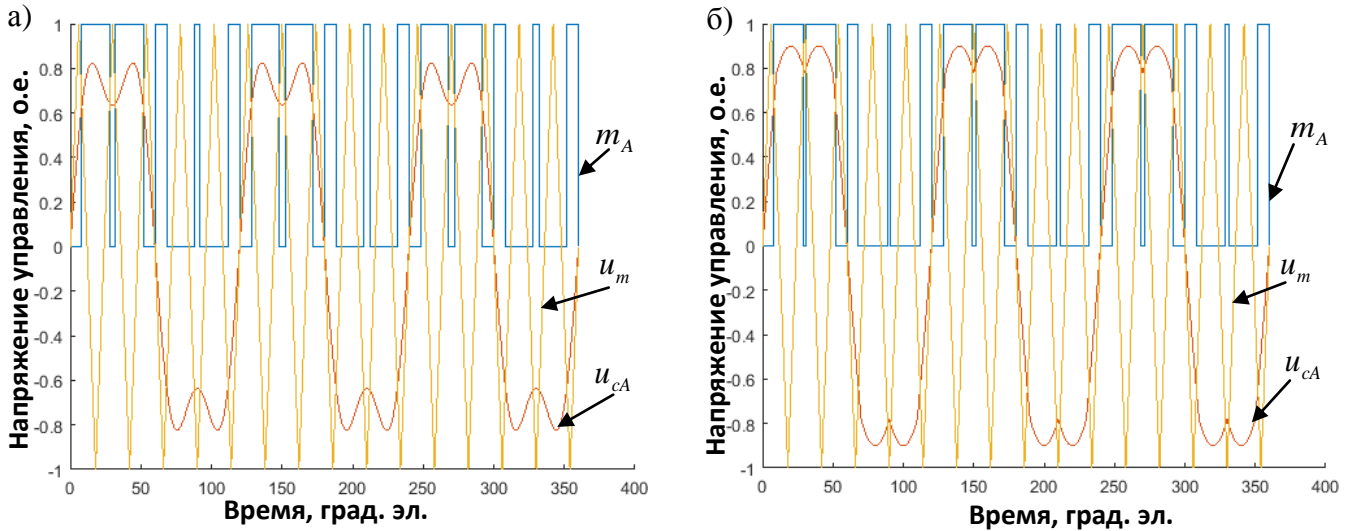
Второго рода, вносят требования стандартов, норм, а также физическую сущность.

$$O_i \in \{o_{j1}, o_{j2} \dots o_{jmax}\}, \quad (3)$$

где o_j – дискретное значение параметра.

Анализ работы мостового трехфазного инвертора проводился с использованием метода спектрального моделирования алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в асинхронной и синхронной области регулирования основной гармоники напряжения с учетом времени открытия и закрытия «ключей» (рис. 5 и рис. 6). Для этого находилась функция переключения, которая определяется при сравнении управляющего u_c и опорного сигнала u_m для каждого моделируемого способа управления.

$$\begin{aligned} m_i(\omega) &= 1, \text{ если } u_c(\omega) > u_m(\omega), \\ m_i(\omega) &= 0, \text{ если } u_c(\omega) \leq u_m(\omega). \end{aligned} \quad (4)$$



а) сигнал управления при синусоидальной ШИМ с инъекцией 3 гармоники;

б) сигнал управления при векторной ШИМ

Рисунок 5 – Сигналы управления при реализации асинхронных алгоритмов ШИМ

Синусоидальная ШИМ с инъекцией третьей гармоники для фазы $N = 1 \dots 3$, имеет управляющий сигнал u_c

$$u_{cN} = \frac{A}{k} \cdot \left(\sin\left(\omega t + \frac{(2 \cdot N - 2)}{3} \cdot \pi\right) - (1 - k)\sin(3 \cdot \omega t) \right), \quad (5)$$

