


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

На правах рукописи



**Танич Василий Олегович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ТЯГОВООРУЖЕННОСТИ  
МАНЕВРОВОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОКСОВАНИЯ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Омельченко Евгений Яковлевич

Магнитогорск - 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЛОКОМОТИВОВ С СИСТЕМОЙ ПЧ-АД .....	17
1.1. Патентные исследования особенностей систем тяговых электроприводов локомотивов .....	17
1.2. Сравнение типовых систем тяговых электроприводов локомотивов по системе ПЧ-АД .....	19
1.3. Усилия тяги и сопротивления при движении поезда.....	26
1.4. Порядок расчета сил сопротивления движению поезда.....	37
1.5. Выводы по главе и постановка задачи исследования .....	47
ГЛАВА 2. ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОЕЗДА .....	50
2.1. Программа расчета усилий.....	50
2.2. Моделирование тягового электропривода НПМ2 .....	61
2.3. Динамическая компьютерная модель тягового электродвигателя ДТА-350М.....	65
2.4. Оценка достоверности компьютерной модели электродвигателя..	75
2.5. Выводы по главе 2 .....	80
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ САР НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА БОКСОВАНИЯ НА ЛОКОМОТИВАХ .....	82
3.1. Требования к тяговому электроприводу НПМ2 .....	82
3.2. Исследование работы систем управления тягового асинхронного электропривода электровоза НПМ2 на динамической компьютерной модели.....	83
3.3. Системы скалярного регулирования. ....	88
3.4. Системы векторного регулирования .....	97
3.5. Процесс боксования у локомотивов .....	100

3.6. Математическое описание процессов в тяговом электроприводе при боксовании локомотива. ....	110
3.7. Выводы по главе 3. ....	115
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВНЕДРЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ .....	117
4.1. Моделирование переходных процессов .....	117
4.2. Моделирование разносного боксования передней тележки.....	117
4.3. Моделирование разносного боксования обеих тележек .....	119
4.4. Переход от разносного к устойчивому боксованию .....	120
4.5. Структурная схема системы электропривода локомотива с ограничением боксования.....	122
4.6. Моделирование устойчивого боксования и расчет его энергетических характеристик .....	124
4.7. Анализ эффективности предложенных мероприятий по модернизации системы управления тяговым электроприводом маневрового электровоза .....	131
4.8. Варианты развития систем управления электроприводами с ограничением боксования.....	143
4.9. Обоснование модернизации САР тягового электропривода электровоза НПМ2. ....	146
4.10. Выводы по главе 4. ....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	157
Приложение .....	176

## ВВЕДЕНИЕ

Промышленный железнодорожный транспорт является основным способом перевозки по сухопутным маршрутам больших масс грузов. Сочетание высокой скорости, энергетической эффективности, надежности и невысокой стоимости перевозок существенно снижает издержки производства. На территории крупных промышленных предприятий возникает постоянная необходимость в перемещении массивных и крупногабаритных грузов. Такие задачи обычно выполняются маневровыми тепловозами и электровозами. В случае развитой электрификации предприятия, при наличии контактной сети, наиболее предпочтительными локомотивами оказываются маневровые электровозы. Развитие полупроводниковой техники в системах электроприводов позволили применять схемы «преобразователь частоты - асинхронный двигатель (ПЧ-АД) на каждом индивидуальном тяговом электроприводе колесной оси локомотива. Использование системы ПЧ-АД позволяет: 1) повысить КПД перевозок; 2) снизить аварийность; 3) повысить проходимость на сложных участках пути, улучшив управляемость поезда при различных характеристиках пути и окружающих условиях. Тем не менее, внедрение тяговых систем по схеме ПЧ-АД на отечественных маневровых электровозах проводится достаточно медленно. Основной причиной этого отставания является застой в отрасли и низкая степень научной разработанности данной проблематики, в том числе по причине невысокого на электротягу спроса со стороны промышленников.

Анализ показал, что большинство предприятий используют тепловозную тягу на гидротрансформаторном приводе, т.к. не обладают достаточной электрификацией своих производств. Там же, где наличие контактной сети позволяет иметь парк маневровых электровозов, зачастую применяются морально и физически устаревшие модели на базе тяговых электроприводов постоянного тока с релейно-контакторной системой управления (РКСУ). РКСУ существенно проигрывает ПЧ-АД по всем параметрам, кроме

стоимости приобретения и ремонта. Но, даже с учетом вышесказанного, на отечественном производстве существуют исключения: ПАО «Магнитогорский Metallургический Комбинат» (ММК) уже два десятилетия эксплуатирует разработанный для производственных площадок промышленных предприятий маневровый электровоз НПМ2. Локомотив произведен ООО «Новочеркасский электровозостроительный завод» (ООО «ПК» «НЭВЗ») и рассчитан на работу в контактной сети с напряжением 1500В постоянного тока. Невзирая на многократную модернизацию изготовителем электровоза, он до сих пор имеет ряд недостатков. В числе недостатков НПМ2 присутствуют: недоиспользование двигателей по мощности, недостаточная устойчивость при боксовании и ограничение тяги при прохождении сложных участков пути. Проблемы выражаются в скатывании поезда к нижней точке пути, неспособности локомотива преодолевать подъемы без запаса кинетической энергии поезда, перегреве тяговых электродвигателей в длительном режиме работы под нагрузкой и частых срывах в боксование колесных осей. Множество проблем возникало в следствии деформации железнодорожного полотна на территории цехов после падения заготовок на рельсы, остальные обеспечивались геометрией путей, погодными условиями и неравномерностью загрузки состава поезда.

Ключевую роль во всех этих процессах играет скалярная система автоматического регулирования (САР) электроприводов асинхронных тяговых электродвигателей (ТЭД). В силовой схеме электровоза на каждой колесной паре установлена система ПЧ-АД. САР инверторов соединены между собой по CAN-шине, что обеспечивает их сопряжение с автоматизированной системой управления (АСУ) электровоза в целом. При таком управлении, на тяговый электропривод с командоконтроллера машиниста поступает сигнал задания тока. Задание отрабатывается идентичными ТЭП колесных осей 1-4, расположенными попарно на передней и задней тележках. На «легких» участках пути при нормальных погодных условиях с небольшим по массе

составом (меньше 1000 т) не возникает существенных проблем с управлением локомотивом, однако, при любом отклонении, вероятность срыва в боксование многократно повышается. Особенно часто эффект проявляется во время разгона локомотива, либо при появлении деформаций в продольном или поперечном профилях пути. Срыв в боксование одной из осей часто приводит к срабатыванию защит и вынужденному снижению силы тяги, а также к возможному торможению поезда. После осуществления торможения набор скорости потребует дополнительных издержек, что существенно снижает эффективность перевозок. В случае срыва в боксование двух или более осей можно говорить о потере управления тягой локомотива.

Разработка более эффективных программных алгоритмов существенно осложняется невозможностью точно предсказать воздействие внешних факторов. К таким воздействиям относятся: состояние рельсовых путей (качество поверхности и качество геометрии), погодные условия, поведение состава (усилие на сцепке), распределение сил сцепления по осям и команды управления с пульта машиниста. Таким образом, при проектировании локомотивов требуется решить одновременно несколько задач, т.е. «состыковать» высокую отзывчивость электровоза по каналам управления с максимально возможным КПД тяговой подсистемы электроприводов. Для решения такой задачи основополагающими являются несколько этапов: 1) выбор и проведение тяговых расчетов с последующим составлением математической модели, необходимой для реализации соответствующей подсистемы в САР ТЭП. На основании вычислений указанной модели можно сформировать основные требования к системе электропривода и произвести компенсацию ряда возмущающих воздействий; 2) исследование процессов боксования при различных вариантах распределения нагрузок на оси электровоза для формирования соответствующих алгоритмов управления САР электроприводов; 3) комплексное моделирование системы ТЭП электровоза, включающее в себя блоки, узлы и модули компенсации, подпрограммы

оптимальной величины сигналов задания по каждому контуру системы управления. Имитационное моделирование необходимо для достижения оптимума КПД по управлению и возмущению 4) оценка целесообразности модернизации технической части электровоза и установки дополнительного оборудования на НПМ2 для получения максимально возможных результатов 5) оценка эффективности принятых решений.

Несмотря на существенный объем исследований в области систем управления тяговыми электроприводами железнодорожного транспорта, большинство из них касается магистральных (поездных) локомотивов. В случае с маневровой работой – изыскания преимущественно затрагивают тепловозы. При этом, проблема повышения эффективности маневровой работы промышленными электровозами раскрыта не полностью, а имеющиеся в наличии способы и методы повышения КПД на маневрах являются локальными и не обеспечивают перекрытия большинства возможных ситуаций. К тому же, большинство мероприятий применимы лишь для незначительных отклонений от номинального режима работы. При их применении не учитывается многофакторная реальная картина протекания физических процессов и взаимодействия разнородных систем при движении поезда. На основании приведенных доводов можно сделать вывод, что в настоящее время существует комплексная проблема повышения эффективности железнодорожных перевозок электровозами при маневровой работе. Представленная проблема, в первую очередь, касается территории промплощадок промышленных предприятий. Это сопряжено с общими проблемами повышения надежности и снижения рисков возникновения нештатных ситуаций на железной дороге. Одним из решений данной проблемы является создание комплексной методики отслеживания и расчета основных параметров в системе ТЭП. Также должны быть разработаны динамические компьютерные модели, реализующие предложенные алгоритмы в системе управления. Дополнительно возможна разработка рекомендаций по

модернизации или дооснащению электровоза оборудованием, обеспечивающим достижение требуемых показателей.

**Степень разработанности.** Исследования в области тяговых расчетов, боксования локомотивов, а также систем управления маневровых электровозов и моделирования тяговых электроприводов отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых, таких как Бакланов А.А., Бондарев Д.В., Виноградов А.Б., А.В. Владыкин, Власьевский С.В., Волков С.Г., Зарифьян А.А., Карякин А.Л., Курбасов А.С., Колпачьян П.Г., Космодамианский А.С., Ляпушкин Н.Н., Марков Д.П., Пугачев А.А., Поляков В.Н., Самме Г.В., Г.Г. Соколовский, Сидяков В.А., Федяев Г.А., Федяева Н.А., Флоренцев, С.Н., Харисов И.Р., Шилин Н.Д., Шрейнер Р.Т., Н. Chen, E. Gouda, T. Ishrat, P. Karlovsky, P. Pichlík, L.P. Resende, M. Popescu, S. Saini, M. Spiryagin, C. V. van de Merwe, M. F. Umar, X. Wen, M. Yamashita, L. H. Zhou и др.

**Объектом исследования** в работе является промышленный маневровый 4х-осный электровоз НПМ2, рассчитанный на питание от контактной сети постоянного тока с номинальным напряжением 1500 В, оснащенный индивидуальными для каждой оси тяговыми электроприводами, выполненными по системе ПЧ-АД со скалярной системой управления.

**Предметом исследования** являются тяговые электропривода, выполненные по системе ПЧ-АД с системой автоматического управления в составе 4х-осного маневрового электровоза НПМ2.

**Целью диссертационной работы** является модернизация микропроцессорной САР тягового электропривода по системе ПЧ-АД, приводящая к улучшению тяговых и энергетических характеристик промышленного маневрового электровоза НПМ2 за счет повышения тяговой мощности и устойчивости САР в режиме тяги и боксования локомотива.

**Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:**

1. Анализ имеющихся данных и методик расчета тяговых усилий локомотивов



при движении по траектории, при боксовании, методик оптимизации управления в системе ПЧ-АД.

2. Разработка математической модели для расчета требуемых тяговых усилий локомотива на различных участках траектории движения поезда.

3. Разработка достоверной математической модели трехфазного асинхронного тягового двигателя ДТА, тягового электропривода колесной оси по системе ПЧ-АД, пригодной для исследования процессов в тяговом электроприводе локомотива в различных режимах работы, включая выбор сцепных зазоров и боксование.

4. Разработка алгоритмов, повышающих устойчивость работы САР в граничных и критических режимах работы тяговых электроприводов электровоза НПСМ2, включая боксование.

5. Разработка дополнительных рекомендаций по модернизации оборудования электровоза НПСМ2 для повышения эффективности его работы.

6. Оценка эффективности принятых технических решений.

В первой главе проанализированы патентные исследования способов повышения сцепления и увеличения силы тяги локомотивов, в т.ч. при боксовании. Проанализировано устройство современных тяговых электроприводов (ТЭП) локомотивов по системе ПЧ-АД, рассмотрены существующие схемы силовой части данных ТЭП. В качестве основы для математического моделирования нагрузок тяговой подсистемы выбрана утвержденная методика тяговых расчетов.

Во второй главе на основании имеющихся данных электровоза НПСМ2 и последовательности выполнения тяговых расчетов составлена математическая и динамическая компьютерная модель расчета сил сопротивления движению поезда, в т.ч. приведенных к электроприводу колесной оси локомотива. На данной модели рассчитаны нагрузки для поезда с электровозом НПСМ2 в качестве головного локомотива при движении на участках пути различного профиля, получены тахограмма и нагрузочная диаграмма тягового

электропривода локомотива. На базе исходных данных электрооборудования разработана математическая и динамическая компьютерная модель тягового асинхронного электродвигателем ДТА-350М. Выведены основные характеристики двигателя, проведено сравнение с исходными параметрами электрической машины. Сделаны выводы о достоверности модели электродвигателя. Для анализа различных режимов работы составлена математическая и динамическая компьютерная модель тягового электропривода электровоза НПМ2 и проверена ее работоспособность.

В третьей главе по результатам моделирования сформулированы требования к электроприводу и его системе автоматического управления. На динамической компьютерной модели проведено исследование работы комплектной скалярной САР, а также других доступных вариантов систем скалярного и векторного регулирования электроприводов. Было рассмотрено влияние на характер переходных процессов компенсации скольжения, IR-компенсации. Сделаны выводы о целесообразности применения системы векторного управления тяговыми электроприводами. Рассмотрены физические аспекты процесса боксования электровоза НПМ2. Описан процесс боксования локомотива на примере электровоза НПМ2, даны понятия упругого и истинного проскальзывания (боксования). Выведены математические зависимости сил давления колес локомотива на рельсы от силы сопротивления вагонов при движении поезда, получены граничные значения сил тяги на колесных осях локомотива. Рассмотрены зависимости коэффициента сцепления от проскальзывания, составлена математическая модель боксования. Проанализированы варианты входа в режим боксования, указаны условия возникновения разносного симметричного боксования, выявлены критерии устойчивого боксования.

В четвёртой главе составлена динамическая компьютерная модель электропривода при боксовании, дана оценка вариантов возможных режимов работы ТЭП электровоза при боксовании, на динамической компьютерной

модели проведено моделирование устойчивого боксования, выполнены исследования режимов потребления электроэнергии ТЭП электровоза при разном и устойчивом боксовании, приведены алгоритмы САР для повышения эффективности работы ТЭП при боксовании. Описана последовательность работы САР тяговых электроприводов электровоза НПС2 для перехода в режим устойчивого боксования и поддержания эффективности работы. Представлена структура системы автоматического регулирования тяговых электроприводов электровоза НПС2 с блоком ограничения боксования. В рамках представленной системы электропривода рассмотрены различные варианты получения сигнала скорости вращения колесных пар и передвижения локомотива, произведена оценка необходимости дооборудования локомотива датчиком линейной скорости движения. Дана оценка эффективности предложенных решений принятых показателей, обоснована необходимость аппаратной модернизации системы управления тяговыми электроприводами НПС2.

В заключении приведены результаты работы, подведены итоги проведенных исследований, сделан вывод о перспективности дальнейшей модернизации аппаратной части электровоза для повышения эффективности его работы.

**Научная новизна.** По ходу решения поставленных задач получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана математическая модель для расчета нагрузок локомотива по траектории движения поезда, отличающаяся наличием связей координат единиц подвижного состава с профилем пути и позволяющая непрерывно оценивать возникающие усилия сопротивления движению каждой единицы железнодорожного состава, с учетом ее типа, скорости, загрузки, текущего положения при прохождении кривых и наклонных участков.

2. Разработана математическая модель тягового электропривода НПС2, выполненного по схеме ПЧ-АД, отличающаяся тем, что в ее структуре

учтено изменение момента нагрузки и инерции при выборе сцепных зазоров подвижного состава во время разгона поезда. и позволяющая выполнять исследования работы электропривода совместно с его системой управления в режиме тяги и при боксовании, являющихся характерными режимами работы локомотива.

3. Установлены математические зависимости между максимальным усилием сцепления каждой колесной пары и усилием сопротивления вагонов при различных скоростях движения локомотива, установлен диапазон подстройки оптимального допустимого превышения угловой скорости колеса над приведенной к его диаметру линейной скоростью движения локомотива. В данном диапазоне достигаются максимальные силы сцепления и максимально допустимой силой тяги соответственно.

4. Разработана математическая модель, описывающая процессы в тяговом электроприводе локомотива при боксовании колесных пар. Модель отличается от известных наличием в структуре блока ограничения проскальзывания с возможностью корректировки предельной скорости скольжения колесной пары, что дает возможность предотвращать разносное боксование при сохранении близкой к максимальной, силы сцепления колеса с рельсом. Модель может быть использована для исследований тяговых электроприводов других локомотивов. В модели имеется возможность оценки электропотребления тяговых электроприводов. При добавлении в САП сигнала физического датчика линейной скорости движения локомотива эффективность применения модели дополнительно возрастает.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Разработанная динамическая компьютерная модель расчета сил сопротивления движения поезда по траектории железнодорожных путей позволяет рассчитывать требуемые моменты электроприводов для обеспечения тех или иных скоростных режимов движения подвижного состава, выявлять критичные участки пути, планировать расход

энергоресурсов и подбирать для наиболее эффективной транспортировки подходящие типы локомотивов и вагонов, а также допустимое количество и массу последних.

2. Разработанная динамическая компьютерная модель электропривода по системе ПЧ-АД, включающая узлы имитации боксования позволяет на стадии проектирования локомотивов с высокой точностью (более 96%) прогнозировать устойчивость и энергоэффективность, как выстраиваемых систем конкретных тяговых электроприводов железнодорожного транспорта, так и локомотивов в целом. Узлы динамической компьютерной модели, в частности, ее механическая часть, содержащая математическое описание физических процессов при выборе сцепных зазоров, может быть использована отдельно и быть адаптирована для исследований других систем тяговых приводов на локомотивах. При добавлении в САР физического датчика линейной скорости движения локомотива эффективность применения модели дополнительно возрастает

3. Предложенные к внедрению рекомендации по модернизации САР, алгоритмы для внедрения в систему автоматического управления тяговых электроприводов промышленного маневрового 4х-осного электровоза НПМ2 позволяют повысить тяговую мощность локомотива на 18% за счет увеличения коэффициента использования двигателя, прироста пускового момента. Коррекция САР также позволяет поднять общую энергоэффективность агрегата от 2 до 5% и обеспечить повышенную стойкость в режимах боксования за счет перехода на векторное управление и внедрения регулятора ограничения скорости проскальзывания. Все остальные изменения затрагивают только программу управления и дадут ощутимый эффект даже без изменений аппаратной части.

**Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Результаты математического моделирования тяговых усилий локомотива, при движении поезда с различными типами, количеством и массами вагонов по путям с изменяющимся горизонтальным и вертикальным профилем. Применимость компьютерной модели при производстве тяговых расчетов;

2. Необходимость проведения аппаратно-программной модернизации системы управления тяговыми электроприводами промышленного маневрового электровоза НПМ2, включая переход на векторное регулирование, для повышения его тяговых свойств, энергоэффективности и устойчивости;

3. Усовершенствованная система управления тяговыми электроприводами электровоза НПМ2, включающая в себя блок ограничения боксования и обеспечивающая поддержание максимальных тяговых усилий при движении состава, включая зону устойчивого боксования для достижения максимальной общей тяговооруженности, энергоэффективности и устойчивости локомотива;

4. Комбинированная система определения линейной скорости движения локомотива, используемая для точного расчета рабочих зон в системе автоматического управления тяговыми электроприводами электровоза НПМ2. Такая система является наиболее предпочтительной для достижения максимальной общей устойчивости, надежности и энергоэффективности.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается достоверностью исходных положений, совпадением результатов математического моделирования систем тяговых электроприводов электровоза НПМ2 с экспериментальными данными, полученными в результате стендовых испытаний на заводе-изготовителе

тяговых электродвигателей ДТА-350 и по результатам опытной эксплуатации на производственной площадке ПАО «ММК».

**Соответствие паспорту специальности.** Задачи, решаемые в рамках данной диссертационной работы, соответствуют области исследования, обозначенной в паспорте специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, а именно п. 1 - «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования», п. 2 – «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов», п. 3 – «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления» и п. 4 – «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов»

**Апробация результатов диссертационной работы.** Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Proceedings of the IEEE Russian Work-shop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI)» (Magnitogorsk, Russia., 2019, 2020, 2023), международных конференциях «International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)» (Magnitogorsk, Russia., 2022, 2024).

**Публикации.** Теоретические и практические результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, опубликованы в 7 печатных работах, из

них 2 научные статьи в журналах в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 научных публикаций в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus. Кроме указанных работ получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.



## **ГЛАВА 1. СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЛОКОМОТИВОВ С СИСТЕМОЙ ПЧ-АД**

### **1.1. Патентные исследования особенностей систем тяговых электроприводов локомотивов**

Патентный поиск осуществлялся по современным электровозам с индивидуальным, построенным на базе ПЧ-АД тяговым электроприводом на каждой оси. Такими электровозами являются поездные 2ЭС5 и 2ЭС10. Конфигурации ТЭП в части наличия инвертера и АД совпадают, что открывает возможности для проведения дополнительных исследований. Возможно проанализировать САР электроприводов, вспомогательных систем повышения устойчивости при движении поезда, способов улучшения условий сцепления и предотвращения боксования колесных пар локомотива. Также возможно меры повышения энергоэффективности, надежности, управляемости, и, как следствие, снижения аварийности при различных условиях работы.

Для грузовых локомотивов разработаны различные варианты устройств и программных модулей подобного класса, например, адаптивные системы управления электроприводами, содержащие дополнительные физические датчики, программные блоки и модули прогнозирования [1, 2], компенсации возмущающих воздействий. К таким узлам относятся: блоки IR компенсации и компенсации скольжения, упрощенные программные модели расчета усилий сцепления и тяги по каждой оси на участках пути. Они включают в себя эмпирические корректировки коэффициентов регуляторов для различных ситуаций [3], наблюдатели нагрузок и ограничения моментов на каждой оси, модули предварительного подмагничивания для регулировки пускового момента и ограничители ускорения. В модели также входят подпрограммы расчета оптимальных режимов работы и регуляторы распределения нагрузок между осями [4]. В ряде случаев производители используют обоснованный переход на векторное управление [5].

Таким образом, по конкретным инженерно-техническим решениям можно выделить:

- устройство для увеличения силы сцепления ведущих колес локомотива с рельсовыми путями, представляющее собой установленную близко к рельсу катушку [6];

- блок ограничения тягового усилия [7] предусматривает установку на тяги осевых редукторов датчиков продольного усилия, и использовать их сигнал для сравнения с сигналом задания суммарной силы тяги и ограничения последнего. Блок препятствует развитию боксования и поддерживает стабильное сцепление колес с рельсами;

- комбинированная система [1], состоящая из датчика виброскорости колес колесных пар, настроенного в соответствии с нужной фазировкой колебаний колес на оси относительно друг друга (для нормального режима работы и режима боксования), и контроллера с программным анализатором колебаний. Система выдает сигнал на блок управления дополнительно установленной катушкой, примагничивающей к рельсу и повышающей силу сцепления сорвавшейся в боксование колесной пары с рельсом;

- [8] предполагает, помимо датчиков скорости вращения каждого электродвигателя, установку антенны с приемником системы навигации и включения в САР тяговых электроприводов обратной связи по линейной скорости локомотива. Линейная скорость считывается средствами системы спутникового позиционирования (ГЛОНАСС и аналоги) и обеспечивает наличие в системе текущей линейной скорости локомотива. Такие меры позволяют вести непрерывное сравнение приведенных линейных скоростей поверхности колесных пар с линейной скоростью движения локомотива и подключать коррекцию при их отличии;

С точки зрения системы управления существуют способы регулирования скорости ТЭП на пределе по сцеплению. Такой способ предлагается в [4]. Суть алгоритма коррекции в использовании для задания

линейной скорости колесной пары результата интегрирования сигнала задания на линейное ускорение. Используя 2 поправочных коэффициента (чуть больший и чуть меньший по отношению к линейному ускорению локомотива) и систему регистрации боксования/юза на основе вибродатчика, корректируется задание на скорость ТЭД, достигая высокой эффективности по использованию тяги локомотива;

Для электровоза 2ЭС10 разработана система контроля за боксованием, использующая датчик активной мощности ТЭД [9]. При проскальзывании колесной пары снижается нагрузка на двигатель и возрастает скорость, что приводит к снижению активной мощности двигателя. В результате срабатки формируется сигнал, снижающий момент тягового привода до достижения установившегося режима работы.

Как видно, предложенные различными авторами способы имеют разные отправные координаты и разные точки приложения корректирующих воздействий, обладают своими достоинствами и недостатками. Данный анализ показывает высокую актуальность проблемы и наличие различных способов ее решения. Для этого может потребоваться, как модернизации оборудования, так и изменение программы управления. Что касается НПМ2 – результаты работы подробно рассмотрены в следующих главах, где и дана исчерпывающая оценка их эффективности, с учетом опыта промышленной эксплуатации локомотива.

## **1.2. Сравнение типовых систем тяговых электроприводов локомотивов по системе ПЧ-АД**

Тяговые электроприводы современных промышленных локомотивов строятся по различным системам: ТП-Д, ПЧ-АД, ПЧ-СД, ПЧ-ВД и пр. В отечественном локомотивостроении наиболее распространены первые две конфигурации, что обусловлено, в первую очередь высоким уровнем исследовательской проработки, сравнительно невысокой стоимостью оборудования и простотой обслуживания. Если разделить промышленный

железнодорожный транспорт на категории поездного и маневрового, в последнем почти преобладает система ТП-Д. На данном этапе, только промышленный маневровый электровоз НПМ2 и тепловоз ТЭМ-23 функционируют на системе ПЧ-АД. Среди поездных электровозов можно привести в пример 2ЭС5 (Скиф) и 2ЭС10 (Гранит), которые построены на ПЧ-АД, и подробнее рассмотреть их с точки зрения конфигурации электропривода и САР.

Электроприводы электровозов по схеме ПЧ-АД устроены аналогично: Каждая колесная ось приводится в движение за счет установленного на ней электродвигателя, передающего крутящий момент на ось через шестерню-редуктор с фиксированным передаточным числом.

Электродвигатель переменного тока современного локомотива запитывается от индивидуального для каждого привода инвертера. В этом случае появляется возможность поосного регулирования силы тяги, что обеспечивает высокий КПД в различных режимах работы, высокое качество аварийного управления и снижение износа механической части. Это становится возможным благодаря технически обоснованному распределению нагрузок в зависимости от рабочей ситуации. Инверторы на базе IGBT-транзисторов позволяют использовать рекуперативное торможение с отдачей энергии в контактную сеть.

Важным отличием при сравнении систем электропривода является напряжение контактной сети: для поездных электровозов оно составляет, как правило, 3 кВ постоянного или 25 кВ **переменного** тока. В отличие от поездных электровозов, маневровый НПМ2 работает в контактной сети предприятия с напряжением 1500 В **постоянного** тока. Таким образом, преобразователь частоты ТЭД может не иметь в своем составе высоковольтного трансформатора. Магистральные электровозы обладают существенно большей мощностью и тяговооруженностью (отношением суммарной силы тяги к весу поезда. В частности, суммарная мощность

тяговых электродвигателей 2ЭС5 по сравнению с НПМ2 выше в 6,3 раза, тогда, как масса выше всего в 2,2 раз.

Поездная работа характеризуется длительным режимом работы тяговых агрегатов на высокой мощности и скорости, тогда как маневровую отличают резкопеременные нагрузки и небольшие скорости передвижения. Это обуславливает осторожное внедрение асинхронных электроприводов в маневровые локомотивы.

На рисунках 1.1-1.3 [11-21] показаны схемы электроприводов электровозов 2ЭС5, 2ЭС10 и НПМ2.

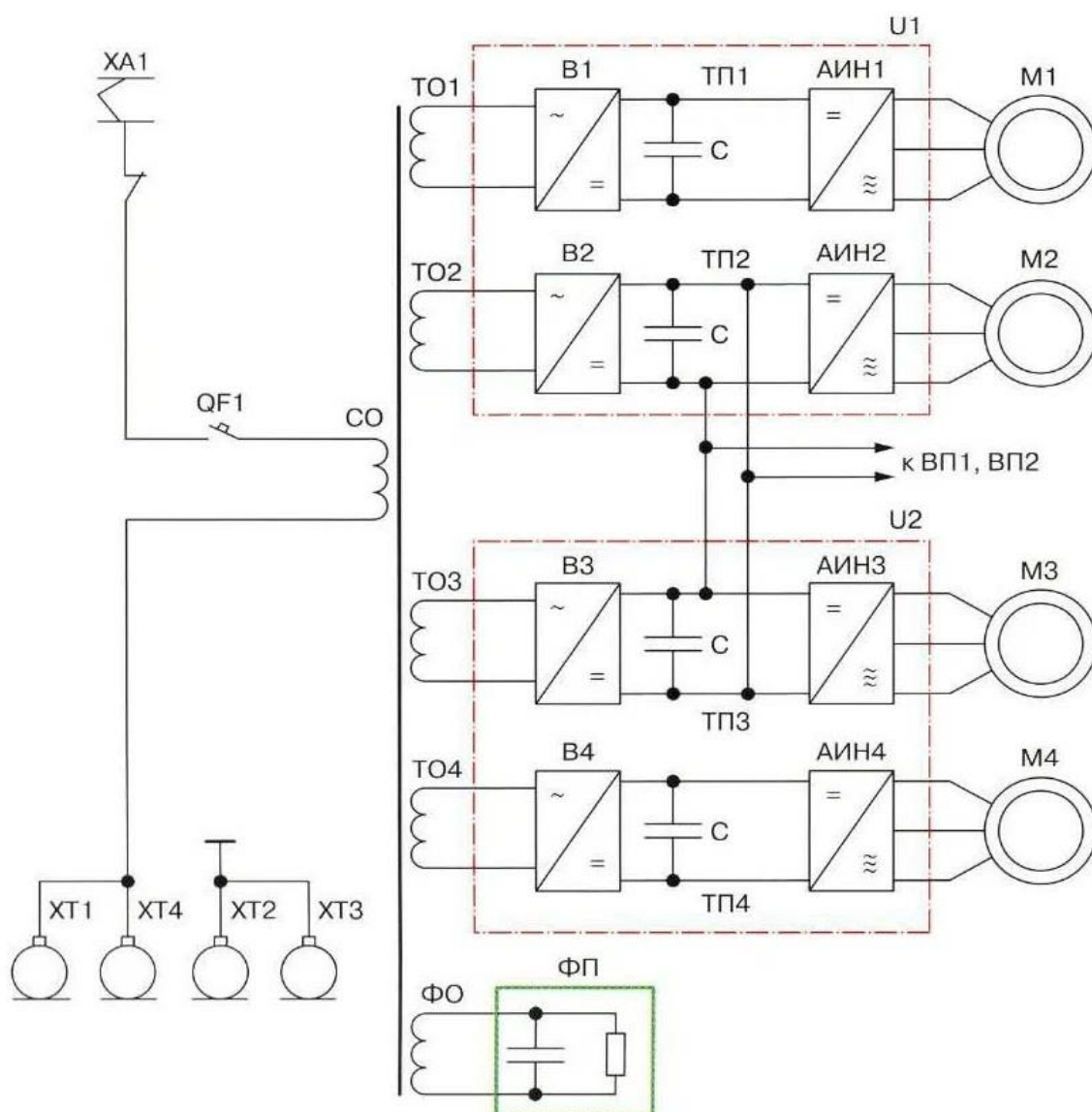


Рисунок 1.1 Однолинейная силовая схема секции поездного электровоза 2ЭС5 с электроприводами системы ПЧ-АД

На рис. 1.1 СО-сетевая (первичная) обмотка силового трансформатора, ТО-тяговые (вторичные) обмотки силового трансформатора ХТ1-ХТ4-токосъемные устройства на колесных парах локомотива

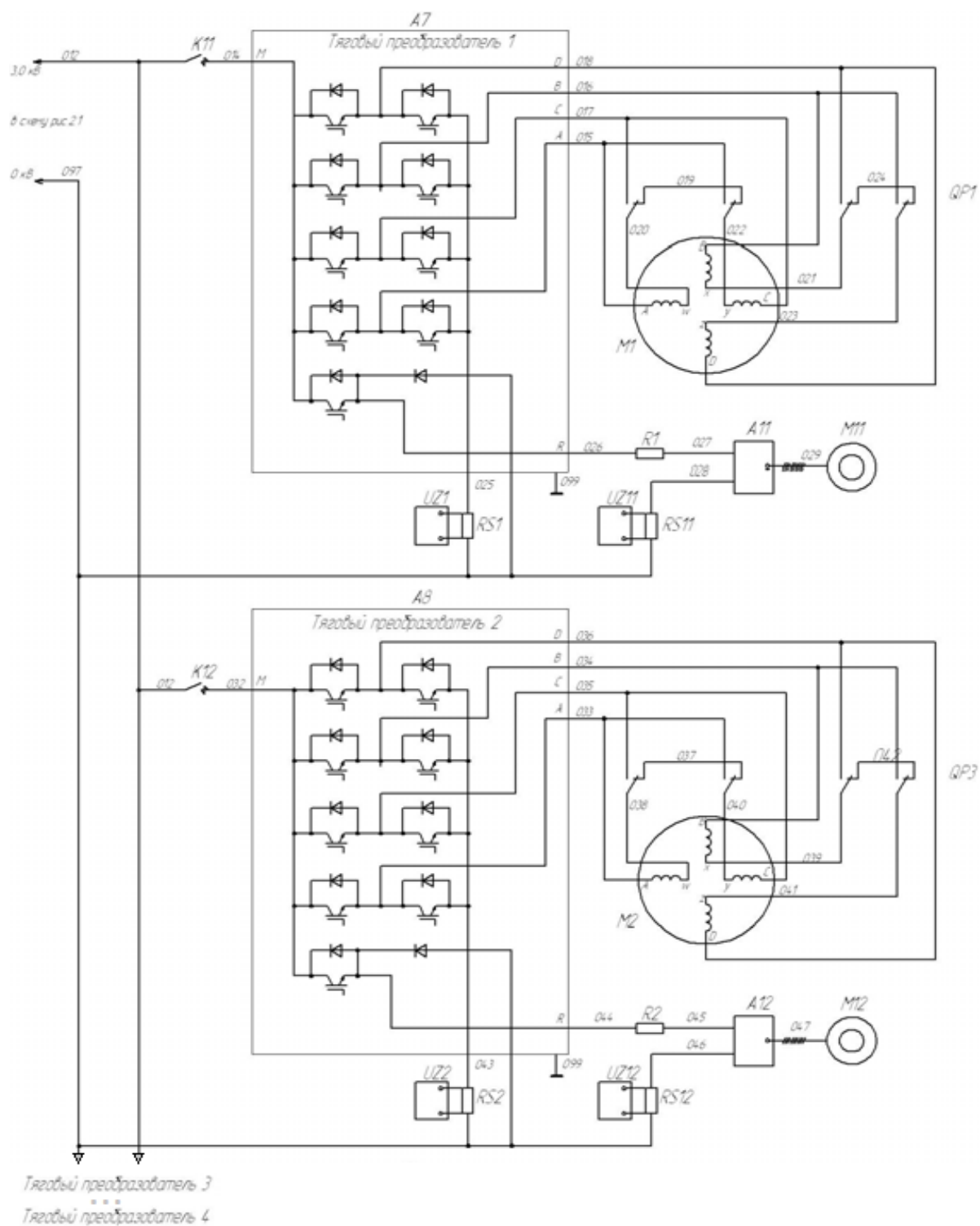


Рисунок 1.2 Силловая схема тяговых электроприводов системы ПЧ-АД секции электровоза 2ЭС10

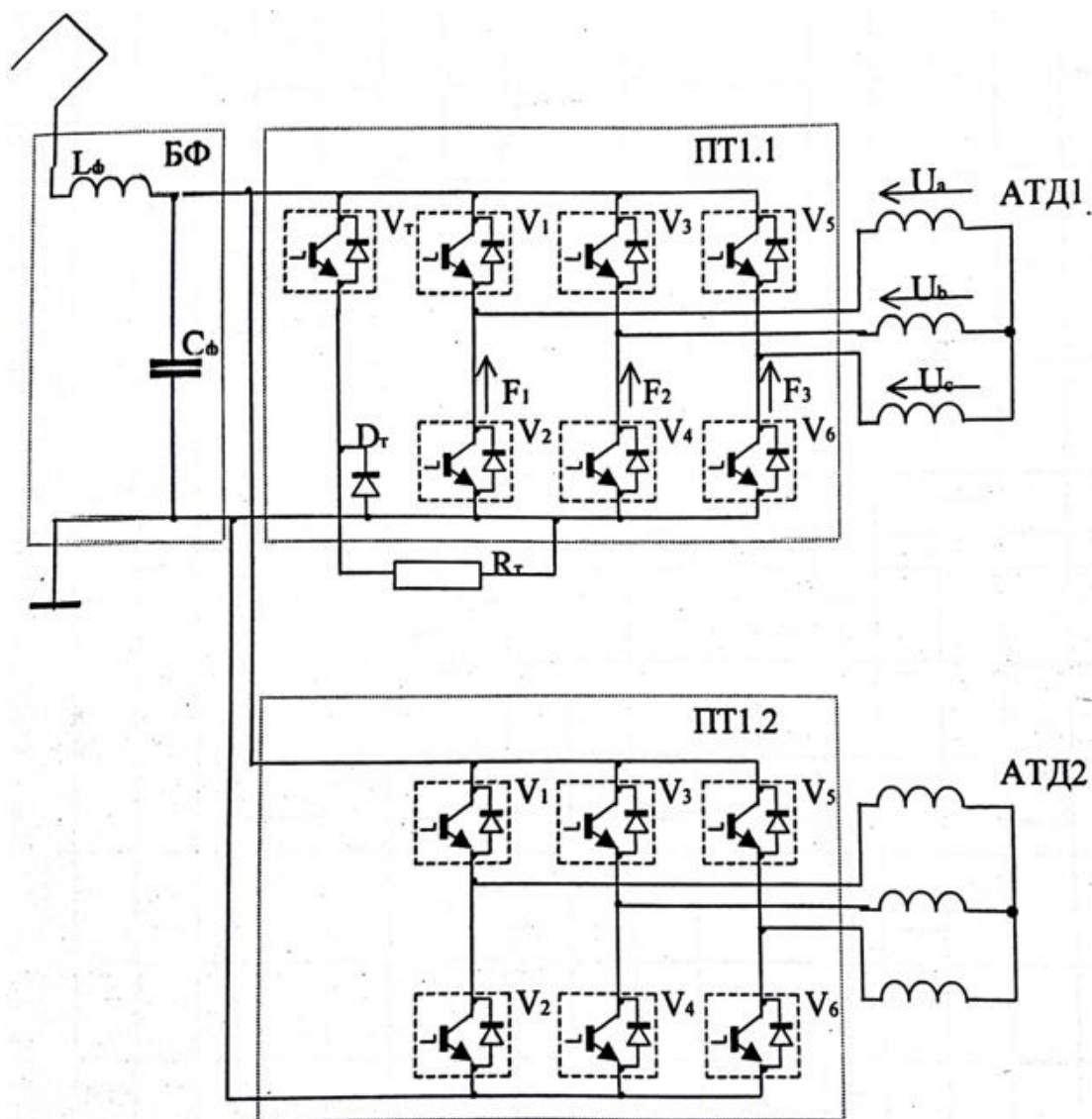


Рисунок 1.3. Силовая схема электроприводов системы ПЧ-АД тележки маневрового электровоза НПМ2.

2ЭС5 оборудован трехфазными тяговыми асинхронными электродвигателями 6 FRA 4567 G производства Alstom (Франция), тогда как на электровоз 2ЭС10 установлены **4-фазные** ТАЭД 1TB2822-0SG02 производства Siemens (Германия).

НПМ2 Оснащается трехфазными асинхронными тяговыми двигателями отечественного производства ДТА-350М. Двигатели серии ДТА изготавливаются для электроприводов колесных пар электропоездов. Технические характеристики ТАЭД электровозов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Технические данные ТАЭД 2ЭС5, 2ЭС10 и НПСМ2

№ п/п	Наименование параметра	6FRA4567G (2ЭС5)	1TB2822-0SG02 (2ЭС10)	ДТА-350М (НПСМ2)	Ед. Изм.
1	Номинальная мощность	1100	1200	350	кВт
2	Фазное напряжение	1074	2400	675	В
3	Номинальный ток	350	158	221	А
4	Номинальная скорость	1038	900	830	Об/мин
5	Номинальная частота	52,7	60	42,1	Гц
6	КПД	95,4	93	92,8	%
7	Коэффициент мощности	0,883	0,85	0,84	-
8	Максимальная скорость	2768	1800	1740	Об/мин
9	Число пар полюсов	3	4	3	-
10	Масса двигателя	2660	3980	2130	кг
11	Количество ТЭД на локомотиве	8	8	4	

Все представленные тяговые электропривода запитываются от IGBT-инверторов, напряжение формируется при помощи ШИМ или ШИР.



Сами тяговые электроприводы электровозов установлены на тележках локомотива и представляют собой сборный колесно-моторный блок, состоящий из тягового двигателя, с шестерней на его валу, механически связанной с ведомой шестерней (зубчатым колесом), расположенным непосредственно на колесной оси колесной пары, на которой также установлены бандажи с гребнем (рисунок 1.4). В конструкции электропривода также имеются связующая муфта и редуктор.

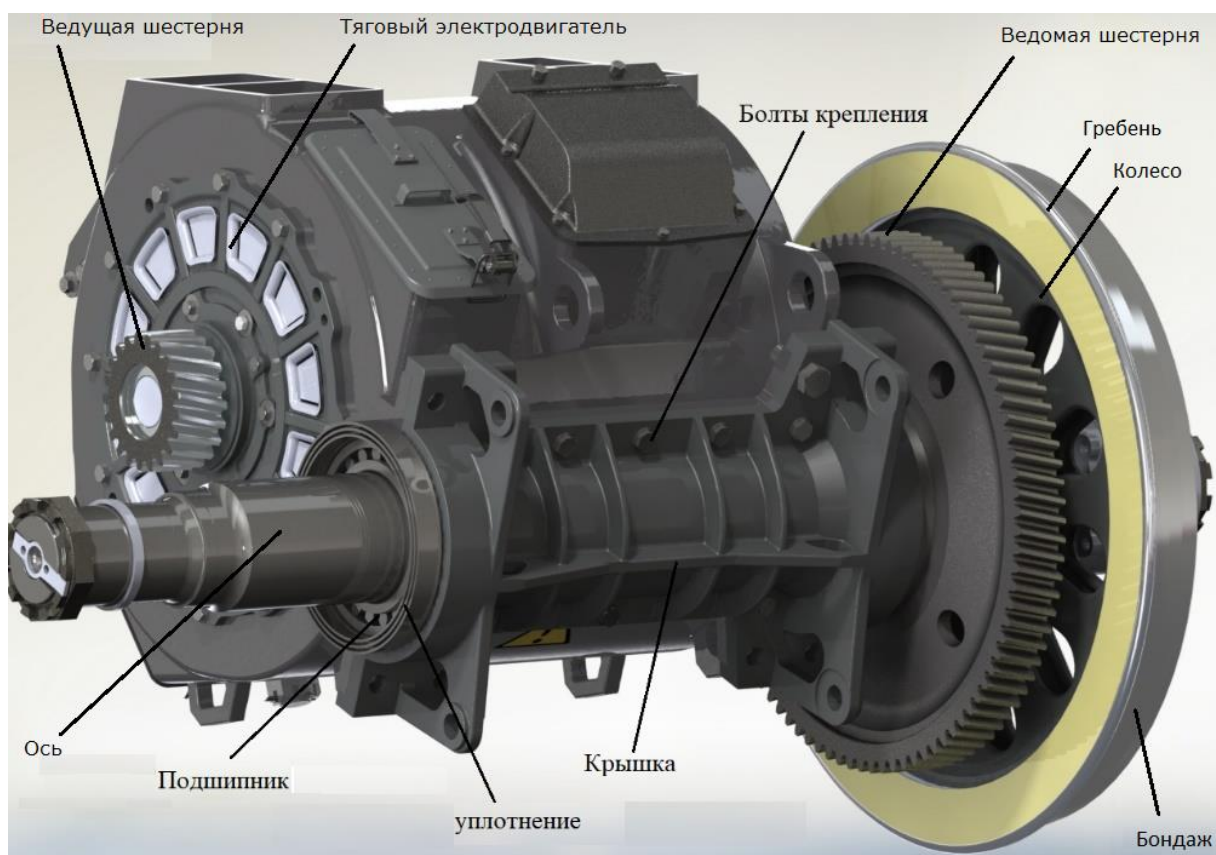


Рисунок 1.4 Конструкция тягового электропривода колесной оси (колесно-моторного блока) электровоза.

Дополнительные сложности при сравнении электроприводов создают различия в конструкции самих электровозов: 2ЭС5 и 2ЭС10 двухсекционные, что позволяет осуществлять более гибкое управление ввиду удвоенного количества приводных тележек и колесных осей, соответственно. Увеличенная длина этих электровозов позволяет более эффективно

распределять сцепной вес, уменьшать потерю сцепления тележек передней секции при начале движения с составом.

