

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей»

(наименование)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Проектирование и эксплуатация силовых установок для автомобилей специального
назначения

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Влияние характеристик электродвигателя на работу самоходного сталеваза 450
тонн конвертера ККЦ»

Обучающийся

А.А. Красильникова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

канд. тех. наук, доцент А.С. Тизиллов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Обзор литературы и теоретические основы.....	8
1.1 История развития самоходных сталевозов.....	8
1.2 Конструктивные особенности самоходных сталевозов на 450 тонн.....	10
1.3 Основные характеристики электродвигателей применяемых в самоходных сталевозах.....	14
1.4 Взаимосвязь характеристик электродвигателя и эффективности работы самоходного сталевоза.....	16
1.5 Проблематика существующих решений и обоснование необходимости дальнейших исследований.....	19
1.6 Сравнительный анализ современных типов электродвигателей (асинхронные, синхронные, двигатели постоянного тока).....	19
1.7 Определение требований к новым двигателям: мощность, крутящий момент, диапазон скоростей, допустимые перегрузки.....	24
1.8 Подбор возможных производителей и моделей двигателей сталевозов, соответствующих требованиям.....	26
2 Методология исследования.....	32
2.1 Постановка задачи исследования.....	32
2.2 Изучение технической документации на существующий электродвигатель.....	33
2.3 Сбор данных о режимах работы сталевоза: частота пусков/остановок, продолжительность рабочих циклов, условия окружающей среды.....	36
2.4 Оценка износа и текущего состояния двигателя.....	37
2.5 Выявление проблемных зон и факторов, влияющих на надежность и долговечность двигателя.....	39
3 Экспериментальная часть.....	45
3.1 Характеристика применяемого оборудования и материалов для исследования.....	45

3.2 Методика проведения эксперимента.....	46
3.2.1 Составление детализированной таблицы производственного цикла сталевого требует предварительного хронометража всех технологических операций.....	47
3.2.2 Расчет статических моментов.....	53
3.2.3 Определение динамического момента.....	53
3.2.4 Проверка двигателей по условиям нагрева.....	54
3.2.5 Расчет максимального момента, развиваемого двигателем.....	55
4 Результаты экспериментальных исследований.....	58
4.1 Исследование влияния мощности электродвигателя на производительность самоходного сталевого.....	58
4.2 Изучение зависимости динамики разгона/торможения от типа и характеристик электродвигателя.....	61
4.3 Оценка энергопотребления самоходного сталевого в зависимости от режимов работы электродвигателя.....	62
4.4 Анализ тепловых процессов в электродвигателе при различных нагрузках.....	64
5 Практические рекомендации и перспективы дальнейшего развития.....	70
5.1 Выводы по результатам проведенных исследований.....	70
5.2 Предложения по модернизации конструкции самоходного сталевого с учетом полученных данных.....	73
5.2.1 Принципиальные схемы подключения преобразователя частоты SINAMICS G120.....	87
5.2.2 Ввод в эксплуатацию преобразователя частоты SINAMICS G120..	91
5.3 Экономический эффект от внедрения предложенных рекомендаций..	109
5.4 Перспективы дальнейшего совершенствования системы управления электродвигателями самоходных стальных.....	114
Заключение.....	127
Список используемых источников.....	129

Введение

Металлургическая отрасль нуждается в мощном оборудовании, выдерживающем экстремальные производственные нагрузки. Самоходные сталевозы играют незаменимую роль при перемещении расплавленного металла между конвертерным и разливочным участками. Бесперебойная работа предприятий металлургического комплекса во многом определяется надежностью электромоторов, установленных на транспортных агрегатах для перевозки жидкой стали.

Целью данного исследования является изучение влияния различных характеристик электродвигателей на работу самоходного сталевоза грузоподъемностью 450 тонн, используемого на конвертере кислородно-конвертерного цеха (ККЦ).

Оптимизация технических решений электродвигателей сталевозов требует тщательного анализа множества параметров. Мощностные характеристики, величина крутящего момента и скоростные режимы определяют эффективность работы агрегатов. Детальное изучение тепловых процессов и коэффициента полезного действия позволяет минимизировать эксплуатационные расходы. Комплексная оценка технических параметров обеспечивает надежность и долговечность оборудования при максимальной производительности.

Рациональное управление энергетическими системами промышленных предприятий приобретает актуальность при стремлении к сокращению производственных затрат. Внедрение усовершенствованных методов контроля электроприводов позволяет существенно снизить энергопотребление и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Практическое применение полученных данных открывает возможности для создания методических указаний по подбору электродвигателей с учетом специфики условий работы, а также модернизации действующих приводных систем самоходных сталевозов.

Объект исследования: Самоходный сталеvoz грузоподъемностью 450 тонн, используемый на конвертере кислородно-конвертерного цеха (ККЦ).

Предмет исследования: Влияние характеристик электродвигателей на работоспособность и эффективность самоходного сталевоза.

Задачи исследования включают следующие пункты:

- ~ анализ текущих технических требований и характеристик самоходных сталевозов 450 тонн, используемых на конвертерах кислородно-конвертерного цеха (ККЦ), включая требования к мощности, скорости передвижения, грузоподъемности и условиям эксплуатации;
- ~ исследование конструктивных особенностей электродвигателей, применяемых на сталевозах, и оценка их соответствия специфическим требованиям производственных процессов в ККЦ;
- ~ оценка влияния основных характеристик электродвигателей (например, мощности, крутящего момента, частоты вращения, КПД) на производительность и энергоэффективность самоходного сталевоза;
- ~ проведение сравнительных расчетов эффективности работы сталевозов с различными характеристиками электродвигателей для определения оптимального сочетания параметров двигателей и условий эксплуатации;
- ~ разработка методологии оценки работоспособности электродвигателей в зависимости от внешних факторов, таких как температура окружающей среды, нагрузки и условия эксплуатации;
- ~ создание модели прогнозирования износа и ресурса электродвигателей на основе полученных данных и результатов исследований;
- ~ разработка рекомендаций по выбору и настройке электродвигателей для обеспечения максимальной надежности и долговечности самоходных сталевозов, работающих в условиях ККЦ;

~ формулирование предложений по модернизации существующей системы электроприводов стелевозов с целью улучшения технико-экономических показателей их работы.