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

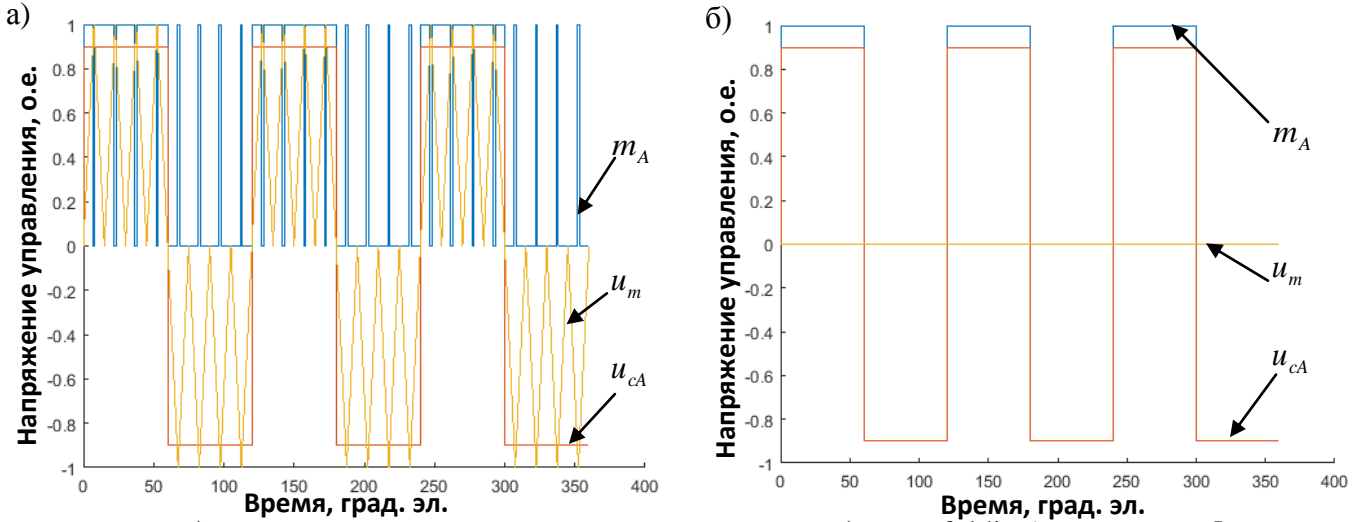
Векторная ШИМ для фазы $N = 1 \dots 3$, использует управляющий сигнал u_c

$$u_{cN} = A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{(2 \cdot N - 2)}{3} \cdot \pi\right) + \Delta u, \quad (6)$$

где Δu – сигнал предмодуляции.

Сигнал предмодуляции Δu на каждом шаге интегрирования может быть определен:

$$\begin{aligned}
 u_{\max} &= \max\left(\sin(\omega t), \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right), \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right)\right), \\
 u_{\min} &= \min\left(\sin(\omega t), \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right), \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right)\right), \\
 \Delta u &= -\left(\frac{(u_{\max} - u_{\min})}{2} + u_{\min}\right).
 \end{aligned} \tag{7}$$



а) сигнал управления при «сглаживании углов» (corner folding), например, 5 кратный;
 б) сигнал управления при полноблочной модуляции
 Рисунок 6 – Сигналы управления при реализации синхронных алгоритмов ШИМ

Моделирование позволило при каждом законе регулирования определить токи транзистора и диода фазы плеча инвертора, а также, при известных параметрах проводимостей, мощность потерь и температуру полупроводниковых структур.

При анализе работы двигателя (см. схему замещения рис. 7), учитывался как эффект насыщения магнитопровода, так и эффект вытеснения тока в проводниках ротора.