Опорно-осевое подвешивание колесно-моторных блоков обеспечивает гашение рывков и компенсацию ударов в ходовой части во время маневровой работы за счет наличия степени свободы электромеханической системы по отношению к рельсовым путям – при резком изменении нагрузке, механических толчках состава поезда, блок «качается» на демпферах, снижая скорость нарастания момента на механически сопряженных узлах (шестерни редуктора, ротор электродвигателя, колесные пары) – это приводит к колебаниям давления на рельсы.

### **1.3. Усилия тяги и сопротивления при движении поезда**

Для полноценного моделирования тягового электропривода необходимо объяснить характер физических взаимодействий, возникающих в системе колесо-рельс и рассчитывать механические нагрузки при разных режимах движения поезда.

На железнодорожном транспорте отсутствуют, как таковые, тахограммы и нагрузочные диаграммы работы электропривода, поскольку механика движения зависит от множества факторов, часто не зависящих напрямую от параметров поезда [22, 24]. Вместо этого отрасль содержит в себе отдельный теоретический раздел, именуемый «тяговые расчеты» (ТР). Проведение вышеуказанных расчетов позволяет оценить рабочие условия (скорости и моменты) тяговых электроприводов на всей протяженности пути при разном составе поезда.

Прежде чем перейти к стандартизированным расчетам, рассмотрим физические процессы, обуславливающие силу тяги локомотива в системе колесо-рельс [26] (рисунок 1.5).

Момент двигателя через механическую часть привода передается на колесную ось. Если система не контактирует с рельсами, колесная пара просто бы свободно вращалась вокруг своей оси. Крутящий момент  $M_k$  как

физическую величину можно заменить парой сил, действующих на расстоянии радиуса колеса. Амплитуда сил зависит от величины момента, переданного на ось [27, 28]

Сила  $F_1$  приложена к геометрическому центру колеса, тогда как  $F_2$  воздействует непосредственно в точке контакта с рельсом (точка  $A$ ). Под действием сил  $F_2$  и  $P_0$ , в соответствии с третьим законом ньютона, в механической системе появляются ответные силы реакции  $F_k$  и  $R$ . Они равны  $F_1$  и  $F_2$  по величине и противоположны им по направлению. Вектор  $R$  направлен перпендикулярно направлению движения и не приводит к изменениям его характера. Силу  $F_k$ , возникшую за счет крутящего момента

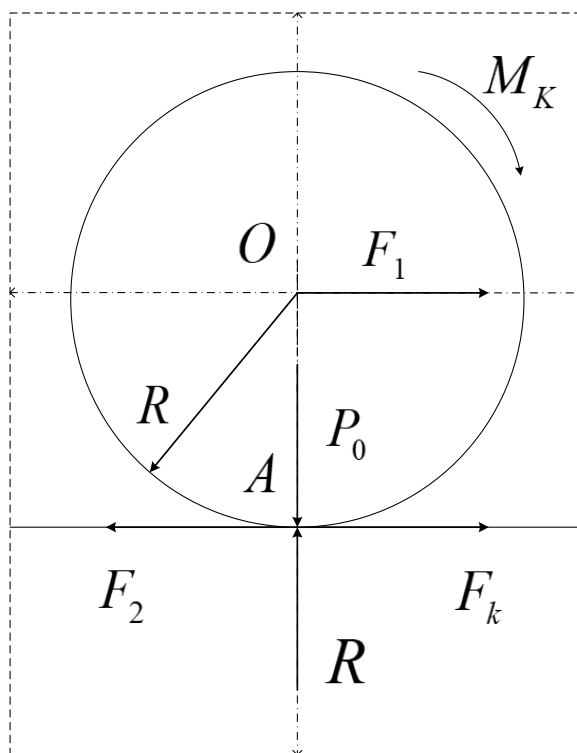


Рисунок 1.5 – Схема образования касательной силы тяги локомотива в системе колесо-рельс

электродвигателя и сонаправленную с вектором движения локомотива, принято считать касательной силой тяги. Упор позволяет бандажу (внешней части) колеса перемещаться относительно мгновенного центра вращения (точка  $A$ ). В то же время, сам центр непрерывно смещается по линии соприкосновения колеса с рельсом.

Силой сцепления называют внешнюю силу, обеспечивающую движение колесных пар по рельсам в случае приложения к колесной оси крутящего момента. Сила сцепления устанавливает ограничение на максимально возможную силу тяги локомотива, при превышении которой поверхность колеса начинает проскальзывать вдоль поверхности рельса - происходит боксование, представляющее собой прокручивание колес вокруг осей при отсутствии поступательного движения подвижного состава, что приводит к потере управления поездом, снижению силы тяги и экстремальному износу гребней и бандажей колес, а также головок рельсов [29-32].

Исследования в области взаимодействия материалов проясняют некоторые аспекты причин возникновения силы сцепления. В соответствии с теорией, сцепление является следствием следующих факторов [33-35]:

- механический контакт, сопровождающийся микроврезанием материалов взаимодействующих элементов при их деформации в области контакта вследствие превышения пороговых нагрузок с образованием т.н. вязкого трения;
- микровзаимодействия на уровне дефектов поверхности материалов контакта (микровыступов);
- наличие в зоне взаимодействия элементов внешней среды (посторонние включения вещества в зоне контакта, адсорбция, адгезия).

Факторы, указанные выше, обуславливают высокую связь силы сцепления с силой трения, препятствующая передвижению локомотива. Отсюда, формирование устойчивого сцепления для работы локомотива в системе подвижной состав – рельсовые пути требует рассмотрения всех основных аспектов их взаимодействий.

Обеспечение движения вдоль путей и исключение схода локомотива с рельс в штатном режиме движения достигается за счет бандажа с гребнем.

Аналогично при движении локомотива по дуге, на поворотах – гребень интенсивно цепляется за головку рельса с внутренней стороны, создавая

усилие, разворачивающее ось колесной пары вдоль вектора мгновенной линейной скорости локомотива, соответствующей минимальным энергозатратам. Жесткость конструкции тележек задает положение колесных пар, а центробежное усилие направлено вдоль радиуса кривой и препятствует повороту, поэтому наблюдается повышенный износ гребней, бандажей и головок железнодорожных путей. Соответственно, резко увеличивается сопротивление движению из-за потерь на трение и рассеивания энергии в демпферах. Сила трения на гребнях составляет около 80% всех сил сопротивления движению [22, 24].

Рассмотрим более подробно физические процессы при движении поезда в кривых

$$F = \frac{m \cdot V^2}{R}, \quad (1.2)$$

где  $m$  – масса вагона, мм  $V$  – линейная скорость вагона,  $R$  – радиус кривой.

В этом случае возникает центробежная сила, приложенная к центру масс единицы подвижного состава. Эта сила, с учетом рычага относительно точки опоры (гребни колес-головки рельс) формирует опрокидывающий момент и одновременно обеспечивает прижатие колес к наружному рельсу [22-23]. Поэтому внешний рельс на рисунке 1.6 расположен выше внутреннего на небольшую высоту  $h$ .

Уравновешивание состава будет возможно при соблюдении условия

$$q_2 = \frac{q \cdot h}{S_k} = \frac{m \cdot V^2}{R}, \quad (1.3)$$

где  $h$  – возвышение наружного рельса, мм,  $S_k$  – расстояние между кругами катания колес вагона, мм (для колеи 1520 мм равно 1600 мм) [22].

Следствием уравнения является уравновешивание сил только при одном значении линейной скорости поезда, равном

$$V = \sqrt{\frac{h}{S_k} \cdot g \cdot R}, \quad (1.4)$$

где  $R$  – радиус кривой,  $g$  – ускорение свободного падения.

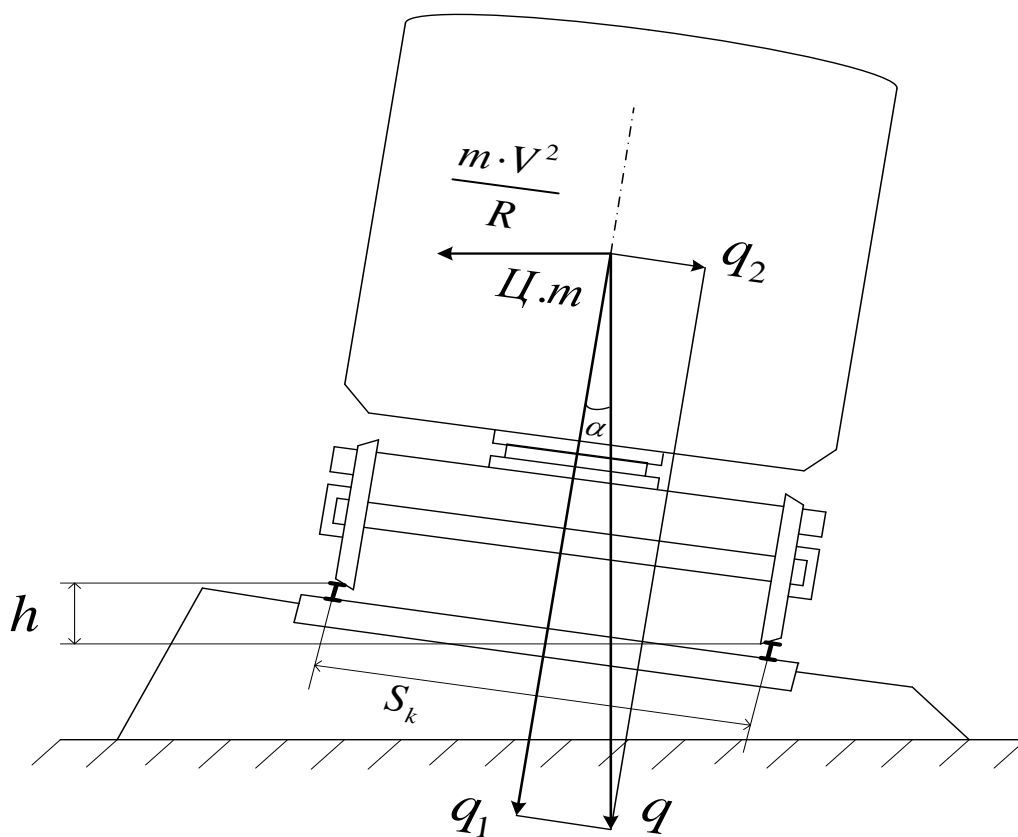


Рисунок 1.6 – Силы, действующие на вагон движении в кривой

Из этого следует, что величина дополнительного сопротивления движению при движении в кривых участках пути зависит от ряда факторов [22-24]: ширины колеи, радиуса кривой, возвышения наружного рельса, базы и конструкции тележек, степени изношенности бандажей, скорости состава, расстояния между осями, величины разбега осей, зазоров между гребнями бандажей и головками рельсов, конусности бандажей.

До этого момента все описываемые силы сопротивления движению были реактивными (возникающими вследствие движения), в реальности присутствуют и активные силы, действующие на поезд и влияющие на величину общего сопротивления движению. К таким силам относится, например, сила, возникающая при нахождении состава на путях под углом к горизонту (под уклон).

На рисунке 1.7 изображена схема ситуации движения состава в гору и обозначены силы, действующие в этом случае.

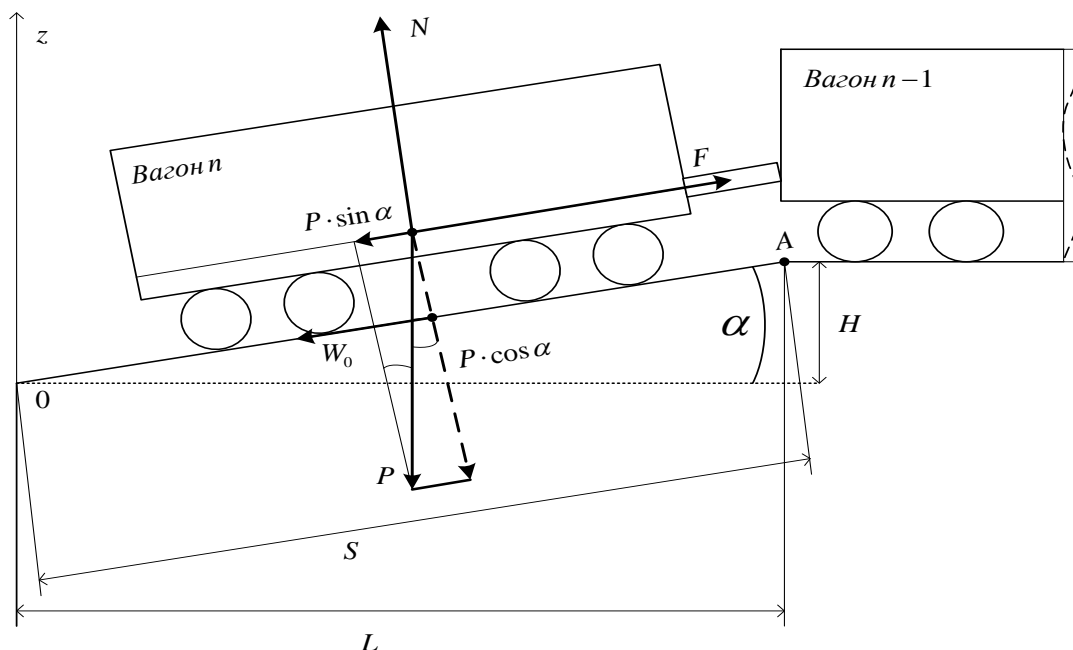


Рисунок 1.7 – Силы, действующие на подвижной состав при расположении под углом к горизонту

Особенности железнодорожных перевозок определяются конъюнктурой путей, а сами пути прокладываются в различных географических зонах, связывают объекты на разной высоте надо уровнем моря. По этой причине, для поездов невыполнимо условие строго горизонтального движения на всех участках траектории, а максимальный уклон железных дорог варьируется для тех или иных логистических задач. При проектировании рельсовых путей учитываются также массы составов, их скорости, погодные условия [22].

По направлению движения подвижного состава приложена контролируемая сила тяги  $F$ , помимо нее на вагон действует сила тяжести  $P = m \cdot g$ , которую относительно наклонной плоскости можно разложить на проекции  $P \cdot \cos \alpha$  и  $P \cdot \sin \alpha$ . Проекция  $P \cdot \cos \alpha$  уравновешивается силой реакции опоры  $N$ , из-за чего вагон не может двигаться вертикально относительно

наклонной плоскости пути. Эта составляющая силы также определяет значение силы трения между вагоном и рельсом [22, 24]

$$W_0 = \mu_{ск} \cdot P \cos \alpha, \quad (1.5)$$

где  $\mu_{ск}$  - коэффициент трения скольжения.

Вектор второй составляющей направлен против движения на подъем, и, следовательно, увеличивает силу сопротивления движению. Поэтому вытягивать состав на подъем существенно тяжелее, чем в горизонтальной плоскости. Дополнительное усилие напрямую зависит от величины угла наклона  $\alpha$ . Дополнительное сопротивление от уклона («скатывающая» сила), определяется:

$$W_i = P \sin \alpha. \quad (1.6)$$

Тригонометрически

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L}, \quad (1.7)$$

поэтому для удобства проведения расчетов  $\operatorname{tg}$  угла наклона  $\alpha$  к горизонтальной плоскости рассчитывают в тысячных долях  $i$  (промилле ‰):

$$i = 1000 \cdot \operatorname{tg} \alpha = 1000 \cdot \frac{H}{L} \text{ ‰}. \quad (1.8)$$

Проектировщики железнодорожных путей стремятся максимально уменьшить углы подъемов и спусков на различных участках полотна. В соответствии с СТН Ц-01-95 «Железные дороги колеи 1520 мм» - «На новых железнодорожных линиях руководящий уклон в грузовом направлении не должен превышать: 9 ‰ - на особогрузонапряженных линиях, 12 ‰ - на линиях I категории, 15 ‰ - на линиях II категории, 20 ‰ - на линиях III категории, 30 ‰ - на линиях IV категории. В тяжелых и особо тяжелых условиях на подъездных путях IV категории допускается применять руководящий уклон до 40 ‰» [22].



В зависимости от направления угла наклона к горизонту, направление скатывающей силы может совпадать с направлением движения поезда, снижая величину результирующей силы сопротивления.

Имеются и другие факторы, формирующие равнодействующую всех сил, приложенных к подвижному составу. К таким факторам относится, например, взаимодействие с атмосферой воздействие воздушных потоков с разных проекций. Поскольку воздействие воздуха в тяговых расчетах учитывается через коэффициент, зависящий от условий внешней среды – этот и многие другие факторы не используются при составлении компьютерной модели

Стоит отметить наличие существенного влияния описанных процессов на коэффициент сцепления – это приводит к снижению максимального момента, который можно реализовать на колесной оси без перехода в буксование:

$$F_K = F_{сц} = P_{сц} \cdot \psi_K, \quad (1.9)$$

где  $\psi_K$  - коэффициент сцепления,  $P_{сц}$  – сцепной вес единицы подвижного состава, т.

Коэффициент сцепления находится в соответствии с выражением:

$$\psi = a_\psi + \frac{b_\psi}{c_\psi + d_\psi \cdot V} - e_\psi \cdot V, \quad (1.10)$$

где  $a_\psi, b_\psi, c_\psi, d_\psi, e_\psi$  - табличные коэффициенты,  $V$  - скорость движения подвижного состава, км/ч [22].

В исследовательских работах встречаются силовые взаимодействия при прохождении рельсостыков, следствия динамической деформации железнодорожного полотна, преобразование энергии в амортизационных системах состава, фрикционные взаимодействия в редукторах, муфтах, при работе подшипников, влияние тормозной системы, зависимость сил сопротивления движению от загрузки поезда, от износа деталей в

межремонтном периоде, температурные и скоростные коэффициенты эффективности элементов систем подвижного состава и пр.

Несмотря на упрощение, в разделе обозначены основные нюансы формирования силы сопротивления движению подвижного состава, раскрыты ее базовые составляющие, для которых приведены математические эквиваленты. В итоге, силу сопротивления  $F_c$  на транспорте принято обозначать  $W$  и  $w$ , (от нем. «der Widerstand» - сопротивление, противодействие) можно представить, как абсолютную и удельную величину [22].

Более точно силы сопротивления можно описать, как все силы, приведенные к ободам колес и действующие на поезд, за вычетом касательной си тяги и тормозного усилия. Отсюда, силой сопротивления движению поезда также является сила, приложенная в местах контакта колес с рельсами. На ее преодоление затрачивается работа, эквивалентная всем преодолеваемым и неуправляемым внешним силам, препятствующим движению.

В зависимости от требуемых исследований, силы сопротивления движению поезда можно классифицировать по разным признакам: по весу, по типу вагонов, от сезонности или окружающих условий (эксплуатационный признак) и т.д.

Причины возникновения сил сопротивления:

- контактное взаимодействие между узлами подвижного состава поезда, между колесными парами и рельсами. В строении пути они являются результатом трения или деформации (трение шеек осей в буксовых подшипниках, трение частей тяговых электродвигателей и механических зубчатых передач локомотивов в движении, трения качения/скольжения колес о головки рельсов, рассеивания энергии в надрессорной части подвижного состава, в верхнем строении пути)

- потери энергии при прохождении неровностей (качество путей, рельсостыки);

- увеличения поверхностного трения колесных пар в поворотах и кривых участках пути;
- удары в механическом оборудовании подвижного состава при неравномерном движении;
- воздействие гравитационно-скатывающего усилия на подъемах и спусках;
- сопротивление воздушной среды (температуро и ветро-зависимое);

В исследуемом случае для расчетов силы сопротивления классифицируются [22], [24]:

А) по отношению к весу подвижного состава:

- полное сопротивление ( $W$ ), действующее на подвижной состав, Н;
- удельное сопротивление ( $w$ ), приводимое к единице веса, Н/кН;

Б) по типу подвижного состава:

- сопротивление движению поезда ( $W, w$ );
- сопротивление движению локомотива ( $W', w'$ );
- сопротивление движению вагонов ( $W'', w''$ );

В) по времени действия (эксплуатационному признаку):

- основное сопротивление, действующее постоянно ( $W_o, w_o$ ).

Для локомотивов выделяют:

- основное сопротивление в режиме тяги ( $W'_o, w'_o$ ). Для электровозов, электровозов и тепловозов с электрической передачей (сопротивление под током);

- основное сопротивление на холостом ходу ( $W_x, w_x$ ). Для электровозов, электровозов и тепловозов с электрической передачей (сопротивление без тока);

Дополнительные сопротивления, действующие при наличии или отсутствии вызывающего фактора:

- сопротивление троганию с места ( $W_{тр}, w_{тр}$ );
- сопротивление от уклона ( $W_i, w_i$ );

- сопротивление при повороте, в кривых участках пути ( $W_r, w_r$ );

Основное сопротивление движению поезда - сопротивление, препятствующее движению подвижного состава по прямой на горизонтальном участке пути при условии нахождения состава на открытой местности при нормальных метеорологических условиях (атмосферное давление  $H_{бар} = 760$  мм.рт.ст., температура окружающего воздуха  $t_{нв} = 20$  °С, скорость ветра  $V_v = 0$  м/с).

Основное сопротивление движению возникает в результате факторов механических взаимодействий. На практике ограничиваются вычислением суммарной величины основного сопротивления [24].

В реальности оказывается почти невозможно точно учесть все описанные условия и взаимодействия, поскольку большая часть участвующих величин не поддается динамическому отслеживанию в каждом месте взаимодействия. Это справедливо не только для поезда, но и для железнодорожных путей. В связи с этим зависимости устанавливаются эмпирически на базе экспериментов с накоплением статистической базы расчетных коэффициентов. В настоящее время это направление выведено в отдельную наукоемкую область отрасли – тяговые расчеты

**Тяговые расчеты** - прикладная часть теории тяги поездов, в которой рассматриваются условия движения поезда и решаются задачи, связанные с определением сил, действующих на поезд, и законов движения поезда под воздействием этих сил [22, 24, 26, 27].

Таким образом, для моделирования усилий при движении поезда целесообразно будет использовать актуальную и утвержденную методику проведения тяговых расчетов. При этом модель должна обеспечивать непрерывный расчет основного сопротивления движению поезда для каждой единицы подвижного состава (с учетом типовых и массогабаритных показателей локомотивов и вагонов, геометрии путей и скорости движения поезда).

Для достижения требуемых возможностей в модели должно быть реализовано распределение параметров пути в горизонтальной и вертикальной плоскости. Также модель должна позволять использовать временные и координатные задержки, учитывающие длину единицы состава и локализующие (привязывающие) локомотив/вагон к конкретному участку пути.

#### **1.4. Порядок расчета сил сопротивления движению поезда**

В компьютерной модели (программе) расчета сопротивления движению поезда реализован соответствующий раздел актуальной (2016 г.) методики тяговых расчетов, являющейся частью СП 37.13330.2012 «СНиП 2.05.07-91\* [22]. Сам по себе алгоритм позволяет в первом приближении оценить диапазон нагрузок на электропривод, образующихся от основных физических факторов, описанных в предыдущем разделе:

- провести корректировку расчета с учетом количества единиц подвижного состава, их специальных вариантов исполнения, а также для работы при разных конфигурациях поездов

Для выполнения расчета усилий в программу заводятся следующие данные:

- геометрический профиль пути (вертикальный уклон и радиус горизонтальных кривых);
- типы единиц подвижного состава и их загруженность, с выделением отдельно порожних и спец вагонов
- требуемая скорость локомотива

Выбранных параметров достаточно для оценки диапазона моментов, т.к. остальные величины (коэффициенты состояния пути, ветровая нагрузка, низкая температура воздуха, стрелочные переводы, виды рельсостыков и прочее) оказывают меньше влияние. Они представляются в программе как массо–и скорости-независимые коэффициенты, не имеющие в рамках данной работы значения. Например, скатывающее усилие на тяжелых участках пути

составляет порядка 80% всех сил сопротивления, при этом это активная сила, не зависящая от скорости движения поезда, зато прямо коррелирующая с количеством и общей массой вагонов, находящихся на наклонном участке.

Расчет производится для промышленного железнодорожного транспорта при маневровой работе на колее с шириной 1520 мм [22].

В отличие от традиционных тяговых расчетов, программа позволяет увидеть динамику приращения составляющих сил от каждого фактора-источника во время движения поезда и точно охарактеризовать амплитудные, установившиеся величины и скорости изменения момента сопротивления. Итогом работы программы является расчет необходимого тягового усилия.

Программа содержит в себе некоторый массив эмпирических коэффициентов, содержащийся в базовых структурных компонентах (единиц подвижного состава по типам). Поезд «собирается» в цепочку, в голове которой находится локомотив, к которому по очереди крепятся вагоны. Для каждого вагона можно задать все необходимые данные из методики. Такой подход позволяет набрать состав с любой массой и распределением по типам вагонов.

В динамическую компьютерную модель в среде Matlab Simulink могут быть добавлены любые дополнительные расчеты и коэффициенты, позволяющие провести моделирование факторов, оставшихся неучтенными.

Выполнение расчета по стандартизированному алгоритму исключает разночтения в теории в различных научных школах и обеспечивает требуемое единообразие.

В процессе расчета следует понимать, что большинство используемых формул и значений коэффициентов являются опытными статистическими данными и не отражают всех происходящих процессов, поэтому пригодны лишь для получения числовых результатов. Эти значения однозначно не отражают фактическое состояние техники, инфраструктуры и окружающих

условий. По этой причине результаты расчета должны подвергаться уточнению на практике после опытных поездок [22, 24].

Для различных математических выражений, привязанных к видам тяги или другим условиям, необходимо четко оговаривать имеющиеся условия до проведения расчета в целях исключения ошибок

Расчет основного удельного сопротивления движению подвижного состава поезда

Расчет применяется для силы основного удельного сопротивления движению подвижного состава, выраженной в Н/т при соблюдении значения температуры окружающего воздуха в диапазоне от -10 до +20 °С при ветре не выше 5 м/с [22].

Величина  $w'_0$  основного удельного сопротивления движению непосредственно экипированных локомотивов при различной линейной скорости в режиме тяги определяется:

$$w'_0 = 9,81 \cdot (a'_0 + b'_0 \cdot V + c'_0 \cdot V^2), \quad (1.11)$$

где  $V$  – линейная скорость движения локомотива, км/ч;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические коэффициенты с индексами, соответствующие режимам работы, их значения указаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Эмпирические коэффициенты для электровозов переменного тока.

Типы локомотивов	Вид пути	$a'_0$	$b'_0$	$c'_0$
Промышленные электровозы и тяговые агрегаты переменного тока	Звеньевой	2,60	0,070	0,00250

Для вагонов (на роликовых подшипниках) основное удельное сопротивление движению, зависящее от скорости, определяется:

а) Для груженых промышленных вагонов и колеи шириной 1520 мм

$$w''_0 = 9,81 \cdot (a''_0 + b''_0 \cdot V + c'_0 \cdot V^2); \quad (1.12)$$

б) При использовании промышленных порожних вагонов в колее 1520 мм

$$w_0'' = 9,81 \cdot (a_{0x}'' + b_{0x}'' \cdot V + c_{0x}'' \cdot V^2); \quad (1.13)$$

где  $V$  – линейная скорость движения единицы подвижного состава, км/ч (в программе принимается в начале шага расчета);  $a, b, c$  – коэффициенты, соответствующие нагрузке вагонов, которые отражены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Расчетные коэффициенты для различных видов вагонов

Типы вагонов	Вид пути	$a_0''$	$b_0''$	$c_0''$	$a_{0x}''$	$b_{0x}''$	$c_{0x}''$
Думпкары ВС100, 2ВС105 2ВС180	Звеньевой	3,60	0,040	0	4,80	0,050	0
Думпкары ВС80, 2ВС85	Звеньевой	3,10	0,020	0	4,00	0,030	0
Думпкары 3ВС50, 6ВС60	Звеньевой	2,70	0,030	0	3,50	0,040	0
Хоппер, 57	Звеньевой	1,50	0,030	0	2,50	0,040	0

При наборе состава из вагонов с различными типами и характеристиками (с разной массой тары, загрузкой, нагрузкой на ось и пр.) вычисления проводятся для средневзвешенного по массе. Для всего поезда средневзвешенный расчет основного удельного сопротивления движению осуществляется для локомотива и остального подвижного состава

При проверке массы подвижного состава поезда по условиям трогания с места, расчет основного удельного сопротивления вагонов  $w_{0тр}$  зависит от нагрузки на ось вагона  $q_0$  (для промышленных вагонов), а именно:

$$w_{0тр} = 9,81 \cdot \frac{20}{q_0}. \quad (1.14)$$

В случае присутствия в составе поезда вагонов с существенно различающимися удельными нагрузками на ось, основное удельное сопротивление состава при трогании с места вычисляется по средневзвешенной массе. Расчет дополнительных удельных сопротивлений движению подвижного состава поезда производится в соответствии с представленной ниже последовательностью.



Значение дополнительного удельного сопротивления движению поезда от угла наклона к горизонту  $w_i$  находится в промилле (‰) и приводится (аппроксимируется) к спрямленному уклону  $i_c$  (при движении в гору берется с положительным знаком, на спуске – с отрицательным) в соответствии с выражением

$$w_i = 9,81 \cdot i_c. \quad (1.15)$$

Дополнительно удельное сопротивление движению поезда в кривых участках пути (по дуге)  $w_{ro}$  в Н/т вычисляется по формуле:

$$w_{ro} = 9,81 \cdot \frac{700 \cdot S_{кр}}{R \cdot L_n} \cdot k_s, \quad (1.16)$$

где  $R$  – радиус дуги кривой на участке пути, м;  $S_{кр}$  – длина участка дуги кривой, м; Включение в расчет соотношения длины кривой с длиной поезда осуществляется при условии  $S_{кр} < L_n$ ;  $L_n$  – длина всего поезда, м;  $k_s$  – поправочный коэффициент, учитываемый при наличии S-образных кривых [36], применяемый при наличии кривых малого радиуса (для колеи 1520 мм – не более 700 м). Коэффициент используется для непосредственно соседствующих дуг или при расстоянии между ними не более 1/3 длины поезда: при 2 разнонаправленных дугах – равен 1,1, при трех – 1,26, при четырех – 1,5, а при расстоянии между дугами меньше 1/2 полной длины поезда – считается равным 1,05, 1,13 и 1,25; [22].

Расчет полного сопротивления движению подвижного состава поезда

Полное сопротивление движению состава в режиме тяги  $W$  в Н высчитывается суммированием основного и дополнительных сопротивлений и выполняется в зависимости от массы локомотива и оставшихся вагонов, согласно выражению [22, 37]

$$W = \sum w_P \cdot P + \sum w_Q \cdot Q, \quad (1.17)$$

где  $P$  и  $Q$  – массы локомотива и вагонов соответственно, т;  $w_P$ ,  $w_Q$  – величины удельных сопротивлений движению типовых единиц подвижного

состава поезда, рассчитываемые в порядке, описанном в выражениях 1.11-1.16 (с переменными, обозначенными соответствующими индексами), Н/т.

Нахождение полного сопротивления движению поезда по троганию с места  $W_{tr}$  в Н выполняется аналогично 1.17 с заменой  $w_0'$  и  $w_0''$  на  $w_0$  и  $w_{0mp}$  соответственно.

Указанный порядок расчета справедлив для колеи 1520 мм.

Разработка программы расчета усилий по траектории движения поезда осуществляется в программном пакете Matlab Simulink. Представленные расчеты отражаются в виде структурной схемы, содержащей динамические звенья. К структуре добавляется математическая «обвязка», позволяющая модели работать согласованно, минимизируя ошибки и позволяя проводить распределенный комбинированный расчет для каждого участка пути, протяженностью с единицу подвижного состава. За материальную точку принят уровень локомотива/вагона, при этом шаг интегрирования настолько мал (сантиметры), что создаваемой им погрешностью можно пренебречь с абсолютной уверенностью.

Модифицированная модель также позволяет выделять и просматривать отдельно компоненты сил сопротивления по каждому источнику и добавлять зависимые переменные в расчет [25].

Основным компонентом модели является типовая подсистема универсальной единицы подвижного состава (в дальнейшем также именуемая универсальным юнитом). Также в модели имеется блок расчета параметров движения поезда: ускорения  $a$ , скорости  $V$  и пройденного пути  $S$ . Сигналы с блока расчета параметров движения подаются на входы первой подсистемы универсальной единицы подвижного состава, которая, в данном случае, является локомотивом. Вагоны подсоединяются к локомотиву последовательно. Выбор типа подвижного состава и задание основных характеристик осуществляется в каждой единице непосредственно [25].

Поскольку модель имитирует поезд с локомотивом в головной части, передвигающийся по рельсовым путям, для каждой единицы необходимо текущее вычислить положение на железной дороге и соответствующий этим координатам вертикальный и горизонтальный профиль пути, в соответствии с выражением:

$$X_u = S_t - (L_{cb} + L_u) + L_{mp}, \quad (1.18)$$

где  $X_u$ , м – текущее положение единицы состава поезда;

$S_t$  – пройденный путь от начала координат;

$L_{cb}$  – длина цепочки единиц подвижного состава, находящихся позади текущей;

$L_{mp}$  – длина половины единицы состава поезда (расстояние от сцепного устройства до центра масс).

Для расчета в структуре для каждой единицы подвижного состава задаются вводные данные:  $T_u$  – тип (0/1 – Локомотив/промышленный вагон соответственно),  $L_u$  – длина единицы подвижного состава,  $m_{eu}$  – масса порожня (масса тары, масса локомотива без топлива)  $m_{ldu}$  – масса полезной загрузки,  $N_{ua}$  – количество осей [25].

$$L_{mp} = \frac{L_u}{K_{mp}}, \quad (1.19)$$

где  $L_{mp}$  – длина половины единицы подвижного состава с учетом сцепного устройства (средняя точка);

$L_u$  – длина единицы подвижного состава;

$K_{mp} = 2$  – коэффициент для расчета геометрического центра масс единицы подвижного состава в продольном направлении;

На основе вводных данных рассчитывается:

- полная масса

$$m_u = m_{eu} + m_{ldu}, \quad (1.20)$$

где  $m_u$  – полная масса единицы состава;

$m_{eu}$  – масса порожнего, без нагрузки;

$m_{idu}$  - масса полезной нагрузки единицы состава.

- нагрузка на ось:

$$m_{lda} = \frac{m_u}{N_{ua}}, \quad (1.21)$$

где  $m_{lda}$  – нагрузка на ось единицы состава;

$m_u$  – полная масса единицы состава;

$N_{ua}$  - количество осей единицы состава.

- масса цепочки единиц состава:

$$m_{cf} = m_u + m_{cb}, \quad (1.22)$$

$m_{cf}$  – масса цепочки единиц, вместе с текущей;

$m_u$  – масса единицы подвижного состава;

$m_{cb}$  – масса цепочки единиц до текущей, не включая ее.

Подстрочные индексы «u» (Unit), «cb» (chain back) и «cf» (chain forward), обозначающие принадлежность к единице или последовательности (цепочки) единиц подвижного состава (на входе и выходе локомотива и вагонов) используются также для обозначения в структуре программы сил сопротивления  $W_u$ ,  $W_{cb}$ ,  $W_{cf}$  и длину текущей цепочки подвижного состава  $L_{cf}$ .

В программе представлено несколько алгоритмов расчета сил сопротивления в соответствии с 1.11-1.16 и др. из разделов 4-6 [25].

Поскольку методы расчета предполагают изначальный выбор условий вычисления, в программе реализованы функции IF. Например, они используются для выбора формулы нахождения удельного сопротивления движению вагона в зависимости от загрузки (груженный/порожний). Также IF используется для расчета сопротивления трогая с места и в других случаях.

В программе не обсчитывается режим холостого хода, поскольку движение поезда задается с позиции «внешнего источника силы бесконечной мощности», прокатывающего локомотив по траектории рельсовых путей с

заданной скоростью. Параллельно проводится измерение сопротивления такому режиму движения.

Для выбора формулы расчета основных удельных сопротивлений локомотива/вагонов в движении/при трогании с места используются логические функции И (&), привязанные к соответствующим параметрам типа, скорости и загрузки

$$\text{ЕСЛИ } T_u = 1 \text{ ВЫПОЛНИТЬ 1.11.} \quad (1.23)$$

Вычисление удельного сопротивления в зависимости от профиля пути (наклон, кривые) производится за счет пропуска текущего положения единицы подвижного состава через массив данных об уклоне рельс в промилле ( $^0/_{00}$ ) и величины, обратной радиусу кривой ( $1/R$ ) дуги. Расчет ведется по всей длине экспериментального пути, после чего полученные значения для данной координаты включаются в расчетные выражения 1.21.

Слагаемое сопротивления движению в кривой включается в сумму только при скорости движения состава, отличной от нуля, тогда как сила скатывания является активной проекцией гравитации на горизонтальную ось. Значение, обратное радиусу используется для исключения деления на ноль на прямых участках пути.

Сопротивление троганию с места (1.14) аналогично по поведению трению покоя [22] и имеет значение только в момент начала движения, поэтому «длительность» его воздействия в программе определяется с учетом что процесс трогания все-таки не мгновенен и на переход механизмов в движение из состояния покоя затрачивается время и энергия [25]. На втором шаге программного времени расчет осуществляется по обычному алгоритму (1.11, 1.12, 1.13, 1.15, 1.16) в зависимости от скорости и нагрузки.

В расчете сопротивления движению при трогании с места вагона применяется функция логического И (&).

В программе ищется вариант, при котором:

- в текущем шаге ускорение поезда не равно нулю ( $a \neq 0$ ), когда как в предыдущем  $a=0$ ;

- в текущем шаге скорость поезда не равна нулю ( $V \neq 0$ ), тогда как в предыдущем  $V=0$ ;

В программе не учитывается сопротивление по троганию с места локомотива, поскольку он тяговая единица и это уже учтено при построении тяговой характеристики.

Таким образом,

ЕСЛИ ( $a=0 \ \& \ a' \neq 0 \ \& \ V=0 \ \& \ V' \neq 0$ ) ВЫПОЛНИТЬ 1.14, (1.24)

где  $a$  – линейное ускорение поезда в текущем расчетном шаге;

$a'$  – линейное ускорение поезда в предыдущем расчетном шаге;

$V$  – линейная скорость поезда в текущем расчетном шаге;

$V'$  – линейная скорость поезда в предыдущем расчетном шаге.

Для нахождения начального сопротивления состава ищется момент, в котором сейчас ускорение и скорость присутствуют, но были равны 0 один шаг расчета назад. Здесь вычисляется момент выхода из состояния покоя, длительность момента в программе равна шагу расчета.

При необходимости в программе могут быть заданы поправочные коэффициенты окружающих условий (Ветер, температура воздуха, качество пути).

Полное сопротивление движению поезда в данный момент времени является результатом суммирования значений сопротивлений всех единиц подвижного состава поезда (1.17), находящихся в данный момент времени на своем участке пути [22, 24].

Наиболее общим задающим параметром в программе является время. Далее в функции времени задаются необходимые значения ускорения, при этом переменные скорости  $V$  и перемещения  $S$  получаются путем последовательного интегрирования параметров

$$S = \int_0^t V dt + S_0, \quad (1.25)$$

где  $a$  – текущее линейное ускорение поезда;

$V$  – текущая линейная скорость поезда;

$t$  – текущее расчетное время в программе;

$S_0$  – начальное положение единицы подвижного состава.

Данные единиц состава и профиль пути обеспечивают раскрытие функциональных возможностей программы [25].

Задание стартового положения единиц состава поезда относительно начала координатной оси исключает появление при расчетах отрицательных величин координат, однако следует учитывать отношение длины поезда к длине пути чтобы избежать ошибок при работе программы.

### **1.5. Выводы по главе и постановка задачи исследования**

Электроприводы маневровых и поездных локомотивов, выполненные по системе ПЧ-АД устроены схожим образом. Основные отличия заключаются в тяговой мощности, питающем напряжении, скоростном и тепловом режимах работы тяговых электроприводов. Для поездных электровозов характерны высокие тяговые мощности (более 2 МВт на единицу), скорости длительного режима более 40 км/ч и продолжительный тепловой режим работы. Для маневровых электровозов характерен перемежающийся режим работы тяговых электроприводов с повышенной тепловой нагрузкой, частые пуски и остановки, скорости 5-15 км/ч (в ряде случаев, до 40 км/ч).

Для повышения эффективности тяги маневровых локомотивов применяются различные методы и системы, включающие в себя аппаратные и программные средства, увеличивающие силу сцепления, и, как следствие, тяги локомотива.

Максимальная сила тяги локомотива не может превышать силу сцепления в системе «колесо-рельс». При превышении силой тяги максимального усилия

сцепления происходит срыв контакта колесной пары с рельсом – возникает боксование. Сила сцепления напрямую зависит от силы давления локомотива на рельсы и коэффициента сцепления, зависящего от характеристик соприкасающихся поверхностей и множества других факторов. Поэтому величина коэффициента сцепления не может быть рассчитана аналитически и вычисляется в соответствии с эмпирическими формулами.

Момент нагрузки тягового электропривода локомотива зависит от профиля пути, характеристик подвижного состава и окружающих условий, и, аналогично коэффициенту сцепления, рассчитывается эмпирически.

Расчет допустимых сил тяги, сопротивления движению, тормозных режимов и пр. на железной дороге входит в утвержденную методику тяговых расчетов. Поскольку методика предназначена для табличных процессоров (MS Excel, Libre office Calc и т.д.), расчет является приблизительным и не учитывает условий движения каждой единицы подвижного состава поезда.

В случае реального движения поезда по железной дороге, возмущения в механической системе колесо-рельс напрямую сказываются на величине максимально допустимого момента на конкретной оси, что приводит к переходу электропривода в режим боксования.

Таким образом, основными задачами исследования является:

Адаптация методики тяговых расчетов к работе в рамках компьютерной модели (программы), способной проводить непрерывный и распределенный по-вагонно расчет требуемых тяговых усилий на путях различной геометрии при разных составах поезда;

Разработка достоверной компьютерной модели тягового электропривода маневрового электровоза по системе ПЧ-АД для анализа переходных процессов при пуске разгоне поезда на холостом ходу и под нагрузкой;

Анализ режимов боксования, разработка математического описания процессов боксования. Моделирование работы тягового электропривода при



боксовании, оценка эффективности его работы, поиск вариантов модернизации существующей САР электропривода.

Разработка усовершенствованной САР электропривода, обеспечивающей поддержание требуемого уровня управляемости, устойчивости поезда при имеющихся характеристиках пути и внешних условий, а вместе с тем и обеспечивающей энергоэффективное управление.

Оценка качества принятых технических решений и анализ их эффективности.

## ГЛАВА 2. ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОЕЗДА

### 2.1. Программа расчета усилий

Для проведения предварительного расчета сил сопротивления движению поезда в программе были заданы характеристики локомотива и вагонов (таблица 2.1), зависимость ускорения поезда от времени (таблица 2.2), массивы профиля пути от расстояния относительно начала координат (таблицы 2.3 и 2.4).