Эти задачи направлены на всестороннее исследование влияния характеристик электродвигателей на функционирование самоходных стелевозов и выработку научно обоснованных рекомендаций для оптимизации их работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

~ комплексный подход к исследованию влияния характеристик электродвигателей на работу самоходного стелевоза 450 тонн. Ранее проведенные исследования рассматривали отдельные аспекты работы электродвигателей, однако целостной картины взаимосвязи всех параметров электродвигателей с производительностью и надежностью стелевозов представлено не было;

~ учет специфики эксплуатации в условиях кислородно-конвертерного цеха. Работа учитывает уникальные особенности производственного процесса, такие как высокие температуры, агрессивные среды и значительные динамические нагрузки, что позволяет получить результаты, непосредственно применимые к конкретному технологическому процессу;

~ моделирование и прогнозирование износа электродвигателей с учетом реальных условий эксплуатации. Разработанная методика позволяет предсказывать срок службы электродвигателей и планировать профилактическое обслуживание, что является важным вкладом в повышение надежности оборудования;

~ оптимизация выбора электродвигателей для самоходных стелевозов на основе анализа множества факторов, включая экономические показатели, что ранее не проводилось в столь широком контексте.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

~ повышение надежности и эффективности работы самоходных стелевозов. Рекомендации, разработанные в ходе исследования, позволят

оптимизировать выбор электродвигателей и улучшить технические характеристики стелевозов, что приведет к снижению простоев и увеличению срока службы оборудования;

~ снижение эксплуатационных расходов. Оптимизация режимов работы электродвигателей и профилактика неисправностей помогут сократить затраты на ремонт и обслуживание стелевозов;

~ экологическая безопасность. Улучшение энергоэффективности работы электродвигателей способствует уменьшению потребления энергии и сокращению выбросов углекислого газа, что соответствует современным тенденциям устойчивого развития промышленности;

~ применение результатов в смежных отраслях. Методология и рекомендации, полученные в результате исследования, могут быть адаптированы для других видов промышленного транспорта и оборудования, эксплуатируемого в тяжелых условиях.

Таким образом, данная работа представляет собой важный вклад в развитие теории и практики эксплуатации самоходных стелевозов, обеспечивая значительный экономический эффект и повышая уровень технологического совершенства металлургической отрасли.

Структура диссертационной работы включает обзор современных подходов к проектированию и эксплуатации самоходных стелевозов, теоретический анализ характеристик электродвигателей, экспериментальные исследования их влияния на работу стелевоза, а также разработку практических рекомендаций.

1 Обзор литературы и теоретические основы

1.1 История развития самоходных сталевозов

Эволюция конструкции самоходных сталевозов отражает поступательное развитие металлургической отрасли. Автоматизированные системы транспортировки расплавленного металла пришли на смену ручным методам перемещения, значительно повысив эффективность производственных процессов. Металлургические предприятия внедряли механизированные решения поэтапно, совершенствуя технические характеристики оборудования. Современные сталевозы воплощают передовые инженерные разработки, обеспечивая безопасное перемещение раскаленного металла между плавильными агрегатами и участками разливки. Конструктивные особенности машин позволяют осуществлять точное позиционирование и выполнять маневры в условиях интенсивного производства.

Самоходные сталевозы появились как ответ промышленности на возрастающие объемы металлургического производства середины прошлого столетия. Традиционные способы перемещения металла уже не справлялись с производственными задачами. Первые модели самоходных агрегатов создавались на базе рельсовых тележек, оборудованных силовыми установками. Инженеры применяли два типа привода - дизельные двигатели либо электромоторы. Модернизация конструкций шла поэтапно, учитывая специфику металлургических предприятий и требования производственного процесса:

~ в 50-ых годах металлургические предприятия приступили к внедрению самоходных сталевозов с бензиновыми и дизельными силовыми установками. Мобильные агрегаты существенно сократили время перемещения металла между производственными участками, несмотря на несовершенство технических решений первых моделей. Производительность

внутрицеховой логистики значительно выросла благодаря механизации транспортных операций;

~ в 60-ые годы XX века масштабное внедрение электрических приводов существенно изменило конструкцию стелевозов. Мощные электродвигатели значительно расширили функциональные возможности металлургического транспорта. Замена двигателей внутреннего сгорания электрическими агрегатами позволила снизить загазованность производственных помещений и повысить маневренность техники при транспортировке металла;

~ 70-ые годы XX века ознаменовались существенным прорывом в металлургической отрасли - внедрением автоматизированных систем управления стелевозами. Разработка и применение дистанционных механизмов контроля позволили значительно повысить безопасность перевозки расплавленного металла, одновременно увеличив точность маневрирования самоходных агрегатов;

~ современные самоходные стелевозы воплощают передовые достижения инженерной мысли последних четырех десятилетий. Компьютеризированные системы управления с множеством датчиков обеспечивают максимально точное перемещение металла при минимальных тепловых потерях. Автоматизация производственных процессов позволила существенно повысить производительность металлургических предприятий за счет оптимизации транспортировки расплавленной стали.