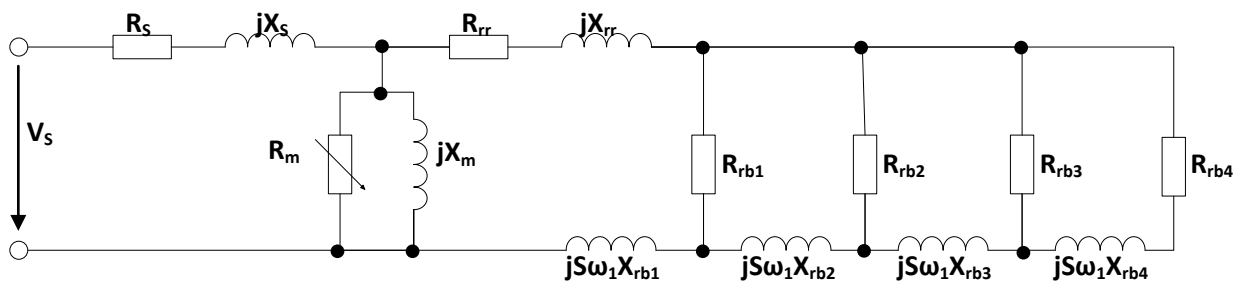


Рисунок 7 – Схема замещения АД с учетом специальных эффектов

Эквивалентное сопротивление цепи намагничивания Z_m

$$Z_m = \frac{R_m \cdot j\omega_1 L_m}{R_m + j\omega_1 L_m}, \tag{8}$$

где ω_1 – частота вращения поля статора.

Активное R_r и индуктивное сопротивление ротора L_r ,

$$R_r = R_{rr} + R_{rb}, \quad L_r = L_{rr} + L_{rb}, \quad (9)$$

где R_{rr}, L_{rr} – активное и индуктивное сопротивление короткозамкнутых колец соответственно;

R_{rb}, L_{rb} – эквивалентное активное и индуктивное сопротивление.

Уравнения, описывающие статический режим работы машины, примут вид

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j\omega_1(L_s + Z_m) & j\omega_1 Z_m \\ j(\omega_1 - \omega_r)Z_m & R_r + j(\omega_1 - \omega_r)(L_r + Z_m) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vec{I}_s \\ \vec{I}_r \end{bmatrix}, \quad (10)$$

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

R_s, L_s – активное и индуктивное сопротивление обмотки статора;

i_s, i_r – ток статора и ротора соответственно.

Энергопотребление тягового привода при его циклической эксплуатации

$$EC = \int_0^{end} P_{eldr} dt, \quad (11)$$

где 0, *end* – начальное и конечное значение времени движения по заданному участку;

P_{eldr} – требуемое значение электрической мощности привода в двигательном или тормозном режиме, которое необходимо для создания заданного значения скорости и силы тяги.

Стоит отметить, что величина требуемой электрической мощности привода включает значения эффективности не только двигателя в зависимости от режима его работы, но также преобразователя и редуктора в зависимости от требуемой силы тяги и скорости движения вагона метро.

Анализ редуктора проводился с использованием карты его эффективности, для чего были определены параметры кинематической схемы. Карта эффективности строилась при заданных величинах мощности (крутящего момента и частоты вращения) за счет определения потерь в ступени редуктора, в результате предварительного уточнения геометрических параметров передачи по известной методике (ISO/TR 14179-2:2001(E), ГОСТ 16532-70). Была построена картина распределения вариантов передаточных отношений одной ступени цилиндрического косозубого редуктора при постоянстве модуля и угла зацепления.

Область допустимых вариантов одноступенчатого редуктора ограничена минимальным и максимальным значением зубьев шестерни z_p и большого зубчатого колеса z_g

$$z_p \in [19...88], \quad z_g \in [19...88]. \quad (12)$$

При построении системы приняты во внимание показатели жизненного цикла инвертора и двигателя исходя из рассчитанных циклограмм температурного нагружения.