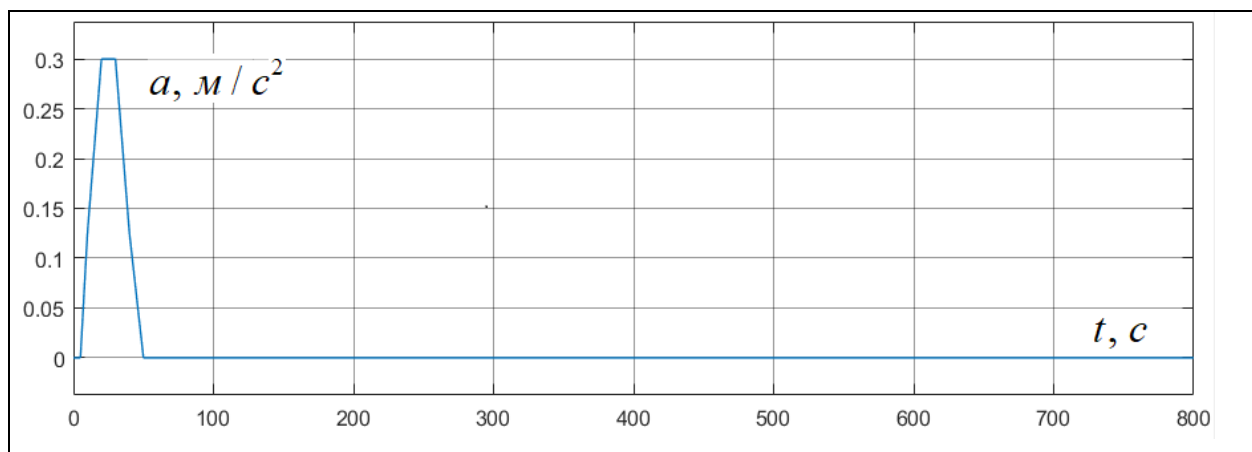
Таблица 2.1 Характеристики электровоза НПМ2 и вагонов 6ВС-60, 3ВС-

50

№ п/п	Имя параметра	Значение параметра			Единица измерения
		НПМ2	6ВС-60	3ВС-50	
1	Род подвижного состава	Локомотив (электровоз)	Думпкарь	Думпкарь	-
2	Назначение подвижного состава	Маневровая работа	Перевозка горной массы	Перевозка горной массы	-
3	Год постройки	2013	1982	1945	год
4	Длина	15000	11830	11920	мм
5	Масса единицы состава	92	28	32	т
6	Грузоподъемность	-	60	50	т
7	Число колесных осей	4	4	4	-

Таблица 2.2 Расчетная функция задания ускорения поезда от времени

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Время моделирования	0	5	10	20	30	40	50	660
Ускорение поезда, м/с <sup>2</sup>	0	0	0,125	0,3	0,3	0,125	0	0

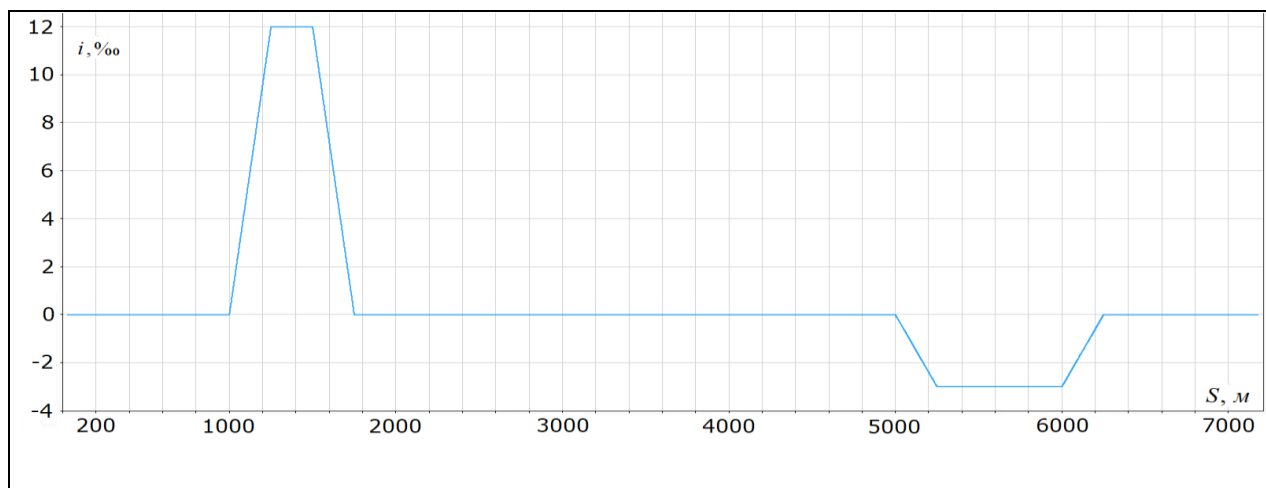


По условиям расчета поезд с места разгоняется до 8,3 м/с (в первой зоне регулирования скорости) и продолжает равномерное движение без ускорения на всей оставшейся траектории. В приводимом примере участки возникновения тех или иных сил сопротивления разграничены во времени для оценки влияния отдельных компонентов на величину общего сопротивления. Коэффициенты для расчета единиц подвижного состава отражены в таблицах 1.2 и 1.3.

Для оценки силы сопротивления движению от уклона и скатывающей силы в программе задается положительный (+) и отрицательный (-) уклон некотором участке железнодорожного пути. Установленные в таблице 2.3 величины + и - уклона соответствуют 41' и 10' (угловых минут). Сила воздействует в двух разных направлениях по отношению к силе тяги и оказывает диаметрально противоположное воздействие на величину результирующей силы сопротивления.

Таблица 2.3 Функция задания уклона профиля пути

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Координата пути, м	0	750	1000	1250	1500	1750	5000	5250	6000	6250	10000
Уклон путей, 0/00	0	0	0	12	12	0	0	-3	-3	0	0



Для расчета сил сопротивления движению поезда в кривой задается дуга радиусом  $R$  примерно 140 метров. Программа не учитывает требуемые диапазоны скорости прохождения кривых различного радиуса [25]. Значения горизонтального профиля пути (отношения  $1/R$  кривой) прописываются в таблице 2.4 в виде обратной радиусу функции для исключения деления на ноль при вычислении на прямых участках пути.

Таблица 2.4 Задание горизонтального профиля (кривизна) пути

№ п/п	1	2	3	4	5	6
Координата пути, м	0	2750	3000	4000	4250	10000
Кривизна пути, $1/R$ (м)	-	-	0,007	0,007	-	-

Для перехода к моделированию тягового электропривода расчета сил сопротивления движению поезда недостаточно – необходимо привести все полученные зависимости параметров движения и нагрузок к электродвигателю колесной оси электровоза НПМ2, сформировав типовую тахограмму и нагрузочную диаграмму электропривода.

Для расчета диаграмм в программе также предусмотрены алгоритмы расчета приведенного к валу двигателя момента инерции колесной оси с учетом редуктора.

Расчет тахограммы и нагрузочной диаграммы целесообразно произвести для одиночного электровоза НПМ2 без вагонов и, затем, оценить добавочное сопротивление от состава разницу в инерционности – это позволит уточнить требования к электроприводу

Расчет тахограммы и нагрузочной диаграммы производится в программе в отдельном алгоритмическом блоке после вычисления параметров движения и суммарных сил сопротивления [25].

В соответствии с основным уравнением электропривода, момент на валу двигателя

$$M_{\text{дв}} = M_c + M_{\text{дин}}, \quad (2.1)$$

где  $M_{\text{дв}}$  – момент двигателя  $M_c$  – статический момент нагрузки,  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент, обеспечивающий динамику привода.

По определению момента

$$M_{\text{дв}} = F \cdot r, \quad (2.2)$$

где  $F$  – величина прилагаемой силы,  $r$  – плечо силы.

Учитывая распределение сил между колесными осями, приводимыми в движения индивидуальными электродвигателями, а также равенство плеча силы радиусу колеса и наличие зубчатой передачи, момент на валу двигателя:

$$M_{\partial\partial} = \frac{F \cdot d}{N_{m.\partial} \cdot 2 \cdot i_{з.п}}, \quad (2.3)$$

где  $M_{\text{дв}}$  – момент на валу двигателя,  $F$  – общее усилие, требуемое по условиям движения поезда,  $d$  – диаметр колеса локомотива по кругу катания.  $N_{\text{т.д}}$  – число тяговых двигателей в составе электровоза (моторвагонный подвижной состав не используется),  $i_{з.п}$  – передаточное число редуктора (зубчатой передачи) [24-25].

Момент инерции ротора электродвигателя, колесной пары и массы поезда, приведенный к валу электродвигателя

$$M_{\partial\partial\partial} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.4)$$

где  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент, приведенный к валу двигателя,  $J_{\Sigma}$  – полный момент инерции механической системы, равный

$$J_{\Sigma} = J_{\partial\partial} + J_{к.п} + J_{лок} + J_{п.с}, \quad (2.5)$$

где  $J_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора ТЭД электровоза НПМ2,  $J_{к.п}$  – приведенный к валу момент инерции колесной пары электропривода,  $J_{лок}$  – приведенный к валу момент инерции локомотива,  $J_{п.с}$  – приведенный к валу момент инерции подвижного состава поезда (вагонов) [22].

По формуляру, момент инерции ротора ТЭД ДТА 350М ( $J_{\text{дв}} = 14 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ),  $J_{к.п}$  высчитывается по частям (ось+колеса) в соответствии с формулой расчета момента инерции для сплошного цилиндра  $J_{ц}$

$$J_{ц} = \frac{m \cdot R^2}{2}. \quad (2.6)$$

Приняв во внимание геометрию элементов колесной пары и плотность стали

$$J_{к.п} = \pi \cdot p_{ст} \left( \frac{R_в^4 \cdot h_в + R_к^4 \cdot 2h_к}{2 \cdot i_{з.п}^2} \right) =$$

$$3,14 \cdot 7850 \cdot \left( \frac{0,075^2 \cdot 1,5 + 0,575^4 \cdot 2 \cdot 0,14}{2 \cdot 5,58^2} \right) = 12,14 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.7)$$

где  $p_{ст} = 7850 \text{ кг/м}^3$  – плотность стали,  $R_в = 0.075 \text{ м}$  – радиус колесной оси,  $R_к = 0.575 \text{ м}$  – радиус колеса,  $h_в = 1,5 \text{ м}$  – длина колесной оси,  $h_к = 0.14 \text{ м}$  – толщина колеса,  $i_{з.п} = 5,58$  – передаточное число редуктора

$J_{лок}$  и  $J_{п.с}$  находятся через радиус приведения, соотносящий угловую скорость вращения вала с линейной скоростью движения поезда

Исходя из определения радиуса приведения  $\rho$ :

$$\rho = \left( \frac{V_t}{\omega_{дв}} \right) = \left( \frac{8,3}{80,83} \right) = 0,103, \quad (2.8)$$

где  $V_t$  – линейная скорость движения поезда по путям.

Приведенный к валу электродвигателя моменты инерции локомотива ( $J_{лок}$ ) и вагонов ( $J_{п.с}$ ) находятся в соответствии с выражениями:

$$J_{лок} = \frac{m_{лок} \cdot \rho^2}{N_{т.д}} = \frac{92000 \cdot 0,103^2}{4} = 244 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.9)$$

$$J_{п.с} = \frac{m_{п.с} \cdot \rho^2}{N_{т.д}} = \frac{1200000 \cdot 0,103^2}{4} = 3182 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.10)$$

где  $m_{лок}$  – масса локомотива  $m_{п.с}$  – масса подвижного состава (вагонов),  $\rho$  – радиус приведения,  $N_{т.д}$  – число тяговых двигателей в составе.

Исходя из  $J_{дв}$ ,  $J_{к.п}$ ,  $J_{лок}$  и  $J_{п.с}$  и находится диапазон коэффициент инерционности электропривода для локомотива ( $\gamma_{min}$ ) и поезда ( $\gamma_{max}$ ):

$$\gamma_{\min} \frac{J_{\text{лок}} + J_{\text{к.п}}}{J_{\text{дв}}} = \frac{244 + 12}{14} = 18,3; \quad (2.11)$$

$$\gamma_{\max} \frac{J_{\text{к.п}} + J_{\text{лок}} + J_{\text{н.с}}}{J_{\text{дв}}} = \frac{7 + 244 + 3182}{14} = 245, \quad (2.12)$$

где  $\gamma_i$  – минимальный и максимальный коэффициент инерционности электропривода.

Значения  $\gamma$  обуславливаются тем, что основным компонентом нагрузки электропривода от старта до достижения установившейся скорости является инерционность масс поезда.

Соответственно, скорость вращения тягового электродвигателя:

$$n_{\text{мд}} = \frac{V_t \cdot i_{\text{зп}} \cdot 60}{\pi \cdot d_{\text{к}}} = \frac{8,3 \cdot 5,58 \cdot 60}{3,14 \cdot 1,15} = 771 \text{ об / мин}, \quad (2.13)$$

где  $n_{\text{тд}}$  – частота оборотов ТЭД,  $V_t$  – линейная скорость движения поезда, м/с,  $i_{\text{зп}}$  – передаточное число редуктора, 60 – количество секунд в одной минуте

Угловая скорость вращения ТЭД  $\omega_{\text{тд}}$  для  $V_t=8,3$  м/с рассчитывается

$$\omega_{\text{мд}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{м.д}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 830}{30} = 80,83 \text{ рад / с}. \quad (2.14)$$

Структура программного модуля расчета тахограммы и нагрузочной диаграммы показана на рисунке 2.1 [25].

Состав поезда выбран исходя из условий присутствия соответствующих типов вагонов на производственной площадке, а также с учетом наличия в методике необходимых эмпирических коэффициентов:

- 1) Электровоз НПМ2
- 2) 6 полностью груженных вагонов 6ВС-60
- 3) 6 полностью груженных вагонов 5ВС-50
- 4) 3 порожних вагона 5ВС-50
- 5) 3 порожних вагона 6ВС-60



### Структура программы расчета сил сопротивления движению поезда

По условиям задачи локомотив стоит впереди поезда и тянет подвижной состав за собой. Порядок вагонов установлен по принципу убывания массы от головной к хвостовой части поезда. Расчет выполняется с шагом 0,01 с, который является оптимальным по результатам тестирования программы [22] в целях построения САР электропривода НПМ2.

Поскольку программа предназначена для оценки величины общей силы сопротивления движению поезда и скорости ее изменения, когда как качество пути, направление и скорость ветра и другие параметры не оцениваются или неизвестны - расчет представлен только компонентами источников, вносящих наибольший вклад в итоговый результат, либо зависящих от типа и характеристики подвижного состава. Структурная схема программы показана на рисунке (2.2).

По результатам выполнения программы получены функциональные зависимости параметров движения поезда, таких как скорость ( $V$ ) и положение ( $S$ ) - от времени, а также зависимости сил сопротивления движению поезда – от скорости, профиля пути и характеристик подвижного состава (как поезда вместе, так и локомотива индивидуально).

Графики зависимостей параметров движения поезда изображены на рисунке 2.2, функции зависимостей сил сопротивления движению для локомотива и всего поезда с 18 вагонами представлены на рисунках 2.3-2.4.

На рисунке 2.2 работает модуль расчета параметров движения поезда (последовательно интегрируя ускорение а рассчитываются переменные линейной скорости  $v$  и пройденного пути  $S$ ). Стоит отметить, что в данная диаграмма привязана к локомотиву.

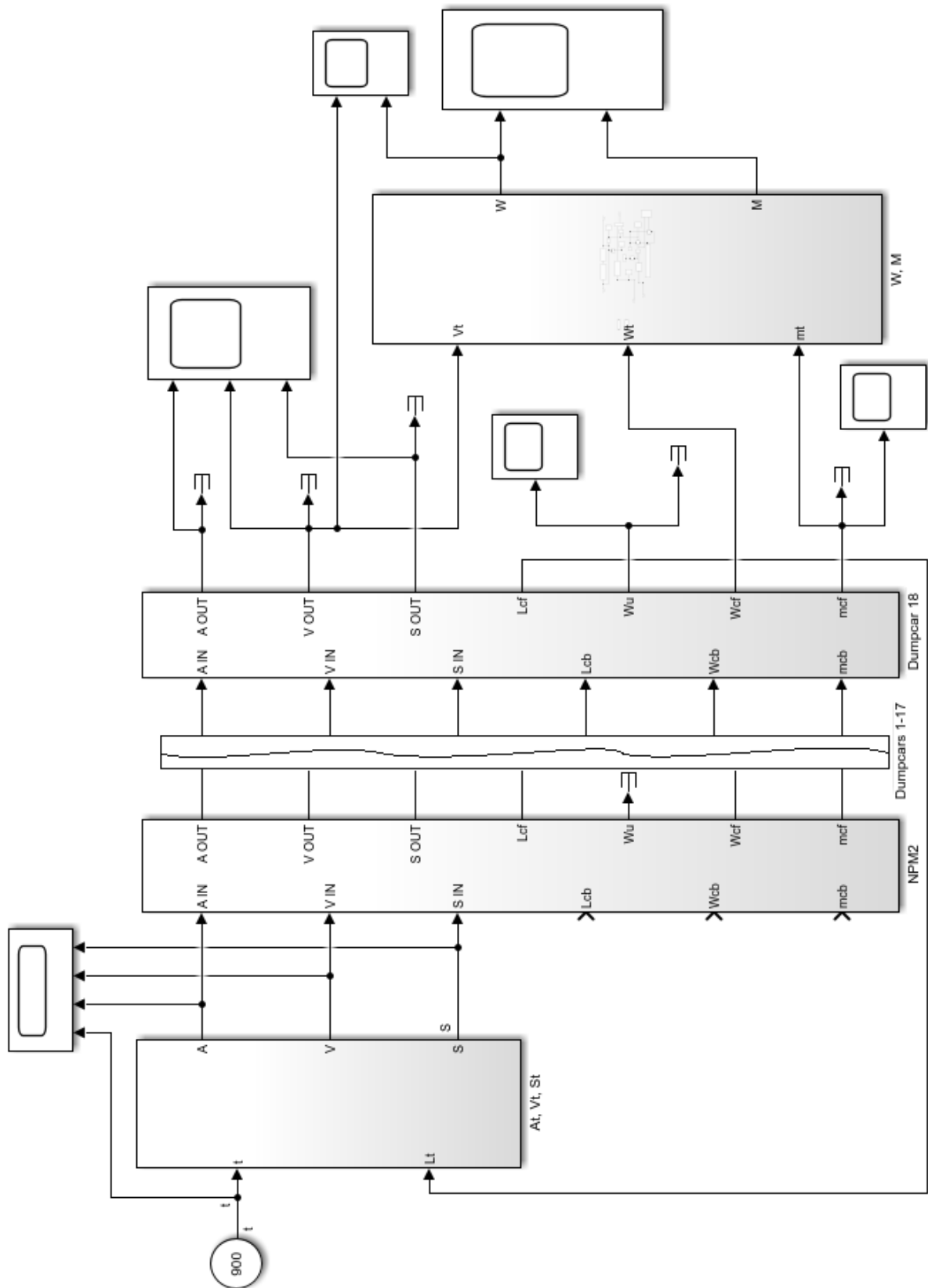


Рисунок 2.1 Общий вид модели расчета сил сопротивления движению поезда

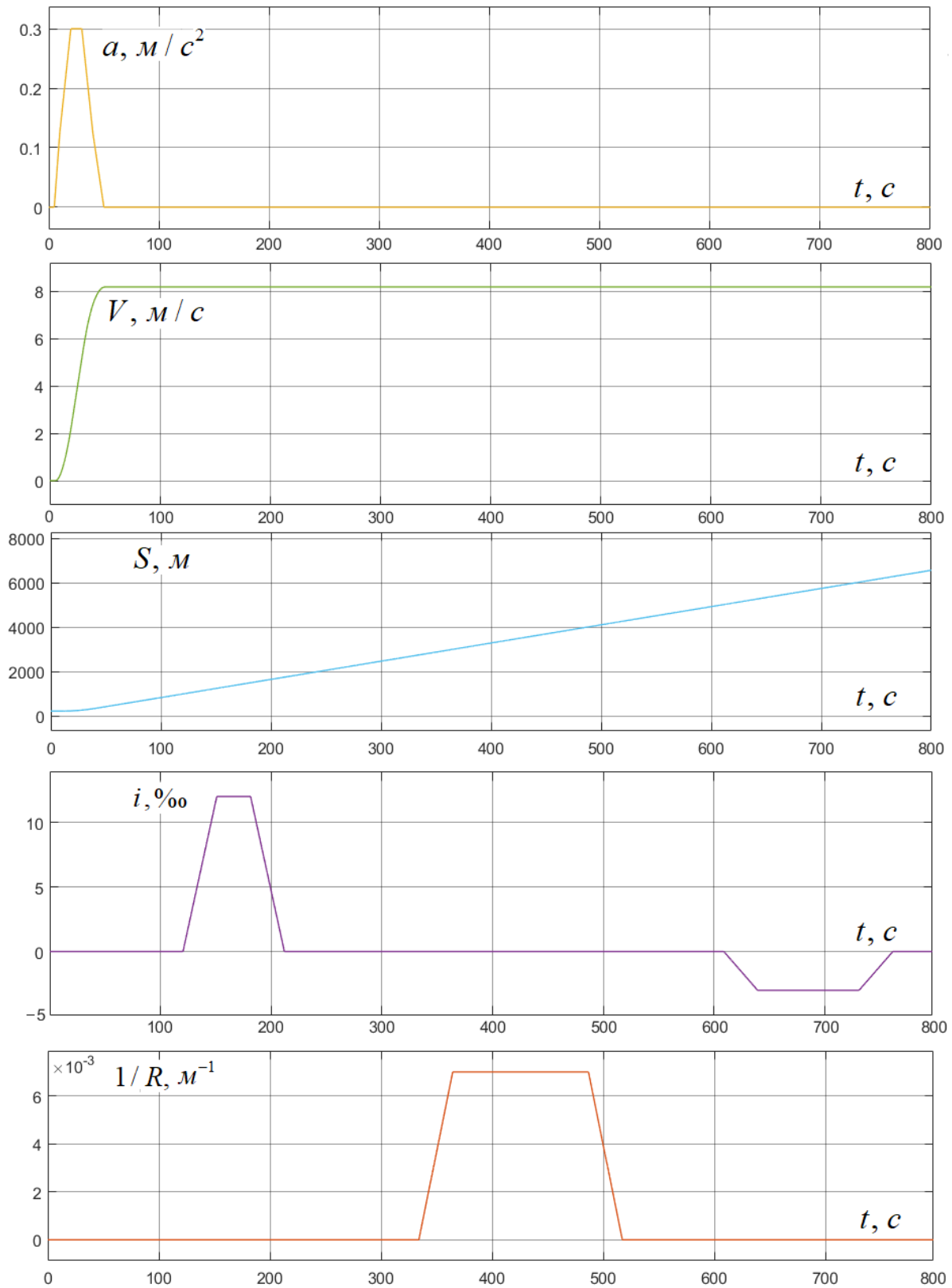


Рисунок 2.2 – Графики зависимостей ускорения ( $a$ ), скорости ( $V$ ), координаты ( $S$ ), уклона ( $i$ ) и кривизны ( $1/R$ ) путей при движении поезда от времени

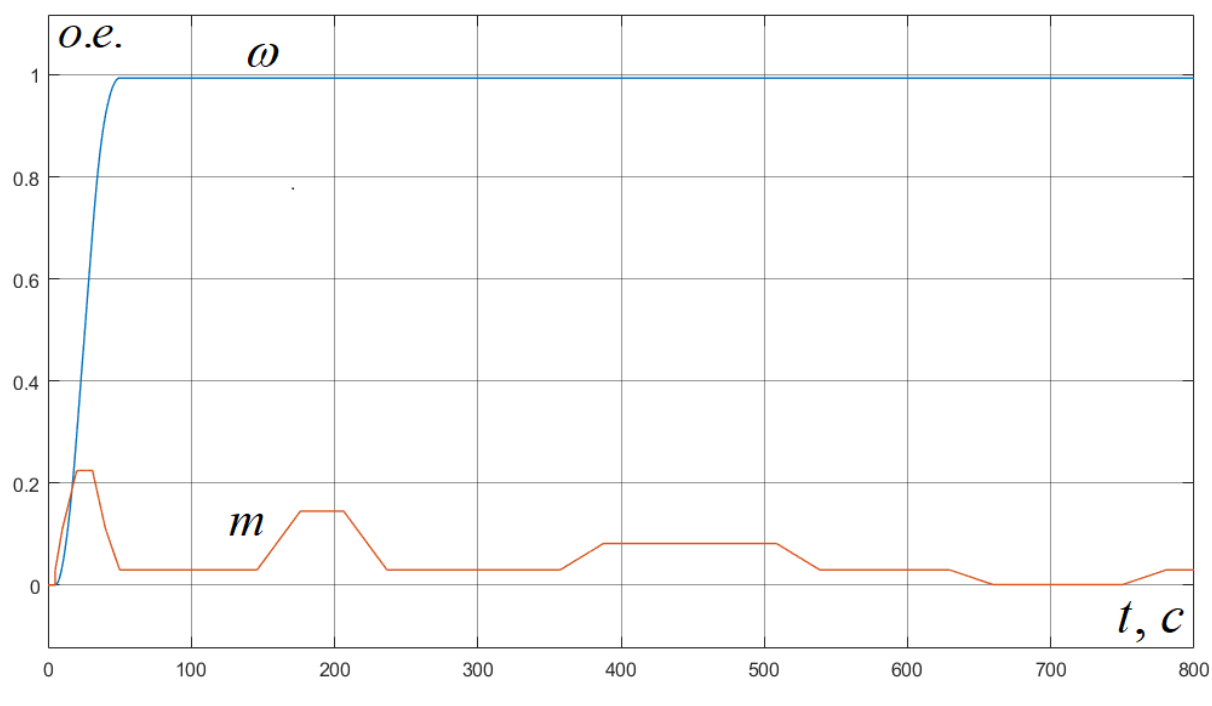


Рисунок 2.3 – Тахограмма и нагрузочная диаграмма тягового электропривода электровоза НПМ2 без состава

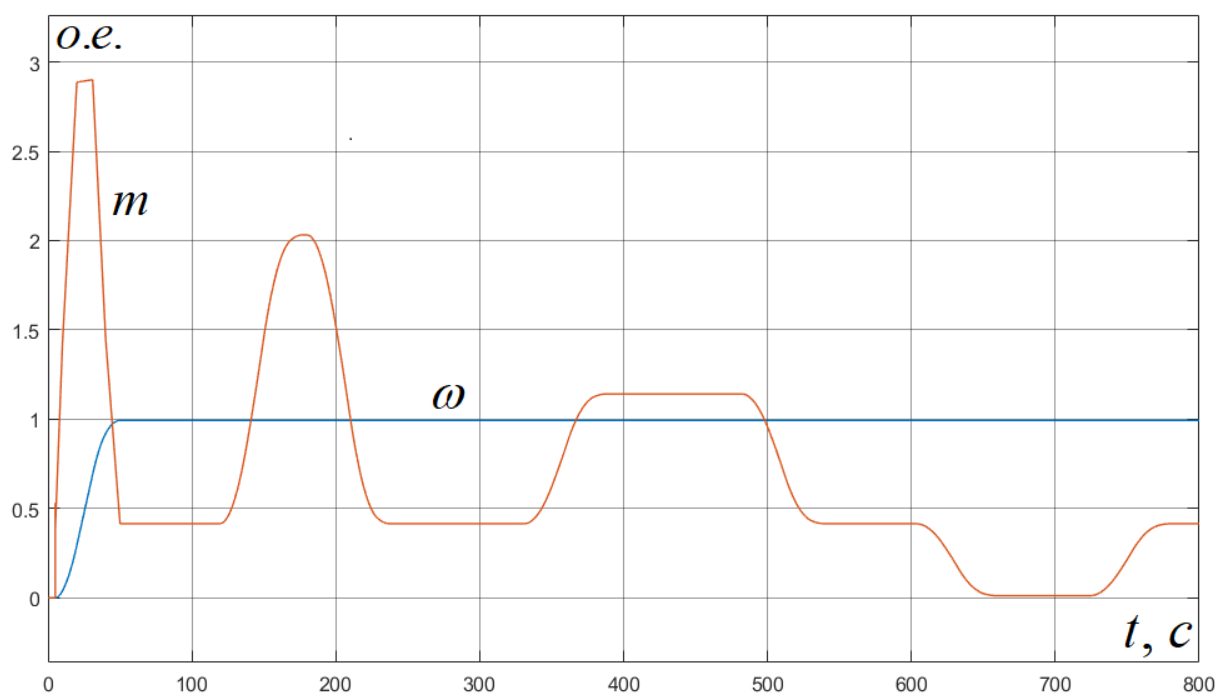


Рисунок 2.4 – Тахограмма и нагрузочная диаграмма тягового электропривода электровоза НПМ2 в составе поезда с 18 вагонами

Это заметно исходя из координаты  $S$ , которая имеет ненулевое значение в начале движения – в соответствии с 1.18 в программе вычисляется стартовое положение локомотива относительно хвоста поезда (последнего вагона), при этом скорость и ускорение идентичны для всего подвижного состава, поскольку зазоры сцепки в данной модели не учитываются. На рис. 2.2 величина уклона пути в промиллях  $I \text{ ‰}$  и показатель радиуса кривой  $1/R$  синхронизированы в модели не по расстоянию, а по времени удобства расчета и представления.

Рисунки 2.3 и 2.4 показывают разницу между режимом «холостого хода», когда НПС2 везет сам себя, т.е. работает без нагрузки (без состава) и режим работы под номинальной маневровой нагрузкой при массе состава 1200 т, т.о. отношения максимальных моментов примерно составляет 15, при этом наибольший момент в данном опыте требуется для преодоления инерционности поезда, далее в порядке убывания на нагрузку влияет момент от уклона и в последнюю очередь момент от работы в кривых участках пути.

Автор отдельно отмечает, что ограничения по уклону в модели составляет 12 и 3 ‰ соответственно [25] – при максимальных показателях уклона и ускорения ( $0,125 \text{ м/с}^2$ ) динамический момент сопротивления будет наибольшим, однако, при максимальных показателях уклона и ускорения ( $40 \text{ ‰}$  и  $0,25 \text{ м/с}^2$ ) [22] момент сопротивления от силы тяжести может быть выше.

## **2.2. Моделирование тягового электропривода НПС2**

В связи со сложностью проведения экспериментов и испытаний на локомотиве, для оценки качества работы тягового электропривода с его системой регулирования целесообразно использовать методы математического и компьютерного моделирования. Современные программные комплексы, такие как Matlab Simulink позволяют в полной мере провести имитационное моделирование процессов в тяговом электроприводе электровоза и оценить эффективность предложенных решений. В соответствии с [19], в тяговом электроприводе электровоза НПС2,

выполненном по системе ПЧ-АД со скалярным регулированием, модель должна позволять применять разные законы частотного регулирования и иметь возможность перехода на векторное управление для проведение сравнительного анализа эффективности САР.

В таблице 2.5 приведены некоторые характеристики электровоза НПМ2, необходимые для исследования режимов работы частотно-регулируемого тягового электропривода локомотива на динамической компьютерной модели, в частности, особенности его системы автоматического управления.

Таблица 2.5 Номинальные характеристики НПМ2 для моделирования

№ п/п	Название параметра	Значение параметра
1	Осевая формула	Во-Во (две независимых двухосных тележки, все они имеют индивидуальный электропривод каждой оси)
2	Источник энергии	Контактная сеть 1500В постоянного тока, питание дизель-генераторная установка (ДГУ) ЭУ-500
3	Тип ТЭД	Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором ДТА-350М с принудительной вентиляцией
4	Тип электропривода	Переменного тока на базе индивидуального IGBT-инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) или широтно-импульсным регулированием (ШИР)
5	Торможение	Механическое (колодки), динамическое, рекуперативное
6	САР электропривода	Двухуровневая, скалярное управление с обратной связью по току статора.
7	Сигнал управления	Задание тока
8	Физические Датчики	Напряжения и тока (в каждой фазе), скорости (2 датчика пульсаций магнитного потока внутри

		электродвигателя)
9	Защита от боксования	Есть, в случае боксования ведущего электропривода одной тележки, с которого берется обратная связь по скорости
10	Особенности CAN	1 уровень – дублированное управление электроприводами тележки, только 1 из 4 датчиков магнитного потока включен в обратную связь по скорости. 2 уровень – взаимодействие между тележками по CAN-шине. ШИМ в 1 зоне, ШИР – во второй

Согласно п. таблице 2.5. и в соответствии со схемой на рис. 1.3. инвертор ТЭД подключен к контактной сети (КС) 1500 В через индуктивно-емкостной фильтр посредством токоприемника. Наличие фильтра необходимо для снижения влияний пульсаций питающего напряжения, возникающих в следствии работы на одной ветви нескольких электровозов разных серий (НПМ2, 4КП, ЕЛ2, ЕЛ 21 и пр.) с различными характеристиками электрооборудования, что приводит, например, к превышению (2100 В) или чрезмерному снижению (1100 В) напряжения питания на соответствующих участках С. Следует отметить, что какое-либо регулирующее оборудование на подстанциях сети отсутствует.

НПМ2 оснащен индивидуальным электроприводом каждой колесной оси с автономным инвертором напряжения, оснащенным датчиками тока и напряжения фаз. Тяговые асинхронные электроприводы расположены попарно на обеих тележках, и обладают одной системой управления на тележку, сигнал задания от машиниста дублируется на инверторы обеих тележек, т.е. имеет место групповое управление. В статоре каждого двигателя с завода предусмотрено по 2 датчика магнитного потока, позволяющие преобразовывать переходные процессы изменения амплитуды магнитных полей в последовательность импульсов (0/1), период следования которых

определяет частоту вращения ротора, а взаимный порядок следования импульсов с обоих датчиков электродвигателя – направление вращения. Несмотря на наличие физического сопряжения с контроллером, только 1 из 4 датчиков, доступных в паре ТЭД тележки используется в программе управления инвертерами САР электровоза в качестве обратной связи, т.е. сигнал задания напряжения и частоты второго двигателя дублируется – этим параметром определяется какой из приводов в тележке является ведущим. Это обуславливает невозможность осуществления реверса направления движения локомотива до его полной остановки.

Сигналом задания для тяговых электроприводов является задание тока – такой типа управления условно называется педалью газа, поскольку, по аналогии с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), величина тока при частотном управлении пропорциональна крутящему моменту на валу электродвигателя [19].

Совмещенная система управления инверторами тележки получает сигнал задания от контроллера машиниста и осуществляет непосредственное управление тяговыми электроприводами, поддерживая заданный ток. В первой зоне регулирования для формирования выходного напряжения преобразователя используется ШИМ, обеспечивая высокое качество питающего напряжения и точное управление, требуемое для маневровой работы электровоза. При превышении номинальной скорости вращения ТЭД САР переходит во 2ю зону регулирования и переключается на ШИР, последний представляет собой вариант ШИМ, при котором время импульсов и пауз (открывания и закрывания транзисторов инвертера) во всем диапазоне регулирования не изменяются, и форма выходного сигнала имеют постоянное значение, в результате снижается качество выходного напряжения [38] и, соответственно, качество управления. Локомотив при в этом случае работает в поездном режиме (передвигается по перегонам, без состава, либо с несколькими порожними вагонами).



В САР также присутствует подсистема защиты от разносного боксования, ориентированная на минимальную скорость ведущих электроприводов и позволяющая уменьшать сигнал задания скорости тележки с проскальзывающей ведущей осью в случае фиксации САР существенной ( $>20\%$ ) разницы в скоростях [21]. Примененные в имеющейся САР технические решения обладают очевидными недостатками, однако могут быть обусловлены:

- требованиями технического задания
- небольшой планируемой загруженностью локомотива (сила тяги закладывалась с избытком)
- недостаточной производительностью контроллера инвертера.
- ограничениями стоимости компонентной и элементной базы для пробной серии локомотивов

Так или иначе, для электровоза НПСМ2 возможно проведение программной и аппаратной модернизации САУ тяговых электроприводов.

### **2.3. Динамическая компьютерная модель тягового электродвигателя ДТА-350М**

Основной задачей при разработке динамической компьютерной модели является совместимость такой модели с различными вариантами систем электропривода [39], [40] (прямой пуск или работа от преобразователя частоты, возможность применения скалярного, векторного управления, работа в тормозных режимах и пр.).

Поскольку на НПСМ2 применяется скалярная САУ [21] тяговых электроприводов, модель должна обеспечивать высокую степень достоверности при снятии эксплуатационных характеристик двигателя, таких как  $\cos\phi$ , КПД,  $S_n$ ,  $S_{кр}$ ,  $M_n$ ,  $M_{кр}$ .

Компьютерные математические модели является электродвигателей [39], [40] нужны в качестве универсальных обособленных элементов или в составе программных комплексов систем моделирования электроприводов – как на

основе реостатной релейно-контакторной системы управления (РКСУ), так и на основе полупроводниковых преобразователей (АВК, ПЧ-АД). Разработка компьютерных моделей требует выбора подхода, последовательного и четкого изложения физических принципов (концептов), лежащих в основе работы исследуемой электрической машины. Такой порядок обеспечивает точную имитацию причинно-следственных связей в двигателе, и, как следствие, высокую степень достоверности результатов моделирования.

В основе модели используется трехфазный асинхронный двигатель, конструктивно состоящий из станины, статора, ротора, подшипников [41], и, в случае описания АД с фазным ротором – блока контактных колец со щетками. Конструктивно, статор состоит из ярма, набираемого из листов электротехнической стали (ограничивающих вихревые токи) и статорной обмотки, укладываемой в пазы. Обмотка статора трехфазного асинхронного двигателя включает в себя 3 отдельных обмотки по числу фаз питающего напряжения двигателя. Каждая такая обмотка, будучи уложенной в пазы статора с геометрическим сдвигом на 120 градусов по отношению к предыдущей, может соединяться по схеме «звезда» (без нулевого провода) или «треугольник». Соответствующее расположение фазных обмоток статора обеспечивает создание вращающегося магнитного потока в замкнутой системе «магнитопровод статора – зазор – магнитопровод ротора – зазор», наличие зазора обеспечивает подвижность ротора.

Ротор асинхронного двигателя также представляет собой набор листов электротехнической стали и имеет с внешней стороны пазы для обмотки. Аналогично статорной, роторная обмотка является распределенной трехфазной системой проводников, выполняющая функцию магнитного взаимодействия со статорной обмоткой [42, 43]. В процессе преобразования электромагнитной энергии в энергию вращения ротора создается крутящий момент, выполняющий полезную работу.

Трехфазные обмотки асинхронного двигателя характеризуются такими техническими параметрами, как число пар полюсов, количество пазов на один полюс, фазу, числом и площадью сечения проводника в катушечных группах, видами исполнения катушек (могут быть однослойными, двухслойными, смешанными, с укороченным или полным шагом, последовательным или параллельным соединением катушек в фазе), также могут быть различными схемы соединения обмоток (треугольник/звезда), однако основным назначением фазных обмоток является создание в пространстве магнитной системе намагничивания, пропорционального протекающей в ней токам [42, 44].

Образованная в результате работы магнитной системы всех фаз статорной обмотки, питающейся от трехфазного источника напряжения результирующая сила намагничивания, представляет собой вращающуюся соосно с валом системы намагничивающих сил, изменяющихся во времени и в пространстве вдоль оси вращения вала, проходя вдоль зубцов. Если по фазам обмотки ротора протекает трехфазный ток, та создает вращающуюся результирующую намагничивающую силу. Под действием взаимодействия намагничивающих сил статора и ротора, при учете их взаимного расположения, формируется главная результирующая намагничивающая сила, создающая главный магнитный поток при учете магнитной проницаемости системы.

Под действием изменения главного магнитного потока наводится ЭДС в обмотках статора и ротора. ЭДС в купе с питающим напряжением статора формируют фазные токи обмоток. В это же время данный магнитный поток взаимодействует с обмоточными токами, создавая электромагнитный вращающий момент. Вращение основного магнитного потока наводит в зубцах статора и ротора вторичные потоки, формирующие вихревые токи, формирующие намагничивающие силы, оказывающие воздействие на

результатирующую намагничивающую силу – это влияние проявляется в виде потерь в стальных магнитопроводах ротора и статора.

Описанная концепция работы асинхронной машины дает возможность сформулировать исходные допущения:

1. Распределение по пазам статорных и роторных обмоток идеально, обмотки состоят из нескольких катушечных групп, которые создают синусоидально-распределенные пространственные намагничивающие силы. Сумма обмоточных токов всегда равна нулю, сопротивления фаз статорных обмоток равны между собой.

2. Зубцовые пульсации магнитного потока при вращении ротора не учитываются, поскольку считается, что данная проблема решена за счет конструктива электрической машины – скосом пазов на одно зубцовое деление и взаимным подбором количества пазов статора и ротора.

3. Индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора принимаются постоянными и не зависят от насыщения основной магнитной цепи.

4. Для учета насыщения магнитной системы используется последовательность «магнитопровод статора – воздушный зазор – магнитопровод ротора - воздушный зазор».

Особенности реализации модели:

1. Расчет основных переменных производится в абсолютных величинах

2. На вход фаз статора могут подаваться напряжения любой конфигурации.

3. Выходными параметрами модели являются токи статора, ротора ( $I_s$ ,  $I_r$ ); электромагнитный вращающий момент ротора ( $M_r$ ); угловая скорость ротора или его угол поворота ( $\omega$ ,  $\Theta_m$ ).

4. В модель могут быть введены следующие возмущающие воздействия: момент сопротивления трения подшипников ( $\Delta M$ ), момент сопротивления рабочего органа (механизма) ( $M_c$ ).

В соответствии с вышеизложенным, моделирование переходных процессов в трехфазном короткозамкнутом асинхронном двигателе представляется набором взаимосвязанных задач, объединяемых общими переменными двигателя:

- расчет электрических (в т.ч. переходных) процессов во всех обмотках статора и ротора, а также сопряженных с другими задачами посредством наводимых в обмотках ЭДС;

- расчет электромагнитных процессов, связывающих фазные обмоточные токи, их пространственную конфигурацию с результирующими намагничивающими токами или МДС (магнитодвижущими силами);

- расчет электромагнитных процессов в магнитной системе, воздушном зазоре асинхронной короткозамкнутой машины, связывающих нелинейными зависимостями намагничивающие токи с главным магнитным потоком.

- расчет магнитоэлектрических процессов, связывающих потокоцепление статорных и роторных обмоток с наводимыми в них ЭДС.

- расчет электромагнитомеханического взаимодействия обмоточных токов с главным магнитным потоком, формирующего электромагнитный момент;

- механика взаимодействия электромагнитного крутящего момента ротора с моментом сопротивления, результатом которого является угловая частота вращения ротора АД.

Моделирование разделяется на 2 фазы:

- создание массива параметров АД с привязкой модели
- непосредственный расчет процессов и взаимодействий.

В первый этап входит изучение схемы замещения асинхронной машины в целях выделения основных определений и параметров, когда как второй подразумевает краткое описание общей структуры модели и ее подсистем, включая установку математических соотношений между ее составляющими переменными.

Для проведения анализа электромеханических свойств асинхронных двигателей при работе в установившихся (статических) режимах работы используется Т-образная схема замещения с подключаемыми параллельно сопротивлениями, характеризующими потери в стали [45]. Схема приведена на рисунке 2.5. Расчет процессов с соответствующими переменными параметрами схемы замещения осуществляется при некоторых допущениях:

1. Статорные и роторные параметры и переменные обозначаются подстрочными индексами 1 и 2, или латинскими буквами S, R соответственно.
2. Представленная схема замещения отражает процессы в одной фазе двигателя, при этом предполагается, что двигатель включает в себя  $m_1$  симметричных фазных обмоток статора, формирующих вращающийся магнитный поток при подаче питающего напряжения.
3. Роторная обмотка отображается  $m_2$  симметричными фазными обмотками с короткозамкнутым ротором по схеме «беличья клетка». Параметры обмотки ротора приводятся к обмотке статора с учетом разницы в числе их витков и коэффициенте трансформации.
4. Характер питающего напряжения: симметричное и синусоидальное, с заданной амплитудой и частотой. Вычисляемые переменные двигателя являются действующими значениями гармонических (синусоидальных) величин.
5. Активные сопротивления статорных и роторных обмоток – константы, неизменные во времени и не зависящие от нагрева или частоты питающего напряжения (эффект вытеснения тока) [46]. Индуктивности потоков рассеяния обмоток также постоянны, не зависят от величины тока или его частоты (тот же поверхностный эффект).
6. Учет потерь в стали производится активными сопротивлениями для обмоток статора и ротора. Значения потерь высчитываются в зависимости от амплитуды и частоты магнитного потока.

7. Характеристика намагничивания двигателя может быть линейной или нелинейной, если это указано дополнительно.

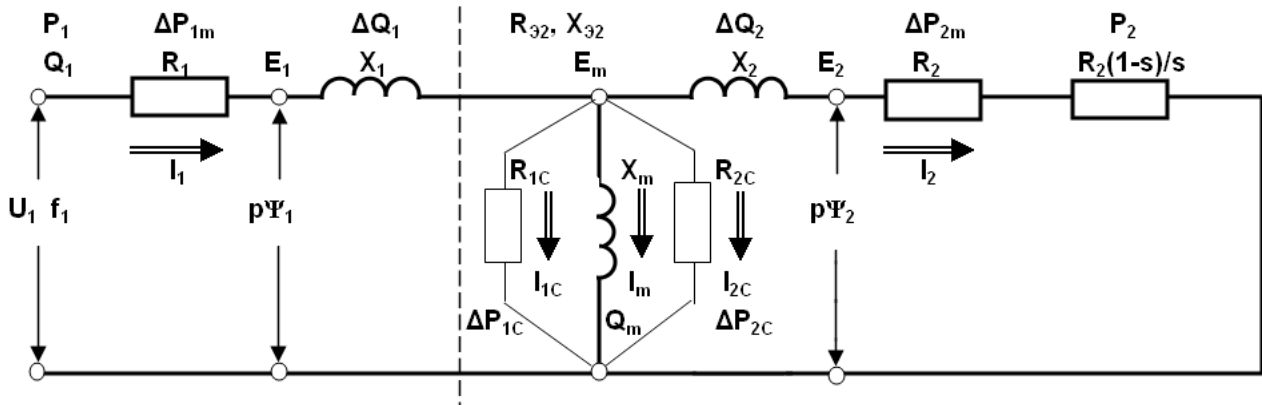


Рисунок 2.5 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Параметры схемы замещения АД:

-  $R_1$  – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом. Его значения могут приниматься при разных температурах (простой, окр. среда, установившийся режим работы). Каталожные данные описывают значения сопротивления при  $t_N=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пересчет значений сопротивлений к рабочей температуре  $t$  осуществляется по формуле

$$R_{1t} = R_{1N}(1 + \alpha \tau_1), \quad (2.15)$$

где  $R_{1N}$  – каталожное значение активного сопротивления при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом;  
 $\tau_1 = \Theta_1 - 20$  – превышение каталожной температуры обмотки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент,  $1/^{\circ}\text{C}$  ( $3,8 \cdot 10^{-3}$  или  $4,3 \cdot 10^{-3}$  для меди или алюминия, соответственно);

-  $X_1$  – индуктивное сопротивление потоков рассеяния одной фазы обмотки статора, Ом, зависит от частоты подводимого напряжения и индуктивности потоков рассеяния обмотки статора  $X_1 = 2\pi f_1 L_1$ . В каталоге обозначается сопротивление при номинальной частоте  $f_N=50\text{ Гц}$ ;

-  $R_2$  – активное фазное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статорной обмотке, Ом. Приведение сопротивления для асинхронного

двигателя с короткозамкнутым ротором осуществляется в соответствии с выражением

$$R_2 = r_2 \frac{4m_1 W_1^2 k_{o61}^2}{Z_2 k_c^2}, \quad (2.16)$$

где:  $Z_2$  – количество пазов обмотки ротора;  $r_2 = r_c + 2r_k$  – величина активного сопротивления при определенной температуре стержня обмотки ротора и двух приведенных частях короткозамкнутого кольца, Ом.