Современные роботизированные механизмы оснащаются комплексом передовых технологий. Навигационные модули, включающие лидарные системы совместно с GPS-оборудованием, обеспечивают прецизионное маневрирование и позиционирование. Многоуровневая система безопасности, состоящая из сенсорных датчиков и механизмов экстренного торможения, гарантирует защиту от столкновений и повреждений. Функционал удаленного управления и автоматизированного выполнения заданных алгоритмов существенно сокращает необходимость постоянного контроля со стороны персонала [1].

Челябинское предприятие «Этерно» разработало уникальную производственную технику в 2022 году. Масштабный проект воплотился в создание специализированного сталево­за с электрическим приводом. Габариты транспортного средства впечатляют масштабами: длина превышает 8 метров, ширина достигает 6,2 метра, а масса составляет 62 тонны. Машина отличается автономной системой управления, позволяющей осуществлять транспортировку расплавленного металла без непосредственного участия оператора [2].

Эволюция самоходных стале­возов демонстрирует существенные достижения металлургической и машиностроительной отраслей. Металлургические предприятия активно внедряют автоматизированные транспортные комплексы, пришедшие на смену механическим агрегатам прошлого века. Модернизация конструкций стале­возов способствует повышению производительности металлургических заводов при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду. Современные разработки позволяют оптимизировать логистические процессы и обеспечивать стабильное функционирование производственных линий [3].

1.2 Конструктивные особенности самоходных стале­возов на 450 тонн

Металлургические транспортеры выполняют комплекс специализированных операций в производственном цикле. Передвижение ковшей с расплавленным металлом между конвертером и участком разливки составляет основную функцию оборудования. Манипулирование емкостью под конвертером при сливе стали требует высокой точности позиционирования. Рабочий цикл включает перемещение установочной машины, вывоз отработанного огнеупора посредством думпкаров, транспортировку шлаковозов без собственного привода. Очистка рельсового полотна и основания конвертера от металлических брызг и шлаковых

наплывов входит в перечень обязательных операций. Монтаж и демонтаж ковша на платформу осуществляется при помощи специального крана разливочного типа.

Конструкция промышленного сталевоза СС-320-4350, который показан на рисунке 1, позволяет осуществлять транспортировку расплавленного металла массой до 450 тонн между конвертерным и разливочным участками. Машина дополнительно выполняет функцию очистки рельсовых углублений производственного цеха [4].

Мобильный агрегат СС-320-4350 выполняет комплекс производственных задач металлургического цеха. Машина обеспечивает перемещение емкости с расплавленным металлом по маршруту от конвертерного участка до зоны разливки. Дополнительной функцией сталевоза служит очистка углублений рельсового пути от производственных загрязнений. В таблице 1 приведены технические характеристики сталевоза СС-320-4350 [5].

Таблица 1 – Технические характеристики сталевоза СС-320-4350:

Вместимость ковша, т	320
Вместимость ковша, т	320
Грузоподъёмность, т	450
Колея, мм	4 350
База, мм	6 500
Скорость передвижения, км/ч	4
Характеристика пути	прямой путь
Макс. нагрузка на колесо, кН	750
Мощность двигателей, кВт	4 х 22
Редукторы	4 х ВКУ-950
Тормоза (диаметр шкива, мм)	300
Диаметр ходового колеса, мм	1000
Масса, кг	90 000

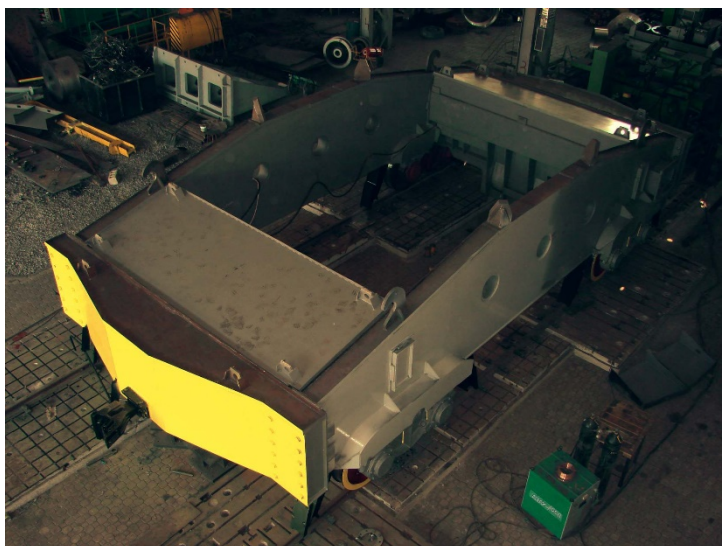


Рисунок 1 – Сталевоз СС-320-4350

Технические характеристики:

- ~ вместимость ковша – 320 тонн;
- ~ колея – 4 350 мм;
- ~ база – 6 500 мм;
- ~ скорость передвижения – 4 км/ч;
- ~ максимальная нагрузка на колесо – 750 кН;
- ~ мощность двигателей – 4×22 кВт;
- ~ диаметр ходового колеса – 1000 мм;
- ~ масса – 90 000 кг.

Особенности: прямой тип пути, максимальная нагрузка на колесо, использование редукторов ВКУ-950, использование тормозов с диаметром шкива 300 мм.

Сталеразливочные ковши принимают расплавленный металл непосредственно из плавильных агрегатов. Объем ковшей варьируется от половины до полной массы производимой стали. Современные технологические требования к внепечной металлообработке обусловили увеличение емкости ковшей на 10-40 процентов [7].