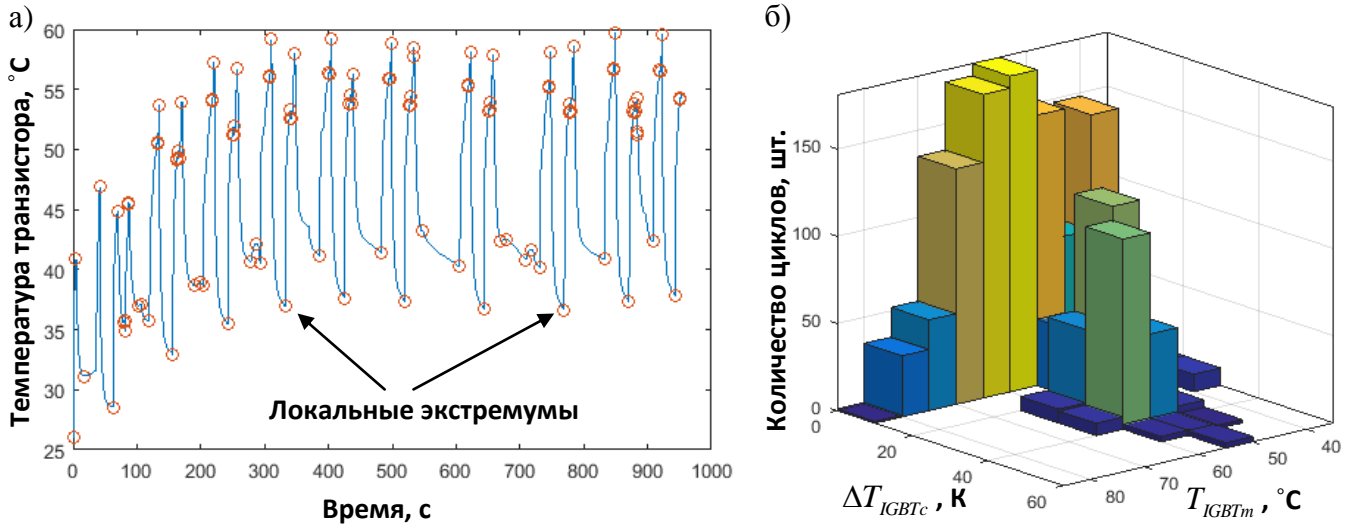
Расчет жизненного цикла инвертора основан на подсчете количества циклов с различной амплитудой ΔT_{IGBTc} и средним уровнем колебания температуры T_{IGBTm} при помощи метода схематизации процесса нагружения («дождя») (рис. 8). Количество циклов до повреждения рассчитывается по методу Мэнсона с учетом абсолютных и средних значений температуры N

$$N = A \cdot \Delta T_a^\alpha \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_b \cdot T_m}\right), \quad (13)$$

где A , α – постоянные величины, получаемые экспериментально для конкретного модуля;

E_a – энергия активации;

k_b – постоянная Больцмана.



а) отрезок температурной циклограммы транзистора; б) число циклов нагружения
Рисунок 8 – К расчету жизненного цикла инвертора

Расчет жизненного цикла двигателя основан на подсчете количества точек циклограммы нагружения с одинаковым значением абсолютной температуры обмотки. Жизненный цикл изоляции двигателя при постоянном значении температуры, LT

$$LT = LT_0 \cdot 2^{\frac{TI - \vartheta_c}{HIC}}, \quad (14)$$

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

TI – относительное значение температуры, определяются лабораторно;

ϑ_c – абсолютное значение температуры обмотки;

HIC – коэффициент снижения на половину (halving index), определяются лабораторно.

В четвертой главе рассматривался алгоритм оптимизации системы тягового привода.

Задача оптимизации предполагает выбор наилучшего варианта из множества решений системы по целевой функции Q , который соответствует заявленному критерию оптимизации.

$$Q = f(x) \equiv \{x_1, x_2 \dots x_{\max}\}, \quad (15)$$

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 (таблица 2). В качестве переменных величин проектирования принимаются передаточное

отношение редуктора, число витков обмотки статора, длина активной части ротора, максимальная частота модуляции инвертора, мощность преобразователя, мощность двигателя.

Таблица 2 – Возможные конфигурации системы привода

Конфигурация привода	Инвертор		Двигатель	Редуктор
	Тип инвертора	Максимальная частота модуляции, Гц	Длина активной части, мм	Передаточное отношение, ед.
1С4М*	INV101	500...1200	130...180	6...14
1С2М**	INV103			
1С4М*	INV105			

* – 1 инвертор на 4 двигателя;

** – 1 инвертор на 2 двигателя.

Математическим решением задачи оптимизации будет являться определение вектора одних параметров компонента, при которых другие принимают экстремальные значения.

$$extr \leftarrow F(X, P), \quad f_i(X, P) \leq \| = \| \geq const_j, \quad x_{i_{\min}} \leq x_i \leq x_{i_{\max}}, \quad (16)$$