-  $X_2$  – индуктивное сопротивление потоков рассеяния одной фазы обмотки ротора, приведенное к фазе обмотки статора, Ом. Операция приведения индуктивного сопротивления обмотки ротора производится по выражению, аналогичному (2.16).

-  $X_m$  – индуктивное сопротивление главного магнитного потока, Ом, зависит от частоты подводимого напряжения питания и индуктивности главного магнитного потока  $X_m = 2\pi f_1 L_m$  [47, 48]. В каталожных данных содержится величина сопротивления при номинальной частоте  $f_N = 50$  Гц;

-  $R_{C1}, R_{C2}$  – активные сопротивления потерь в стали статорных и роторных обмоток, Ом, зависящие от амплитуды и частоты магнитного потока;

$\Psi_1, \Psi_m, \Psi_2$  – потокосцепление обмотки статора, главных статорных и роторных магнитных потоков, Вб;

-  $E_1, E_m, E_2$  – ЭДС, наводимые потокосцеплениями в обмотке статора от главного магнитного потока и в обмотке ротора, В.

Основное уравнение, заложенное в работу динамической компьютерной модели, построено на векторной сумме токов в схеме замещения.

$$\vec{I}_m = \vec{I}_1 - \vec{I}_2 - \vec{I}_C. \quad (2.17)$$

Использование уравнение (2.3) подразумевает знание составляющих используемых векторов в заданной системе координат.

Структура модели ADNEW (рисунок 2.6) составлена при помощи программного пакета Matlab Simulink в виде блоков подсистем и компонентов.



Блоки структуры содержат входные и выходные каналы, а также связывающий их в единую модель математический аппарат. Блоки, связанные между собой однотипными (векторными) переменными в структуре соединены толстой линией, тогда как тонкими линиями обозначены скалярные переменные. Математика блоков включает в себя логику, арифметику, дифференциальные уравнения и прочее.

В структуре модели производится расчет токов статора и ротора по трем фазам, далее осуществляется пересчет в двухфазной системе координат, вычисление потокосцеплений, тока намагничивания и ЭДС обмоток, расчет величины электромагнитного момента ротора электродвигателя и угловой скорости вращения его вала. Подробно рассмотрим назначение структурных блоков модели согласно их функционалу.

Фазный ток статора  $I_{li}$  рассчитывается с учетом его зависимости от питающего напряжения  $U_{li}$ , значения противо-ЭДС  $E_{li}$ , и параметров статорной обмотки. В модели не учитывается неидентичность обмоток, поэтому все обмотки в модели одинаковые, а значение фазного тока в операторном виде в трехфазной неподвижной (АВС) системе координат может быть вычислен в соответствии с выражением

$$I_{li}(p) = (U_{li}(p) - E_{li}(p) - U_{10}) \frac{1/R_1}{1 + T_1 p}, \quad (2.18)$$

где:  $i$  – индекс каждой фазы статорной обмотки (значения А, В, С;)  $T_1 = L_1/R_1$  – электромагнитная постоянная времени обмотки статора, с;  $L_1$  – индуктивность магнитных потоков рассеивания, Гн;  $U_{10}$  – напряжение смещения нейтрали обмотки к нейтрали сети, В.

Расчет фазных токов статора  $I_S$  по формуле (2.18) осуществляется в блоке 1/Z1. На вход блока подаются трехмерные вектора питающего напряжения  $U_S$  и противо-ЭДС  $E_S$ .

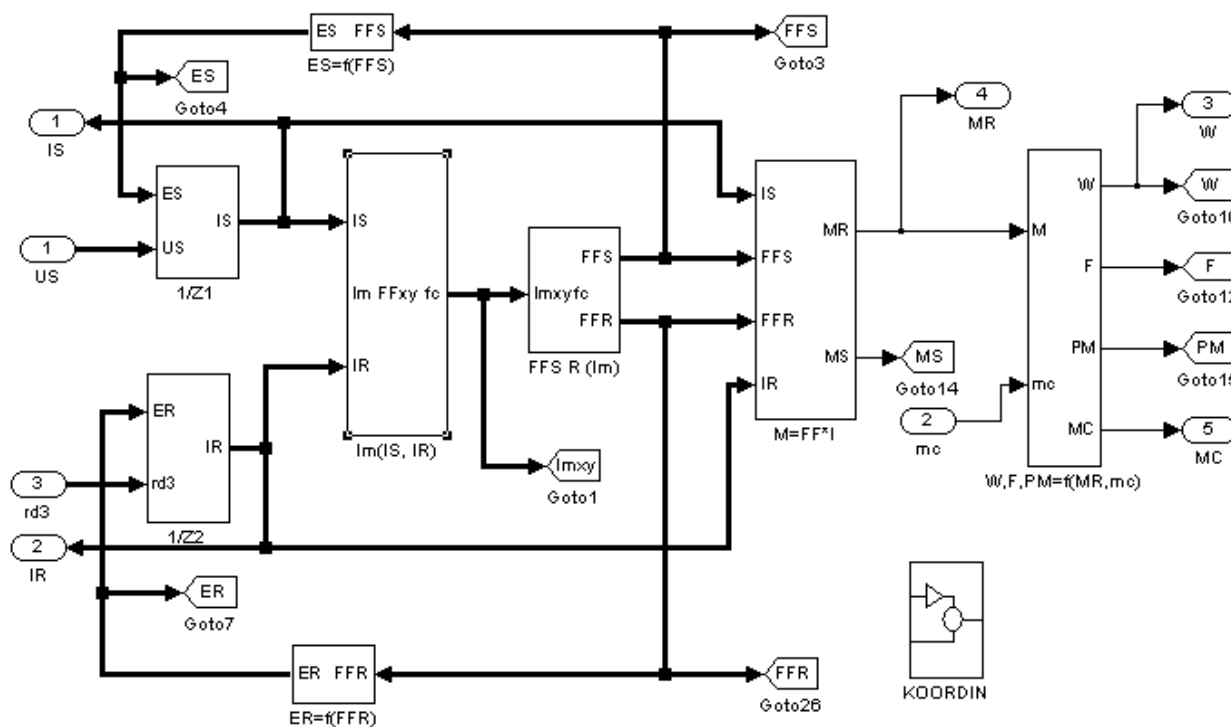


Рисунок 2.6 – Структурная схема динамической компьютерной модели  
ADFNEW

Значение тока фаз ротора  $I_{2j}$  зависит от значения ЭДС  $E_{2j}$ , индуцируемой в обмотке, значения роторного питающего напряжения  $U_{2j}$  и данных обмотки ротора, причем сопротивления фаз ротора  $R_{2j}$  могут задаваться различными, поэтому фазный ток роторной обмотки в операторном виде в трехфазной вращающейся со скоростью скольжения системе координат **abc**, может быть найден по формуле

$$I_{2j}(p) = (E_{2j}(p) - U_{2j}(p) - U_{20} - I_{2j}(p)R_{2j}) \frac{1}{L_{2j}p}, \quad (2.19)$$

где:  $j$  – индекс фазы ротора, соответствующие значения - а, b, с;  $L_2$  – индуктивность магнитных потоков рассеивания обмотки ротора, Гн;  $U_{20}$  – напряжение смещения нейтрали обмотки относительно нейтрали внешней цепи, В.

Расчет трехфазных токов ротора  $I_R$  по формуле (2.19) производится в блоке **1/Z2**. Входными переменными блока являются трехмерный вектор ЭДС  $E_S$  и трехмерный вектор добавочного сопротивления  $R_{d3}$ , задаваемого в

относительных единицах. Трехмерный вектор напряжения питания ротора  $U_R$  в представленной модели равен нулю.

Вычисление остальных переменных: двухмерного вектора тока намагничивания, трехмерных векторов главного магнитного потока, обмоточных ЭДС, электромагнитного момента ротора, угла поворота вала и скорости вращения асинхронного электродвигателя, а также расчет его энергетических характеристик описан осуществляется в соответствии с [39, 44, 49].

#### 2.4. Оценка достоверности компьютерной модели электродвигателя

Для проведения оценки достоверности компьютерной модели используются расширенные характеристики ДТА-350М, включая обмоточные данные двигателя. В таблице 2.6 представлены характеристики асинхронного тягового электродвигателя ДТА-350, необходимые для моделирования.

Таблица 2.6 Характеристики моделирования тягового электродвигателя

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра	Единица измерения
1	Номинальная мощность ( $P_n$ )	350	кВт
2	Фазное напряжение ( $U_{1f}$ )	675	В
3	Номинальный ток ( $I_{1f}$ )	221	А
4	Номинальная скорость ( $\omega_n$ )	830	Об/мин
5	Номинальная частота ( $f_n$ )	42,1	Гц
6	КПД ( $\eta$ )	92,8	%
7	Коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ )	0,84	-
8	Максимальная скорость ( $\omega_{max}$ )	1740	Об/мин
9	Число пар полюсов ( $p_p$ )	3	-

10	Номинальное скольжение ( $S_n$ )	1,4	%
11	Номинальный момент ( $M_n$ )	4028	Нм
12	Кратность максимального момента (часовой режим/макс. скорость) ( $\lambda$ )	3,13/1,6	-
13	Максимальная частота тока ( $f_{max}$ )	88,4	Гц
14	Тип обмотки статора	Простая петлевая	-
15	Соединение обмотки статора	Y	-
16	Соединение обмотки ротора	Короткозамкнутая	-
17	Активное сопротивление обмотки статора при 20 0C ( $R_1$ 20C)	0,0505	Ом
18	Активное сопротивление обмотки ротора при 20 0C ( $R_2$ 20C) (приведенное к обмотке статора)	0,0349	Ом
19	Индуктивность обмотки статора ( $L_1$ )	0,00103	Гн
20	Индуктивность рассеяния ротора (приведенная к обмотке статора) ( $L_2$ )	0,00092	Гн
21	Индуктивность намагничивающего контура ( $L_m$ )	0,0277	Гн
22	Передаточное число редуктора ( $k_R$ )	5,58	-
23	Подвеска двигателя	Опорно-осевая	-

На рисунке 2.7 представлены переходные процессы, полученные на вышеописанной модели при прямом пуске на холостом ходу асинхронного короткозамкнутого двигателя ДТА-350М, запитанного от трехфазного

источника с линейным напряжением 1170 В и частотой 42,1 Гц [49] с последующим набросом номинального момента сопротивления. Зависимости модуля тока статора  $i_l$ , э/м момента  $m$ , момента сил сопротивления  $m_c$  и угловой скорости вращения  $w$  отображаются в относительных единицах. Постоянная времени инерции имеет значение 0,27 с.

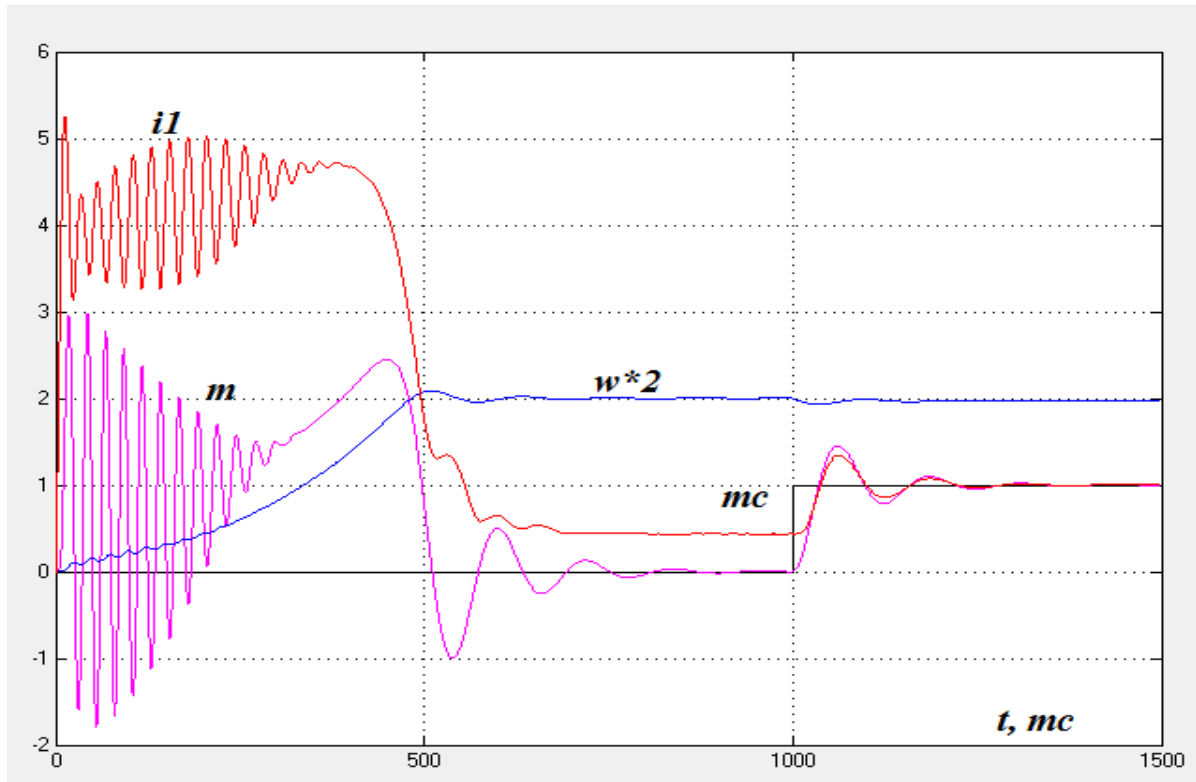


Рисунок. 2.7 – Переходные процессы в ДТА-350М при прямом пуске на холостом ходу и набросе номинального момента

При моделировании данных переходных процессов в модели было учтено вытеснение тока ротора в функции скольжения [49]. Время пуска составляет не более 0,5 с при величине суммарного момента инерции, равного двойному моменту инерции АД. Кратность пиковых значений тока и момента при пуске составляют 5,3 и 3 номинала, соответственно. Без учета вытеснения тока ротора время пуска вырастет до 0,66 с при соответствующих пиковых значениях тока и момента 8,5 и 2,7. В первой половине интервала пуска явно выражены колебательные процессы тока и момента, что сопровождается биением составляющих с частотами до 50 Гц, что обуславливается различной

инерционностью электрических и процессов [50], когда как электромагнитный момент равен произведению тока в обмотке на ортогональную составляющую потокосцепления [51], что приводит к колебаниям величины тока и момента [52, 53].

Поскольку автор не имеет возможности тестировать различные варианты структуры САР на реальном локомотиве, на первый план выходит достоверность имеющейся динамической компьютерной модели.

Методика оценки достоверности компьютерной модели основана на вычислении точности расчета основных параметров электродвигателя в номинальном режиме работы [54]: по достижению установившегося режима при номинальном напряжении, частоте и моменте нагрузке проводилась фиксация значений скольжения, статорного тока,  $\cos\varphi$  и КПД. Результаты измерения вместе с расчетом среднеквадратичной ошибки представлены в таблице 2.7. Общая среднеквадратичная величина по представленным переменным не превысила 3,75 %, что подтверждает высокую степень достоверности динамической компьютерной модели [55].

Таблица 2.7 Оценка достоверности компьютерной модели и расчет среднеквадратичной ошибки

	U, В	F, Гц	Mн, Нм	$\omega$ , 1/с	s, %	I <sub>1</sub> , А	cosφ	η, %
<b>Двигатель</b>	1170	42.1	4028	86.9	1.44	221	0.84	92.6
<b>Модель</b>	1170	42.1	4028	86.93	1.41	213.2	0.89	90.8
Δ					0.02083	0.03529	-0.0595	0.01944
Δ <sup>2</sup>					0.00043	0.00125	0.00354	0.00038
Итого, %								<b>3.74187</b>

Расчет среднеквадратичной ошибки производится в соответствии с выражением (2.30):

$$\Delta = \sqrt{\frac{\left(\frac{s_H - s_{H.мод}}{s_H}\right)^2 + \left(\frac{I_{1H} - I_{1H.мод}}{I_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{\cos\varphi_H - \cos\varphi_{H.мод}}{\cos\varphi_H}\right)^2 + \left(\frac{\eta_{1H} - \eta_{1H.мод}}{\eta_{1H}}\right)^2}{4}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\left(\frac{1,44 - 1,41}{1,44}\right)^2 + \left(\frac{221 - 213,2}{221}\right)^2 + \left(\frac{0,84 - 0,89}{0,89}\right)^2 + \left(\frac{92,6 - 90,8}{92,6}\right)^2}{4}} = 0,0374 \quad (2.20)$$

Добавление к структуре модели электродвигателя подсистемы преобразователя частоты (рисунок 2.8) дает возможность исследовать режимы работы тягового электропривода, выполненного по системе ПЧ-АД [56].

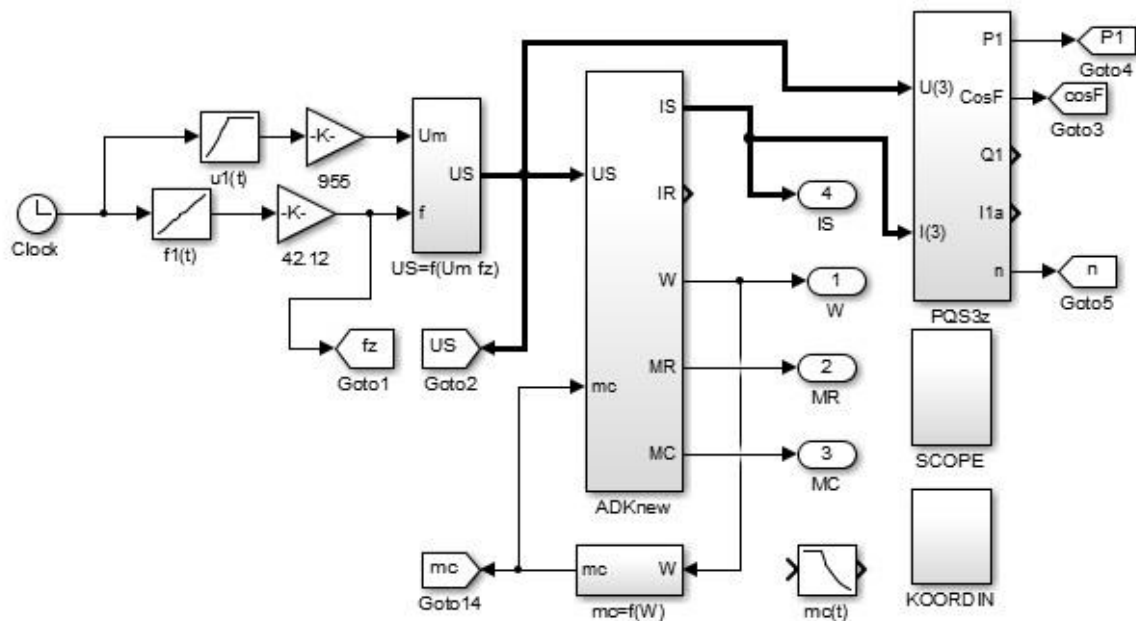


Рисунок 2.8 – Модель электропривода по системе ПЧ-АД с тяговым электродвигателем ДТА-350М.

Блок  $U_s=f(U_m, F_z)$ , на вход которого подаются сигналы задания напряжения и частоты питания реализует функции ПЧ, преобразуя одномерные скалярные входные величины сигналов задания в трехмерный вектор мгновенного значения фазного напряжения, поступающего на вход модели асинхронного электродвигателя ADKnew. В блоке задания реактивного момента нагрузки  $m_c=f(\omega)$  формируется требуемый момент сопротивления при ненулевой скорости АД.

Переходные процессы модели ADKnew, приведенные на рисунке 2.9. отражают пуск ДТА-350М с номинальным реактивным статическим моментом в разомкнутой системе ПЧ-АД с задатчиком интенсивности и скалярным регулированием скорости. Номинальная угловая скорость электродвигателя 86,9 рад/с выбрана с учетом соответствия максимальной линейной скорости локомотива в 1 зоне регулирования (30 км/час или 8,33 м/с).

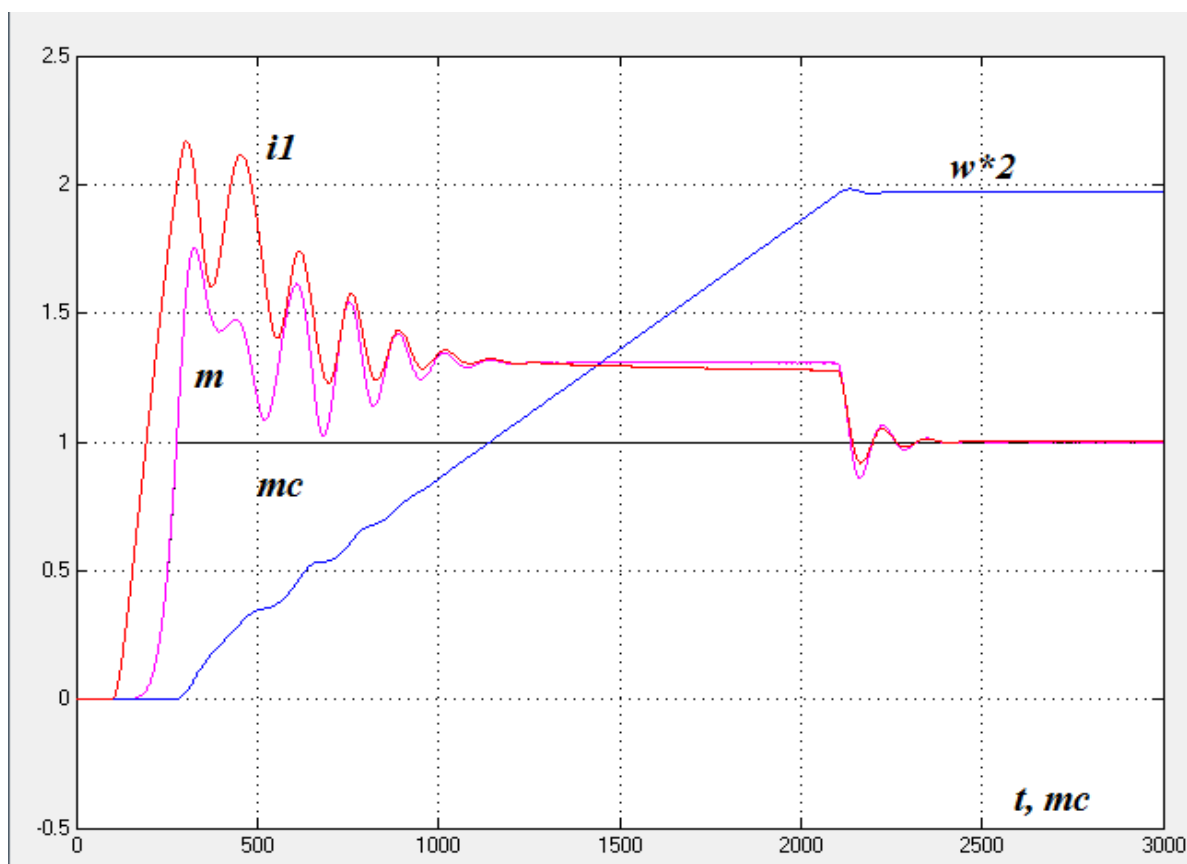


Рисунок 2.9 – Переходные процессы ДТА-350М при пуске с номинальной реактивной нагрузкой.

Можно отметить следующие характеристики переходных процессов, представленных на диаграмме (2.9): продолжительность работы ЗИ – 2 с, пиковые значения тока и момента составляют 2,2 и 1,7 номинальных величины соответственно. Значение динамического момента при пуске от задатчика интенсивности 0,3  $M_n$ .

## 2.5. Выводы по главе 2

Полученные переходные процессы являются идеализированными и не учитывают динамическое перераспределение нагрузок между осями в движении, коррелирующее с соответствующим ограничением силы сцепления.

Анализ графиков скорости и момента сопротивления на валу электродвигателя позволяет сделать выводы: динамический момент ТЭП составляет существенную часть момента нагрузки, и с учетом разницы в



требованиях прохождения различных участков пути может быть основным потребителем мощности электродвигателя. Гравитация формирует основной компонент силы сопротивления движению поезда – скатывающая сила при максимальных уклонах пути способна сделать участок непреодолимым для поезда, поскольку она также влияет и на величину силы сцепления, ограничивая максимальный уровень тяги, что, в свою очередь снижает эффективность локомотива. Система тягового электропривода маневрового локомотива обладает инерционностью  $\gamma \leq 245$  и определяет повышенные требования к диапазону регулирования и энергетическим показателям САР.

Рассчитанные по формулам 2.5-2.10 величины инерционности компонентов электропривода позволяют сделать вывод: момент инерции маховых масс тягового привода (электропривода и колесных пар) составляет около 10% от момента инерции массы локомотива, приведенной к валу одного ТЭД.

Вид переходных процессов указывает на характерные для асинхронного электродвигателя кривые скорости и момента при пуске и набросе нагрузки, что свидетельствует о корректности модели. Выбранная в качестве показателя достоверности компьютерной модели ДТА-350М величина среднеквадратичной ошибки, равная 3,75% показывает высокую степень схождения характеристик. Таким образом, представленная динамическая компьютерная модель (ДКМ) АД пригодна для проведения исследований эффективности различных САР ПЧ-АД. Также на модели можно проводить анализ работы тягового электропривода электровоза при боксовании.

### ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ САР НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА БОКСОВАНИЯ НА ЛОКОМОТИВАХ

#### 3.1. Требования к тяговому электроприводу НПМ2

Маневровый режим работы электровоза НПМ2 задается в диапазоне скоростей от 0,1 м/с до 8,3 м/с: нижний предел скорости обуславливает необходимость точного позиционирования сцепленных с электровозом локомотивов и вагонов, а верхний – границы работы электропривода в 1 зоне регулирования (около 30 км/ч в рабочем диапазоне толщин бандажей на номинальной частоте питающего напряжения ТЭД). Таким образом, диапазон регулирования скорости тягового электропривода:

$$D_{\omega} = \frac{8,3}{0,1} = 83 \quad (3.1)$$

Полученные в 2 главе результаты моделирования нагрузок электропривода при движении одного локомотива и поезда (диаграммы 2.3 и 2.4), а также допустимой перегрузочной способности двигателя в часовом режиме  $\lambda=3,13$  (таблица 2.6), диапазон регулирования момента приблизительно равен

$$D_M = \frac{3,13}{0,4} \approx 8 \quad (3.2)$$

Таким образом, с учетом особенностей технологического процесса, характеристик питающей (контактной) сети и механики подвижного состава, к тяговому электроприводу электровоза предъявляются следующие требования:

1. Диапазон регулирования скорости 83:1, момента – 8:1
2. Рекуперативное и динамическое торможение
3. Обеспечение ускорения/торможения до 0,25 м/с<sup>2</sup>
4. Работа в диапазоне напряжений контактной сети 1100-2100 В
5. Система управления моментом двигателя

6. Высокое быстродействие САР (время реакции по возмущению 0,05 с)
7. Двухзонное регулирование частоты вращения (1 зона – до 30 км/ч, вторая – до 60 км/ч)
8. Защита от боксования и юза [57]
9. Диапазон рабочих температур окружающего воздуха от -40 до +80

Помимо всего прочего, тяговый электропривод должен работать в составе группы из 4 электроприводов, обеспечивая как синхронизированное кооперативное, так и индивидуальное управление скоростью и моментом тяговых электродвигателей.

Дополнительным требованием является стабильная работа ТЭД в условиях ударных механических нагрузок, вызванным нелинейным поведением различных единиц подвижного состава на сложных участках пути (при выборе зазоров по сцепке и в режиме «толкача» (подача вагонов) [58].

### **3.2. Исследование работы систем управления тягового асинхронного электропривода электровоза НПМ2 на динамической компьютерной модели**

Трогание поезда с места сопровождается ступенчатым выбором зазоров в сцепных устройствах между единицами подвижного состава, по данным [59] величина зазора составляет 110 мм. Таким образом, момент сопротивления, состоящий из сопротивления движению от трения и инерционности [59] меняется ступенчато.

Поскольку при торможении промышленного состава с тянущим локомотивом (в процессе которого вагоны, как правило «догоняют» локомотив, обеспечивающий наибольшее тормозное усилие), люфты сцепных устройств устраняются – в режиме тяги при трогании с места стоящего впереди поезда «головного» локомотива состав «растягивается», т.к. зазоры между его единицами становятся максимальными.

Структурная схема механической части модели электропривода НПМ2 с подсистемой имитации выбора зазора по сцепке представлена на рисунке 3.1.

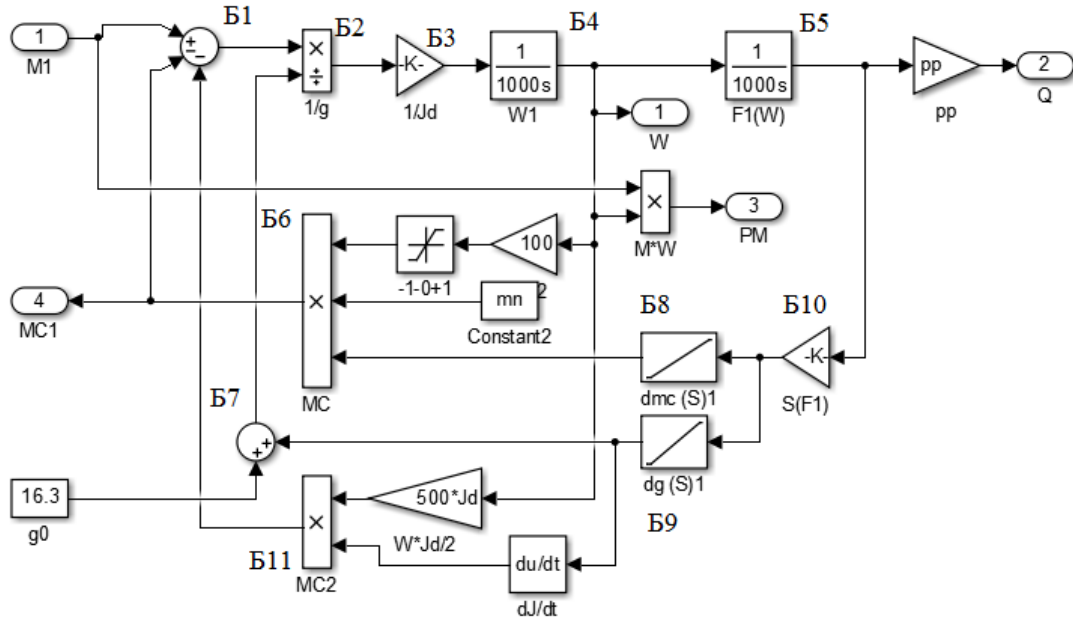


Рисунок 3.1 – Структурная схема подсистемы механической части модели электропривода НПМ2 с имитацией выбора зазора сцепки

Схема рисунка 3.1 включает в себя следующие переменные и блоки (модули): на вход модели подается величина электромагнитного момента ТЭД М1, в блоках Б1-Б11 реализуются математические уравнения электропривода:

$$\left. \begin{aligned} M_{CM} \geq M_C(S) \geq 3 \cdot \Delta M_C + 2 \cdot n_B \cdot \Delta M_C = M_{C0} + K_M \cdot S(t), \\ J_{\Sigma M} \geq J_{\Sigma}(S) \geq 1,5 \cdot J_{ДВ} + 3 \cdot \Delta J + 2 \cdot n_B \cdot \Delta J = J_0 + K_J \cdot S(t), \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где для подвижного состава с учетом масс НПМ2, груженого и порожнего вагонов целесообразно использовать кратные каждому 30 тоннам коэффициенты  $K_M = 0.504 \text{ МН/м}$ ,  $K_J = 89.5 \text{ кг*м}^2/\text{м}$ ,  $\Delta M_C = 0,0277 \cdot M_H$  и  $\Delta J = 4,925 \cdot J_{ДВ}$  (зазор сцепки 0,11 м). Из (3.1) уравнение движения одномассового электропривода с изменяющейся инерционностью  $J_{\Sigma}(S)$  можно записать в форме [59]

$$M(t) - M_C(S) = J_{\Sigma}(S) \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ_{\Sigma}(S)}{dt}, \quad (3.4)$$

где модуль перемещения электровоза  $S(t) = \frac{R_K}{i} \int \omega(t) \cdot dt + S_0$ .

Исходя из (3.4) уравнение Коши для углового ускорения электродвигателя

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}(S)} \left[ M(t) - M_c(S) - \frac{\omega(t)}{2} \frac{dJ_{\Sigma}(S)}{dt} \right]. \quad (3.5)$$

Поскольку рост момента инерции эквивалентен увеличению сопротивления, на основе (3.5) получено интегральное уравнение для расчета угловой скорости вращения электродвигателя НПМ2

$$\omega(t) = \int \frac{1}{J_{\Sigma}(S)} \left[ M(t) - M_c(S) - \frac{\omega(t)}{2} \frac{dJ_{\Sigma}(S)}{dt} \right] dt + \omega_0. \quad (3.6)$$

Представленные уравнения реализованы в структурной схеме механической части модели электропривода на рисунке 3.1: (3.3) реализуются в блоках Б5, Б8, Б9 и Б10, а (2.35) – в Б1-Б4, Б6, Б7 и Б11.

За основу для моделирования работы ПЧ-АД взяты типовые структурные схемы разомкнутых и замкнутых САР скалярного и векторного типов [60 - 66], удовлетворяющие предъявленным требованиям.

При помощи модели электропривода проведен расчет переходных процессов трогания с места поезда с выборкой зазоров по сцепке. По условиям, масса локомотива составляет 92 т., вагонов – 450 т. (НПМ2 с составом из 10 вагонов, из которых первые 5 груженные по 50 т. каждый, а оставшиеся 5 – порожние. По результатам [55] каждые 30 т веса и массы поезда увеличивают момент сопротивления и момент инерции, приведенный к тяговому электродвигателю ДТА-350М на  $\Delta M_c = 0,0277 \cdot M_n$  и  $\Delta J = 4,925 \cdot J_{дв}$  соответственно. На электропривод колесной оси, оснащенный одним ТЭД приходится момент сопротивления  $3 \cdot \Delta M_c$ , а суммарная инерционность равна  $1,5 \cdot J_{дв} + 3 \cdot \Delta J$ . Вслед за выбором зазора первой сцепки с вагоном 60 т, статическая нагрузка увеличивается на величину  $2 \cdot \Delta M_c$ , а инерционная – на  $2 \cdot \Delta J$ .

В момент трогания с места НПМ2 сначала движется независимо от вагонов, а когда ход сцепного соединения между НПМ2 и первым вагоном

(110 мм) исчерпан – к нагрузке электропривода добавляется статический момент и инерционность первого вагона, после чего цикл повторяется до выбора следующего зазора – состав растягивается вплоть до последнего вагона, после чего уже весь поезд приходит в движение. Частота выбора зазора зависит от скорости локомотива, тогда как темп разгона немного изменяется ввиду увеличения задания скорости: момент двигателя нарастает быстрее, чем увеличивается сила сопротивления и инерционность. Увеличивающемуся темпу разгона также способствует присоединение порожних вагонов в конце состава [67, 68].

Для реализации поставленной задачи в модель включены дополнительные структурные блоки, на которых реализуются нелинейные функций моментов сопротивления и инерции от перемещений локомотива. На рисунке 3.2 изображены переходные процессы при пуске ТЭД ДТА-350М от преобразователя частоты с задатчиком интенсивности в разомкнутой САР со скалярным регулированием координат. Начальные условия: локомотив трогается с места и за 5 секунд разгоняется до скорости «растягивания» состава (3 км/ч или  $0,83 \text{ м/с}^2$ ). Выбор всех 10 зазоров состава, общей длиной 1,1 м осуществляется по прошествии 4,3 с, за это время суммарные моменты нагрузки и инерции ступенчато увеличились до  $0,5 \text{ М}_H$  и  $90,25 \text{ Дж}$  соответственно. Пиковые значения тока и момента ТЭД не превысили 1,19 и 0,95 соответственно.

Таким образом, разработанная модель ПЧ-АД с ТЭД [59] позволяет проводить исследования сложных электромеханических систем, таких как тяговый электропривод локомотивов, обеспечивая высокую достоверность полученных результатов (3,75%) для системы ПЧ-АД с возможностью модернизации структуры и для оценки энергоэффективности и динамических показателей различных САР.

Принимая во внимание сформулированные с учетом эксплуатационных ограничений требования к электроприводу (раздел 3.1) и результаты

моделирования выборки зазоров в режиме тяги автор выделяет продолжительный перемежающийся режим работы.

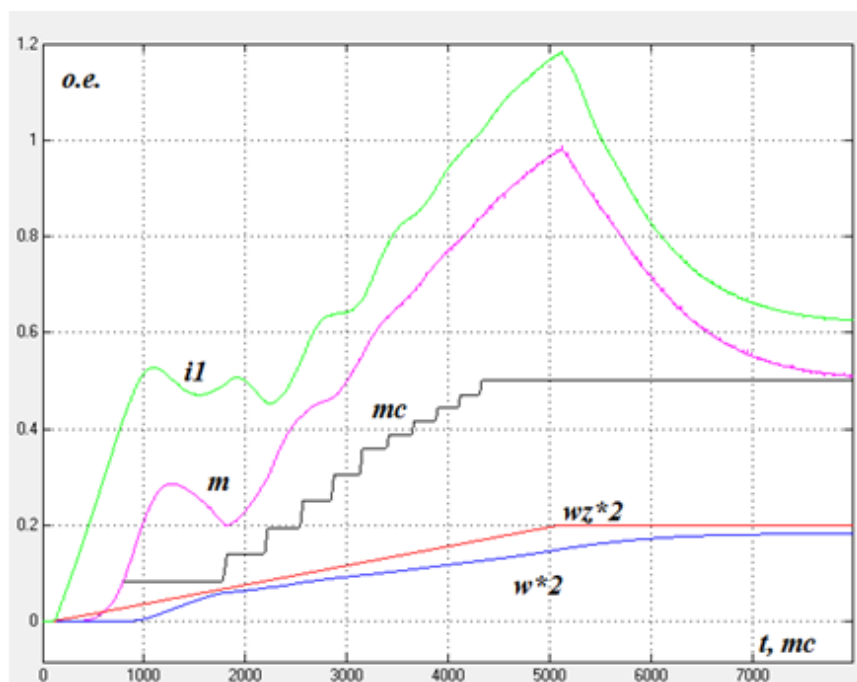


Рисунок 3.2 – Переходные процессы пуска тягового электропривода НПС2 по системе ПЧ-АД при трогании поезда с места и выборе зазоров в сцепке

Режим характеризуется ограничением производной момента нагрузки ( $\leq 1M_H/c$ ) и граничными значениями величины сопротивления от  $(-0,5 \text{ до } 1,5)*M_H$  и скорости вращения электродвигателя от 0,1 до 2  $\omega_H$ . Таким образом, целесообразно рассмотреть применение различных (скалярных и векторных) САУ в модели ПЧ-АД с целью оценки качества переходных процессов [69-74]:

- А. Разомкнутая скалярная САУ;
- Б. Разомкнутая скалярная САУ с ИР и S – компенсациями;
- В. Замкнутая скалярная САУ с ПИ-РТ
- Г. Замкнутая скалярная САУ с ПИ-РТ, ИР и S – компенсациями;
- Д. Замкнутая скалярная САУ с ПИ-РС;
- Е. Замкнутая скалярная САУ с ПИ-РС и ИР компенсацией;
- Ж. Замкнутая векторная САУ с ПИ-РС;

3. Разомкнутая векторная САУ с заданием момента электродвигателя и ограничением по скорости.

Рассматриваемые варианты включают в себя разомкнутые и замкнутые системы управления током (моментом) тягового электродвигателя. При моделировании скалярных САУ акцент сделан применении ИР-компенсации и компенсации скольжения в качестве альтернативы более сложной для реализации на НПМ2 векторной системе управления.

Рисунок 3.2 демонстрирует что дискретное увеличение моментов инерции и сопротивления нагрузки в процессе выбора зазоров не оказывают влияние на развиваемый ТЭД электромагнитный момент и статорный ток. Данная особенность связана с высокой инерционностью локомотива. Отсюда следует считать изменение момента нагрузки от сопротивления движению и инерции при выборе зазоров сцепки непрерывным и зависящим от количества вагонов  $n_B$  или пройденного электровозом пути  $S(t)$ .

### **3.3. Системы скалярного регулирования.**

На данный момент на НПМ2 применяется замкнутая по току скалярная система регулирования координат, оптимизированная по закону Костенко с компенсацией скольжения [21]. Представленная в разделе 2.3 модель, в отличие от традиционных [40, 47, 61, 62, 74] составлена с учетом вытеснения тока ротора в функции скольжения, а также потери в стали статора [45, 46].

На рисунке 3.3 показана функциональная схема разомкнутой скалярной САУ ПЧ Simovert MasterDrive [69]. В структуру входят следующие блоки (модули): задатчик интенсивности ЗИ (Б1), ФП (функциональный преобразователь)  $U/f$  (Б2), регулятор  $U_d$  (Б3), модуль ИР компенсации (Б4), модуль компенсации скольжения (Б5), блок токоограничивающего регулятора (Б6), блок датчика тока (Б7), модуль управления IGBT транзисторами (Б8) и силовая часть АИН (Б9) соответственно. На этой структуре проводилось моделирование А и Б вариантов САУ.



Ниже представлены уравнения для формирования заданных значений амплитуды и частоты питающего напряжения ПЧ:

$$\left. \begin{aligned} U_{ST} &= 2,34 \cdot U_{1H} \cdot [K_U \cdot f_Z(t) + K_{IR} \cdot K_{OT} \cdot I_1] / U_d; \\ f_{ST} &= f_Z(t) + K_S \cdot K_{OT} \cdot I_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где коэффициенты: усиления ФП, IR-компенсации и компенсации скольжения (S) рассчитываются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} K_U &= \sqrt{2} \cdot (U_{1H} / f_{1h}); \\ K_{IR} &\leq \sqrt{2} \cdot (R_1 / K_{OT}); \\ K_S &\leq s_H \cdot f_{1H} / (K_{OT} \cdot I_{1H}). \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

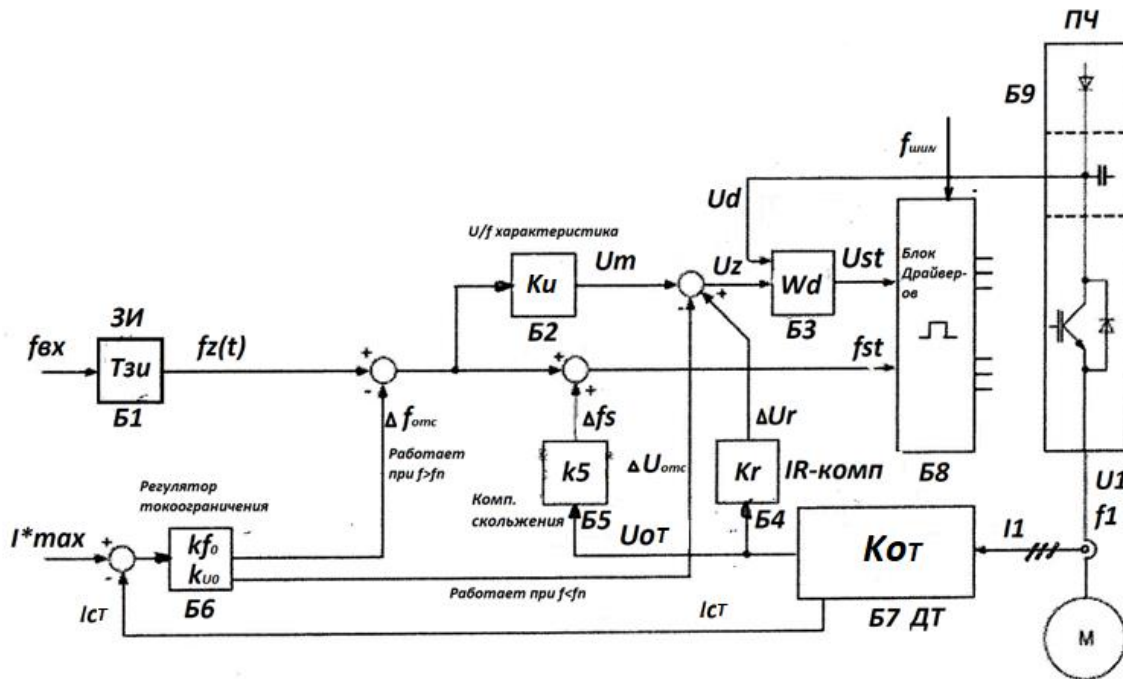


Рисунок 3.3 – Функциональная схема разомкнутой скалярной САР по системе ПЧ-АД

В отличие от разомкнутой, структура динамической компьютерной модели замкнутой САР не включает в себя модуль компенсации скольжения (B5). Также в схеме присутствует датчик скорости (ДС) с ПИ-РС или ПИ-РТ. Данная схема применялась для расчета переходных процессов САР вариантов В, Г, Д, Е.

Функциональная замкнутая по скорости векторная система управления ПЧ Simovert MasterDrive VC, представленная на рисунке 3.4 имеет в своем составе модули (блоки): (ЗИ) - задатчик интенсивности (Б1), регулятор  $U_d$  (Б3), преобразователь координат (Б4), ПИ-РТ по оси  $d$  и ПИ-РТ контура потокосцепления, датчики ОС по току и математическую модель электродвигателя, включая векторные преобразования (Б7), драйверы управления IGBT транзисторов (Б8), основная силовая схема АИН (Б9), датчик скорости (ДС) – инкрементальный энкодер (Б10), ПИ-РС (Б11), математический модуль (МДУ) умножения и деления (Б12), расчета ЭДС с предиктивной моделью (Б13). Предложенная структура применялась при расчете переходных процессов САР варианта Ж.