Конструкция сталевоза, рассчитанного на транспортировку сталеразливочных ковшей массой 450 тонн, представлена на втором рисунке. Основу конструкции формирует сварная рама, включающая продольные балки в количестве двух штук и четыре поперечные балки с коробчатым профилем. Верхняя часть рамы защищена футеровкой из огнеупорного кирпича [8].

Сталевоз оснащается двумя автономными механизмами перемещения, функционирующими от электрических двигателей постоянного тока. При возникновении неисправности одного механизма, резервный узел поддерживает бесперебойную эксплуатацию агрегата. Трансмиссия крутящего момента к ходовым колесам осуществляется посредством трехступенчатых редукторных систем.

Электропитание оборудования поступает через систему троллей, монтированных внутри тоннельного пространства. Токосъемное устройство, закрепленное на сталевозе, скользит по рельсовому пути, размещенному в основании троллейного канала. Роликовый механизм, установленный на несущей раме, приподнимает эластичную металлическую полосу, служащую верхним перекрытием тоннельной щели [9].

Сталевоз оснащен системой дистанционного управления. Автоматизированное оборудование включает механизм подъема очистительного скребка рельсового полотна, а также устройство удаленного контроля автосцепки при перемещении шлаковоза либо думпкара.

1.3 Основные характеристики электродвигателей применяемых в самоходных стелевозах

Маневровые стелевозы конвертерного цеха представляют собой платформенные конструкции, оснащенные четырехколесной ходовой частью. Передвижение осуществляется посредством двух автономных электромеханических систем, обеспечивающих синхронную работу приводных механизмов колесных пар [10].

Механизм передвижения стелевоза функционирует в двухскоростном режиме. Стандартный режим обеспечивает перемещение со скоростью один метр в секунду, а маневровый - со скоростью ноль целых две десятых метра в секунду. При штатной эксплуатации остановка электропривода осуществляется посредством рекуперативного электрического торможения.

При возникновении аварийной ситуации механизм задействует систему динамического торможения, а по достижении скоростного показателя 0,1 м/с включаются механические тормозные устройства [11].

Система торможения стелевоза активируется моментально при отключении электропитания. Механизм передвижения стелевоза обеспечивает плавный старт и остановку, предотвращая расплескивание металла. Диапазон регулировки скорости составляет 5:1. При сливе металла скорость движения автоматически снижается, что позволяет точно останавливать агрегат в заданных точках. Конструкция механизма гарантирует бесперебойную работу оборудования [13].

Бесперебойное функционирование электропривода стелевоза играет критическую роль в металлургическом производстве. Малейшие задержки при транспортировке ковша влекут снижение температуры расплавленного металла до значений, препятствующих нормальному процессу непрерывного литья на машинах непрерывного литья заготовок. Своевременная подача стали в конвертер определяет эффективность всего производственного цикла [16].

Анализ технических характеристик привода позволяет сформулировать комплекс эксплуатационных параметров и конструктивных ограничений:

- ~ непрерывное соблюдение технологических циклов при эксплуатации сталевоза обеспечивает стабильную работу электрооборудования. Нарушение заданных параметров производственного процесса способно вызвать серьезные неполадки в функционировании электрических систем агрегата;

- ~ процесс управления электроприводом требует непрерывного мониторинга отклонений в его функционировании. Нестандартные режимы работы электропривода вызывают необходимость оперативного вмешательства и корректировки параметров. Своевременное обнаружение и устранение сбоев обеспечивает стабильность производственного цикла. Специалисты регулярно анализируют показатели работы системы для предотвращения аварийных ситуаций;

- ~ обеспечение безопасности технологических операций требует строгого контроля над скоростью перемещения оборудования при выполнении маневров. Плавное замедление и ограничение ускорения позволяют предотвратить возникновение аварийных ситуаций во время производственных процессов. Рациональный выбор параметров движения механизмов гарантирует стабильное протекание технологических циклов.

При анализе требований к электрическому приводу механизма возникает необходимость детального рассмотрения задач по автоматизации конверторного производства. Система управления включает три последовательных уровня автоматического регулирования:

- ~ автоматизированный комплекс управляет производственными агрегатами металлургического цеха. Механизмы конверторного участка выполняют транспортировку ковшей с расплавом между технологическими позициями. Система обеспечивает точное дозирование кислорода через фурмы, контролирует процесс слива жидкого металла. Миксеры и машины непрерывного литья заготовок функционируют согласно заданным параметрам. Весовое оборудование отмеряет необходимое количество

сыпучих материалов для загрузки в конвертор. Программное обеспечение координирует работу всех механизмов, поддерживая непрерывность производственного цикла;

~ автоматизированное управление металлургическими агрегатами осуществляется посредством компьютерных систем, обеспечивающих контроль производственных параметров. Вычислительные комплексы регулируют технологические режимы конвертерной плавки и непрерывной разливки стали на машинах МНЛЗ. Программное обеспечение координирует последовательность операций при выплавке металла и формировании заготовок, оптимизируя производственный цикл согласно заданным алгоритмам;

~ оперативное управление конверторным производством осуществляется через интегрированную систему контроля материальных потоков. Производственная координация между подразделениями обеспечивает бесперебойное снабжение сырьем и расходными материалами. Автоматизированный учет производственных показателей позволяет формировать детальную отчетность по работе цеха. Планирование загрузки оборудования и распределение ресурсов между отделениями выполняется с учетом текущих производственных задач и доступности материалов.