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

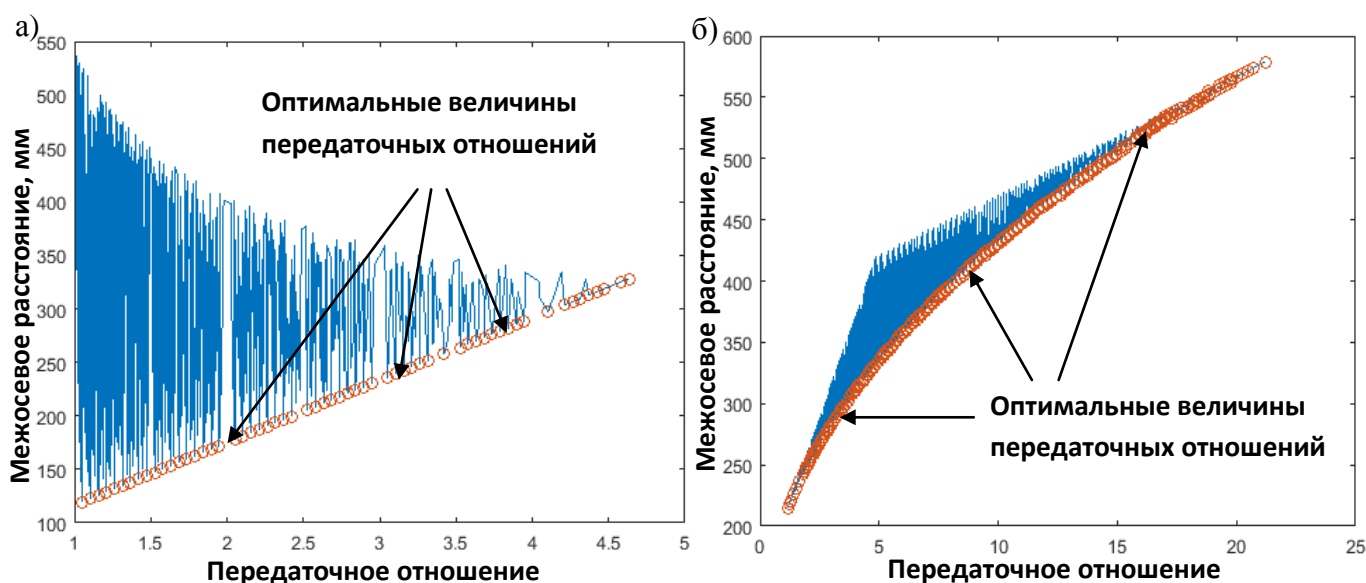
f_i – аналитическая зависимость между выше обозначенными векторами;

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

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

Зависимость f_i описывается уравнениями состояния привода в статическом режиме.

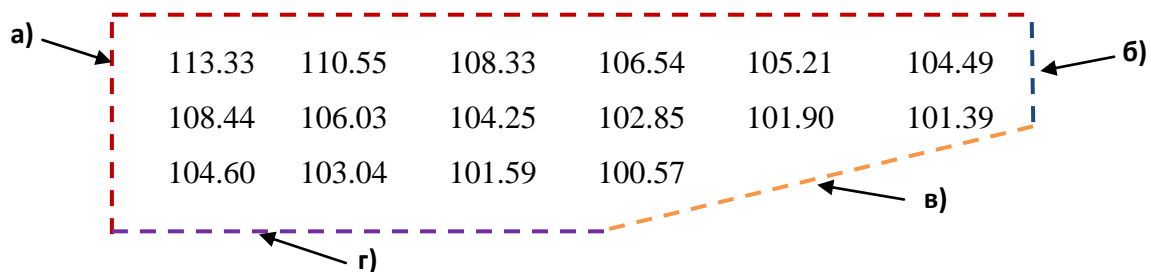
Оптимизация редуктора по критерию минимальности межосевого расстояния, а значит и минимальности его момента инерции наглядно представлена на рис. 9.