В функциональной схеме разомкнутой векторной САР без обратной связи по скорости с заданием момента двигателя  $M_Z$  «педаль газа», в отличие от замкнутой, отсутствует связь между РС (Б11) и МДУ (Б12). Описанная структура применялась при расчете переходных процессов САР варианта З.

Анализ эффективности работы различных САР проводился на модели ПЧ-АД из предыдущего раздела, собранной на базе ADKnew с добавлением механической части электропривода (рисунок 31). В модели также учтены выводы раздела 3.2, включая условно-непрерывное изменение моментов нагрузки и инерции в процессе выбора зазоров сцепки при трогании. Дополнительно, при вычислении угловой скорости вращения АД учтена скорость изменения инерционного момента. В итоговом варианте к модели добавлялись структуры САР согласно функциональным схемам на рисунках 3.3 и 3.4.

Осциллографирование процесса трогания электровоза осуществлялось в следующей последовательности: старт на холостом ходу => выборка зазоров в сцепке и последовательное увеличение моментов сопротивления и инерции, а также ростом момента от приращения инерции от 10 груженных вагонов с массой 60 тонн каждый.

Рисунок 3.5 А демонстрирует вид переходных процессов в относительных единицах (о.е.) при трогании локомотива с места, с заданием от ЗИ требуемой скорости  $0,1 \omega_H$ , достигаемой за 5 с в разомкнутой САР (рисунок 2.8).

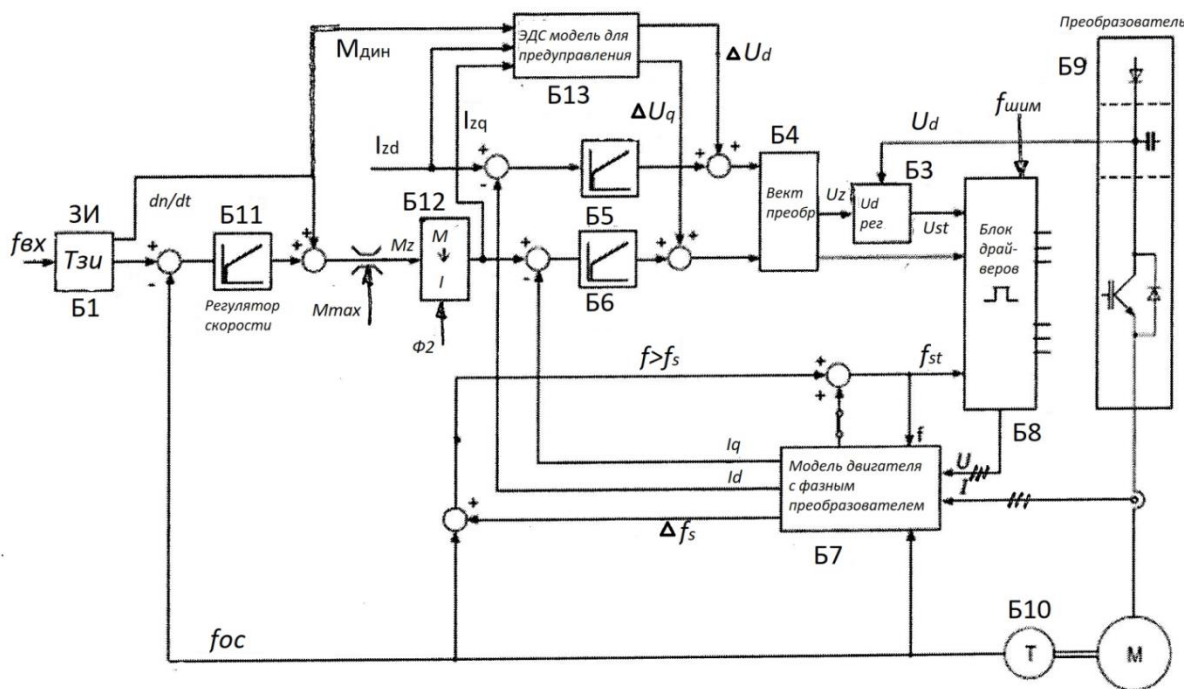


Рисунок 3.4 – Функциональная схема замкнутой по скорости векторной САР по системе ПЧ-АД

Нарастание сигнала ЗИ начинается с момента 100 мс, в это же время формируется ток статора  $i_1$  и магнитный поток, т.о. выполняются все условия для создания тягового усилия – нарастает электромагнитный момент ( $m$ ) двигателя и скорость его вращения  $\omega$ , что приводит к увеличению момента сопротивления.

Во временном интервале с 1,5 до 4,65 с начинается выбор зазоров сцепных устройств, сопровождающийся дополнительным увеличением моментов сопротивления и нагрузки. Пиковые величины момента и тока статора равны 1,12 и 1,65 соответственно. Переходные процессы характеризуются слабым использованием двигателя по моменту, относительно тока ( $K_{MF}=0.678$ ), что говорит о посредственной энергоэффективности [75, 76].

Процесс пуска монотонный, быстродействие снижено. Общее время пуска  $> 8\text{с}$ .

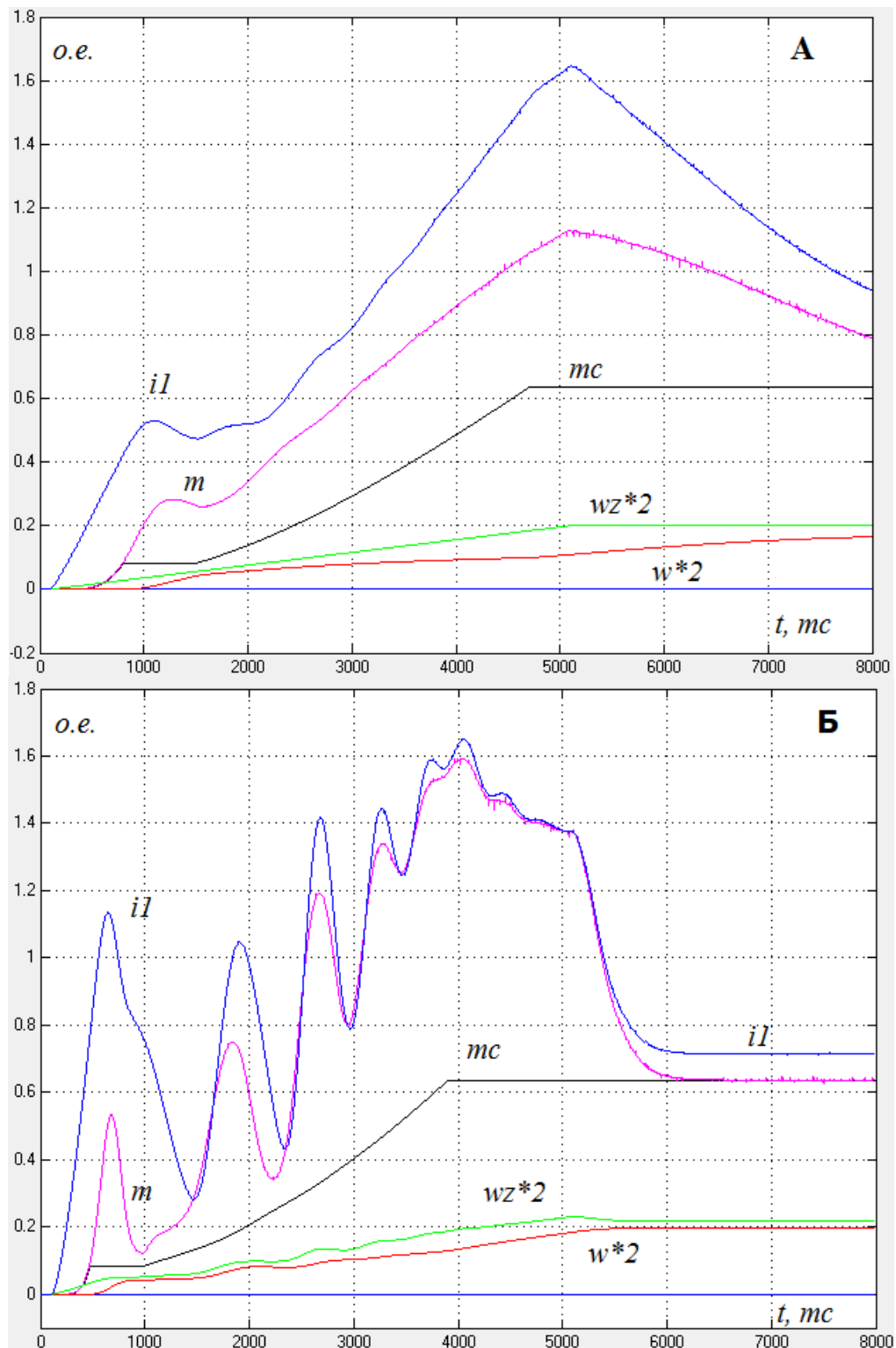


Рисунок 3.5 – Графики переходных процессов в разомкнутой классической САР (А), а также с IR и S – компенсациями (Б)

Рисунок 3.5 (Б) иллюстрирует процесс пуска электропривода от ЗИ с такими же параметрами задания скорости и постоянной времени задатчика интенсивности. Аналогичная система используется на исследуемом электровозе НПМ2 с ДТА-350М. В данном случае машинист управляет величиной тока статора. Время пуска составляет 5,3 с. Характерной особенностью САР является отсутствие статической просадки скорости в связи с компенсацией скольжения. Характер переходных процессов вначале – монотонный, однако при пуске момент нарастает быстрее вследствие ИР компенсации. Реакцией электропривода на изменение момента нагрузки является колебательный характер переходных процессов. Максимумы тока статорной обмотки и момента составляют 1,65 и 1,6, амплитуды их колебаний – 0,3 и 0,2 соответственно. С середины пуска кривые тока и момента практически совпадают, а результатом является хороший уровень использования двигателя по моменту, что также обуславливается наличием ИР-компенсации.

На рисунке 3.6 (В) показан процесс пуска с разомкнутой скалярной САР с ПИ-РТ статорной обмотки. Для моделирования была выбрана форма сигнала задания тока ПИ-РТ  $i_{z1}$ , соответствующая усредненному значению тока на рисунке 3.6 (Б) – в виде сложной трапеции. Пики тока статора и момента АД имеют значения 1,55 и 1,15, что позволяет сделать вывод о низких показателях использования двигателя по моменту. Время пуска при использовании такой САР не превышает 5 с.

Рисунок 3.6 (Г) отражает переходный процесс пуска в замкнутой скалярной САР с ПИ-РТ статорной обмотки, при наличии в ИР и S – компенсации. Максимумы тока статора и момент составляют 1,55 и 1,25. Улучшенное использование двигателя по моменту обуславливается применением ИР – компенсации, однако из-за этого в переходных процессах появляется слабозатухающая ВЧ компонента [77]. Автор отдельно отмечает,

что применение двойного или адаптивного [78] РТ не приводит к заметному улучшению качественных показателей пусков.

Расчеты переходных процессов на рисунках 3.6 и 3.7 выполнялись на переработанной ДКМ.

На рисунке 3.7 (Д) показан процесс запуска ТЭД НПМ2 при трогании с места в замкнутой скалярной САР с ПИ-РС. При запуске расчетов наблюдается всплеск статорного тока и момента до величин 1,5 и 0,4 – происходит формирование магнитного потока, в результате двигатель форсировано переходит в рабочий режим. Максимальные величины тока обмотки статора и момента электродвигателя составляют 3,0 и 1,7 – по моменту двигатель используется неэффективно. В картине переходных процессов отсутствует статическая просадка по скорости, характер переходных процессов – монотонный.

Рисунок 3.7 (Е) иллюстрирует пуск в скалярной замкнутой САР с ПИ-РС и IR-компенсацией. При запуске модели наблюдается всплеск тока статора амплитудой 1,75  $I_H$ . Пиковые значения тока и момента за время переходного процесса составляют 2,3 и 1,75 – коэффициент использования двигателя по моменту немного выше, однако на графиках проявляется затухающий колебательный процесс, который в реальной системе электропривода может привести к потере сцепления колес с рельсом.

Колебания момента в переходных процессах для электропривода локомотива нежелательны, поскольку характер движения по рельсам подразумевает наличие других источников возмущения: работа подвески колесно-моторных блоков, переезд рельсостыков, деформации путей, рывки и толчки от сближения и растягивания вагонов по сцепке. Присоединение к вышеуказанным факторам низкочастотных колебаний момента при отработке задания на тягу будет приводить к резонансам в механической системе и потере управления тягой локомотива. По этой причине в современных локомотивах применяются различные демпферные системы подвешивания

электродвигателей, демпферы сцепных устройств, механические системы перераспределения нагрузок между осями. Это позволяет частично сгладить влияние колебаний момента на систему тягового электропривода локомотива.

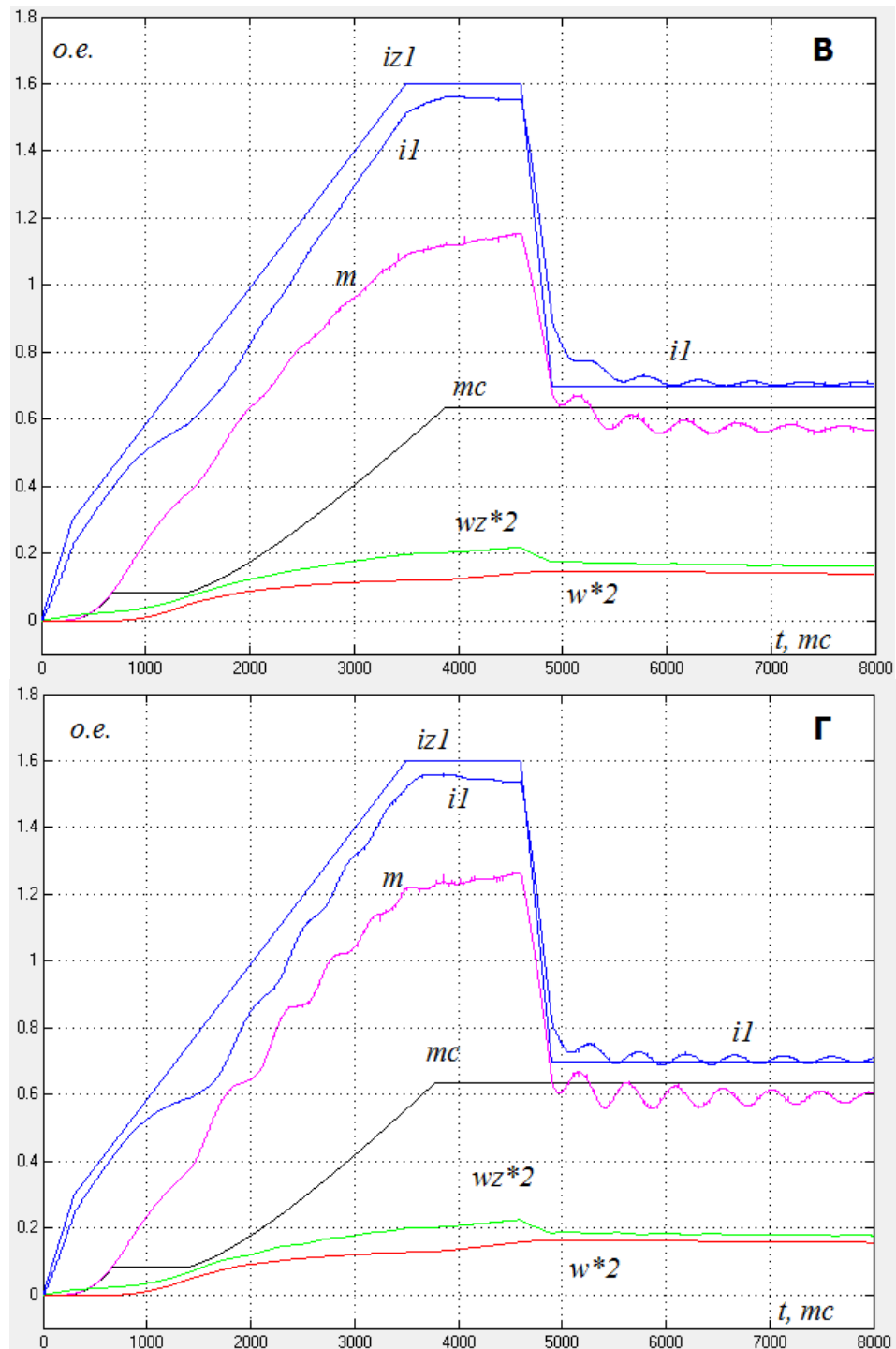


Рисунок 3.6 – Графики переходных процессов в замкнутой САУ с ПИ-РТ (В), а также с ИР и S – компенсациями (Г)

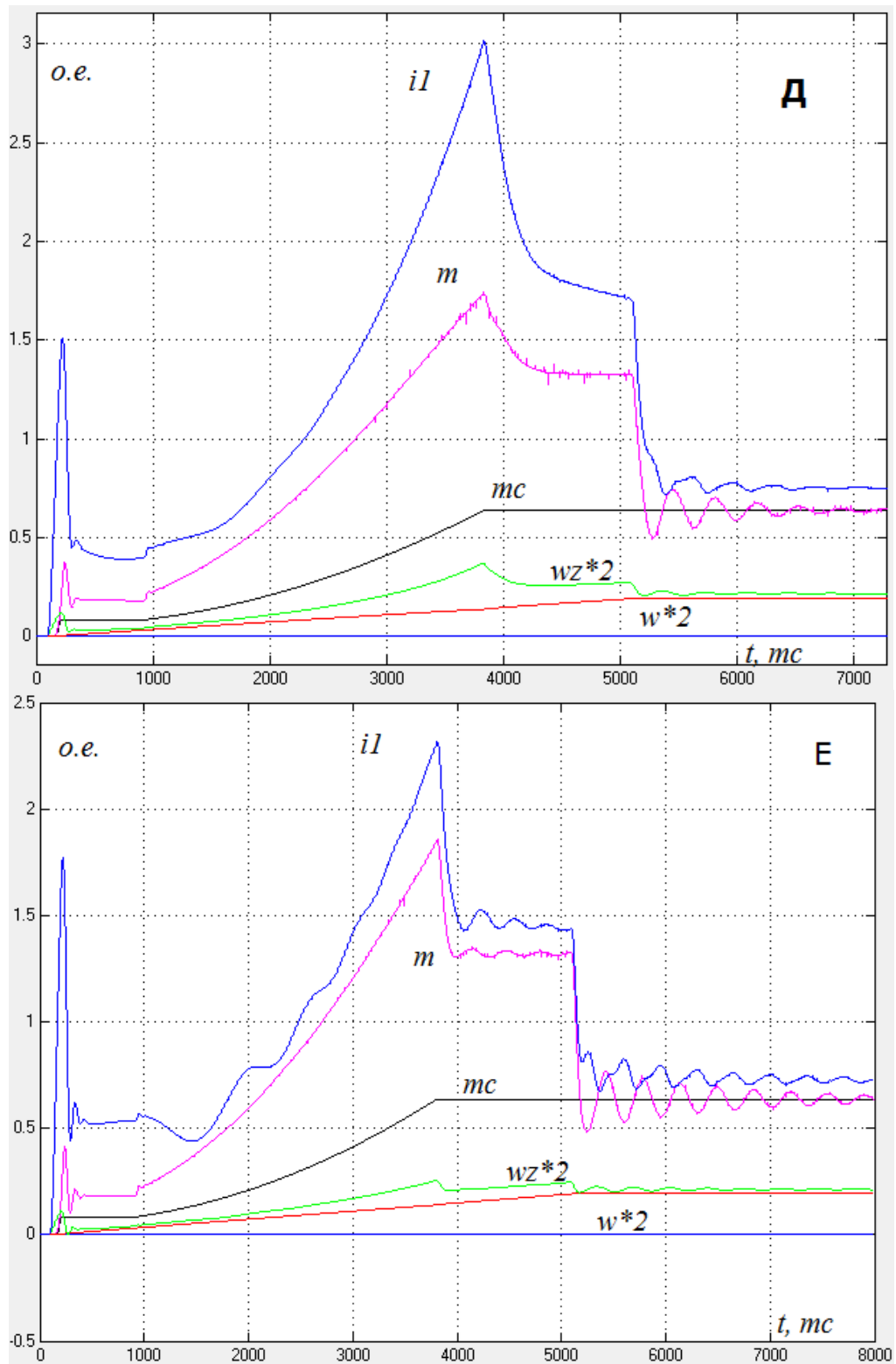


Рисунок 3.7 – Графики переходных процессов в замкнутой САР с ПИ-РС (Д), а также с ИР и S – компенсациями (Е)



### 3.4. Системы векторного регулирования

На рисунке 3.8 (Ж) изображен процесс запуска ДТА-350М в замкнутой векторной САР с ПИ-РС (рисунок 3.4). В период от старта до 0,3 с происходит форсировка магнитного потока за счет форсировки тока статорной обмотки, привязанного к оси  $d$ , после чего формируется момент двигателя (ток статорной обмотки по оси  $q$ ) по заданной тахограмме и нагрузке. В этом случае отсутствует статическая просадка скорости. Переходные процессы – минимально колебательные, пиковые значения тока статорной обмотки и момента АД составляют 1,65 и 2 соответственно, демонстрируя высокую энергоэффективность и нормальный уровень использования двигателя по моменту. Моделирование процессов для снятия осциллограмм проводилось в модифицированной программе.

Рисунок 3.8 (З) отражает процессы при пуске в разомкнутой векторной САР с заданием момента ТЭД и ПИ-РТ (аналог педали акселератора ДВС). Характер начала переходных процессов вариантов САР Ж и З практически идентичен. Далее основное влияние оказывает включение в работа регулятора тока по оси  $q$ . Функция задания момента идентична В и Г. Вид процессов – монотонные, максимумы тока статора и момента ТЭД 1,3 и 1,5 – такой вариант обеспечивает довольно высокие показатели использования двигателя по моменту при очень высоких показателях энергоэффективности.

Как видно из представленных графиков, системы векторного управления менее колебательные, обладают повышенным быстродействием и высокими коэффициентами использования двигателя по току и по моменту, что также обуславливает их эффективность.

Энергетическая эффективность векторных систем управления на реальном оборудовании достигается также за счет алгоритмов управления с предварительным подмагничиванием электродвигателей, в связи с чем момент формируется быстрее из-за чего снижаются потери в обмотках.

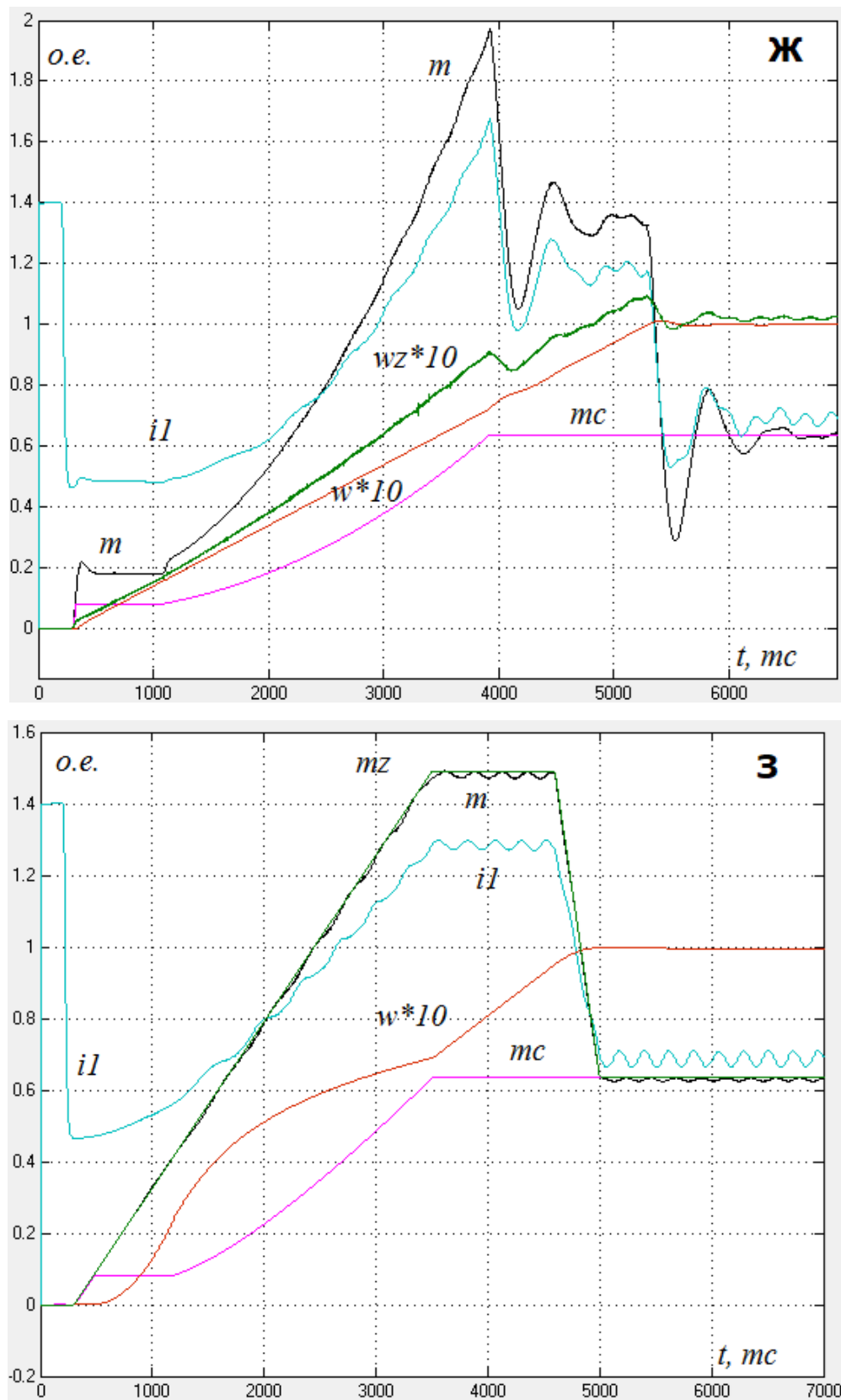


Рисунок 3.8 – Переходные процессы в замкнутой векторной САР с ПИ-РС  
и в разомкнутой с заданием момента

В таблице 3.1 приведены значения параметров регуляторов и коэффициентов компенсации, референсные значения переменных переходных процессов для исследуемых А-З вариантов САР.  $K_{MI}$  (коэффициент использования электродвигателя по моменту) вычисляется через отношение тока статорной обмотки к электромагнитному моменту двигателя в относительных единицах.

Таблица 3.1 Значения качественных и количественных характеристик для выполненных исследований САР

Вар.	Управление	Структура	KIR	KS	KR	KI	IIМ/IIН	MM/MH	KMI
А	Скалярное	Разомкнутая	0	0	-	-	1.65	1.12	0.678
Б	Скалярное	Разомкнутая	1	0.8	-	-	1.65	1.6	0.97
В	Скалярное	Регулятор тока	0	0	2.5	0.03	1.55	1.15	0.742
Г	Скалярное	Регулятор тока	0.5	0.5	2.5	0.03	1.55	1.25	0.806
Д	Скалярное	Регулятор скорости	0	0	30	0.01	3.0	1.7	0.567
Е	Скалярное	Регулятор скорости	0.4	0	30	0.01	2.3	1.75	0.761
Ж	Векторное	Регулятор скорости	-	-	30	0.01	1.65	2.0	1.212
З	Векторное	Задание момента Регулятор тока	-	-	2.5	0.03	1.3	1.5	1.154

Таким образом, электропривод маневрового электровоза целесообразно оснащать векторной САР. Выбор конкретного типа векторного управления (замкнутое, разомкнутое) должен быть уточнен после опытных испытаний локомотива на предприятии.

Переход на системы векторного управления тяговыми электроприводами повлечет за собой замену контроллеров ТЭП, подключение в САР всех датчиков магнитного потока ТЭД (обратная связь по скорости) и изменение программного обеспечения. В связи с этим автор рекомендует запланировать аппаратно-программную модернизацию НПМ2.

### 3.5. Процесс боксования у локомотивов

Боксование на железной дороге возникает при срыве сцепления колеса с рельсом вследствие реализации избыточного по условиям сцепления тягового усилия [79-82].

В техническом направлении, в целом, можно отметить процессы, схожие с боксованием до степени аналогии: в первую очередь, прокатка стали, в частности, сортопрокатное производство (прокатный валок в клети – колесо, прокатываемая заготовка – рельс). В режиме упругой деформации (при нулевом обжатии) проскальзывание появится при превышении усилия прокатки над силами трения в пятне контакта с заготовкой. Далее, вполне допустима аналогия с выпадением из синхронизма синхронного электродвигателя (СД) при работе в двигательном режиме. В этом случае электромагнитная «пружина» вращающегося поля статора тянет за собой ротор СД с той же скоростью – поддерживается синхронизм. Если момент нагрузки превысит максимальный момент электродвигателя, зависящий от питающего напряжения и тока индуктора, то угловая скорость снизится, ротор «отстанет» от поля статора на угол, превышающий критическое значение и двигатель перейдет в неустойчивый и неуправляемый «асинхронный» режим работы (имеется ввиду СД без демпферной обмотки). Работа в неустойчивом режиме сопровождается появлением сложной нелинейной зависимости от скольжения ротора СД, на которой присутствуют 2 максимума. Практически тоже самое происходит в генераторном режиме работы если генераторный момент от рабочего механизма превысит максимальный отрицательный момент электродвигателя. Таким образом, частные случаи различных технических процессов можно частично можно использовать при исследовании боксования.

Возможность срыва в боксование определяется физическими параметрами поезда, путей и внешними условиями (1 глава работы), поэтому конструктив локомотива и его система электропривода совместно с САР и



локомотива. На НПМ2 установлены 2 жестко закрепленные в вертикальной оси тележки, поэтому в кинематической схеме локомотива (рис. 3.9) при движении поезда с постоянной скоростью  $V_L$ , реакция рельсов от давления колес отмечена усилиями  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  и  $F_4$ , прикладываемое на разных расстояниях от центра масс  $m_L$ . Каждая колесная пара формирует тяговое усилие  $F_{K_i}$ . Реакцией от суммарного тягового усилия является усилие сопротивления от вагонов  $F_V$ , прикладываемое на высоте сцепки  $h_L$ . Для данной схемы в случае установившегося движения локомотива составлена система уравнений [83, 84]:

$$\left. \begin{aligned} \sum M_A &= 0; -F_1 \cdot l_L - F_2 \cdot l_L + F_3 \cdot l_L + F_4 \cdot l_L - F_V \cdot h_L + F_V \cdot R_K = 0; \\ \sum F_Y &= 0; F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - P_L = 0; \\ \sum F_X &= 0; -F_V + F_{K1} + F_{K2} + F_{K3} + F_{K4} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

где  $l_L$  – расстояние от центра масс, м;  $F_V$  – усилие на сцепке Н; высота оси сцепного устройства, м; радиус колеса, м;  $P_L$  – вес локомотива, кг; тянущие усилия колесных пар, Н.

Принимая равномерное распределение массы локомотива между колесными парами на холостом ходу, решение системы уравнений (3.9) изложено в выражении (3.10) [83, 84]:

$$\left. \begin{aligned} F_V &= F_{K1} + F_{K2} + F_{K3} + F_{K4}; \\ F_1 &= P_L / 4 - F_V \cdot (h_L - R_K) \cdot (l_L + a / 2) / l_l^2 / 4; \\ F_2 &= P_L / 4 - F_V \cdot (h_L - R_K) \cdot (l_L - a / 2) / l_l^2 / 4; \\ F_3 &= P_L / 4 + F_V \cdot (h_L - R_K) \cdot (l_L - a / 2) / l_l^2 / 4; \\ F_4 &= P_L / 4 + F_V \cdot (h_L - R_K) \cdot (l_L + a / 2) / l_l^2 / 4. \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

где  $R_K$  – радиус колеса.

В соответствии с уравнениями (3.9) при постоянной скорости поезда усилие от вагонов складывается из тянущих усилий колес  $F_{K_i}$ , а давления колес на рельсы зависят от веса локомотива и тянущего усилия от вагонов,

причем давление колесных пар 1 и 2 уменьшается (разгрузка), а давление колесных пар 3 и 4 увеличивается (перегрузка).

В данном случае, опрокидывающий момент равен

$$M_O = \sum F_{K1-4} \cdot (h_L - R_K) = F_K \cdot (h_L - R_K), \quad (3.11)$$

где  $P_o$  – статическая (весовая) нагрузка от колесной пары на рельсы, кН;  
 $M_O$  – опрокидывающий момент, кН.

Задача по описанию условий разгрузки колесных пар решается для электровазона НПМ2М, основные характеристики которого приведены в таблице 3.2 [83, 84].

Таблица 3.2 Основные характеристики электровазона НПМ2

$P_{2\Sigma}$ , кВт	$P_L$ , кН	$R_{wh}$ , м	$P_{CP}$ , т	$V_R/V_M$ , км/ч	$F_{VR}$ , кН	$F_{VMax}$ , кН	$R_{min}$ ( $V = 3,6$ м/с)
1400	925	0,56	1100	30/60	160	212	60 м
$l_L$ , м	$h_L$ , м	$A$ , м	$\Psi_0$	$\Psi_{30}$	$M_{Cr}/M_H$	$M_{MM}/M_H$	
3,425	1,06	2,1	0,36	0,277	3,1	1.6	

В соответствии с уравнениями (3.9) и данными таблицы 3.2 получены новые зависимости изменения давления колес на рельсы от усилия сопротивления вагонов

$$\left. \begin{aligned} F_1(F_V) &= 231,25 - 0,0477 \cdot F_V; \\ F_2(F_V) &= 231,25 - 0,0258 \cdot F_V; \\ F_3(F_V) &= 231,25 + 0,0258 \cdot F_V; \\ F_4(F_V) &= 231,25 + 0,0477 \cdot F_V. \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Сила сцепления считается в соответствии с выражением 3.13 [20]

$$F_{сц} = 1000 m_{л} g \psi, \quad (3.13)$$

Где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m^*c^2$ ;  $m_{л}$  – масса локомотива, т;  $\psi$  – коэффициент сцепления для локомотива, который равен отношению наибольшей силы тяги локомотива к его сцепному весу.

Для расчета коэффициента сцепления  $\Psi$  используется формула (1.10), данные эмпирических коэффициентов  $a_\Psi$ ,  $b_\Psi$ ,  $c_\Psi$ ,  $d_\Psi$ ,  $e_\Psi$  приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 Значения эмпирических коэффициентов для расчета коэффициента сцепления электровоза НПМ2

Тип локомотива	$a_\Psi$	$b_\Psi$	$c_\Psi$	$d_\Psi$	$e_\Psi$
Промышленный электровоз переменного тока на подъездных путях	0,228	7	53	3	0

Значения  $\Psi$  изменяется в диапазоне от 0,36 до 0,277 при линейных скоростях локомотива  $V$  от 0 до 30 км/ч.

На рисунке 3.10 представлены:

- функциональные зависимости сил давления колесных пар на железнодорожные пути  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  и  $F_4$  от силы сопротивления вагонов [51]  $F_V$  (система уравнений 3.12, отрезки СВ – СА в 1 и 2 квадранте);

- функциональные зависимости максимальной силы тяги обоих тележек локомотива  $F_{C0}$  и  $F_{C30}$  от силы давления колес ( $\Psi$ , отрезки ОВ и ОА);

- дополнительные вертикальные пунктирные линии, соответствующие величинам номинального  $F_{VN}$  и максимального  $F_{VM}$  (из таблицы 3.1) тягового усилия, равномерно распределенного между колесными парами.

По диаграмме 3.10 оценивается режим боксования. При номинальной тяге колесных пар в 40 кН, сила давления с 1 по 4 колесные пары, соответственно, равна 217,99, 221,50, 229,75 и 233,26 (точки с 1 по 4). Минимальное и максимальное тяговое усилие  $F_{C1}$  и  $F_{C4}$  при скорости 30 км/ч составляют 62,37 и 62,06 кН (5 и 6 точки). Запас по боксованию составляет 22,37 и 24,06 кН.

При трогании поезда с места наибольшее тяговое усилие передней колесной пары на пределе срыва в боксование достигает величины 76 кН (8 точка). В связи с разгрузкой 1 и 2 колесные пары перейдут в режим боксования с наибольшей вероятностью, поскольку линейная зависимость коэффициента сцепления является допущением.





В систему управления тягой электровоза включены сигналы частоты датчиков магнитного потока электродвигателей, пропорциональные скорости вращения электродвигателей 1 и 3 колесных осей, тогда как 2 и 4 управляются идентично (2 глава). Система управления проводит опрос датчиков скорости, напряжения и тока двигателей за период  $T=2$  мс, что позволяет обновлять параметры обратных связей с частотой 500 Гц.

Для данной конфигурации САР возможны 2 варианта боксования: боксование колесной оси ведущего электродвигателя (с сигналом обратной связи по скорости), боксование колесной оси ведомого электродвигателя (без сигнала обратной связи по скорости). В каждом случае система электропривода будет реагировать по-разному:

- для ведущего электродвигателя срыв колесной пары в боксование приводит к уменьшению к увеличению скорости вращения колесной оси, а, следовательно, к уменьшению момента и тока соответствующего электродвигателя и пропорциональному уменьшению скольжения. Наличие датчика скорости позволяет определить скольжение напрямую, при достижении скольжения 0,5 Гц (при номинальном скольжении 0,58 Гц) включается сигнал боксования и САР снижает задание на скорость обоих электродвигателей до выхода из граничного диапазона по скольжению.

- для ведомого электродвигателя срыв колес в боксование приводит к повышению скорости вращения следующему за этим существенному снижению тягового момента (в соответствии с механической характеристикой АД). При этом САР не реагирует на боксование ведомой колесной оси, а снижение момента происходит до тех пор, пока это не приводит к повторному зацеплению колеса с рельсами по достижению моментом двигателя величины ниже ограничения силы сцепления. В результате повторного зацепления механическое оборудование испытывает «удары» и «рывки», ощущаемые машинистом. Дополнительно, на время боксования ведомой оси нагрузка перераспределяется на ведущий двигатель, в связи с чем ведущая ось также

может сорваться и запустить алгоритмы защиты от боксования, снизив задание скорости обоих двигателей тележки.

Боксование, в зависимости от источника возникновения, следует классифицировать по нескольким типам [79, 85]:

1. Боксование между колесами одной колесной пары (например, в поворотах);
2. Прерывистое боксование, вызванное механическими (пространственными) колебаниями локомотива и профиля рельсов по траектории движения поезда;
3. Боксование всех колесных осей локомотива при трогании с места или движении на подъем
4. Поосное боксование отдельных колесных пар при трогании с места, при движении на подъем вследствие неравномерной нагрузки колесных пар на рельсы

Боксование первого типа время от времени возникает при движении в кривой вследствие жесткой связки колес на оси колесной пары, поскольку «внутреннее» и «внешнее» по отношению к соответствующим рельсам колеса в поворотах проходят разный путь, тогда как боксование 2 типа чаще возникает из-за неровностей пути и неравномерного распределения масс при движении на высокой скорости и имеет колебательный характер. Коррекция боксования 2 типа заключается в выполнении мероприятий по повышению устойчивости поезда. Появление 3 типа боксования вероятно при существенном превышении тяговым усилием усилия сцепления. Наибольший интерес в проводимом исследовании представляет 4 тип.

Сам процесс боксования нетривиален и сложен в изучении. В наиболее характерных источниках боксование рассмотрено с нескольких сторон: в [86] авторы пытались объяснить процессы на уровне кристаллической решетки. Также в статье приведены структурные схемы между колесами на одной оси при движении в кривой для ТЭД постоянного тока. В этой же работе

приведены зависимости сил сцепления в зоне контакта системы колесо-рельс в функции разности скоростей боксования. Аналогичный подход используется в исследованиях [87-90] В следующей работе [91] составлены функциональные схемы для определения боксования и его ограничения между осями для тяговых электродвигателей переменного тока. В других материалах Самме Г.В. [92, 93] достаточно подробно описано само явление, раскрыты вычисленные зависимости коэффициента сцепления от скольжения, на которых находится до 2 максимумов.

В работе изменен подход к проблеме и применено иное описание процесса, включающее разложение общей массы поезда на 2 массы: поступательно и вращательно движущуюся. Анализ проведен для 4 типа боксования для эквивалентного двигателю четырехосного локомотива.

До момента срыва сцепления между ободом колеса и рельса для определенной линейной скорости передвижения поезда  $V = \omega * R_K / i$  возможно составить дифференциальное уравнение движения для всего поезда, описывающее движение одномассовой системы без изменения инерционности (при полностью выбранных зазорах) и переменных моментах (усилиях)

При разгоне поезда после «растягивания» состава по сцепке электропривода работают в двигательном режиме, сила тяги равна сумме усилий сопротивления вместе с динамическим усилием, обуславливающим разгон поезда [59].

При входе в боксовании 4 типа и выходе из этого режима учитывается, что процесс может запуститься при трогании поезда с места и в режиме тяги в установившемся режиме. Локомотив стартует с составом и после выбора сцепных зазоров тяга равна силе сопротивления движению и динамическим усилием на разгон массы поезда. При превышении силы тяги над силой сцепления (машинист через САР задал избыточный момент ТЭД), идет срыв сцепления и скорость точек обода колеса резко увеличивается над линейной скоростью передвижения поезда — локомотив входит в боксование

[нарушается условие (3.10), а колесные оси «задней» тележки локомотива вращаются в зацеплении] тогда вследствие разницы скоростей по данному триггеру должно сработать реле защиты от боксования, снизив задание на ток и сбросить тягу электродвигателя 1 колесной оси (отпустить «педаль газа»), и подтормозив электропривод.

Отметим, что сначала в боксование входит ось с наихудшими условиями сцепления, которые можно скорректировать на локомотиве при помощи подсыпки песка в область контакта системы «колесо-рельс».

При старте поезда часто может появиться боксование 4 типа (3.11), при котором обе оси передней тележки переходят в боксование за счет опрокидывающего момента, действующего на локомотив, когда последний стоит впереди поезда. В этом случае, по условиям работы электронных блоков управления (ЭБУ) локомотива, должно сработать антипробуксовочное реле, снизив задание на ток боксующей оси. Завершением боксования считается момент времени, когда линейная скорость поверхности колеса и рельса выравниваются, т.е. происходит зацепление.

В установившемся режиме движения боксование чаще возникает при езде в гору. При этом сила сопротивления растет, превышая силу сцепления. Для поддержания скорости и устранения боксования, в данном случае, машинист подсыпает песок, параллельно увеличивая задание тока, т.е. увеличивая силу сцепления, и, соответственно, максимально допустимую силу тягу. При уравнивании сил сцепления и тяги, колесные оси локомотива подтормозятся и боксование закончится.

В процессе торможения поезда могут использоваться как электрическое (динамическое, рекуперативное) или пневматическое торможение локомотива, так и пневматическое торможение вагонов.

Боксование электровоза также существенно ограничивает его тягу, что повышает аварийность на сложных участках пути и при неблагоприятных погодных условиях [113].

### 3.6. Математическое описание процессов в тяговом электроприводе при боксовании локомотива

В работе рассматривается подход, основанный на разложении суммарной массы поезда в процессе боксования на 3 компонента, первые два (тяговые электродвигатели) – вращающиеся массы, а третья (масса локомотива и вагонов) движется поступательно. Математические выкладки выведены для 4 типа боксования.

До начала проскальзывания в системе колесо-рельс (срыва в боксование) для движущегося поезда можно составить дифференциальное уравнения, описывающее движение общей массы при условии постоянства инерции (после выбора всех сцепных зазоров) с переменными усилиями:

$$\begin{aligned} F_{K1}X_1 + F_{K3}X_3 + \Delta F_{C1}X_B + \Delta F_{C3}X_C - (F_{CV} + F_{CL}) = \\ = \left[ 3,6J_D \frac{X_1 + X_3}{R^2} + m_V + m_L \right] \frac{dV}{dt}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

где  $F_1, F_3$  – сила тяги электродвигателей колесных пар, формируемых заданием на ток САР в функции времени, Н\*м;  $V$  – линейная скорость поезда, м/с;  $F_{CL}, F_{CV}$  – усилия сопротивления движению локомотива и вагонов, соответственно, кН;  $R_K, R, i$  – радиус колеса (с бандажом), радиус приведения и передаточное число зубчатой передачи, м;  $J_D$  – момент инерции тяговых электродвигателей, кг\*м<sup>2</sup>;  $m_L, m_V$  – масса локомотива и вагонов, соответственно, кг;  $X_1, X_3, X_B, X_C$  – логические переменные, значения которых меняются при начале боксования.

На базе дифференциального уравнения (3.14) выведено интегральное уравнение расчета линейной скорости движения поезда

$$\begin{aligned} V = \left( 3,6J_D \frac{X_1 + X_3}{R^2} + m_V + m_L \right)^{-1} \times \int (F_{K1}X_1 + F_{K3}X_3 + \Delta F_{C1}X_B + \\ + \Delta F_{C3}X_C - (F_{CV} + F_{CL})) dt + V(0); \end{aligned} \quad (3.15)$$

В процессе боксования (проскальзывание колесных осей обеих тележек) при условии

$$V \neq \frac{\omega R_K}{i} \quad (3.16)$$

Формируются два дифференциальных уравнения

$$M_{12} - \Delta M_X - \Delta F_{C1} \frac{R_K}{i} X_B = 3,6J_D \frac{d\omega_{12}}{dt}, \quad (3.17)$$

$$M_{34} - \Delta M_X - \Delta F_{C3} \frac{R_K}{i} X_C = 3,6J_D \frac{d\omega_{34}}{dt}; \quad (3.18)$$

Где  $\Delta F_{C1}$ ,  $\Delta F_{C3}$  – добавочные усилия, зависящие от скорости проскальзывания, Н\*м;  $M_{12}$ ,  $M_{34}$  – моменты сил на колесных парах соответствующих участках характеристик боксования;  $\Delta M_X$  – момент холостого хода электропривода колесной пары;  $\omega_{12}$ ,  $\omega_{34}$  – угловые скорости вращения колес на соответствующих участках характеристик боксования.