1.4 Взаимосвязь характеристик электродвигателя и эффективности работы самоходного сталеваза

Анализ эффективности работы самоходного сталеваза зависит от множества факторов, включая характеристики электродвигателей, условия эксплуатации, нагрузки и другие параметры. Вот ключевые аспекты анализа эффективности работы самоходного сталеваза в зависимости от электродвигателя:

а) тип электродвигателя: различные типы электродвигателей имеют разные показатели КПД, скорости вращения, момента и стабильности работы. Например:

1) асинхронный двигатель: имеет высокий КПД, но меньший контроль над скоростью и моментом;

2) синхронный двигатель: обеспечивает точное управление скоростью и моментом, но требует сложной системы управления;

3) постоянного тока: позволяет легко регулировать скорость и момент, но требует дополнительного оборудования для преобразования переменного тока в постоянный.

б) КПД электродвигателя: коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателя влияет на эффективность энергопотребления. Чем выше КПД, тем меньше энергии теряется в виде тепла и больше передается на привод. Высокий КПД особенно важен для самоходных стелевозов, работающих в условиях высоких нагрузок и длительных циклов работы.

в) скорость и момент: электродвигатель должен обеспечивать необходимую скорость и крутящий момент для перемещения груза. Важно учитывать динамические характеристики двигателя, такие как максимальная скорость, пусковой момент и способность поддерживать стабильную работу при различных нагрузках.

г) система управления: эффективность работы самоходного стелевоза также зависит от системы управления двигателем. Современные системы частотного регулирования позволяют точно контролировать скорость и момент, обеспечивая оптимальные режимы работы и снижая потребление энергии.

д) энергопотребление: анализ энергопотребления включает оценку количества электроэнергии, потребляемой двигателем при различных режимах работы. Оптимизация режимов работы позволяет снизить общее энергопотребление и эксплуатационные расходы.

е) надежность и долговечность: надежность и долговечность электродвигателя влияют на общую эффективность работы самоходного сталевоза. Частые поломки и необходимость ремонта снижают производительность и увеличивают затраты на обслуживание.

ж) условия эксплуатации: эксплуатационные параметры среды существенно воздействуют на производительность электрических машин. Повышенная запыленность, колебания температур и избыточная влажность снижают эффективность работы оборудования. При подборе электродвигателей необходимо учитывать специфику рабочей среды, поскольку определенные модели демонстрируют повышенную устойчивость к неблагоприятным внешним факторам. Эксплуатационные характеристики оборудования должны соответствовать следующим параметрам рабочего пространства:

1) движение металлоплавильного агрегата требует особого контроля при запуске и остановке для предотвращения разбрызгивания расплава;

2) диапазон регулировки скорости сталевоза составляет 5:1. Маневрирование при сливе металла требует плавного снижения скоростных показателей. Точность позиционирования агрегата в конечной точке маршрута значительно возрастает благодаря корректному выбору скоростного режима;

3) бесперебойное функционирование электропривода служит ключевым условием производственного процесса, поскольку малейшее отклонение от установленного времени слива стали способно нарушить технологический цикл конвертера;

4) электропривод должен обеспечивать равномерные показатели ускорения и замедления при максимально коротких интервалах запуска и прекращения работы механизма.

1.5 Проблематика существующих решений и обоснование необходимости дальнейших исследований

Производственный цех оснащен электроприводами повышенной надежности, укомплектованными закрытыми двигателями краново-металлургической серии с кремнеорганической изоляцией.

Расположение двигательной установки сталево­за под рамой создает неблагоприятные условия эксплуатации механизма при отрицательных температурах окружающей среды, преимущественно в зимний сезон [18].

Электромагнитные тормозные механизмы постоянного тока выполняют функцию основных тормозных элементов. Дисковые тормоза, интегрированные в моторную систему, обеспечивают дополнительное торможение. Оператор производит регулировку параметров торможения непосредственно через пульт управления установкой [19].

Регулировка скоростного режима позволяет варьировать движение в пятикратном диапазоне, обеспечивая плавное замедление при выполнении маневров. Сниженная скорость во время слива металла гарантирует точность остановки сталево­за и безаварийное завершение технологического цикла.

Электромеханическая система обеспечивает равномерное ускорение при запуске и плавное замедление во время остановки механизма. Конструкция привода гарантирует механическую надежность узлов, сокращая длительность циклов разгона-торможения до минимума. Технологический регламент производства устанавливает продолжительность переходных режимов работы оборудования равной пяти секундам [20].

1.6 Сравнительный анализ современных типов электродвигателей (асинхронные, синхронные, двигатели постоянного тока)

Род тока электропривода механизма влияет на выбор силового агрегата. Металлургические производства применяют крановые двигатели с

асинхронным питанием либо постоянным током параллельного или последовательного возбуждения. При проектировании электрооборудования анализируются экономические затраты, включая расходы на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонтные работы. Монтаж электродвигателей требует тщательного расчета параметров питающей сети для обеспечения надежной работы механизма [21].

Крановые электродвигатели функционируют преимущественно в циклическом режиме с варьируемой скоростью вращения, подвергаясь существенным нагрузкам и регулярным запускам. Металлургическое производство создает дополнительные условия эксплуатации, включая воздействие агрессивной среды с температурой до 70 градусов Цельсия. Конструктивные особенности и эксплуатационные параметры крановых электродвигателей существенно превосходят характеристики стандартных промышленных моделей.

Сниженная масса и меньшая стоимость асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором не компенсируют недостатки эксплуатации, связанные с высокими значениями пусковых токов и уменьшенным пусковым моментом. При равной мощности масса таких агрегатов составляет 92% от двигателей с фазным ротором, а стоимость ниже в 1,3 раза, что ограничивает сферу их применения [22].

Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором успешно зарекомендовали себя при эксплуатации в условиях умеренных нагрузок на производстве.

Асинхронные электродвигатели выгодно отличаются от моторов постоянного тока сниженными затратами на приобретение, несложным техническим обслуживанием и доступным ремонтом. Специфика эксплуатации сталевоза предполагает множественные включения за час работы, необходимость плавной регулировки скоростных режимов в широком диапазоне, включая превышение номинальных значений. С учетом указанных

требований рациональным выбором становится применение электродвигателя постоянного тока [23].

Сталевозы оснащаются электродвигателями постоянного тока серии Д, применяемыми в крановых механизмах. При выборе оптимального способа управления механизмом целесообразно провести сравнительный анализ двух систем электропривода: генератор-двигатель и тиристорный преобразователь-двигатель. Сопоставление технико-экономических показателей позволит определить наиболее надежное и экономически выгодное решение, соответствующее эксплуатационным требованиям привода сталевоза [24].

Система генератор-двигатель представляет отдельный электромашинный узел. Якорная цепь силового двигателя постоянного тока функционирует автономно благодаря независимому возбуждению. Питание поступает через специализированный генератор, работающий по схеме независимого возбуждения. Вращательное движение генератора обеспечивается синхронным электродвигателем от сети переменного тока с фиксированной угловой скоростью. Тиристорный выпрямитель подает напряжение на обмотку возбуждения генераторного устройства. Регулирование параметров силового двигателя выполняется посредством варьирования значений электродвижущей силы генератора.

В системе генератор-двигатель режим рекуперативного торможения считается наиболее востребованным среди существующих трех вариантов торможения. Энергосберегающие характеристики рекуперации обуславливают выбор данного режима при проектировании электромеханических систем [25].

Преимущества электропривода системы генератор-двигатель включают множество значимых характеристик:

- ~ механические свойства привода демонстрируют повышенную жесткость параметров работы;
- ~ скоростные режимы регулируются плавно, без рывков и перепадов;

- ~ двухзонное управление приводом реализуется с минимальными затратами ресурсов;

- ~ диапазон регулирования рабочих скоростей охватывает широкий спектр значений, позволяя настраивать оптимальные режимы эксплуатации оборудования.

Однако, система электропривода с электромашинным преобразователем характеризуется рядом существенных ограничений:

- ~ присутствие подвижных элементов в агрегате вызывает необходимость регулярного технического обслуживания;

- ~ эксплуатация оборудования требует выделения специализированного помещения с фундаментом;

- ~ значительная мощность электрических машин сочетается с медленной реакцией системы управления на изменение параметров;

- ~ применение тиристорного преобразователя в связке с двигателем постоянного тока позволяет избежать указанных недостатков.

Электропривод с тиристорным преобразователем обеспечивает регулирование работы двигателя постоянного тока посредством варьирования параметров управляющих импульсов. Применение отрицательных обратных связей позволяет настраивать механические характеристики привода под конкретные производственные задачи, существенно расширяя функциональные возможности системы преобразователь-двигатель.

Тиристорные электроприводы демонстрируют выдающиеся эксплуатационные характеристики. Диапазон регулирования скорости достигает соотношения 50:1, что соответствует показателям системы генератор-двигатель. Надежность оборудования подтверждается длительным сроком эксплуатации – 15-20 лет при наработке без сбоев 4000-6500 часов в течение гарантийного периода. Комплектные электроприводы значительно упрощают монтаж, сокращают время пусконаладочных работ, минимизируют трудозатраты при разработке и производстве. Заводская готовность изделий существенно повышает эффективность внедрения оборудования [26].

Система тяговый преобразователь-двигатель выгодно отличается множеством преимуществ при сравнении с генератор-двигательной системой, что обуславливает её выбор для практического применения.

В производственном процессе применяется комплектный тиристорный электропривод КТЭ, обеспечивающий управление скоростными режимами посредством вариации якорного напряжения. Встроенный регулятор поддерживает стабильные показатели тока возбуждения электродвигателя.

Рисунок 2 демонстрирует базовую электрическую схему привода сталеваза.

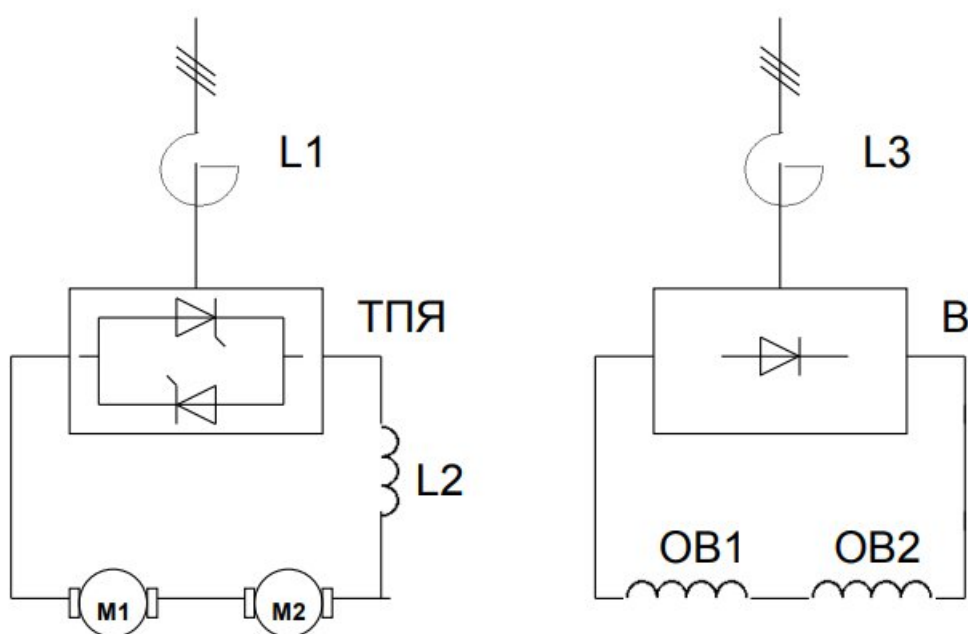


Рисунок 2 – Упрощенная электрическая схема электропривода сталеваза.