а) для одноступенчатого редуктора; б) для двухступенчатого редуктора
Рисунок 9 – Оптимальные значения передаточного отношения по ступеням при постоянном значении модуля

Из множества вариантов распределения межосевых расстояний выбран вектор соответствующий рассматриваемому критерию для одно- и двухступенчатого редуктора при постоянстве модуля и угла наклона зубьев. Выбор же действительного модуля позволил уточнить кривую оптимального передаточного отношения в зависимости от общей длины межосевого расстояния и сравнить одноступенчатый и двухступенчатый редуктор при оптимальной длине общей централи. Критерием изменения модуля ступеней явилось квазипостоянство механического напряжения в зацеплении при работе с одинаковым крутящим моментом, который соответствовал предельным значениям используемой тяговой характеристики.

При рассмотрении вариантов привода, работающих с одним передаточным отношением редуктора, было введено понятие блокирующего контура при изменении относительного энергопотребления привода. Он представляет собой контур из ограничений функционального характера в случае изменении длины (по вертикали) и числа витков (по горизонтали) машины (рис. 10).



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

Рисунок 10 – Блокирующий контур двигателя (значения в процентах)

Для оценки степени использования объема машины при сравнении различных сочетаний рабочих параметров привода был введен коэффициент относительного объема машины, k_{Mref}

$$k_{Mref} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot r \cdot D^2 \cdot l_{Fe} \cdot B_{\delta}, \quad (17)$$

где N – число витков обмотки статора;

r – передаточное отношение редуктора;

D – диаметр ротора;

l_{Fe} – длина активной части машины;

B_{δ} – максимальное значение индукции в воздушном зазоре.

Коэффициент относительного объема машины также использовался при сравнении асинхронных двигателей с различной геометрией магнитопровода. В результате удалось показать преимущества машин по техническим и стоимостным характеристикам с меньшим значением коэффициента относительного объема машины.

Использование коэффициента относительного объема привода позволило связать параметры объема двигателя с параметрами преобразователя и его жизненным циклом, а также с вели-

чиной энергопотребления (рис. 11). Было показано, что перечисленные параметры, включая коэффициент относительного объема, коррелируют со стоимостными показателями привода.

Расчеты с различным сочетанием конструкционных параметров показали тесную связь коэффициента относительного объема двигателя с энергопотреблением привода и жизненным циклом инвертора. Таким образом, появляется возможность оптимизации параметров тягового привода под заданный уровень энергопотребления и жизненного цикла инвертора.