Дифференциальное уравнение (3.17) описывает изменение скорости вращения электроприводов передней тележки при срыве в боксование. В уравнении (3.18) описывает функцию изменения угловой скорости вращения электроприводов задней тележки при начале боксования. Силы  $\Delta F_{C1}$  и  $\Delta F_{C3}$  объединяют оба выражения (3.17 и 3.18), формируемые разницей между силой тяги и сцепления, задаются в соответствии с [79, 80, 83, 93 - 98].

На рисунке 3.11 приведена обобщенная характеристика сцепления в системе «колесо-рельс» локомотива. Для ее пояснения, необходимо ввести понятие относительной (в процентах) скорости скольжения  $V_{СК}$ , равной отношению скорости линейного проскальзывания колеса к его угловой скорости вращения.

В соответствии с современными представлениями, при вращении колеса, вызванным наличием касательной силы тяги (1 глава данной работы), взаимодействие поверхностей приводит не только к зацеплению, но и к «скатыванию» колеса в направлении тяги, в результате чего у поверхности обода колеса появляется скорость проскальзывания, отражающая разницу между путем, пройденным геометрическим центром колеса и его

поверхностью. При повышении касательной силы тяги растет и величина относительного проскальзывания: В среднем, рабочее значение скорости проскальзывания в основном находится в диапазоне 0,5-0,8%, а при достижении  $V_{ск}=1,25\%$  коэффициент сцепления  $\Psi$  является максимальным.

При дальнейшем росте силы тяги, и превышении связанной с ней некоторой скорости проскальзывания, коэффициент сцепления существенно снижается и происходит срыв контакта колеса с рельсом - наступает боксование.

Рисунок 3.11 содержит прямые ветви, отражающие расчетный максимум коэффициента сцепления  $\Psi$  (0,353; 0,299 и 0,277 соответственно) при «критическом проскальзывании» для разных линейных скоростей локомотива (0, 15 и 30 км/ч соответственно) и соответствующую ветви при 30 км/ч возвратную ветвь, отражающую возврат системы «колесо-рельс» в стабильное зацепление после завершения боксования.

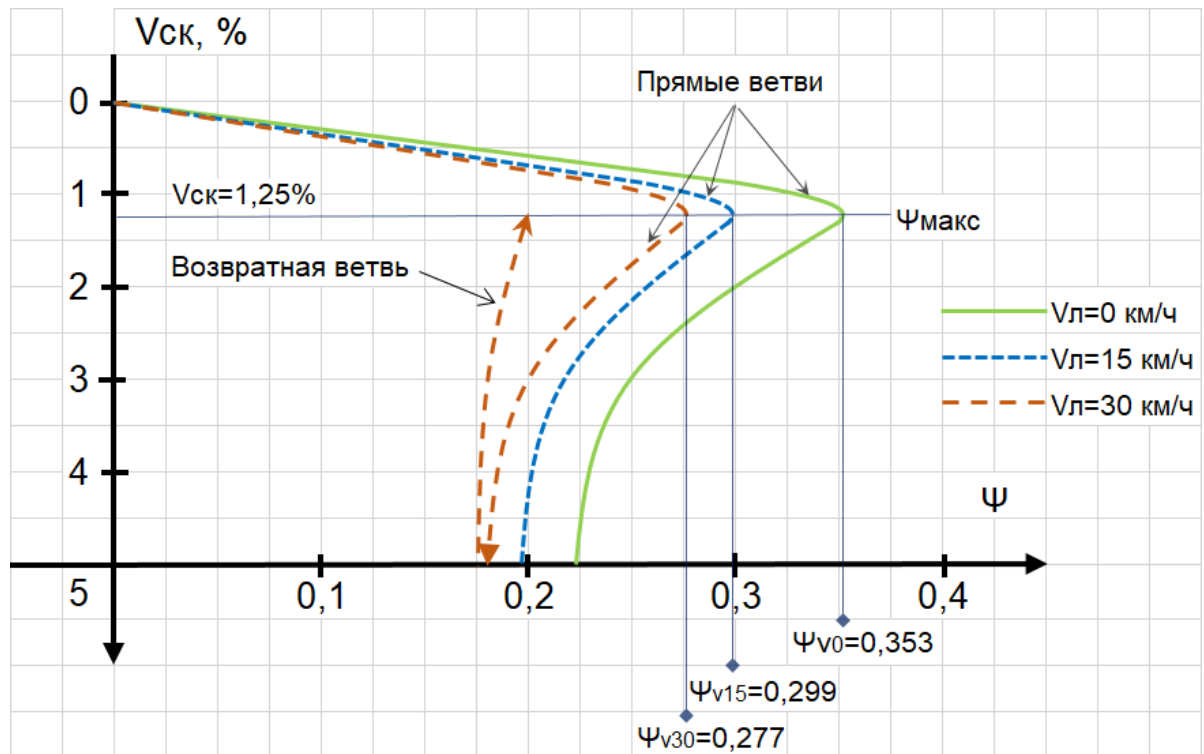


Рисунок 3.11 – Зависимости коэффициента сцепления  $\Psi$  колесных пар локомотива от скорости проскальзывания  $V_{ск}$  при разных скоростях движения



Из-за вида графика просматривается прямая аналогия с механической характеристикой асинхронного электродвигателя, и имеющимися на ней характерными точками (номинальное и критическое скольжение, пусковой момент и т.д.). Вид возвратной ветви позволяет понять, почему в большинстве случаев не стоит переводить систему в неуправляемое (разносное) боксование – по завершении боксования максимум сцепления существенно снижается по сравнению с точкой срыва. Практически тоже самое можно сказать и об асинхронном двигателе – не следует перегружать его выше критического момента, в противном случае, чтобы его запустить, придется существенно снизить нагрузку на валу, чтобы вернуть электрическую машину на рабочий участок характеристики.

В некоторых источниках [83, 93, 95] рассматривается появление второго максимума коэффициента сцепления, превышающего первый на 30-50%, однако достигается он при  $V_{СК}=10\%$  и выше, однако такой режим крайне нерекомендуется в связи с высоким износом поверхностей колес и рельсов. В Для электровозов с АТД, в соответствии с результатами экспериментов [100] предпочтителен режим ограничения относительного проскальзывания в пределах 5% для выполнения маневровых работ (при разгоне и движении на скоростях до 40 км/ч)

Поскольку проскальзывание при увеличении силы тяги от нуля до максимума по сцеплению  $\Psi_{МАКС}$  является «упругим» и ему подвержены все тяговые оси локомотива в равной степени (при равномерном распределении сил тяги),  $V_{СК}$  не будет обнаруживаться датчиками угловой скорости вращения колесных осей, поэтому им можно пренебречь. В этом случае, график зависимости коэффициента сцепления  $\Psi$  от скорости боксования  $V_B$  приобретает вид (рисунок 3.12).

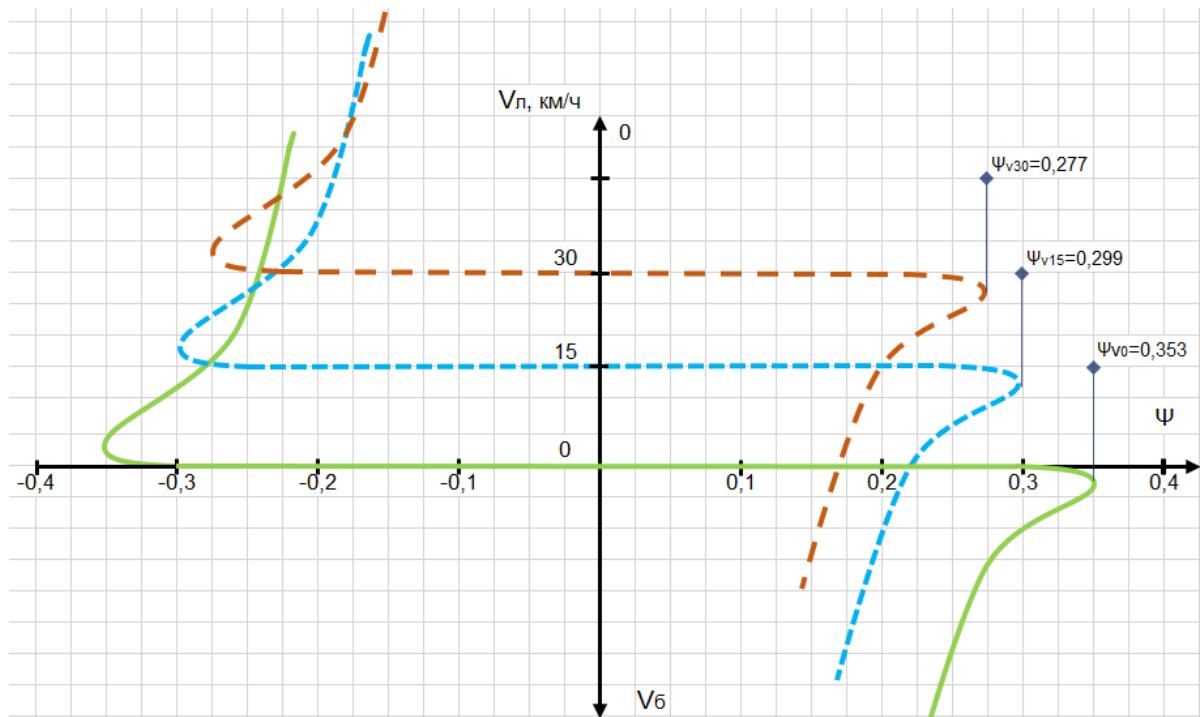


Рисунок 3.12 – Зависимости коэффициента сцепления  $\Psi$  колесных пар локомотива от скорости боксования  $V_{\text{б}}$  при разных скоростях движения

В реальной системе при приближении величины силы тяги к максимуму сцепного усилия в системе «колесо-рельс» появляется неупругое, (т.н. «истинное») [101] проскальзывание, т.е. начинается боксование, которое при отсутствии контроля за силой тяги может перерасти в разносное боксование.

Автор отмечает, что в соответствии с вышеизложенным, боксование, по своей сути, не является «атипичным» режимом взаимодействия колеса с рельсом, поэтому его следует рассматривать, не как явление, с которым стоит бороться, а, как сопряженный с тяговым режимом паразитный эффект, степенью проявления которого необходимо управлять.

Для инерции маховых масс при вычислении угловой скорости вращения данная сила направлена против движения, а для массы поезда, движущейся поступательно – по ходу, это используется при расчете линейной скорости (3.15).

На основе дифференциальных уравнений (3.17) и (3.18) формируются интегральные уравнения движения

$$\omega_{12} = \frac{1}{3,6J_D} \int \left( M_{12} - \Delta M_x - \Delta F_{C1} \frac{R_K}{i} \right) dt + \omega_{12}(0), \quad (3.19)$$

$$\omega_{34} = \frac{1}{3,6J_D} \int \left( M_{34} - \Delta M_x - \Delta F_{C3} \frac{R_K}{i} \right) dt + \omega_{34}(0); \quad (3.20)$$

где  $\omega_{12}$ ,  $\omega_{34}$  – угловые скорости движения колесных пар на соответствующих участках характеристик боксования.

Интегральные уравнения (3.15), (3.17), (3.18) применяются в структуре модели тягового электропривода для описания процесса боксования. Переход от (3.15) к системам уравнений (3.17, 3.18) осуществляется при выполнении условия (3.16), т.е. при срыве сцепления в системе колеса с рельсом (превышении касательной силы тяги  $F_K$  над силой сцепления  $F_{сц}$ ).

### 3.7. Выводы по главе 3.

1. Разомкнутая скалярная САР тягового электропривода электровоза без компенсационных блоков неэффективна в плане КПД и с низким использованием ТЭД по моменту, с низким быстродействием и монотонными процессами

2. Использование ИР – компенсации в разомкнутых и замкнутых САР улучшает показатели пуска, повышают общую энергоэффективность, однако добавляют в процессы низкочастотную колебательную составляющую при изменении момента сопротивления

3. Скалярные замкнутые (по скорости) САР характеризуются относительно высокой скоростью перехода в рабочий режим, но посредственными показателями использования двигателя по моменту. При включении ИР-компенсации проявляется колебательная составляющая.

4. Векторные САР дают высокое быстродействие и энергоэффективность, повышают качество переходных процессов, однако требуют наличие быстродействующего модуля расчета переменных (мат. модель АД). Также эти системы сложнее в наладке.

5. Тяговый электропривод маневрового электровоза целесообразно оснащать разомкнутой векторной системой управления.

6. Выведены для четырехосного локомотива новые зависимости изменения давления колес на рельсы от усилия сопротивления вагонов.

7. На основании зависимостей коэффициента сцепления колесных пар от величины относительного проскальзывания колеса при реализации силы тяги, с учетом разной природы упругого проскальзывания и боксования (истинного проскальзывания) доказана необходимость точного отслеживания и управления скоростью проскальзывания для реализации максимального тягового усилия.

8. Математически обосновано, что в режиме тяги четыре колесные пары четырехосного маневрового электровоза находятся в полном контакте с рельсами при номинальном режиме работы; в режимах, отличных от номинальных, всегда есть две колесные пары, вероятность перехода в режим боксования у которых значительно выше по сравнению с остальными колесными парами.

9. Для всего диапазона тяговых усилий при движении четырехосного локомотива в составе поезда найдены зависимости сил давления колесных колесных пар на железнодорожные пути от силы сопротивления вагонов, а также зависимости максимальной силы тяги обеих тележек локомотива от силы давления колес на рельсы. Представленные зависимости позволяют оценить границы допустимой тяги в зависимости от скорости движения состава и от степени загрузки локомотива

10. Проанализированы ограничения силы тяги для локомотива, тянущего за собой состав по горизонтальному прямолинейному участку пути, на пределе входа в боксование. Выведены зависимости максимального усилия сцепления от скорости движения локомотива, составлена математическая модель электропривода в режиме боксовании.

## **ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВНЕДРЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ**

### **4.1. Моделирование переходных процессов**

Расчет переходных процессов выполнен на базе усовершенствованной динамической компьютерной модели подраздела 3.6 данной работы с применением уравнений (3.15, 3.19, 3.20). С учетом [59, 79, 80, 99, 100, 101] разработана ДКМ со скалярным управлением [79, 80] при боксовании обеих тележек.

Конфигурация ДКМ следующая: тяговый АД ДТА-350М, скалярное управление, 12 4-осных думпкаров 6ВС60 массой по 87 тонный каждый (тара 27 т и 60 т полезная нагрузка) с выбранными зазорами сцепных устройств по 110 мм, [79, 80]. Вес поезда равен 1136 т, трогание происходит при силе сопротивления, равной  $0,2F_{VN}$  и моментом инерции  $768,6J_{ДВ}$ . По уравнениям (3.15), (3.19) и (3.20) изменяются значения логических коэффициентов  $X_1$  и  $X_2$  ДКМ в функции режимов работы системы «колесо-рельс» «нормальная тяга/боксование».

### **4.2. Моделирование разного боксования передней тележки**

Рисунок 4.1 иллюстрирует вид переходных процессов в о.е. при пуске всех тяговых АД электровоза с замкнутой по току скалярной САР ПЧ-АД, двойным регулятором тока [80], выбранными зазорами в сцепных устройствах 12 вагонов и начале боксования. Пуск АД начинается с линейного увеличения задания на ток статора тяговых АД электровоза с темпом 1.6 о.е за 3,5 с. Пиковые значения тока и момента 1 электродвигателя при моделировании достигают 1,7 и 1,6 номинального значения.

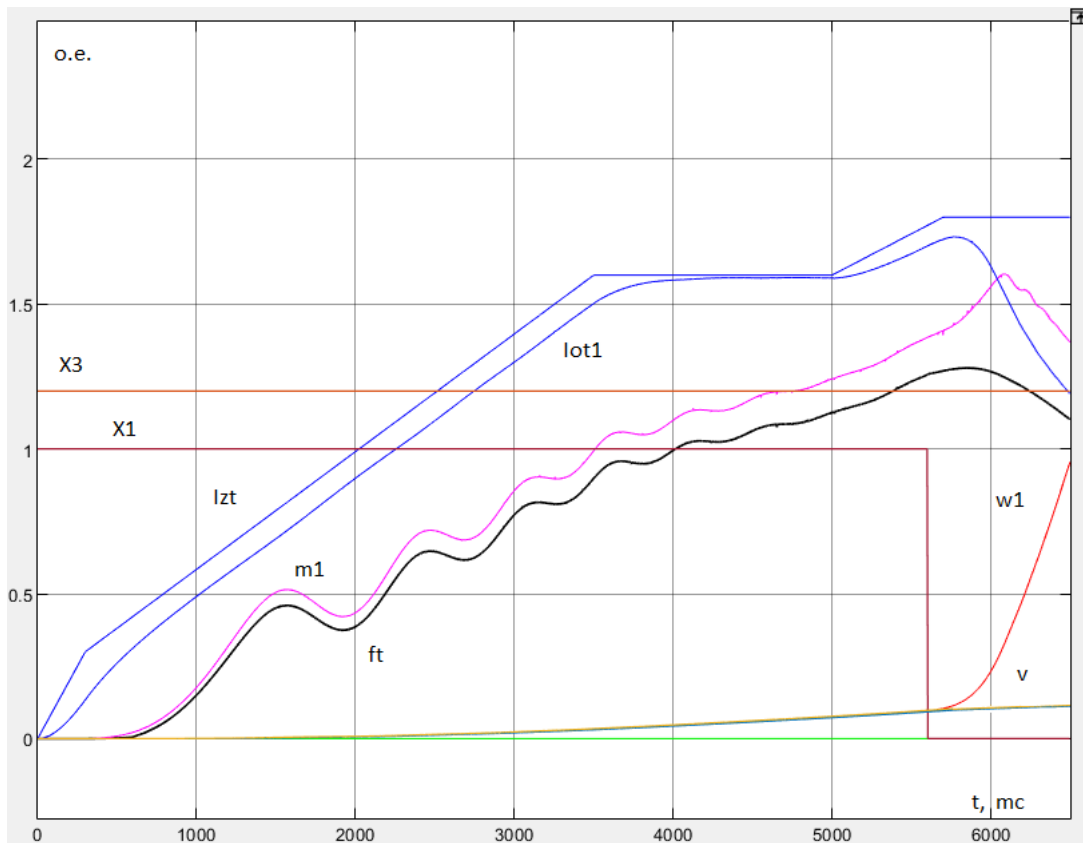


Рисунок 4.1 – Переходные процессы пуска ТЭД в системе ПЧ-АД при трогании с места локомотива с выбранными зазорами в сцепке и разном боксовании

По прошествии 5 секунд от начала расчета сигнал задания тока статора увеличивается до 1,8 о.е., в связи с чем сила тяги становится больше силы сцепления передней колесной оси – происходит срыв сцепления. В начале боксования, в момент 5,6 с изменяется логическая переменная  $X_1$ . В результате срыва сцепления угловая скорость электропривода  $\omega_1$  существенно увеличивается, а рост линейной скорости  $v$  замедляется вследствие снижения силы тяги первой тележки при большом моменте инерции поезда. Характер процесса соответствует переходу в разносное боксование, максимальная скорость тягового электродвигателя ограничивается только максимальной частотой преобразователя частоты.

### 4.3. Моделирование разного боксования обеих тележек

Рисунок 4.2 иллюстрирует вид переходных процессов пуска тяговых АД НПСМ2 в разомкнутой скалярной САР с ИР-компенсацией и задатчиком интенсивности [80] при трогании поезда с места,

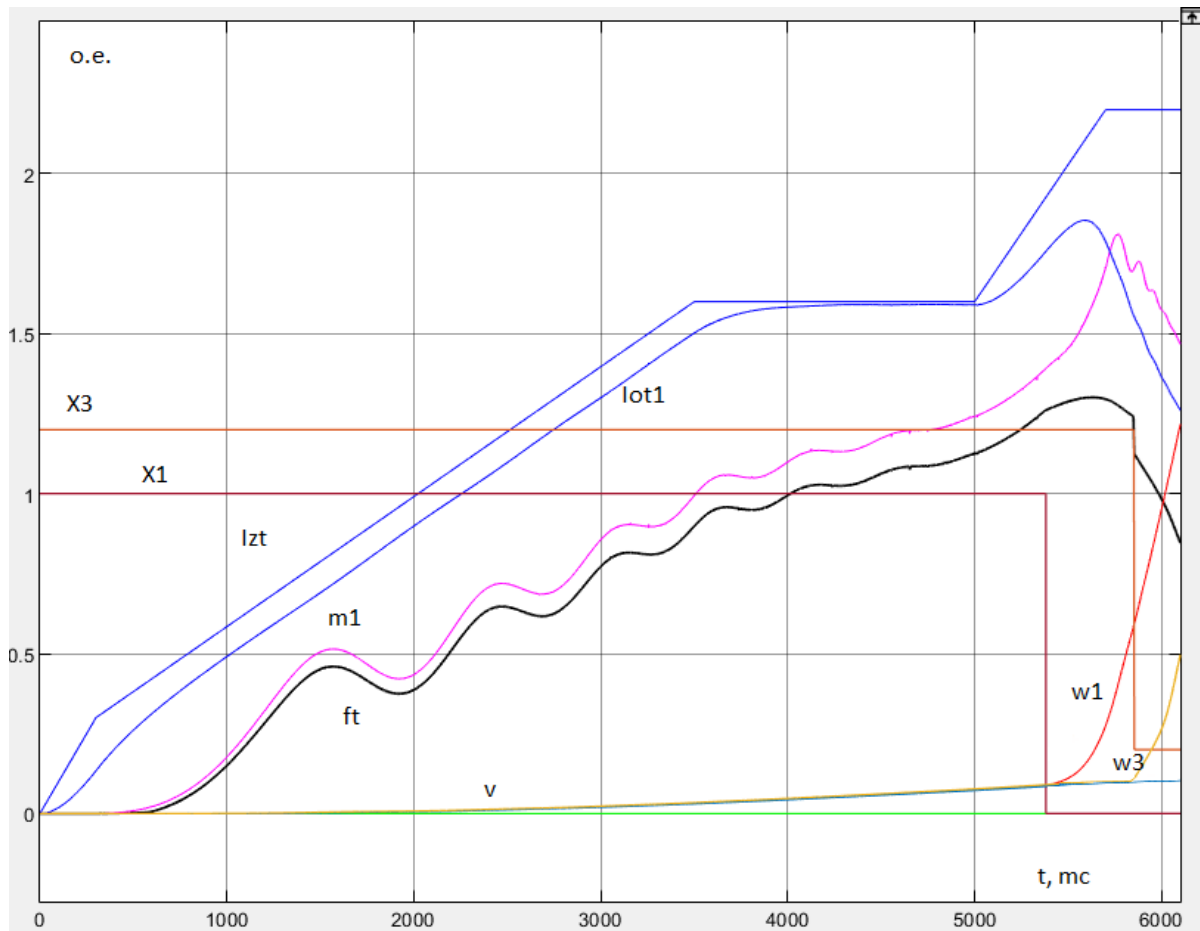


Рисунок 4.2 – Переходные процессы пуска ТЭД в системе ПЧ-АД при трогании с места локомотива с выбранными зазорами в сцепке и разным боксованием колесных пар обеих тележек

С момента 5,3 с. происходит срыв в боксование передней тележки, для задней тележки срыв сцепления происходит в 5,85 с. Угловые скорости ТЭД  $\omega_1$  и  $\omega_3$  обеих тележек существенно повышаются при почти полном отсутствии линейного разгона поезда – сказывается колоссальное снижение эффективной силы тяги, на этот раз, у обеих тележек.

На реальном электровозе НПСМ2 при резком росте скольжения «колесо-рельс», САР стремится поддержать ток соответствующего АД на уровне

задания – оси боксующей тележки разгоняются с последующим переходом к разносному боксованию. Чтобы этого не произошло, должно срабатывать встроенная защита от боксования, принудительно тормозящее оси передней тележки при появлении разницы скоростей между 1 и 3 колесной парой, снижая задание на ток боксующей тележки. [21]. Поскольку сигнал управления подается на оси попарно (на тележку), для 2 и 4 оси зачастую происходит саморегулирование [19]. Стоит отметить еще одну вероятную причину автозацепления боксующих колесных пар – появление второго максимума сцепления при скоростях проскальзывания более 5% [100]

Исходя из вышеизложенного, при резком (ударном) прекращении боксования в ТЭД появляются броски тока выше уставки защиты, из-за чего САР отключается по максимальному току ТЭД и машинисту приходится перезапускать всю систему управления локомотивом.

#### **4.4. Переход от разносного к устойчивому боксованию**

Зависимости (3.12) однозначно указывают на отсутствие скачкообразного снижения силы тяги после срыва в боксование колесных пар во время движении поезда – резкое увеличение скорости колесной пары обусловлено ростом доли механической работы электропривода на разгон маховых масс боксующей оси в связи со срывом зацепления поверхностей: задание на ток остается неизменным, а имеющаяся избыточная мощность растрачивается на раскрутку колес и истирание поверхностей пар катания [100, 101].

В связи с вышеизложенным, возможно получение динамически равновесного процесса боксования с ограничением линейной скорости опережения поверхности бандажа по отношению к полотну путей, при котором сила сцепления будет близка к максимально возможной с учетом внешних условий.

В этом случае, механическая часть будет функционировать без существенных динамических перегрузок (стабилизация тяги без «схватываний-срывов» в месте контакта системы «колесо-рельс»), вызванных



изменяющимися условиями, а, соответственно – не будет и бросков тока, обусловленных колебательными процессами, что в итоге позволит эффективно управлять тягой локомотива.

Поскольку уровень ограничения скорости должен обеспечивать, с одной стороны – минимальную разницу в линейных скоростях поверхностей, с другой – учитывать характеристики тягового электропривода, амплитудное значение коэффициента подобрано исходя из величины номинального скольжения электродвигателя ДТА-350М [84]

$$\Delta f_{\delta} = \frac{f_H \cdot s_H}{100} = \frac{42,1 \cdot 1,44}{100} = 0,6 \text{ Гц} \quad (4.1)$$

где  $\Delta f_{\delta}$  – амплитуда частоты проскальзывания, Гц;  $f_H$  – номинальная частота питания ТЭД, Гц;  $s_H$  – номинальное скольжение ТЭД, %.

В реальной системе значение данного коэффициента подбирается с учетом эксплуатационных испытаний [100, 109, 110]. Таким образом, скорость проскальзывания составит

$$\Delta \omega_{\delta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta f_{\delta}}{p \cdot i_{ред}} = \frac{6,28 \cdot 0,6}{3 \cdot 5,58} = 0,22 \text{ рад / с} \quad (4.2)$$

где  $\Delta \omega_{\delta}$  – амплитудное значение скорости проскальзывания колесо-рельс, рад/с;  $p$  – число пар полюсов ТЭД,  $i_{ред}$  – передаточное число зубчатой передачи.

Или

$$\Delta n_{\delta} = \frac{\Delta \omega_{\delta}}{k_{пер}} = \frac{0,22}{0,1047} = 2,1 \text{ об / мин} \quad (4.3)$$

где  $\Delta n_{\delta}$  – значение скорости проскальзывания колесо-рельс, об/мин,  $k_{пер} = 0,1047$  – коэффициент перевода из рад/с в об/мин.

$$\Delta V_{\delta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_K \cdot \Delta n_{\delta}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,575 \cdot 2,1}{60} = 0,12 \text{ м / сек} \quad (4.4)$$

где  $\Delta V_{\delta}$  – скорость проскальзывания, м/с;  $R_K$  – радиус колеса, м.

Как видно из расчетов, значение скорости проскальзывания при номинальной линейной скорости движения локомотива, равной 30 км/ч составляет 0,12 метров в секунду.

Для оценки полученных результатов сравним величину линейного проскальзывания при условии прижатия внутреннего колеса с величиной проскальзывания внешнего колеса по кругу катания при прохождении электровозом НПМ2 кривых минимального радиуса (60 м на скорости 10 км/ч, таблица 3.2)

$$\Delta V_{\delta R \min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \Delta R_{pR \min}}{t_{кр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \Delta R_{pR \min}}{2 \cdot \pi \cdot (R_{R \min} - \Delta R_{pR \min}) / V_{R \min \text{ лок}}} =$$

$$= \frac{1,52}{59,25 / 3,6} = 0,09 \text{ м / сек} \quad (4.5)$$

где  $\Delta V_{\delta R \min}$  – линейная скорость проскальзывания в кривой, радиусом 60м при скорости 10 км/ч;  $\Delta R_{pR \min}$  – изменение радиуса кривой за счет разницы расстояния от центра кривой до внутреннего и внешнего рельса, соответственно;  $\Delta R_{pR \min}$  – минимальный радиус проходимых кривых для НПМ2 (60м).  $V_{R \min \text{ лок}}$  – предельная скорость прохождения кривых минимального радиуса (10 км/ч).

Удержание проскальзывания в пределах частоты скольжения ТЭД позволит стабилизировать электромеханическую систему, поддерживая квазиустановившийся режим **рабочего** боксования.

#### 4.5. Структурная схема системы электропривода локомотива с ограничением боксования

Динамическая компьютерная модель тяговых электроприводов четырехосного маневрового электровоза НПМ2 строится на базе ДКМ тягового электропривода с ДТА-350М [59], описанных в главе 3 настоящей работы. Комбинированная модель, представленная на рисунке 4.3 состоит [84] из 4 моделей индивидуальных электроприводов по системе ПЧ-АД с САР (блоки

$US1=f(U_m) - US4=f(U_m))$  с модулем вычисления механических переменных поезда RACHET M и структурами боксования ADK1 – ADK4.

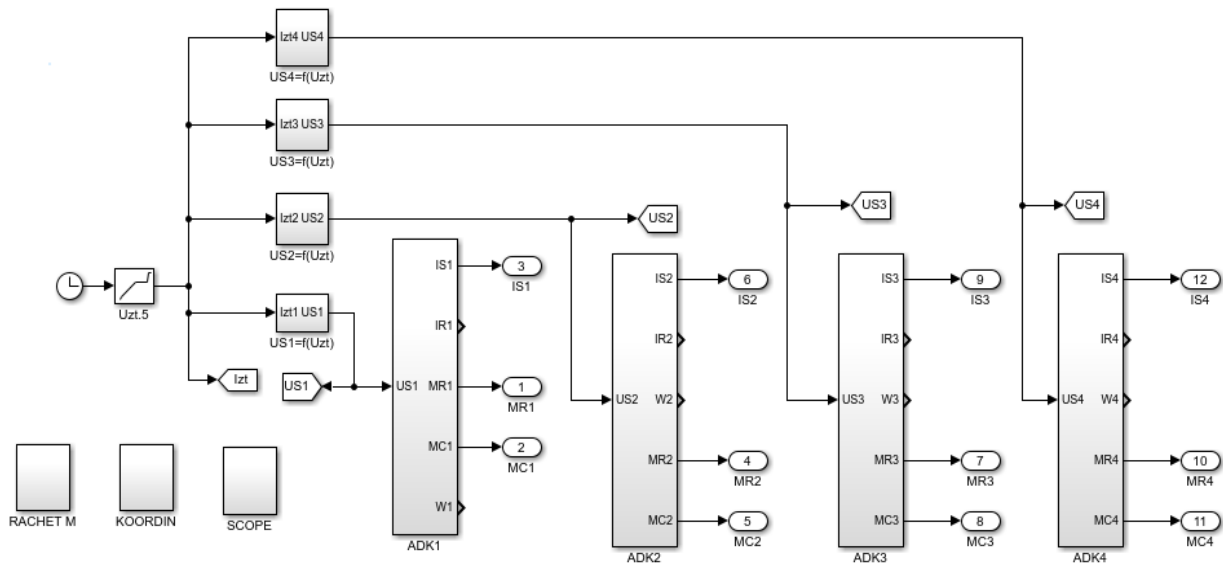


Рисунок 4.3 – Обобщенная структура ДКМ тягового 4-двигательного электропривода электровоза НПМ2

Скалярная САР каждого электропривода (рисунок 4.4), выполненного по системе ПЧ-АД строится на базе двойного (RT1, RT2) регулятора тока [78] с блоком ограничений выходных значений Dynamic Saturation [DS], ограничивающего уровень управляющего сигнала преобразователя частоты  $f_{in}$  в зависимости от минимальной скорости одного из 4 двигателей  $W_i$ , или линейной скорости движения локомотива  $V$ . Блок DS формирует возможный диапазон управляющего сигнала, с шириной в пределах минимальной скорости  $\pm df$ , функционально зависящий от номинального скольжения электродвигателя, обеспечивая рабочее боксование колесных пар.

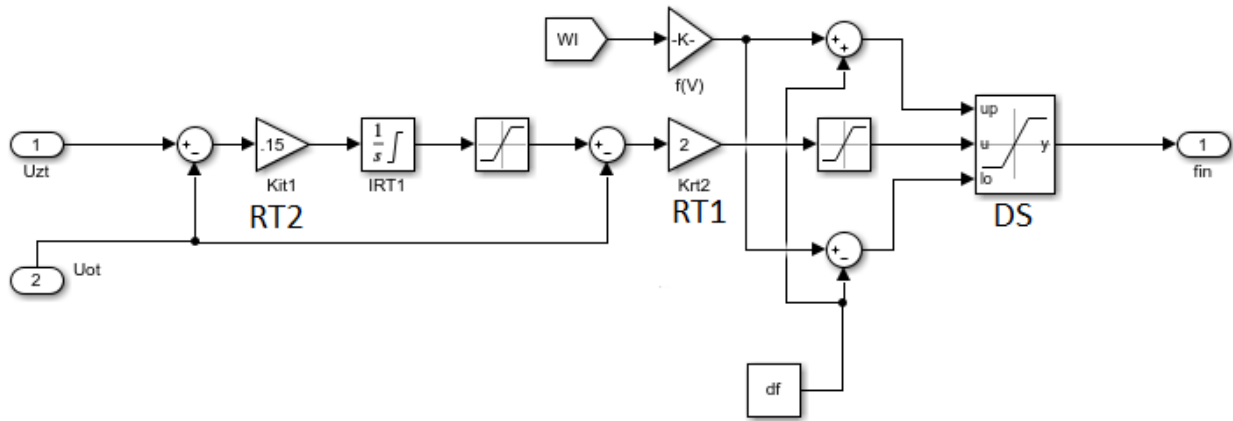


Рисунок 4.4 Двойной регулятор тока с блоком ограничения (структура ограничения боксования)

#### 4.6. Моделирование устойчивого боксования и расчет энергетических характеристик

На ДКМ выполнено моделирование пуска четырехдвигательного электропривода НПМ2 по системе ПЧ-АД в замкнутой по току САР:

- с выбранными сцепными зазорами при начале боксования;
- с выбранными сцепными зазорами с включенным модулем ограничения боксования.

Рисунок 4.5 иллюстрирует переходные процессы запуска тяговых электроприводов по системе ПЧ-АД в замкнутой по току САР при начале боксования 1 и 2 колесных осей. С момента времени 5,5 с для 1 и 2 колесных пар начинается разносное боксование: тяговые усилия  $mk_1$ , частоты управления и скорости вращения  $w_1$  и  $w_2$  колесных пар существенно увеличиваются, а линейная скорость локомотива практически не увеличивается из-за разрыва сцепления в месте контакта системы «колесо-рельс» колесных пар передней тележки. Разносное боксование также приводит к росту электропотребления тягового электропривода боксующих осей, снижая энергоэффективность.

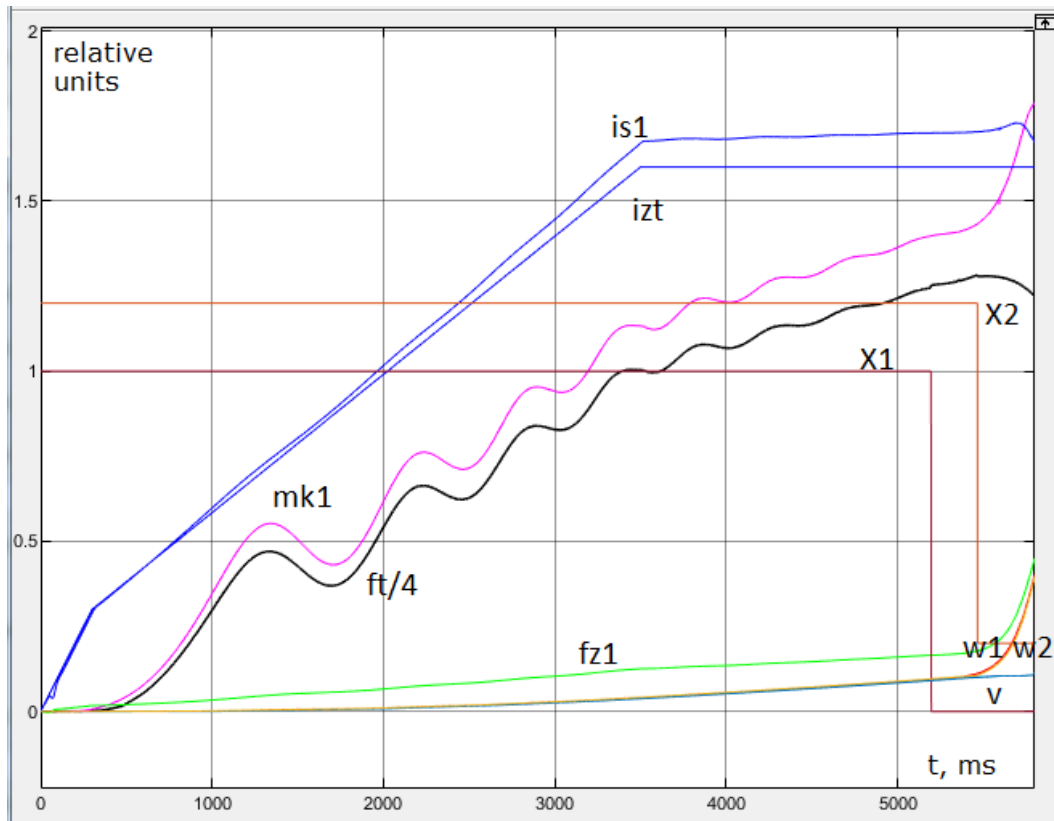


Рисунок 4.5 – Переходные процессы пуска тяговых электроприводов электровоза НПМ2 с выбранными сцепными зазорами при начале боксования колесных пар передней тележки

Переходные процессы угловых скоростей четырех ТЭД  $w_i$ , моментов на колесных осях  $mk_i$ , приведенные в относительных единицах на рисунке 4.6 вместе со значениями логических коэффициентов  $x_i$ , подтверждают переход в режим разного боксования колесных пар передней тележки с момента времени 5,5 с. В данном случае, колесные пары задней тележки не потеряли сцепление с головками рельсов, в связи с чем, они, в основном и обеспечивают тягу для движения состава.

На рисунках 4.6 - 4.9 кривые переходных процессов для  $W1-W4$ ,  $X1-X4$ ,  $mk1-mk4$  сдвинуты вверх на 0,1 относительной величины по своему номеру. Это сделано, чтобы эти кривые не слились в одну линию.

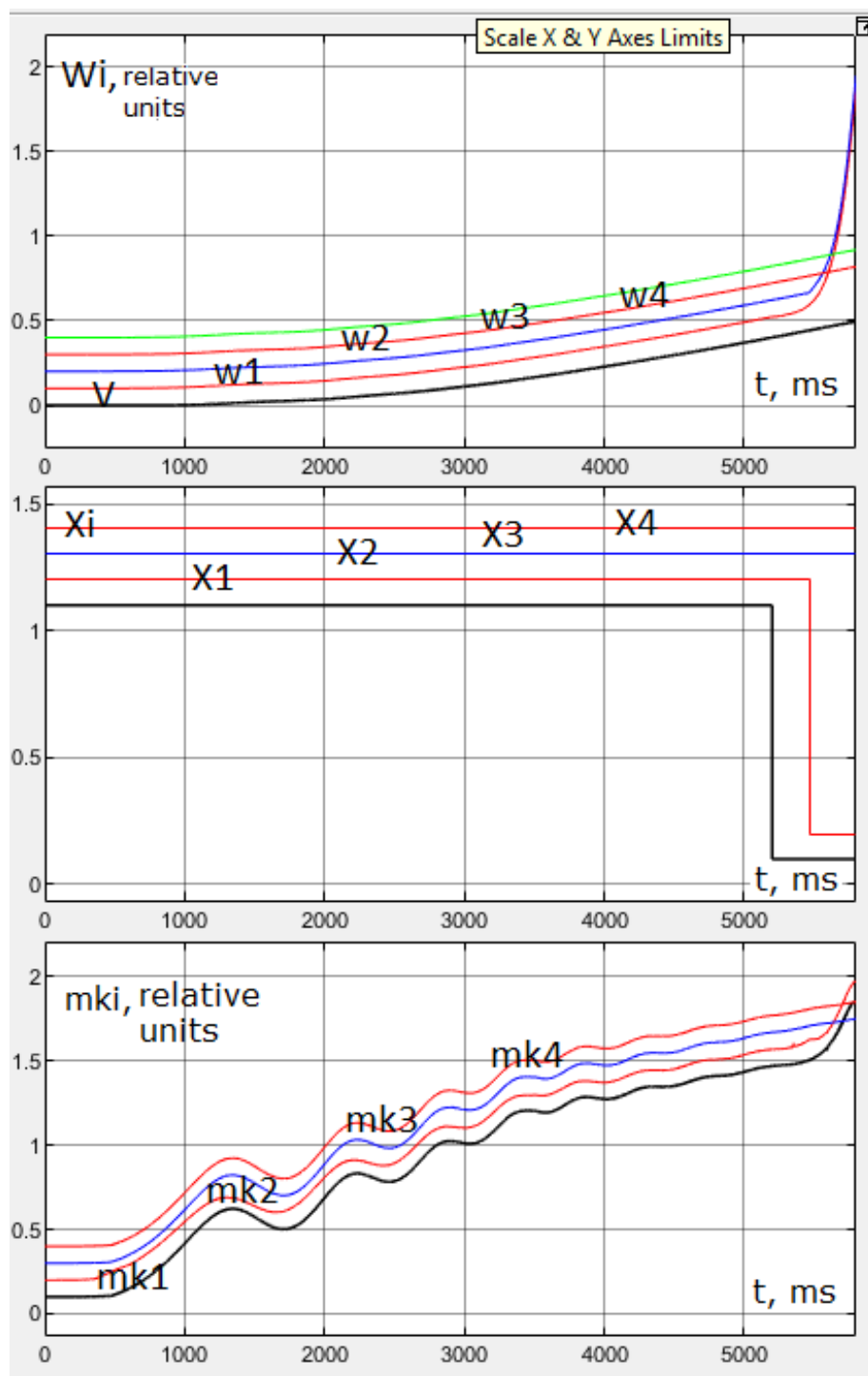


Рисунок 4.6 – Вид переходных процессов четырех тяговых электроприводов НПСМ2 при начале разного боксования 1 и 2 колесных пар

На рисунке 4.7 приведены переходные процессы мгновенных значений электрических [104] и механических ( $P_e$  и  $P_m$ ) мощностей с 1 по 4 колесную пару.