В механизме внедрена комплексная схема подчиненного управления скоростными режимами работы с одноконтурным регулированием. Рассмотрение специфики выбранного электропривода позволяет определить эксплуатационные требования и характеристики установленной системы. Электроприводы серии КТЭ функционируют в замкнутых производственных пространствах при заданных рабочих параметрах [27].

Эксплуатационные условия электропривода включают высотное расположение до 1000 метров над уровнем моря, механическую стабильность без вибраций, диапазон рабочих температур от +1 до +40 градусов Цельсия при относительной влажности воздуха до 80%. Монтаж и функционирование электроприводной системы, за исключением двигательного узла, недопустимы на мобильных установках, в зонах с повышенной взрывоопасностью и пожароопасностью. Запрещается размещение оборудования в помещениях с высокой концентрацией водяного пара и электропроводящей пыли.

1.7 Определение требований к новым двигателям: мощность, крутящий момент, диапазон скоростей, допустимые перегрузки

Работа самоходного сталевоза связана с высокой интенсивностью труда, необходимостью перевозки тяжёлых грузов, сложными условиями эксплуатации и высоким уровнем безопасности. Основные требования к двигателям определяются исходя из специфики этой техники [28].

Мощность двигателя – один из ключевых показателей, определяющих возможность эффективного выполнения операций. Самоходные сталевозы используются для транспортировки большого объёма металла, иногда до нескольких сотен тонн, что накладывает серьёзные требования на силовую установку.

Мощность двигателя рассчитывается с учётом массы перевозимых материалов, сопротивления качению, аэродинамического сопротивления и других внешних факторов. Средний показатель мощности для современных сталевозных машин варьируется от 50 до 250 кВт в зависимости от размера транспортного средства и объёма перевозимой продукции [29].

Если брать в расчёт фактические значения ускорения и силы сопротивления, расчётная мощность может достигать до 150–200 кВт.

Высокий крутящий момент необходим для начала движения и поддержания устойчивого хода при значительных нагрузках. Самоходные стелевозы требуют достаточно высокого крутящего момента, чтобы уверенно преодолевать неровности дороги, подъёмы и обеспечивать стабильное передвижение при большой массе груза [30].

Двигатели самоходных стелевозов должны иметь момент минимум 5 000–12 000 Н·м для обеспечения уверенной работы с тяжелыми грузами.

Скорости движения самоходных стелевозов варьируются в зависимости от режима работы. Необходимо учитывать следующие особенности:

- ~ рабочие скорости: для нормального функционирования на производственных площадках стелевозу нужна скорость 2–5 км/ч;
- ~ максимальная скорость: для манёвров или быстрого перемещения без груза необходима скорость до 15–25 км/ч.

Этот широкий диапазон скоростей требует хорошей способности двигателя адаптироваться к изменениям режима работы, поддерживая стабильную тягу и управляемость.

Перегрузки неизбежны при работе с большими массами и нестабильной опорой (например, при движении по неровностям или подъёмам). Двигатели для самоходных стелевозов должны выдерживать кратковременные перегрузки, чтобы предотвратить остановки в процессе транспортировки.

Общие рекомендации:

- ~ краткосрочные перегрузки: допустимы до 150% от номинальной мощности и крутящего момента. Это обеспечит уверенное выполнение задач в нестандартных ситуациях;
- ~ пиковая нагрузка: система защиты двигателя должна отключать питание при достижении предельных уровней перегрузки, чтобы избежать повреждений мотора.

1.8 Подбор возможных производителей и моделей двигателей стелевозов, соответствующих требованиям

Подбор двигателей для самоходных стелевозов — задача сложная, учитывая уникальные требования к мощностным характеристикам, крутящему моменту и другим параметрам. Рассмотрим несколько известных производителей и моделей двигателей, которые могут подойти для таких нужд.

Производители двигателей:

а) Siemens:

1) Siemens производит электрические двигатели для промышленного сектора, включая мощные асинхронные и синхронные модели;

2) модели: серия SIMOTICS предлагает широкий выбор электродвигателей с мощностью до 500 кВт и крутящим моментом до 30 000 Н·м;

3) преимущества: высокий КПД, низкие уровни шума и вибрации, возможность настройки для тяжёлых условий эксплуатации;

б) ABB:

1) ABB известна своими решениями для тяжёлой промышленности, включая горнодобывающие предприятия и металлургию;

2) модели: серии ACS800, DCS880 и ACS1000 подходят для применения в стелевозах благодаря высокому крутящему моменту и поддержке широкого диапазона скоростей;

3) преимущества: возможность интеграции с системами автоматизации и управления, устойчивость к повышенным температурам и влажности;

в) General Electric (GE):

1) GE производит двигатели для тяжёлой техники, включая железнодорожные локомотивы и горнорудные машины;

2) модели: серия Industrial DC Motors обладает большим крутящим моментом и высокой надёжностью;

3) преимущества: устойчивость к вибрациям и ударам, хорошие показатели производительности в широком диапазоне температур;

г) Caterpillar:

1) Caterpillar известен производством дизельных двигателей для строительной и горнодобывающей техники;

2) модели: серия CAT Industrial Diesel Engines может использоваться в сочетании с электрическими приводами;

3) преимущества: высокая надёжность, экономичность топлива, большая мощность;

д) WEG:

1) WEG производит электродвигатели для промышленности, включая металлургическое производство;

2) модели: серия W22 Magnetic Flux Vector предлагает отличные возможности для управления скоростью и моментом;

3) преимущества: широкий диапазон мощностей, низкое энергопотребление, устойчивость к агрессивным средам.