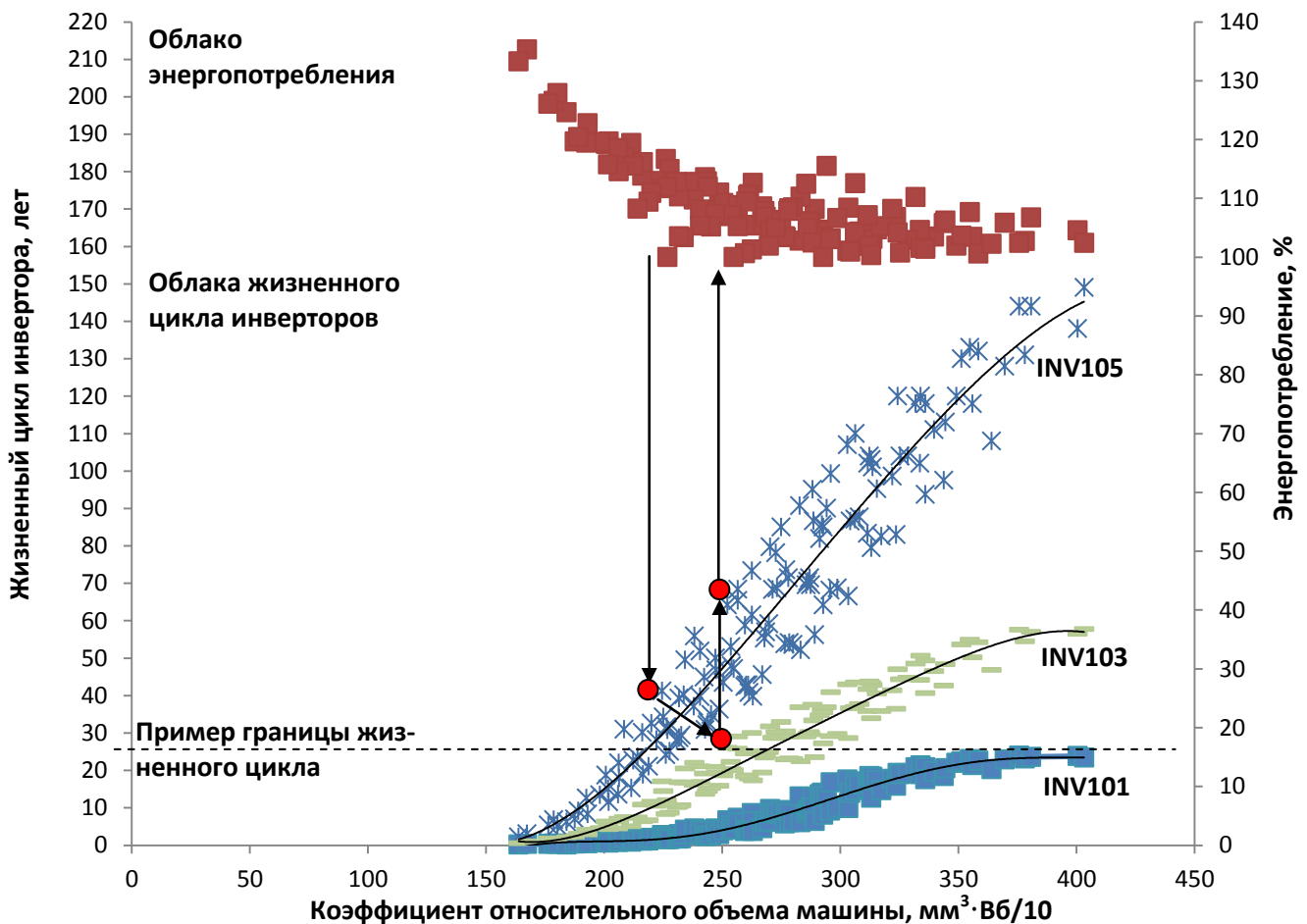


Рисунок 11 – К методике оптимизации привода по критерию

По рис. 11 была сформирована последовательность процесса оптимизации:

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;

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.

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 менее 7 %.

9. Предложена методика определения наилучшей совокупности параметров асинхронного тягового привода вагонов метрополитена по критерию наименьшего энергопотребления. На основе предложенной методики произведена оптимизация конструкционных 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций».

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Владыкин, А.В. Оптимизация самовентилируемого асинхронного двигателя как область повышения эффективности электропоездов метрополитена / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6 (66). – С. 18-24. – ISSN: 1997-0722.

6. Владыкин, А.В. Выбор оптимальных конструктивных параметров асинхронного привода метрополитена с учетом жизненного цикла инвертора / А.В. Владыкин // Транспорт Урала. – 2018. – № 1 (56). – С. 58-63. – ISSN: 1815-9400.

Публикации в журналах и научных сборниках.

7. Владыкин А.В. Поиск оптимального состояния привода с точки зрения энергоэффективности подвижной единицы / А.В. Владыкин, Н.О. Фролов // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3 (21). – С. 36-38. – ISSN: 2311-164X.

8. Владыкин А.В. Исследование влияния на показатели асинхронного тягового привода его конструктивных параметров / Н.О. Фролов, А.В. Владыкин // Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования: Материалы IX Международной научно-практической конференции / Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург, 2017. – С. 243-244.

9. Владыкин А. В. Определение количества температурных циклов инвертора МВПС метрополитена «методом дождя» / А.В. Владыкин // Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов «Техника и технологии наземного транспорта». – Екатеринбург: УрГУПС, – 2018. – С. 21–24.

Владыкин Алексей Владимирович

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

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

Подписано в печать «5» октября 2018 г.

Формат 60 × 84 1/16

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,2

Заказ № ____.