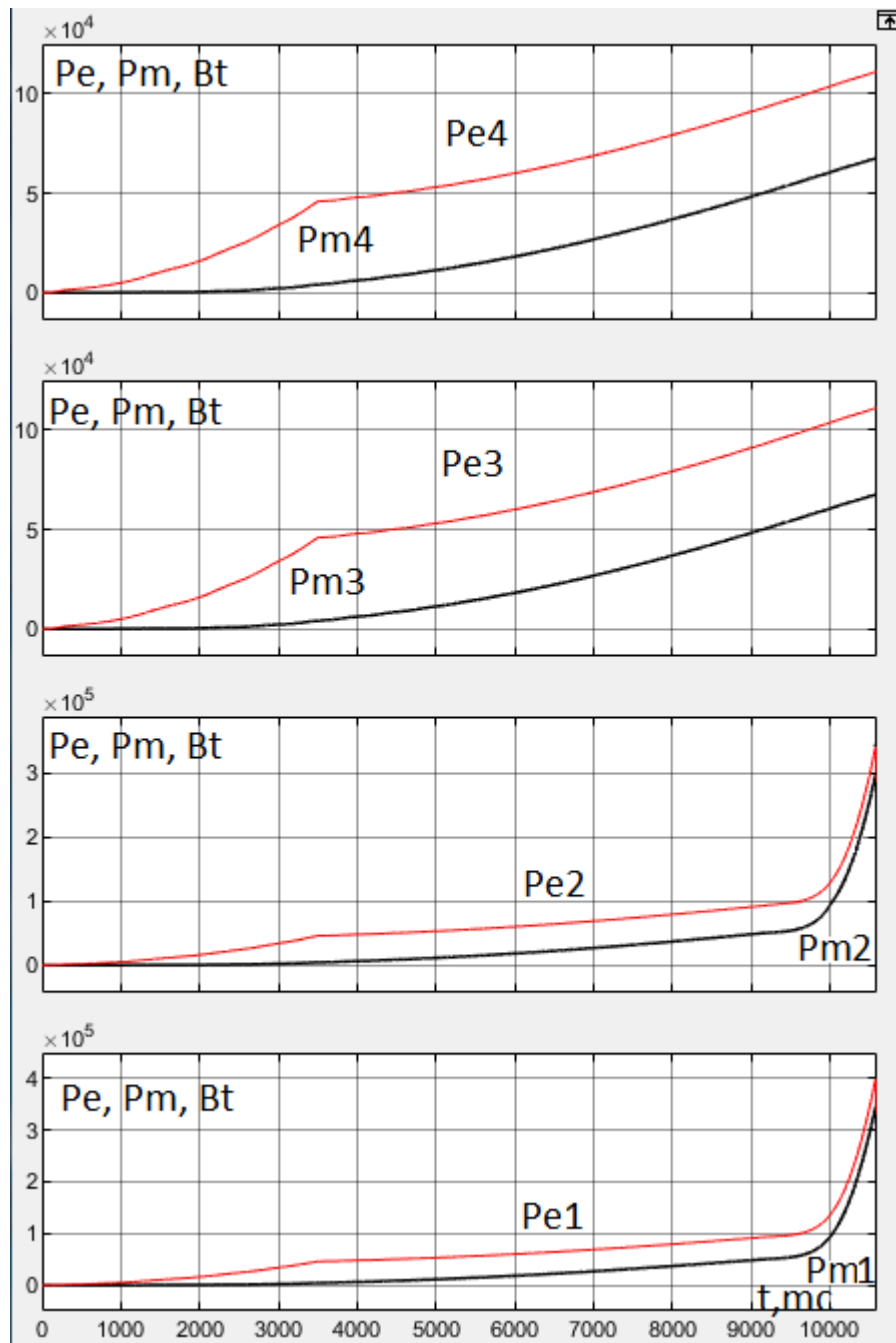


Рисунок 4.7 – Энергетические характеристики электроприводов колесных пар НПМ2 при разном боксовании колесных пар передней тележки

По рисунку 4.7 можно сделать вывод о резком увеличении потребления электроэнергии тяговыми электроприводами при переходе в разное боксование колесных пар передней тележки.

На рисунке 4.8 показан вид переходных процессов пуска тяговых электроприводов ПЧ-АД с замкнутой по току САР при активной системе ограничения боксования (рисунок 4.4). По прошествии 5,5 с колесные оси

передней тележки срываются в ограниченное по величине боксование: угловые скорости вращения ТЭД 1 и 2 ( $w_1$  и  $w_2$ ) незначительно увеличиваются, при этом поезд продолжает разгоняться, поскольку нарушение сцепления 1 и 2 колесных пар с рельсами минимально. Электропотребление тяговых электроприводов локомотива при ограниченном боксовании возрастает не существенно. Энергоэффективность высокая.

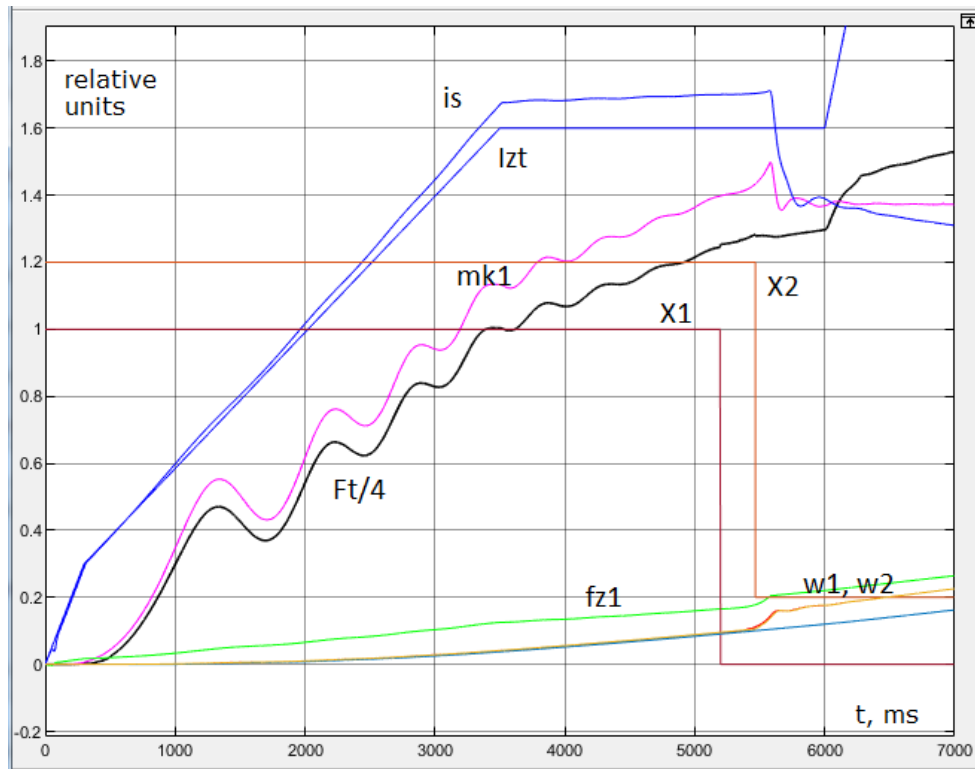


Рисунок 4.8 – Переходные процессы пуска тяговых электродвигателей по системе ПЧ-АД с САР с обратной связью по току после выбора зазоров сцепных устройств и включенным блоком ограничения боксования

Для описанных на рисунке 4.8. условий получены переходные процессы переменных для 4 тяговых электроприводов (рис. 4.9), подтверждающие режим управляемого боксования колесных пар передней тележки, начавшегося с 5,5 с. Колесные пары задней тележки (3 и 4) остаются в зацеплении (линейные скорости точек поверхности колеса равны линейной скорости локомотива), тогда как 1 и 2 колесные пары незначительно проскальзывают (линейная



скорость точек поверхности колеса незначительно превышает линейную скорость движения локомотива).

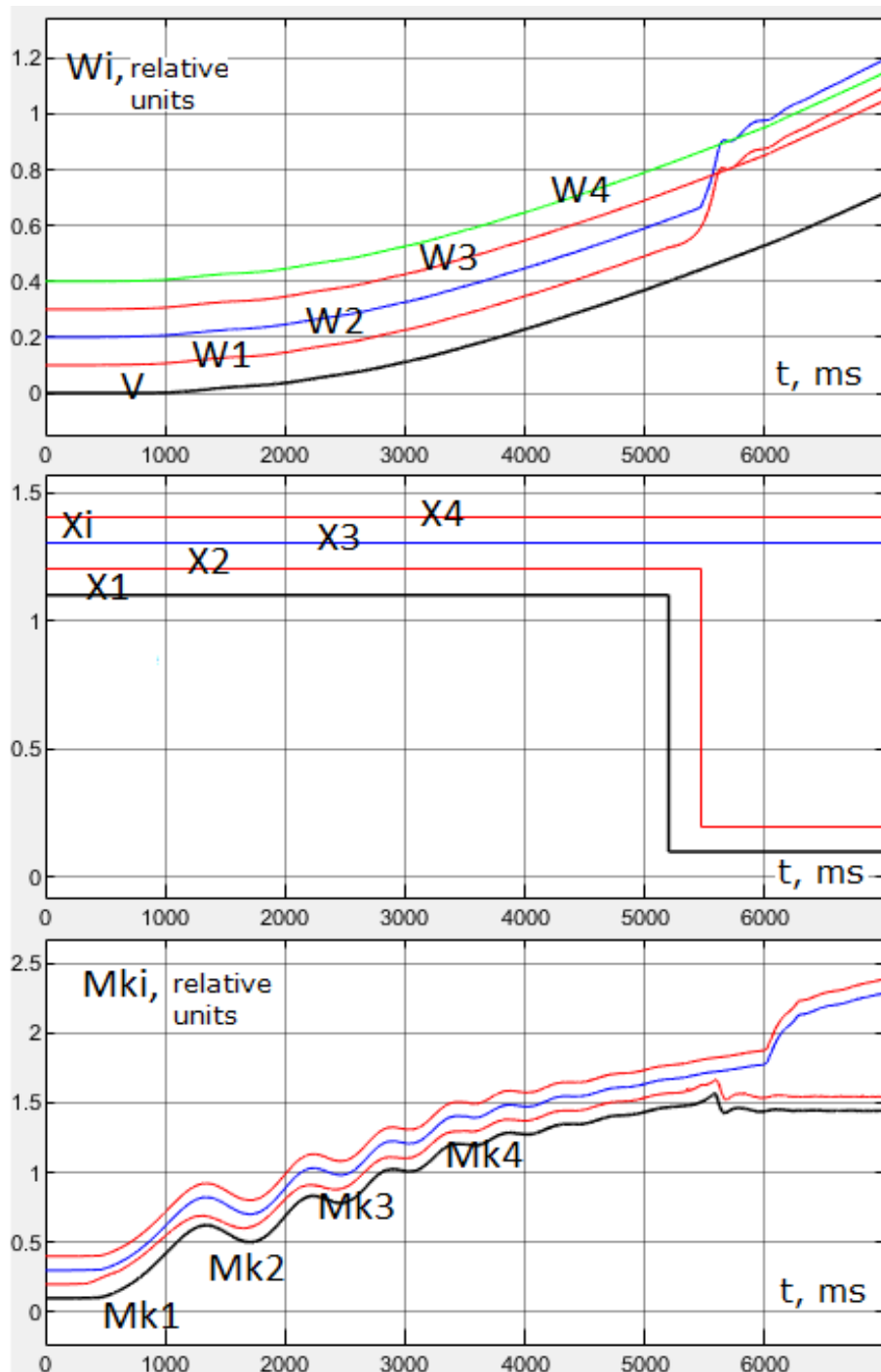


Рисунок 4.9 – Вид переходных процессов четырех тяговых электроприводов НПМ2 при входе в режим рабочего боксования 1 и 2 колесных пар.

По достижению времени 6 с, в САР формируется задание на увеличение скорости движения локомотива – при этом увеличения проскальзывания не происходит, т.к. работает блок ограничения боксования.

Энергетика рабочего боксования, оцениваемая в соответствии с диаграммой (рисунок 4.10) переходных процессов мгновенной электрической ( $P_e$ ) и механической ( $P_m$ ) мощностей колесных пар обеих тележек демонстрирует лишь незначительное повышение электропотребления.

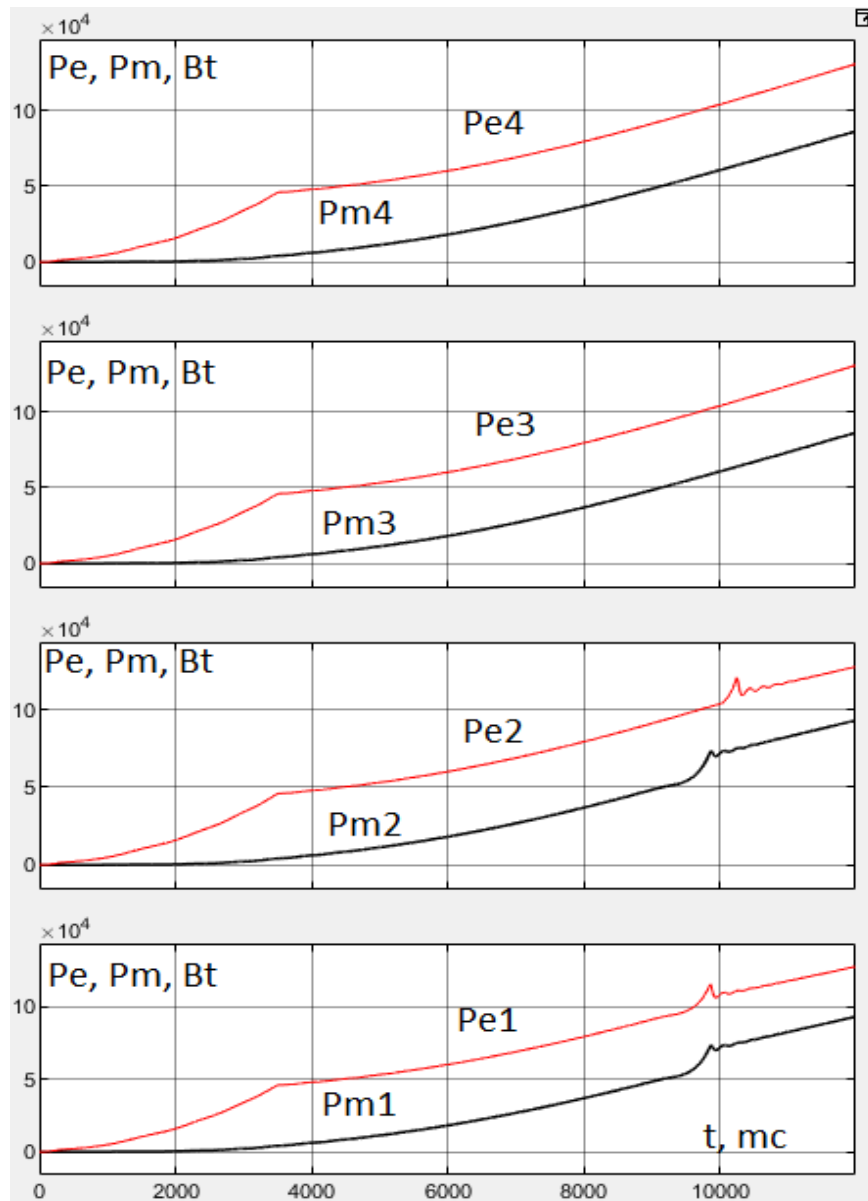


Рисунок 4.10 – Энергетические характеристики электроприводов колесных пар НПМ2 при срыве в боксование колесных пар передней тележки и работе модуля ограничения боксования

В данном случае, механическая мощность, затрачиваемая на разгон маховых масс и истирание поверхностей минимальна, т.е. почти вся энергия электропривода расходуется на обеспечение тяги локомотива, снижая износ механической части локомотива и головок рельсов. Исходя из имеющихся данных по эксплуатационной эффективности электровозов, при устранении неуправляемого боксования КПД локомотива возрастает, в среднем, от 2 до 5% [105], что является существенной величиной при оценке перспектив модернизации.

Отмечу, что внедрение вышеописанного блока управления боксованием на электровозе НПМ2, помимо переписывания программы управления, аналогично переходу на векторную САР (глава 3 работы) потребует замену контроллеров инвертеров локомотива, поэтому должно осуществляться в ходе модернизации НПМ2.

#### **4.7. Анализ эффективности предложенных мероприятий по модернизации системы управления тяговым электроприводом маневрового электровоза**

Как показывает практика [105], общая эффективность работы электровоза на производственной площадке предприятия при маневровом режиме не может быть точно вычислена аналитически после внесенных в него изменений. Для этого имеется несколько причин:

- электровозы работают на нескольких станциях с различным профилем пути под разной нагрузкой;
- на локомотиве работают сменные бригады «машинист-помощник машиниста» различной квалификации и отношением к работе.
- условия окружающей среды меняются непрерывно, влияние внешних факторов сложно спрогнозировать с инженерной точностью;
- производственная программа предприятия непрерывно корректируется

Изложенные обстоятельства формируют существенный разброс оцениваемый характеристик. С учетом опыта автора, отслеживание

энергоэффективности возможно либо на конкретных сложных участках пути по изменившимся средним показателям их проезда поездом, либо исключительно статистически, накапливая данные за большой период времени.

В зависимости от назначения и методики оценки [105, 114 – 118] используются несколько показателей энергоэффективности: эксплуатационный КПД электровозов, удельная энергетическая эффективность, КПД электровоза, как электроустановки (электромеханического преобразователя), суточную производительность электровоза, а также тяговооруженность локомотива.

Эксплуатационный КПД [105, 114] может быть рассчитан:

$$\eta_{пэ}^s = \frac{A1}{W} \quad (4.6)$$

где  $A1$ -количество работы, вычисленных по методике тяговых расчетов, кДж;  $W$ -количество энергии, эквивалентное израсходованному топливу/электроэнергии, кДж (обычно это называют топливо-энергетическим ресурсом).

Удельная энергетическая эффективность вычисляется:

$$\mathfrak{E}_T^s = \frac{A_{пеп}}{W} \quad (4.7)$$

где  $A_{пеп}$  – реальный объем выполненной локомотивом работы по перевозкам, кДж.

Эксплуатационный КПД электровоза как электромеханического преобразователя [116] предполагает оценку энергетической эффективности электровоза с трех сторон: КПД ( $\eta$ ), коэффициент использования мощности (КИМ) и  $\cos \phi$ . В данном случае,  $\eta$  электровоза рассчитывается:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{tr}}{P_{tr} + P_{loss} + P_{aux}}, \quad (4.8)$$

где  $P_{in}$  – потребляемая электровозом из сети активная мощность;

$P_{out}$  – выходная мощность электровоза,  $P_{out} = P_{tr}$ ;

$P_{loss}$  – потери мощности;

$P_{\text{aux}}$  – мощность, потребляемая вспомогательными системами локомотива;

Тяговая мощность электровоза

$$P_{tr} = F_{tr} \cdot V_{л}, \quad (4.9.)$$

где  $F_{tr}$  – общая касательная сила тяги локомотива, кН;  $V_{л}$  – скорость локомотива.

КИМ электровоза  $\gamma$  предстает, как отношение тяговой мощности электровоза  $P_{tr}$  к его номинальной мощности  $P$ :

$$\gamma = \frac{P_{tr}}{P}. \quad (4.10)$$

Использованные в данной работе компьютерные модели не учитывают потери на преобразование энергии в инвертере и во вспомогательных цепях локомотива. Потери в меди, в стали электродвигателя [117, 118] уже учтены в динамической компьютерной модели электродвигателя в соответствии с разделом 2.3 данной работы. С учетом питания от контактной сети постоянного тока при ее питании от подстанции с неуправляемым выпрямителем, имеет смысл принять потери преобразователя постоянными. В этом случае разница в КПД может быть найдена как разница в потребляемой мощности при работе в одном режиме – например, при пуске.

Для служб организации движения удобнее оценивать суточную производительность электровоза, рассчитываемую по формуле:

$$П_{\odot} = m_{п} \cdot V_y \cdot t_c, \quad m \cdot км \quad (4.11)$$

Где  $m_{п}$  – масса поезда, т;  $V_y$  – скорость поезда на участке,  $t_c$  – суточное время работы локомотива в составе поезда.

Производительность электровоза (4.11) учитывает среднюю скорость на участке, которая напрямую зависит от тяговых возможностей локомотива. Применяемые технические решения способствуют повышению величины тяги локомотива, как за счет увеличения коэффициента использования электродвигателей по моменту  $K_{М1}$ , так и за счет увеличения устойчивости

электровоза при прохождении участков со сложным профилем пути. Второе реализуется с помощью подсистемы ограничения боксования, позволяющей поддерживать близкую к максимальной силу сцепления.

Поскольку, согласно материалам 3 Главы данной работы, сила сцепления, в общем случае, зависит от силы давления колес на рельсы и коэффициента сцепления (3.13), целесообразным будет использовать величину, связывающую величины максимальной силы тяги локомотива и массы поезда.

В нормативно-технической документации [115] такой показатель не фигурирует, однако некоторые исследователи [114] в области железнодорожного транспорта допускают возможность применения для этих целей понятия **тяговооруженности**, которое обычно характерно для аэрокосмической отрасли.

В общем случае, тяговооруженностью [119] (T/W, Thrust-to-Weight ratio) называют отношение тяги двигателей летательного аппарата к его весу. Сила тяги чаще всего измеряется в Ньютонах, поэтому расчет тяговооруженности ( $Y$ ) для локомотива можно представить, как

$$Y = \frac{F_K}{m_{\text{л}} \cdot g}, \quad (4.12)$$

где  $F_K$  – касательная сила тяги, кН;  $m_{\text{л}}$  – масса локомотива, т;  $g$  – ускорение свободного падения.

В случае с морской или авиатехникой  $m$  включает в себя полную массу воздушного или морского судна вместе с полезной нагрузкой, тогда, как для железной дороги полезной нагрузкой является масса поезда. Таким образом, по мнению автора, необходимо просчитывать тяговооруженность для локомотива в составе поезда, оперирующего на конкретном участке пути, железнодорожной станции и т.д.

$$Y = \frac{F_K}{m_{\text{п}} \cdot g}, \quad (4.13)$$

Где  $m_{\Pi}$  – масса поезда;

Для электровозов НПМ2 на промплощадке предприятия существует типовая масса состава, с которой он преимущественно работает. В соответствии с материалами 2 Главы данной работы, типовая масса состава для НПМ составляет 1200 т.

Исходя из вышесказанного, при средней скорости движения поезда в маневровом режиме 15 км/ч и соответствующем коэффициенте сцепления  $\psi_{v15}$ , тяговооруженность поезда с электровозом НПМ2 в головной части составит

$$F_K = P_{\text{сц}} \cdot \psi_{v15} = 920 \cdot 0,299 = 275 \text{ кН}, \quad (4.14)$$

$$Y = \frac{F_K}{m_{\Pi} \cdot g} = \frac{275}{12920} = 0,021 = 2,1 \%. \quad (4.15)$$

Поскольку при боксовании коэффициент сцепления снижается в 2 и более раз, а срыву в боксование чаще всего подвержены колесные пары передней тележки электровоза, суммарные потери тяги с учетом перераспределения нагрузок составляют не менее 20 % [120, 121] - соответствующим образом снижается и тяговооруженность. При управляемом боксовании, потери тяги не превышают нескольких процентов. Таким образом, тяговооруженность при рабочем боксовании можно считать постоянной;

Экономическая эффективность модернизации электровоза может быть оценена через уменьшение стоимости потребляемой электроэнергии и уменьшение стоимости/увеличение периодичности проводимых ремонтов колесных пар/рельсовых путей.

Экономический эффект проявляется по нескольким направлениям:

- повышение эффективности железнодорожных перевозок за счет улучшения эксплуатационных показателей электровоза НПМ2, таких как повышение КПД, расширение скоростного диапазона и повышения тяговой мощности;
- снижение износа бандажей колесных пар вследствие рабочего боксования;

- снижение износа железнодорожного полотна вследствие рабочего боксования, исключение формирования «пяток» (локального глубокого износа головки рельсов, рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Износ (истирание, проплавление) головок рельсов при вследствие разносного боксования локомотивов на тракционных путях депо

Допустимо указать ориентировочные эксплуатационные значения и выполнить предварительный расчет на базе результатов исследования на динамической компьютерной модели.

Для первого пункта при стоимости 1 кВт\*ч электроэнергии 3,7 руб и прироста КПД на 5% с учетом среднегодового часового электропотребления электровоза в 70 кВт\*ч, эффект в денежном выражении будет равен

$$E_{\eta} = C_m \cdot \eta \cdot P_e \cdot h_y \cdot N_{Loc} =$$

$$= 70 \cdot 0,05 \cdot 3,7 \cdot 8760 \cdot 25 \approx 2,85 \text{ млн.руб}, \quad (4.16),$$

Где  $E_{\eta}$  - экономический эффект от прироста энергоэффективности, млн. руб;  $C_m=70$  - среднегодовое часовое электропотребление электровоза кВт\*ч;  $\eta=0,05$  -прирост КПД;  $P_e$ -стоимость 1 кВт\*ч электроэнергии с контактной сети, руб;  $h_y$ -количество часов в году (8760),  $N_{Loc} = 25$  - количество работающих НПС на линии, шт.



Для второго пункта – износ поверхности бандажей приводит к их ускоренной замене по оставшейся толщине. Стоимость замены одного бандажа составляет 55000 рублей. На локомотиве наблюдается большой износ первой колесной пары, значительная доля которого может обуславливаться боксованием. В соответствии с предъявляемыми к локомотивам требованиями, бандажи на всех четырех колесных осях меняются единовременно. Таким образом, экономический эффект при увеличении периода службы бандажей составит

$$E_b = P_b \cdot q_y \cdot \Delta T \cdot N_b \cdot N_{Loc} \quad (4.17),$$

Где  $E_b$  – экономический эффект от увеличения срока службы бандажей, млн. руб;  $P_b$  – стоимость замены одного бандажа, руб;  $q_y$  – коэффициент приведения стоимости замены бандажа к календарному году,  $\Delta T$  – увеличение периода службы бандажа, %;  $N_b$  – количество бандажей на колесных парах НПСМ2 (8 шт);  $N_{Loc}$  – количество работающих НПСМ2 на линии (на момент написания работы принято 25) шт.

Оценить величину экономического эффекта по второму пункту на данный момент практически невозможно в связи с отсутствием статистических данных о периодичности замены бандажей, а также многофакторной зависимостью износа последних от условий эксплуатации. В связи с вышесказанным, данное выражение остается в общем виде.

В последнем случае при длительном боксовании электровоза в месте боксования происходит истирание головок рельсов, что дополнительно снижает их срок службы. Аналогично предыдущему пункту, рассчитать экономический эффект не представляется возможным, поскольку подсчет износа пути не производится, а само полотно имеет множество особенностей конструкции на разных участках, из-за чего стоимость замены сильно варьируется.

В итоге, по второму и третьему пункту экономический эффект может быть оценен только статистически, после проведения модернизации.

Расчет электропотребления на тягу электровоза в маневровом режиме работы осуществлялся на модели из раздела 3.6 данной работы. Для расчета были выбраны: разомкнутая скалярная САР с IR и S-компенсациями (Б), а также векторная замкнутая (Ж) и разомкнутая и (З) САР. Для каждого варианта САР в модель закладывались сценарии расчетов, соответствующие маневровому режиму работы локомотива:

1. разгон локомотива без состава до установившейся скорости,
2. разгон локомотива с составом массой 1100 т и выборкой зазоров,
3. разгон локомотива с составом массой 1100 т с выбранными зазорами,
4. равномерное и прямолинейное движение локомотива без состава за период времени,
5. равномерное и прямолинейное движение локомотива с составом 1200 т за период времени

Схема расчета: локомотив разгоняется за 5 секунд до скорости маневрового режима, соответствующей, в среднем,  $0,1 \omega_H$  или 3 км/ч, далее, в течении 5 секунд продолжает равномерное прямолинейное движение. За время разгона, а также в установившемся режиме в программе интегрируется показатель затрачиваемой активной мощности тягового электропривода  $P$ . На выходе получается среднее значение энергии в джоулях. Сравнивая среднее количество энергии, затрачиваемое на переходный процесс, можно оценить энергоэффективность системы. Для удобства отображения  $\omega$  ТЭД и  $m_c$  увеличены в 2 раза.

На рисунках 4.12, 4.13 и 4.14, изображены переходные процессы в электроприводе при пуске, разгоне маневрового электровоза НПМ2:

- без состава на холостом ходу с векторной САР (Ж),
- с составом из 11 груженных вагонов со скалярной САР (Б),

- пуске и разгоне локомотива с 11 гружеными вагонами с векторной САР  
(Ж)

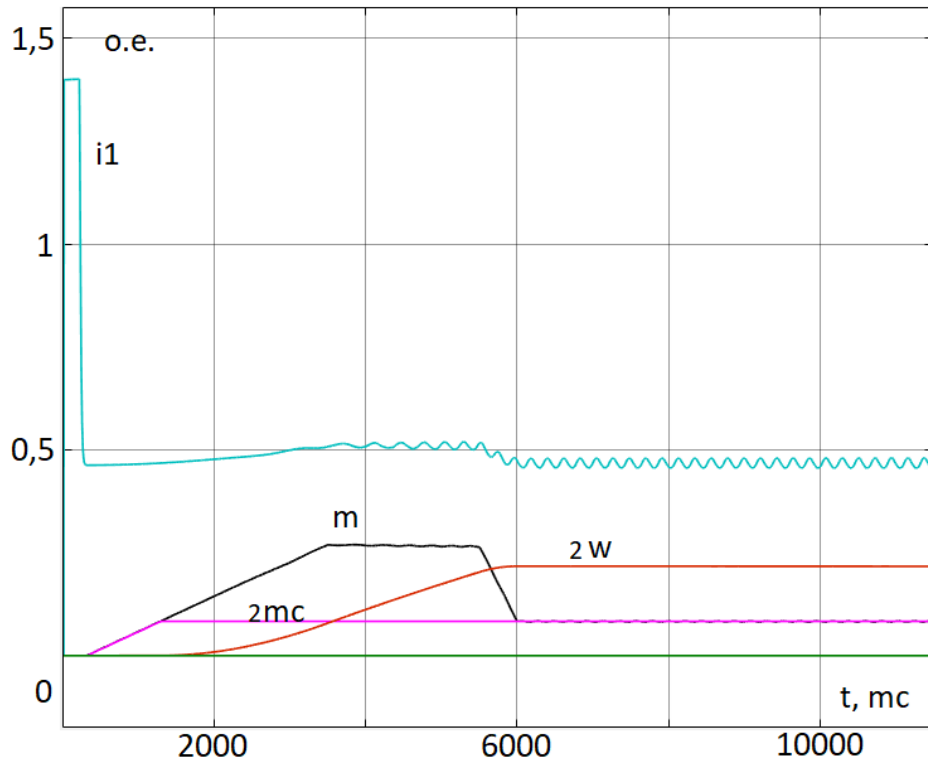


Рисунок 4.12 – Переходные процессы в тяговом электроприводе электровоза НПМ2 с векторной САР без состава при пуске и разгоне

Переходные процессы на рисунке 4.12 характеризуются быстрым возрастанием тока статора до  $1.4 I_H$ , обеспечивающим намагничивание. Момент двигателя нарастает монотонно в соответствии с заданным темпом разгона, колебательная составляющая практически отсутствует. Переходные процессы энергоэффективны

При старте локомотива со скалярной системой управления тягой с 11 гружеными вагонами, массой по 100 т каждый и выборе зазоров переходные процессы (рисунок 4.13) тока  $I$  и момента  $m$  колебательные, их пиковые значения достигают  $1,32 I_H$  и  $1,35 m_H$  соответственно.

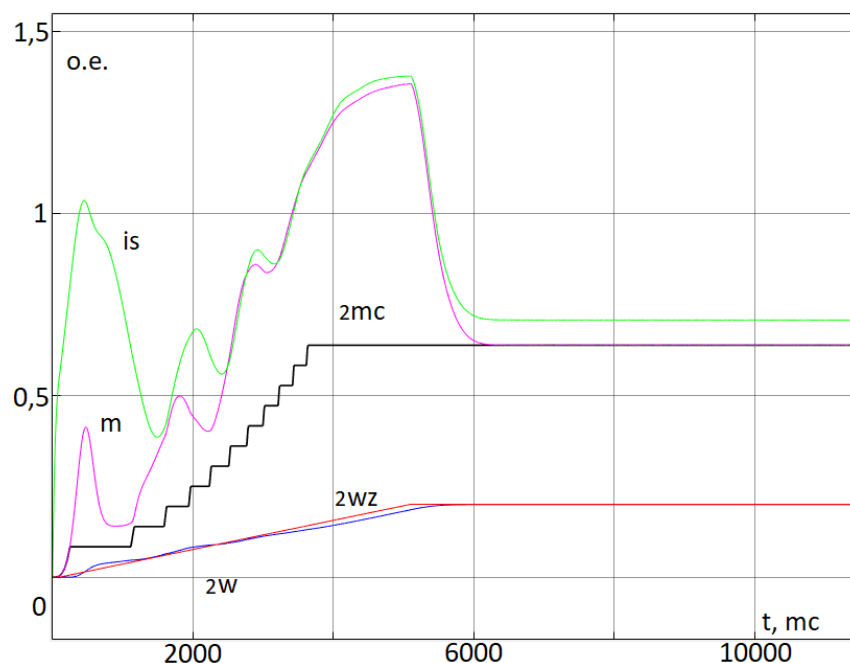


Рисунок 4.13 – Переходные процессы в тяговом электроприводе  
электровоза НПМ2 со скалярной САР при разгоне с составом

Переходные процессы в электроприводе электровоза НПМ2 с векторной САР при пуске и разгоне с 11 груженными вагонами монотонны, характеризуются быстрым нарастанием тока статора до  $1,4 I_H$ .

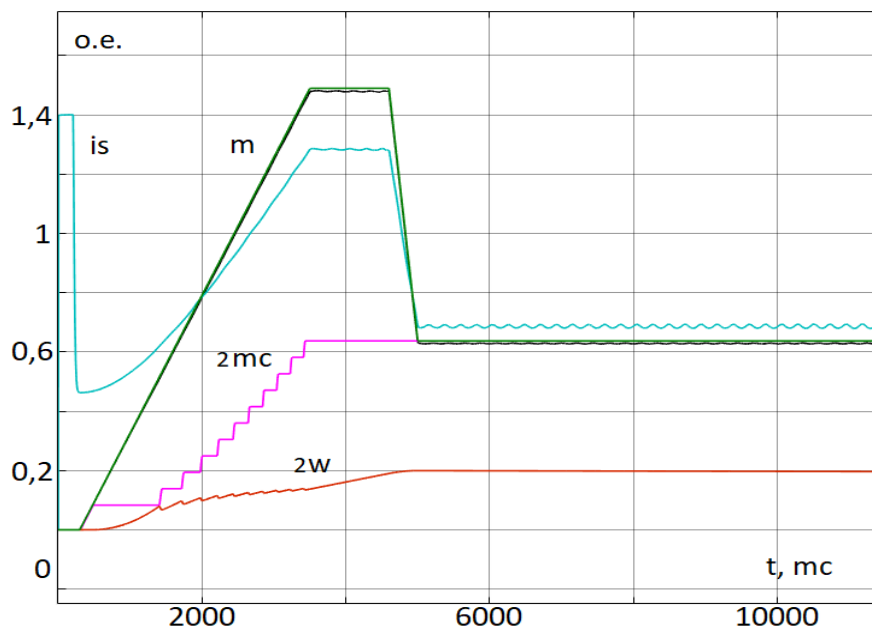


Рисунок 4.14 – Переходные процессы в тяговом электроприводе  
электровоза НПМ2 с векторной САР при разгоне составом

Пиковое значение момента достигает 1,45 мН. В период выбора зазоров момент нарастает с одинаковой скоростью, переходные процессы энергоэффективны.

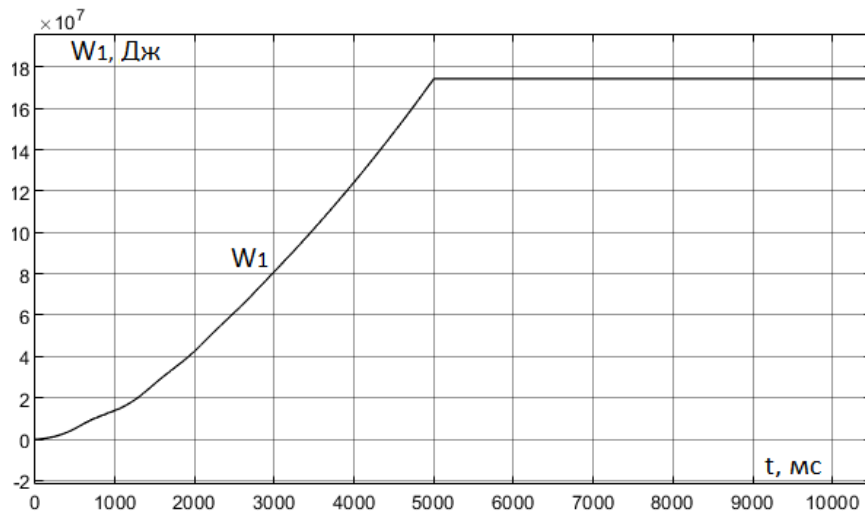


Рисунок 4.15 – Энергозатраты на разгон НПС2 при скалярном регулировании с 11 груженными вагонами в составе поезда и выбором сцепных зазоров

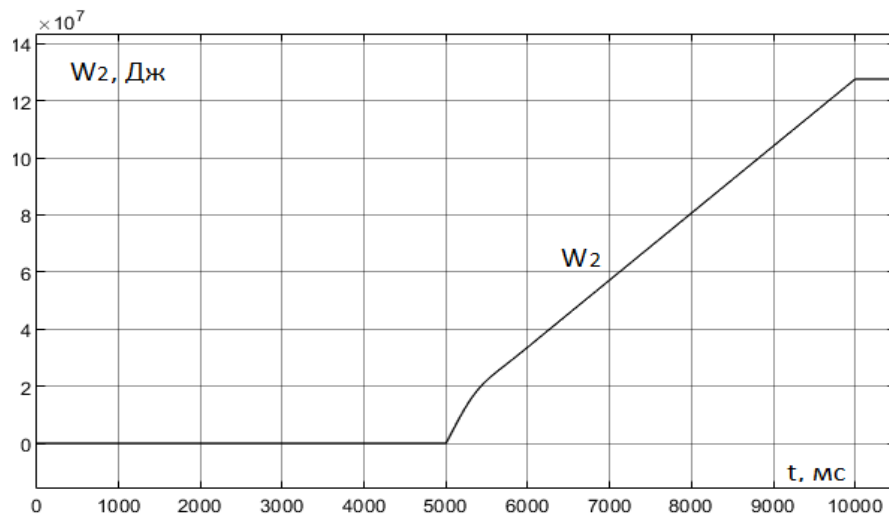


Рисунок 4.16 – Энергозатраты на равномерное движение НПС2 при скалярном регулировании с 11 груженными вагонами в составе поезда

В таблице 4.1 представлены обобщенные результаты расчета энергозатрат для скалярной и векторной САР маневрового электровоза.

Таблица 4.1 Результаты расчета энергозатрат в маневровом режиме за одинаковое время при разных типа маневровой работы с применением скалярной и векторной САР

Тип САР	№ П/п	Режим	$W_1$ , $10^7$ Дж	$W_2$ , $10^7$ Дж	$\Delta\omega/\omega_n$
Скалярное регулирование (В)	1	ХХ локомотив	4,132	3,126	0,1
	2	Выбор зазоров	17,74	12,88	0,1
	3	Без зазоров	16,6	12,88	0,1
Векторное регулирование (Ж)	4	ХХ локомотив	3,564	3,155	0,1
	5	Выбор зазоров	16,09	12,8	0,1
	6	Без зазоров	15,3	12,8	0,1

Используя данные таблицы 4.1 вычислены относительные отклонения ( $\Delta$ ) потребления энергии для 3 режимов при использовании скалярной и векторной САР (таблица 4.2). Их обозначения имеют вид  $\Delta W_{i(N)}$ , где  $i=1$  – режим разгона и  $2$  – режим равномерного движения,  $N = X$  – локомотив без состава,  $TRZ$  – поезд с выбором сцепных зазоров,  $TR$  – поезд с выбранными зазорами.

Таблица 4.2 Относительные отклонения в энергозатратах при маневровой работе

№ П/п	1	2	3	4	5	6
Наименование $\Delta$	$\Delta W_1 (X)$	$\Delta W_1 (TRZ)$	$\Delta W_1 (TR)$	$\Delta W_2 (X)$	$\Delta W_2 (зазоры)$	$\Delta W_2 (TR)$
Значение $\Delta$	13,7 %	9,3 %	7,8 %	- 0,9 %	0,6 %	0,6 %

Таким образом, энергоэффективность при переходе на векторное управление существенно (>9%) повышается при переменной нагрузке, что обуславливается предварительным подмагничиванием АД и контролем величины момента электродвигателя.

Среднеквадратичное отклонение составило

$$\Delta = \sqrt{\frac{(\Delta W_{1(X)})^2 + (\Delta W_{1(зазоры)})^2 + (\Delta W_1)^2 + (\Delta W_{2(X)})^2 + (\Delta W_{2(зазоры)})^2 + (\Delta W_2)^2}{6}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(0,137)^2 + (0,093)^2 + (0,078)^2 + (-0,009)^2 + (0,0062)^2 + (0,0062)^2}{6}} = 0,075 \quad (4.18);$$

Переход на системы векторного регулирования позволяет экономить электроэнергию на локомотиве при маневровых работах до 7,5%, поскольку для них характерны переменные нагрузки, связанные с частыми пусками, остановками, работой «толкачем», а также выборкой сцепных зазоров

#### 4.8. Варианты развития систем управления электроприводами с ограничением боксования

Регулятор ограничения боксования функционирует на основе сигнала минимальной скорости вращения электродвигателя  $w_i$ , получаемого от системы управления тягой после сравнения угловых скоростей всех 4 ТЭД, т.о. система ограничений боксования работает эффективно в том случае, если хотя бы 1 колесная ось не боксует. Одновременное боксование всех 4 колесных пар возможно, но возникает, как правило, при комбинации негативных факторов, обычно включающих в себя ошибочные действия машиниста.

В соответствии с проведенными в 1 главе данной работы патентными исследованиями, системы ограничения боксования по каналу управления САР тяговых электроприводов, по сути, могут быть 3 видов:

1. Только с датчиками угловой скорости вращения ТЭД (рисунок 4.17);
2. С датчиками угловой скорости вращения ТЭД и датчиками линейной скорости движения локомотива (рисунок 4.18).

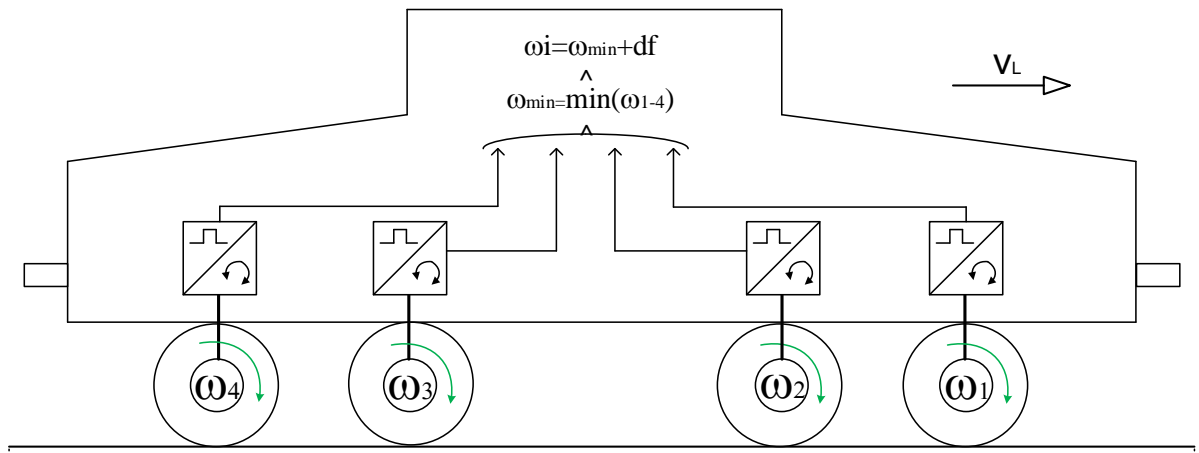


Рисунок 4.17 – Схема сигналов обратной связи САР с ограничением боксования с датчиками угловой скорости вращения

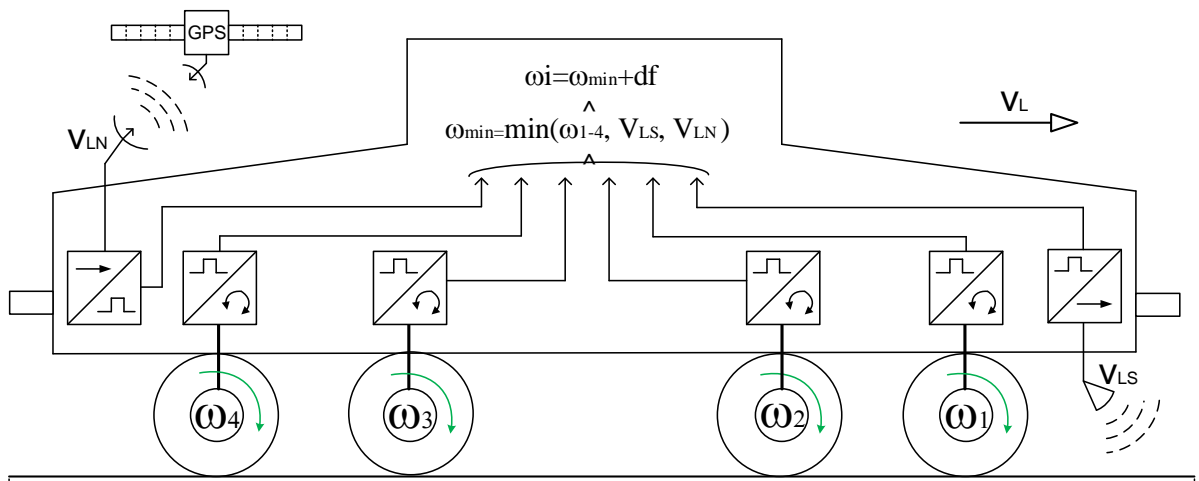


Рисунок 4.18 – Схема сигналов обратной связи САР с ограничением боксования с датчиками линейной ( $V_{LI}$ ) и угловой скорости вращения

Существуют также системы с измерением электрических величин, позволяющие отслеживать режимы работы ТЭД и выявлять признаки избыточного проскальзывания [106], поэтому их можно отнести к 1 категории.



Функционально система автоматического ограничения боксования с дополнительными датчиками линейной скорости движения локомотива (рисунок 4.18) по возможностям существенно превосходит конфигурацию, ограниченную лишь датчиками угловых скоростей (рисунок 4.12), поскольку линейная скорость локомотива при боксовании, приведенная к угловой скорости колесных пар/ТЭД всегда является минимальной. Дополнительно, измерение линейной скорости локомотива с датчиками угловой скорости колесных пар позволяет учитывать все виды проскальзывания, что дает существенное преимущество при формировании предиктивных моделей управления тяговыми электроприводами локомотивов [111], поскольку становится возможным отслеживать деформации в пятне контакта системы «колесо-рельс»

Технически датчики линейной скорости движения локомотива в рассматриваемых системах обычно представляет собой либо измерительный канал скорости системы спутникового (GPS/GLONASS) мониторинга транспорта, либо отдельный датчик линейной скорости движения (ультразвуковой, оптический и т.д.).

За счет наличия внешнего по отношению к системе электропривода измерительного канала линейной скорости возможна компенсация боксования для всех 4 колесных пар локомотива. Использование типовых систем спутниковой телеметрии ограничивает нижний предел измерений скорости по точности (как правило, точность в 1 км/ч доступна при скоростях от 30 км/ч) [107] и исключает использование регулятора боксования при движении в маневровом режиме или в условиях радиопомех (внутри депо, рядом со зданиями, сооружениями, при плохих погодных условиях, а также в зоне действия средств радиоэлектронной борьбы). Применение для изменения линейной скорости датчика линейной скорости радарного [108, 109] или инерциального [110] принципов действия с достаточной точностью технически

сложно и дорого, в связи с чем, на практике обычно ограничиваются снятием угловой скорости колесных пар.

Невзирая на техническую и экономическую сложность, комбинированные системы более перспективны, поскольку обеспечивают более высокую точность изменения и больше вариантов применения (оценка состояния электроприводов колесных пар, состояния железнодорожного полотна участка движения, в т.ч. с учетом погодных условий, по модели путевого развития [107, 111, 113] и прочее), поэтому вопрос поиска недорогих, точных и экономически целесообразных способов определения линейной скорости движения локомотивов остается открытым. В связи с вышеизложенным, а также с учетом условий эксплуатации промышленных электровозов, предложенный вариант модернизации САР является перспективным.

#### **4.9. Обоснование модернизации САР тягового электропривода электровоза НПМ2.**

На данный момент существует 2 версии исследуемого электровоза – НПМ2 и НПМ2М (модернизированный по результатам опытной эксплуатации вариант). Силовые электрические схемы обоих инверторов и механические часть электроприводов одинаковы. Из имеющихся контроллеров инверторов производства ST Microelectronics ST10F269Z2Q6 и Infineon SAK-XC2768X-136F128LR (таблица 4.2), изображенных на рисунках 4.19 и 4.20. Их использование продиктовано дешевизной и отсутствием изначальных жестких требований заказчика к быстродействию и электропотреблению: первый – устарел, поскольку обладает недостаточной для векторного управления вычислительной мощностью. Параметры второго контроллера позволяют адаптировать под его структуру программу векторного управления [122], однако потребуются глубокая оптимизация программы с потерей точности вычислений. При этом речь не идет об интеграции подсистем контроля боксования, защит и контуров взаимодействия между электроприводами колесных осей.

В контроллеры «защита» программа управления, исходный код которой отсутствует. Как уже было описано ранее (глава 3 данной работы) аппаратно в контроллер заведены все сигналы импульсных датчиков скорости тяговых АД, в системе управления для коррекции задания используются только датчики электродвигателей нечетных («ведущих») колесных осей.

Таким образом, четные («ведомые») оси управляются синхронно, в связи с чем при появлении боксования на зависимой оси САР «не чувствует» изменений скорости и тока данного электродвигателя до срабатки максимально-токовой защиты. После срабатки защиты система аварийно отключается, колодки сжимаются, локомотив затормаживается. Для продолжения движения требуется ручной перезапуск системы управления с пульта машиниста.

Таблица 4.2 Сравнительные характеристики микроконтроллеров НПМ2

№ п/п	Название параметра	НПМ2	НПМ2М	Ед. Изм.
1	Производитель контроллера	ST Microelectronics	Infineon	-
2	Тип контроллера	ST10F269Z2Q6	SAK-XC2768X-136F128LR	-
3	Назначение	Промышленные контроллеры	ЭБУ силовых агрегатов транспорта низкого уровня сложности	-
4	Разрядность	16	16/32	Бит
5	Частота процессора	40	128	МГц.
6	Объем оперативной памяти (RAM)	2	90	Кб.
7	Объем флэш-памяти (ROM)	256	1024	Кб.
8	Индекс производительности	20	128	MIPS
9	Количество портов ввода-вывода	До 111	До 118	Шт.

10	АЦП/ЦАП	16 10-битных входов АЦП/ 4 выходных канала ШИМ	До 24 12-битных входов АЦП	-
11	Поддерживаемые интерфейсы связи	CAN, Serial,	CAN, UART, LIN, SPI, I2C, I2S (2 канала)	-
12	Дополнительные функции	Часы-таймер (RTC)	Часы-таймер (RTC), JTAG интерфейс программирования	-
13	Диапазон рабочих температур	от -40 до +125	от -40 до +125	°C

При движении локомотива на сложных участках пути «накатом» (с запасом кинетической энергии) затормаживание приводит к невозможности преодолеть подъем или кривую. Поэтой причине локомотивная бригада вынуждена откатывать состав назад для повторной попытки, такие инциденты срывают график перевозок. Особое влияние на график оказывается в демисезонье и холодный период года.

Такие простейшие недостатки используемой САР объясняются нехваткой производительности контроллеров тяговых электроприводов.

Таким образом, отсутствие в распоряжении автора свободных вычислительных ресурсов контроллеров ТЭП и исходных файлов программы управления делает невозможной модернизацию локомотива без проведения мероприятий в установленном порядке (техзадание, проект, поиск исполнителей и т.д.) с привлечением специализированных организаций.

Модернизация должна включать в себя:

- замену контроллера управление инвертером;
- разработку и установку на новые контроллеры обновленной программы управления;
- настройку системы регулирования с учетом эксплуатационных требований;

Изменения в программе управления инвертером должны включать в себя:

- переход со скалярной на векторную систему управления тягой

- включение всех датчиков скорости ТЭД в САР
- внедрение в САР блока ограничения боксования.



Рисунок 4.14 – Плата контроллера САР инвертера НПМ2 на локомотиве с микропроцессором STM ST10F269Z2Q6





Рисунок 4.15 – Плата контроллера САР инвертера НПМ2М на локомотиве с микропроцессором Infineon SAK-XC2768X-136F128LR

После приемосдаточных испытаний должен быть откорректирован диапазон ограничения скорости проскальзывания. Поскольку коэффициент

сцепления сильно зависит от окружающих условий, установка «среднего» значения может не привести к заметному увеличению ограничения силы тяги. В этом случае необходимо вывести переключатели для подстройки коэффициентов под определенные условия на панель машиниста.

#### **4.10. Выводы по главе 4.**

1. Получены переходные процессы входа в разное боксование для 1 и 2 тележек соответственно.
2. На основании переходных процессов разного боксования доказана существенная потеря тяги локомотива, приводящая к нежелательным последствиям для тягового электропривода, включая в себя ударные механические и токовые нагрузки.
3. Проведенные на динамической компьютерной модели исследования показали, что срыв в разное боксование колесных пар первой тележки приводит к потере управления тягой локомотива и к существенному росту электропотребления тяговых электроприводов и износу механической части привода колесных пар и головок рельсов.
4. Определен режим «устойчивого» боксования без существенного снижения тягового усилия на проскальзывающей колесной паре, при условии ограничения скорости проскальзывания на величину  $s_n$  тягового электродвигателя.
5. На динамической компьютерной модели доказано, что введение в структуру САПР тягового электропривода локомотива регулятора боксования с ограничением на уровне двойного номинального скольжения ТЭД, позволяет сохранить управление локомотивом без существенного увеличения электропотребления. В реальных условиях, это означает снижение износа механических элементов электропривода и рельсовых путей.
6. Проведен анализ эффективности, показано их влияние на энергетическую, экономическую эффективность и производительность локомотива. Описаны имеющиеся стандартные показатели эффективности

работы локомотива, предложено использовать показатель тяговооруженности для оценки производительности локомотива.

7. На динамической компьютерной модели проведен расчет переходных процессов и оценка затрат активной энергии для разгона поезда с НПМ2 в маневровом режиме работы (с выборкой зазоров и без, от 0 до 3 км/ч, равномерное и прямолинейное движение). Среднеквадратичное отклонение составляет 7,5% потребления мощности в маневровом режиме, т.о. обоснован переход на векторное регулирование.

8. Проведен сравнительный анализ конфигураций систем ограничения боксования с датчиками линейной скорости движения поезда, описаны достоинства и недостатки для каждой конфигурации, показана перспективность использования комбинированных систем отслеживания как угловой скорости колесных пар, так и линейной скорости локомотивов в целом

9. Проведен анализ производительности контроллеров инвертера тягового электропривода электровоза НПМ2, обоснована необходимость замены контроллера на более производительный для перехода на векторное управление.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных в диссертационной работе исследований для четырехосного маневрового электровоза НПМ2 разработана новая система автоматического управления электроприводами с использованием боксования, позволяющая повысить управляемость и энергоэффективность локомотива, обеспечивая устойчивую тягу в широком диапазоне условий работы. Данный вывод основывается на следующих результатах:

Проведенные исследования показали

1. Для промышленных маневровых локомотивов на основе актуализированной методики тяговых расчетов составлена математическая и динамическая компьютерная модель расчета сил сопротивления движению подвижного состава, на которой проведен расчет усилий при движении локомотива в составе поезда при различной геометрии путей, рассчитана тахограмма и нагрузочная диаграмма тяговых электроприводов четырехосного маневрового электровоза НПМ2, по результатам расчета установлено, что тяговый электропривод маневрового локомотива работает под переменной нагрузкой, сильно зависящей от профиля пути и окружающих условий, при этом скорость нарастания момента не превышает 0,3 Мн/с;

2. Разработанная динамическая компьютерная модель расчета усилий сопротивления движению подвижного состава по траектории рельсовых путей позволяет проводить распределенный во времени и пространстве (повагонно) расчет сил сопротивления, действующих на сцепном устройстве локомотива и вагонов при движении локомотива в голове поезда. Данная модель может применяться для оценки сил сцепления, нагрузки на эквивалентный электропривод локомотива. Модель может быть рекомендована для расчета сил сопротивления движению маневровых и поездных локомотивов на путях с различной геометрической конфигурацией и условиями окружающей среды.

3. Разработана математическая и динамическая компьютерная модель тягового асинхронного электродвигателя ДТА-350М с короткозамкнутым

ротором, достоверность модели доказана расчетом рабочих характеристик машины при номинальном режиме работы. Среднеквадратичная ошибка не превысила 3,75%.

4. Разработана математическая и динамическая компьютерная модель эквивалентного электропривода по системе ПЧ-АД одной из 4 колесных осей, на которой проведен расчет переходных процессов электропривода четырехосного маневрового электровоза НПМ2 при различных системах регулирования, а также при разгоне поезда с места и выборе зазоров сцепных устройств, полученные диаграммы указывают на скачкообразное изменение момента нагрузки электропривода и кратности момента инерции состава (от 18 для локомотива до 245 при составе массой 1200 т). Результаты моделирования показывают существенный рост коэффициента использования двигателя по току и моменту (до 18%) при переходе на векторное управление;

5. Разработана математическая модель воздействия процессов боксования колесных пар локомотива на тяговый электропривод локомотива, разработана классификация и описаны условия срыва в боксование локомотива в режиме тяги (локомотив в голове поезда), составлены уравнения нагрузок на колесные оси и приведены зависимости сил давления колесных пар на железнодорожные пути от силы сопротивления вагонов, а также зависимости максимальной силы тяги обеих тележек локомотива от силы давления колес на рельсы. Рассмотрены источники и характеристики проскальзывания колеса по рельсу, приведены зависимости максимального коэффициента сцепления от величины относительной скорости проскальзывания при разных линейных скоростях движения локомотива. Установлено, что при ограничении скорости боксования возможно сохранение высокого коэффициента сцепления локомотива, и, следовательно, его тяговооруженности и энергоэффективности;

6. Разработана модель 4-двигательного тягового электропривода четырехосного маневрового электровоза НПМ2, с помощью которой получены переходные процессы при срыве в боксование электроприводов передней

тележки, включая оценку потребляемой системой ПЧ-АД активной мощности. В результате моделирования сделаны выводы о существенном снижении КПД системы электропривода, повышении электропотребления при переходе в разное боксование;

7. Для системы управления тяговыми электроприводами НПС2 разработан регулятор ограничения боксования, уставка по величине которого установлена на уровне номинального скольжения тягового электродвигателя. Проведен анализ эффективности регулятора показал скорость проскальзывания на уровне 0,12 м/с при номинальной скорости движения локомотива 30 км/ч, что незначительно отличается от скорости проскальзывания на кривых минимального радиуса;

8. На 4-двигательной модели тягового электропривода НПС2 с регулятором боксования выполнено исследование и расчет переходных процессов при срыве в боксование с ограничением скорости проскальзывания («рабочее» боксование). На основе полученных процессов сделан вывод об отсутствии срыва сцепления, эффективном использовании электроэнергии и снижении износа в системе «электропривод-колесная пара-головка рельса».

9. Описано влияние предложенных решений на экономическую, энергоэффективность и производительность локомотива. Рассмотрены типовые показатели эффективности работы локомотивов, для оценки производительности предложен показатель тяговооруженности поезда, отражающий соотношение силы тяги локомотива к весу поезда.

10. Проведен расчет затрат активной энергии для разгона поезда с НПС2 в маневровом режиме работы. Величина среднеквадратичного отклонения энергозатрат 7,5% указывает на снижение потребления мощности при векторном регулировании, подтверждая обоснованность модернизации САУ.

11. Рассмотрены технологии определения скорости движения локомотива, дана сравнительная характеристика достоинств и недостатков примененных систем датчиков измерения угловой скорости колесных пар и линейной

скорости движения локомотивов, обоснована оптимальность принятого технического решения.

12. Обоснована необходимость модернизации аппаратной части локомотива (замены контроллера инвертера ПЧ тягового электропривода) для перехода на векторное управление и включения в САР регулятора боксования.

13. Разработанная компьютерная модель асинхронного тягового электродвигателя может быть рекомендована для расчета рабочих характеристик других асинхронных двигателей и применяться в составе моделей иных электроприводов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение № RU 183797 U1 Российская Федерация. Устройство для предотвращения буксования локомотива. Антипин Д. Я, Воробьев В. И., Пугачев А. А. и др / Патентообладатель ФГБОУ «Брянский государственный технический университет». 2016 г.
2. Патент на изобретение № RU 2446063 C2 Российская Федерация. Способ управления тяговым электроприводом локомотива на пределе по сцеплению колес с рельсами / Федяева Г. А., Федяев Н. А., Матюшков С. Ю. и др.; Патентообладатель ФГБОУ «Брянский государственный технический университет». 2010 г.
3. Патент на полезную модель № RU 2270766 C2 Российская Федерация. Способ предупреждения буксования и юза колесных пар и подавления фрикционных автоколебаний в кинематической цепи подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями / Федяева Г. А., Федяев В. Н., Власов А. И. и др.; Патентообладатель ФГБОУ «Брянский государственный технический университет». 2004 г.
4. Патент на полезную модель № RU 161280 U1 Российская Федерация. Система регулирования асинхронного тягового электропривода локомотива на пределе по сцеплению колес с рельсами / Федяева Г. А., Тарасов А. Н., Смородова Т. В и др.; Патентообладатель ФГБОУ «Брянский государственный технический университет». 2014 г.
5. Пугачев, А. А. Система управления тяговым асинхронным двигателем с минимизацией мощности потерь / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, А. С. Космодамианский // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2(46). – С. 55. – EDN UJJZMT.
6. Патент на полезную модель № RU 194613 U1 Российская Федерация. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Воробьев В. И., Измеров О. В, Пугачев А. А., Космодамианский А. С. и др.; Патентообладатель Космодамианский Андрей Сергеевич. 2019 г.

7. Патент на полезную модель № RU 171 080 C1 Российская Федерация. Устройство для предотвращения боксования локомотива / Воробьев В. И., Антипин Д. Я, Пугачев А. А. и др.; Патентообладатель ФГБОУ «Брянский государственный технический университет». 2015 г.

8. Патент на изобретение № RU 2360805 C2 Российская Федерация. Устройство для измерения скорости и обнаружения боксования и юза транспортного средства / Зорин В. И., Шухина Е. Е., Кисельгоф Г. К., и др.; Патентообладатель ООО "Транспортные системы безопасности и АЛС" (ООО "СБ-ТРАНС-АЛС"). 2009 г.

9. Бакланов, А. А. Анализ особенностей новых электровозов постоянного тока 2ЭС6, 2ЭС10, ЭП2К и учет их в эксплуатации / А. А. Бакланов, А. П. Шиляков, Е. А. Бардала [и др.] // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : Материалы научно-практической конференции, Омск, 07 февраля 2014 года / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2014. – С. 29-39. – EDN SWXXAX.

10. Буйносов, А. П. Перспективные локомотивы на промышленных предприятиях / А. П. Буйносов, С. И. Лаптев // Инновационный транспорт - 2016: специализация железных дорог: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященная 60-летию основания Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, 17 ноября 2016 года / Ответственный за выпуск С. В. Бушуев. Том Выпуск 8 (227). – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 213-219. – EDN YOJPHR.

11. Андрющенко, А. А. Новый магистральный грузовой электровоз 2ЭС5С / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 5-9. – EDN YURPJR.

12. Марченко, А. В. Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5 / А. В. Марченко, К. П. Солтус // Локомотив. – 2013. – № 1(673). – С. 40-44. – EDN PXTMEB.
13. Электровоз 2ЭС5. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Основные параметры и характеристики электровоза. Электрические схемы – Новочеркасск, 2014 – 110 с.
14. Силовые цепи электровозов 2ЭС10 "Гранит" // Локомотив. – 2019. – № 6(750). – С. 21-23. – EDN ZXTMRF.
15. Осинцев, И. А. Устройство и эксплуатация электровоза 2ЭС10: учебное пособие по профессии 23.01.09 "Машинист локомотива" / И. А. Осинцев, А. А. Логинов. — Москва: Российские железные дороги, 2015. — 331, [1] с.: ил., схемы: 21 см.; ISBN 978-5-89035-786-1.
16. Осинцев, И. А. Электрическая схема электровоза 2ЭС10 "Гранит" / И. А. Осинцев // Локомотив. – 2021. – № 3(771). – С. 22-27. – EDN URVCAY.
17. Осинцев, И. А. Электровоз 2ЭС10 "Гранит": тяговый привод и электрические машины / И. А. Осинцев // Локомотив. – 2022. – № 1(781). – С. 21-23, 26. – EDN KZXSTS.
18. Электровоз 2ЭС10. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Основные параметры и характеристики электровоза. Электрические схемы – Новочеркасск. 2010. – 98 с.
19. Электровоз НПМ2. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Основные параметры и характеристики электровоза. Электрические схемы – Новочеркасск. 2013. – 110 с.
20. Электровоз НПМ2. Руководство по эксплуатации. Книга 3. Электрические машины – Новочеркасск. 2013. – 90 с.
21. Электровоз НПМ2. Руководство по эксплуатации. Книга 5. Преобразователи – Новочеркасск, 2013. – 110 с.
22. Сидяков, В. А. Актуализация правил тяговых расчетов на промышленном железнодорожном транспорте: Методическое пособие (к СП 37.13330.2012 «СНиП 2.05.0791\* Промышленный транспорт» / В.А. Сидяков,

Л.А. Андреева, А.Г. Колчанов, И.П. Потапов, Н.И. Карганова, А.В. Ватинов, В.Е. Сидяков, И.Т. Демченко, В.П. Глухман. Москва 2016. – 95 с.

23. Ромен, Ю. С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо - рельс при движении поезда в кривых / Ю. С. Ромен // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 1. – С. 17-26. – EDN TOLHQR.

24. Resende, L. P. Railway trajectory modeling for simulation of locomotives drive systems / L. P. Resende, L. T. F. W. Silva, M. A. Tomim // 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, Brazil, 2017, – Pp. 1-8, doi: 10.1109/COBEP.2017.8257381.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618026 Российская Федерация. Расчет нагрузки локомотива по траектории движения поезда: № 2019616868: заявл. 05.06.2019: опубл. 26.06.2019 / В. О. Танич, С. С. Енин, Е. Я. Омельченко, А. В. Белый.

26. Коптилов, В. И. Сила тяги локомотива и её теоретическое обоснование / В. И. Коптилов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2017. № 11. – С. 31-35.

27. Руднев, В. С. Основы тяги поездов. Сила тяги и тяговые характеристики локомотивов / В. С. Руднев // Локомотив. – 2017. – № 12(732). – С. 21-25. – EDN ZVRVHX.

28. Бондарев, Д. В. Повышение касательной силы тяги путём модернизации нового электровоза НПМ2 на Магнитогорском металлургическом комбинате / Д. В. Бондарев, А. Д. Кольга // Добыча, обработка и применение природного камня: Сборник научных трудов Международной технической конференции, Екатеринбург, 24–26 апреля 2018 года / Под редакцией Г. Д. Першина. – Екатеринбург: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2018. – С. 117-120. – EDN ZCDDVR.



29. Марков, Д. П. Теоретические основы трения и изнашивания / Д. П. Марков // Трибология - машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции, Москва, 14–16 октября 2020 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2020. – С. 165-170. – EDN DNVWXJ.

30. Markov, D. P. Adhesion at friction and wear / D. P. Markov // Friction. – 2022. – DOI 10.1007/s40544-021-0564-7. – EDN GGWSOO.

31. Марков, Д. П. Трение и сцепление при взаимодействии колеса с рельсом / Д. П. Марков // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 3. – С. 229-237. – EDN KWFAXT.

32. Марков, Д. П. Трибология железнодорожной тележки / Д. П. Марков // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77, № 4. – С. 230-240. – DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-4-230-240. – EDN XWOSWT.

33. Chen, H. Adhesion characteristic of wheel–rail under various medium intervention conditions / H. Chen // In Proceedings of the 12th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2022), Melbourne, Victoria, Australia, 2022, September 4-7, – Pp. 9.

34. Markov, D. P. Tribological studies for developing friction modifiers in the wheel–rail system / S. M. Zakharov, D. P. Markov, A. V. Ovechkin // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36, No. 6. – Pp. 468-475. – DOI 10.3103/S1068366615060173. – EDN WRETYD.

35. Захаров, С. М. Трибологические исследования для разработки модификаторов трения в системе "колесо-рельс" / С. М. Захаров, И. Г. Горячева, А. П. Краснов [и др.] // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 6. – С. 611-620. – EDN VINNPT.

36. Марков, Д. П. Геометрия на железной дороге / Д. П. Марков // Взаимодействие науки и общества в контексте междисциплинарных

исследований: Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Калуга, 20 декабря 2023 года. – Уфа: ООО "Аэтерна", 2023. – С. 7-11. – EDN GVCBQM.

37. Ran, X. Dynamic identification of coupler force of heavy haul locomotive: An effective and long-term intelligent measurement method, Engineering Applications of Artificial Intelligence / X. Ran, S. Chen, B. Xie, K. Wang // Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 133, Part E, 2024, 108478, ISSN 0952-1976, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108478>.

38. Малышков, Г. М. Особенности режима кодового широтно-импульсного регулирования в инверторах / Г. М. Малышков, В. В. Крючков, М. А. Чудесников, С. Н. Алдокимов // Практическая силовая электроника. – 2008. – № 1(29). – С. 12-19. – EDN KVRTWZ.

39. Омельченко, Е. Я. Динамические математические модели асинхронных двигателей: Монография / Е. Я. Омельченко. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2012. 157 с.- Деп. в ВИНТИ 22.03.2012, № 104-B2012.

40. Rai, T. Generalized modeling model of three phase induction motor / T. Rai, P. Debr // 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), Nagercoil, India, 2016, – Pp. 927-931, doi: 10.1109/ICEETS.2016.7583881.

41. Zhurov, I. Modeling of a Diesel Locomotive Induction Motor Drive with the Field-oriented Control when Operating in a Limited Voltage and High Rotation Frequency Mode / I. Zhurov, S. Bayda, S. Florentsev // 2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives, IWED 2021 - Proceedings: 28, Moscow, 27–29 января 2021 года. – Moscow, 2021. – Pp. 9376322. – DOI 10.1109/IWED52055.2021.9376322. – EDN DHNOHB.

42. Сарваров, А. С. Магнитодвижущие силы трёхфазных обмоток асинхронных машин / А. С. Сарваров, Е. Я. Омельченко // Электротехника. – 2013. – № 1. – С. 31-35. – EDN PMSMCF.

43. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: монография / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000 г. 654 с. ISBN 5-7691-1111-9.

44. Омельченко, Е. Я. Снижение пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности фазных напряжений / Е. Я. Омельченко, А. Б. Лымарь, В. О. Танич, М. Ю. Петушков // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 2(47). – С. 47-54. – DOI 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54. – EDN DYQJGL.

45. Zhurov, I. Field-Oriented Control of the Induction Motor as Part of the Shunting Locomotive Powertrain Considering Core Losses and Magnetic Saturation / I. Zhurov, S. Bayda, S. Florentsev // 2022 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED), Moscow, Russian Federation, 2022. – Pp. 1-6, doi: 10.1109/IWED54598.2022.9722586.

46. Виноградов, А. Б. Учёт потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 57-61. – EDN HYISPR.

47. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617766 Российская Федерация. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: 2014615416: заявл. 03.06.2014: опубл. 20.08.2014 / Е. Я. Омельченко, О. А. Тележкин, В. О. Моисеев, С. С. Енин. ОБПБТ.

48. Umar, M. F. Design and simulation of a 3-phase induction motor drive based on indirect rotor field orientation using MATLAB Simulink tool / M. F. Umar, M. N. Akbar, S. M. R. Kazmi // 2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG), Mirpur Azad Kashmir, Pakistan, 2018, – Pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPESG.2018.8384497.

49. Omelchenko, E. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor / E. Omelchenko, T. Khramshin, V. Tanich, I. Kozhevnikov // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2019, – Pp. 59-63, doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915408.
50. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. - учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности 140604 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" направления подготовки 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии". – Москва: Академия, 2006. – (Высшее профессиональное образование. Электротехника). – EDN QMJAEX.
51. Зарифьян, А. А. Моделирование тягового электропривода локомотива в ПК "MATLAB/Simulink" / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян, В. В. Сироткин // Транспорт: наука, образование, производство : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 года. Том 1. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 131-135. – EDN YSNZfq.
52. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А Сыромятников. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
53. Gouda, E. Estimation of equivalent circuit parameters of induction motor based on FEM with modelling and experimental verification / E. Gouda, M. El-Hayes, S. Abdelkader and G. A. El-Salam // 2017 19th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2017, – Pp. 1440-1446, doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301372.
54. Zhurov, I. Parameters Estimation Technique of the Induction Motor Electric Drive With the Field-Oriented Control Tacking Into Account Core Losses / I. Zhurov, S. Bayda, S. Florentsev // 2022 International Ural Conference on Electrical

Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, – Pp. 164-169, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906667.

55. Omelchenko, E. Calculation of the Traction Induction Motor Performance Characteristics Using a Dynamic Computer Model / E. Omelchenko, V. Tanich, A. Sarvarov // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2024, – Pp. 730-734, doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718962.

56. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614457 Российская Федерация. Динамическая математическая модель системы "преобразователь частоты - асинхронный двигатель" со скалярной замкнутой системой регулирования: № 2015611088: заявл. 25.02.2015: опубл. 20.05.2015 / Е. Я. Омельченко, С. А. Линьков, О. А. Тележкин, Я. В. Проскурин.

57. Власьевский, С. В. Сравнение процессов буксования электровозов переменного тока с асинхронным и коллекторным приводом / С. В. Власьевский, Л. В. Бузмакова // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2017. – № 13. – С. 15-18. – EDN ZWKVTR.

58. Zhou, H. A Modeling Method for the Driving Process of Heavy-Haul Train Based on Multi-Mass Model / A Modeling Method for the Driving Process of Heavy-Haul Train Based on Multi-Mass Model // in IEEE Access, vol. 8, – Pp. 185548-185556, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029965.

59. Omelchenko, E. The Operation Researching of a Traction Asynchronous Electric Drive in the Electric Locomotive on a Dynamic Model / E. Omelchenko, V. Tanich and A. Lyman // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2020, – Pp. 44-49, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234347.

60. Пугачев, А. А. Моделирование тягового электропривода локомотива с опорно-осевым подвешиванием двигателя / А. А. Пугачев // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 09–12 июня 2015 года:

Новосибирский государственный технический университет Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Том Часть 1. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2015. – С. 130-133. – EDN TZAFWX.

61. Шрейнер, Р. Т. Оптимизация асинхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярной системой управления / Р. Т. Шрейнер, А. В. Костылев, С. И. Шилин, А. И. Хабаров. М.: Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 25а-29. – EDN PBEAFJ.

62. 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. – EDN TXOYNL.

63. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. — 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 304 с.

64. Поляков, В. Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В. Н. Поляков; В. Н. Поляков, Р. Т. Шрейнер ; под ред. Р. Т. Шрейнера. М.: М-во образования и науки Российской Федерации, ФГАОУ ВПО "Уральский федеральный ун-т им. Б. Н. Ельцина, ФГАОУ ВПО "Российский гос. проф.-пед. ун-т" Учреждение Российской акад. образования "Уральское отделение". – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 222 с. – ISBN 978-5-9615-0006-6. – EDN QMLUJV.

65. Zhurov, I. Design Features of an Induction Motor Based Traction Electric Drive with Field-Oriented Control / I. Zhurov, S. Bayda, S. Florentsev and P. Rozkariaka // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russian Federation, 2024, – Pp. 1260-1265, doi: 10.1109/PIERE62470.2024.10804988.

66. Гибадуллин, И. Х. Моделирование пуско-тормозных режимов замкнутой астатической скалярной САР скорости системы ПЧ-АД в программе

MATLAB / И. Х. Гибадуллин, А. А. Лебедев, В. А. Буланов, С. А. Линьков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 19–23 апреля 2021 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – С. 240. – EDN JBOKTI.

67. He, Z. Research on the influence of coupler on heavy haul locomotive dynamics / Z. He, S. Luo and W. Ma // 2010 International Conference On Computer Design and Applications, Qinhuangdao, China, 2010, – Pp. V3-287-V3-290, doi: 10.1109/ICCDA.2010.5540759.

68. Sovička, P. Development of an advanced locomotive simulator / P. Sovička, M. Pácha and P. Rafajdus // 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE), Budapest, Hungary, 2017, – Pp. 1-5, doi: 10.1109/IYCE.2017.8003752.

69. Фомин, Н. В. Параметрирование преобразователей "Simoreg" и "Simover": Электронное издание: учебное пособие / Н. В. Фомин, Е. Я. Омельченко, В. В. Шохин, Ю. В. Мерзляков. М.: Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – электронный ресурс – EDN YWGTKZ.

70. Омельченко, Е. Я. Преобразователи частоты Simanics / Е. Я. Омельченко, В. О. Моисеев, С. С. Енин. М.: Магнитогорск: Издательство Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова, 2015. – 195 с. – ISBN 978-5-9967-0742-3. – EDN VTJSTX

71. Zhang, H. The key technology to speed sensor-less vector control of locomotive traction / H. Zhang, W. Wu and T. Sun // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, NSW, Australia, 2017, – Pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056158.

72. Mătuşa, T. Behavior of a Traction Induction Motor with Rotor Flux-Oriented Control / T. Mătuşa, M. Popescu, A. Bitoleanu, C. V. Suru // 2024

International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, 2024, – Pp. 1-6, doi: 10.1109/ICATE62934.2024.10748990.

73. Popescu, M. New Achievements in the Rotor Field-Oriented Control for Autonomous Locomotives: Part 1: System synthesis and theoretical investigations / M. Popescu and A. Bitoleanu // 2021 7th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, Romania, 2021, – Pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEEE53383.2021.9628690.

74. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. М.: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – Иваново, 2008. – 320 с. – ISBN 978-5-89482-579-3. – EDN NREFIB.

75. Щербаков, Д. А. Квазиоптимальная по минимуму потерь система скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода / Д. А. Щербаков, В. Н. Поляков // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института, Екатеринбург, 21–25 мая 2018 года / ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2018. – С. 242-245. – EDN YYBTKX.

76. Иньков Ю. М. Повышение энергоэффективности тяговых электроприводов с асинхронными двигателями и системой векторного управления / Ю. М. Иньков, А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев, С. В. Морозов // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 10-15. – EDN PWFKBX.

77. Raluca-Cristina, N. Investigation of Idle Running and Short-Circuit Performance Improvement for an Asynchronous Traction Motor / N. Raluca-Cristina, V. Ion, N. Marian-Ştefan and E. Sorin // 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, – Pp. 1-6, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905795.

78. Омельченко, Е. Я. Анализ работы регуляторов тока / Е. Я. Омельченко, В. О. Моисеев, О. А. Тележкин // Вестник Магнитогорского



государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 4(44). – С. 81-85. – EDN RMRMJH.

79. Омельченко, Е. Я. Процесс боксования четырехосного маневрового электровоза с тяговым электроприводом по системе "преобразователь частоты - асинхронный двигатель" / Е. Я. Омельченко, В. О. Танич, А. Б. Лымарь // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 3(56). – С. 28-35. – DOI 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-28-35. – EDN GTOOAB.

80. Omelchenko, E. Skidding Process Research for a Four-Axle Shunter Electric Locomotive with a Traction Electric Drive "Frequency Converter - Asynchronous Drive" / E. Omelchenko, V. Tanich, A. Lyman // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 261-266, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906624.

81. Chen, H. Survey on occurrence of wheel slip/slide in mountain service line / H. Chen, T. Furuya, S. Fukagai, S. Saga // 12th World Congress on Railway Research (WCRR), railway research to enhance the customer experience, 28 October-1 November 2019, Tokyo, Japan, Railway Technical Research Institute, Tokyo, Japan.

82. Wang, S. Adhesion Control of Heavy-Duty Locomotive Based on Axle Traction Control System / S. Wang, W. Zhang, J. Huang, Q. Wang P. Sun // in IEEE Access, vol. 7, – Pp. 164614-164622, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952268.

83. Шилин, Н. Д. Исследование проскальзывания колесных пар грузовых электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / Н. Д. Шилин, С. Н. Прокофьев // Железная дорога: путь в будущее: Сборник материалов I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 года. – Москва: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2022. – С. 201-206. – EDN IXXWTS.

84. Omelchenko, E. A Four Axle Shunting Electric Locomotive Control System Based on Inverter-Induction Motor Technology with Account of Slipping / E. Omelchenko, V. Tanich and D. Kabanov // 2023 Russian Workshop on Power

Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, – Pp. 108-112, doi: 10.1109/PEAMI58441.2023.10299918.

85. Pichlík, P. Analysis of the Locomotive Wheel Slip Controller Operation During Low Velocity / P. Pichlík and J. Bauer // in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 3, – Pp. 1543-1552, March 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.2971832.

86. Ляпушкин, Н. Н. Моделирование процесса сцепления колеса локомотива с рельсом / Н. Н. Ляпушкин, А. Н. Савоськин, А. А. Чучин // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 6(31). – С. 50-53. – EDN LUMVQG.

87. Yamashita, M. Anti-slip re-adhesion control method for increasing the tractive force of locomotives through the early detection of wheel slip convergence / M. Yamashita and T. Soeda // 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), Geneva, Switzerland, 2015, – Pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2015.7311756.

88. Van de Merwe, C. V. Estimation of Locomotive Adhesion Coefficients and Slip Ratios / C. V. van de Merwe and J. D. Le Roux // 2023 American Control Conference (ACC), San Diego, CA, USA, 2023, – Pp. 2252-2257, doi: 10.23919/ACC55779.2023.10155953.

89. Can, K. Adhesion control method based on optimal slip velocity searching and tracking / K. Can, H. Jingchun, D. Wenqi and W. Xiaokang // 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Changsha, China, 2019, – Pp. 1200-1207, doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101798.

90. Rahaman, ML. An investigation into the effect of slip rate on the traction coefficient behaviour with a laboratory replication of a locomotive wheel rolling/sliding along a railway track / ML. Rahaman, E. Bernal, M. Spiryagin, C. Bosomworth, B. Sneath, Q. Wu, C. Cole T. McSweeney // Centre for Railway Engineering, Central Queensland University, Rockhampton, Qld, Australia. 2023.

91. Самме, Г. В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива: Монография / Г. В. Самме. – Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 104 с. – ISBN 978-5-89035-706-9. – EDN VETOCF.
92. Самме, Г. В. Характеристики сцепления и поведение моторно-колесных блоков электровоза при боксовании / Г. В. Самме, В. А. Яковлев // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 3. – С. 16-26. – EDN KYUNMZ.
93. Самме, Г. В. Новые результаты в теории сцепления локомотива / Г. В. Самме // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3(28). – С. 14-16. – EDN SYSRBB.
94. Власьевский, С. В. Сравнение расчетных сил тяги по сцеплению электровозов переменного тока с асинхронным и коллекторным приводом / С. В. Власьевский, О. А. Малышева, О. В. Мельниченко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – № 5. – С. 30-36. – EDN YNWBKP.
95. Pichlík, P. Comparison of locomotive adhesion force estimation methods for a wheel slip control purpose / P. Pichlík and J. Zděnek // Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Targoviste, Romania, 2017, – Pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI.2017.8166502.
96. He, J. Anti-slip strategy of locomotives using improved adhesion characteristic curve slope method / J. He, B. Dou, C. Zhang, L. Liu and X. Yin // 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, China, 2017, – Pp. 855-860, doi: 10.1109/CAC.2017.8242885.
97. Saini, S. Adhesion estimation based novel approach to control wheel slip in electric locomotives / S. Saini and G. S. Bhawaria // 2022 International Young Engineers Forum (YEF-ECE), Caparica / Lisbon, Portugal, 2022, – Pp. 20-24, doi: 10.1109/YEF-ECE55092.2022.9849915.
98. Ishrat, T. Wheel slip control based on traction force estimaton of electric locomotives / T. Ishrat, G. Ledwich, M. Vilathgamuwa and P. Borghesani // 2016

Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, Australia, 2016, – Pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2016.7749331.

99. Омельченко, Е. Я. Динамические математические модели асинхронных двигателей / учебное пособие / – Вологда: ООО «Изд-во Инфа-Инженерия», 2025. – 160 с. ISBN 978-5-9967-0185-8.

100. Савоськин, А. Н. Анализ управления скольжением колесных пар грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями / А. Н. Савоськин, Н. Д. Шилин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81, № 3. – С. 230-239. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-3-230-239. – EDN CECENC.

101. Бурэн-Итгэл, Г. Моделирование динамических процессов электропривода при потере сцепления колесной пары / Г. Бурэн-Итгэл // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать второй Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3-х томах, Москва, 25–26 февраля 2016 года. Том 2. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 142. – EDN WJPDUF

102. Власьевский, С. В. Сравнение энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторным и асинхронным приводом / С. В. Власьевский, Д. В. Грибенюк, М. С. Алексеева // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2016. – № 12. – С. 24-27. – EDN XDBOUN

103. Бакланов, А. А. Анализ тягово-энергетической эффективности новых электровозов / А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиляков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 70-80. – EDN YTEPVO.

104. Омельченко, Е. Я. Мощность в многофазных цепях / Е. Я. Омельченко, С. С. Енин, В. О. Танич // Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015)", Екатеринбург, 05–09 октября 2015 года / ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; – Екатеринбург, 2015. – с. 79-82. – EDN VOOYOR.

105. Курбасов А. С. Эксплуатационный КПД электровозов как показатель эффективности их использования / А. С. Курбасов // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3-4(40-41). – С. 39-41. – EDN PBZHWJ.

106. Харисов, И. Р. Законы и способы управления тяговым усилием электроприводов магистрального электровоза / И. Р. Харисов, А. Л. Карякин // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 4(57). – С. 60-68. – DOI 10.18503/2311-8318-2022-4(57)-60-68. – EDN DTHOHM.

107. Evans, L. Monitoring speeding using GPS data to inform road safety initiatives / L. Evans // 2023 Australasian Road Safety Conference, 09.2023, Cairns, Queensland, Australia, Australasian College of Road Safety, T: Mawson, S: ACT, C: Australia – Pp. 309.

108. Патент на изобретение № RU 2808863 C1 Российская Федерация. Способ и система определения скорости локомотива и направления движения / Чернявец В. В. Патентообладатель Чернявец В. В. 2023 г.

109. Яицков, И. А. Способ увеличения точности определения линейной скорости движения подвижного состава путем радиолокационного метода / И. А. Яицков, П. Ю. Коновалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 8. – С. 590-596. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-8-590-591. – EDN AVERRR.

110. Патент на изобретение № RU 2526730 C2 Горохов А.А. «Анализатор параметров движения локомотива». Патентообладатель Горохов А.А. 2012 г.

111. Karlovsky, P. Wheel slip determination capability of locomotive driven by model predictive control / P. Karlovsky and J. Bauer // 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest, Hungary, 2018, – Pp. 1-6, doi: 10.1109/PEMC41159.2018.8994818.

112. Wen, X. Anti-Slip Re-Adhesion Control Strategy of Electric Locomotive Based on Distributed MPC / X. Wen, J. Huang and S. Zhang // 2019 IEEE 21st International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 17th International Conference on Smart City; IEEE 5th International

Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS), Zhangjiajie, China, 2019, – Pp. 2708-2713, doi: 10.1109/HPCC/SmartCity/DSS.2019.00380.

113. Kersbergen, B. Distributed model predictive control for railway traffic management / K. Bart, van den B. Ton, De S. Bart // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 68, 2016, – Pp. 462-489, ISSN 0968-090X.

114. Воронова, Ю. В. Системный анализ тяговооруженности состава на перевальных участках ВСЖД / Ю. В. Воронова, Н. П. Рычков, Е. Г. Санникова // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2016. – Т. 2. – С. 586-588. – EDN WHUPWX.

115. ГОСТ Р 56046-2014 Национальный стандарт Российской Федерации «Показатели использования локомотивов. Термины и определения»

116. Зарифьян, А. А. Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 1. – С. 77-92. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92. – EDN SDVHVR.

117. Зарифьян, А. А. Расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе электровоза при изменяющейся нагрузке / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 2. – С. 81-91. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-2-81-91. – EDN LBFNXD

118. Байбичян, В. В. Оптимизационная задача для асинхронного тягового двигателя / В. В. Байбичян, П. Г. Колпахчян, А. В. Костюков // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2023 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 180-183. – EDN ЕМКТАІ.

119. Арепьев, К. А. Разработка методики оценки соответствия данным эксплуатационной документации характеристик взлета современных

магистральных самолетов / К. А. Арепьев, Г. Е. Масленникова, Р. Р. Тажетдинов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2017. – № 19(330). – С. 54-63. – EDN YKHUXO.

120. Шилин, Н. Д. Разработка алгоритмов повышения тяговых и сцепных свойств электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / Н. Д. Шилин, С. Н. Прокофьев // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт : Сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 года. – Щербинка: АО "ВНИИЖТ", 2021. – С. 209-213. – EDN ALDUWC.

121. Шилин, Н. Д. Поосное перераспределение силы тяги для электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / Н. Д. Шилин, С. Н. Прокофьев // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81, № 2. – С. 148-156. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156. – EDN NPNNOE.

122. Анучин, А. С. Отечественный микроконтроллер K1921BK01T для управления электродвигателями / А. С. Анучин, А. С. Жарков, В. Ф. Козаченко [и др.] // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2016. – № 1(151). – С. 80-95. – EDN VOSLMN.

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник электровозного депо  
цеха подвижного состава  
ООО «Ремпуть»  
/ Агутин А.В. /  
«20.04» 2025 г.



### АКТ

об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Танича Василия Олегович**

научный руководитель – профессор кафедры автоматизированного  
электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова» докт. техн. наук,  
Омельченко Е.Я.

Настоящим документом подтверждается принятие к использованию результатов диссертационного исследования Танича В.О. в ООО «Ремпуть» для модернизации и проектирования электроприводов локомотивов

Соискателем Таничем В.О. был разработан и исследован **способ модернизации системы управления тяговыми электроприводами промышленного маневрового электровоза с асинхронным тяговым электроприводом по системе ПЧ-АД.**

Перечень передаваемых результатов диссертационной работы:

- компьютерная программа (модель) для расчета нагрузок локомотива по траектории движения поезда, позволяющая оценивать возникающие усилия сопротивления движению железнодорожного состава при прохождении участков пути в кривых, с наклоном, с учетом типов, характеристик и количества вагонов как суммарно, так и для каждой составляющей единицы подвижного состава поезда;

- динамическая компьютерная модель тягового электропривода НПМ2, выполненного по схеме ПЧ-АД, отличающаяся высокой степенью достоверности (среднеквадратичная ошибка 3,75%) и позволяющая выполнять исследования работы самого привода совместно с его системой управления в различных условиях, имитирующих режимы работы локомотива;

- структура регулятора ограничения боксования, предназначенная для встраивания в систему управления тяговых электроприводов локомотива и позволяющая перейти от предотвращения **разносного** боксования колесных пар к ограничению проскальзывания в пределах диапазона **рабочего** боксования.



- компьютерная модель расчета сил сопротивления движению поезда по траектории, компьютерная модель тягового электропривода по системе ПЧ-АД с различными системами управления и физической обратной связью по скорости, позволяющая проводить расчеты режимов работы оборудования локомотивов при различных конфигурациях железнодорожных путей и составов поездов.

Применение регулятора ограничения боксования в САР тяговых электроприводов четырехосного маневрового электровоза позволяет реализовать максимальную доступную силу тяги по условиям сцепления, уменьшая электропотребление и износ механической части тяговых электроприводов, бандажей колес и головок рельсов.

Согласовано:

Ведущий инженер-электроник  
цеха подвижного состава  
ООО «Ремпуть»



/ Д.А. Кабанов /