Модели двигателей:

а) Siemens SIMOTICS GP (General Purpose), представленный на рисунке 3:

1) мощность: до 315 кВт;

2) крутящий момент: до 15 000 Н·м;

3) применение: подходит для средних стелевозов с относительно небольшими объёмами перевозок;



Рисунок 3 – Siemens SIMOTICS GP (General Purpose)

б) ABB DCS880 Drives, представленный на рисунке 4:

- 1) мощность: до 560 кВт;
- 2) крутящий момент: до 24 000 Н·м;
- 3) применение: идеальное решение для крупных стелевозов, работающих в сложных условиях;



Рисунок 4 – Двигатель ABB DCS880 Drives

в) General Electric DC Series, представленный на рисунке 5:

- 1) мощность: до 375 кВт;
- 2) крутящий момент: до 18 000 Н·м;
- 3) применение: хорошо подходит для стелевозов, используемых в металлургической отрасли;



Рисунок 5 – Двигатель General Electric DC Series

г) Caterpillar CAT C13, представленный на рисунке 6:

- 1) мощность: до 430 л.с. (320 кВт);
- 2) применение: используется преимущественно в комбинированных системах с электрическим приводом;



Рисунок 6 – Двигатель Caterpillar CAT C13

д) WEG W22 Magnetic Flux Vector, представленный на рисунке 7:

- 1) мощность: до 450 кВт;
- 2) крутящий момент: до 21 000 Н·м;
- 3) применение: отлично справляется с повышенными требованиями к точности управления и надёжности;



Рисунок 7 – Двигатель WEG W22 Magnetic Flux Vector

Сравнение представленных электродвигателей объединено в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнение вариантов электродвигателей

Производитель	Модель	Мощность (кВт)	Крутящий момент (Н·м)
Siemens	SIMOTICS GP	315	15 000
ABB	DCS880	560	24 000
GE	DC Series	375	18 000
Caterpillar	CAT C13	320	-
WEG	W22 Magnetic Flux	450	21 000

Выводы по разделу

Металлургия является одной из старейших отраслей промышленности, непрерывно развивающейся благодаря новым технологиям и материалам. Рассмотрены исторические этапы становления отрасли, начиная с примитивных способов плавки железа до современных высокоэффективных процессов непрерывной разливки и рафинирования металла. Особое внимание уделено современным методам повышения качества продукции, включая применение компьютерных моделей и автоматизации производственных процессов.

Проведенное исследование показало, что несмотря на значительные достижения науки и техники, существуют нерешённые проблемы и возможности для дальнейших разработок. Теоретический материал, представленный в обзоре, послужит основой для последующих глав и выводов по работе. Таким образом, данная глава подготовила необходимую базу для понимания текущего уровня научно-технического прогресса в сфере металлургического производства и позволит сформулировать конкретные рекомендации и предложения по совершенствованию технологий транспортировки стали.

2 Методология исследования

2.1 Постановка задачи исследования

Целью данного исследования является изучение влияния различных характеристик электродвигателей на эффективность работы самоходного сталевоза грузоподъемностью 450 тонн, используемого в конвертерном цехе комбината чёрной металлургии (ККЦ). Исследование направлено на выявление ключевых факторов, определяющих производительность, экономичность и надежность эксплуатации сталевозов, оснащенных различными типами электродвигателей.

Основные задачи исследования включают:

- ~ анализ существующих типов электродвигателей, применяемых в самоходных сталевозах, включая асинхронные двигатели переменного тока, синхронные двигатели постоянного тока и другие перспективные технологии;
- ~ оценка влияния конструктивных особенностей электродвигателей на такие параметры, как мощность, крутящий момент, энергоэффективность, долговечность и устойчивость к внешним воздействиям (например, вибрации, пыли, высоким температурам);
- ~ исследование динамики работы сталевоза в условиях реального производственного процесса, включая загрузку/разгрузку металла, маневрирование внутри цеха и транспортировку грузов на большие расстояния;
- ~ моделирование и прогнозирование поведения сталевоза с использованием различных моделей электродвигателей для определения оптимальных режимов работы и минимизации энергозатрат;
- ~ разработка рекомендаций по выбору наиболее подходящих типов электродвигателей для конкретных условий эксплуатации, а также предложений по модернизации существующих систем электропривода сталевозов;

~ экономический анализ затрат на эксплуатацию и обслуживание различных типов электродвигателей, а также оценка потенциальной экономии ресурсов при внедрении новых технологий.

Ожидаемые результаты исследования позволят повысить эффективность работы самоходных сталевозов, снизить эксплуатационные расходы и улучшить общую производительность конвертерного цеха.

2.2 Изучение технической документации на существующий электродвигатель

Сталеразливочные ковши принимают расплавленный металл после завершения плавки в металлургических агрегатах. Объем ковшей варьируется от половины до полной массы производимой стали. Современные технологические требования к внепечной металлообработке обусловили увеличение емкости ковшей на 10-40% относительно традиционных параметров.

Конструкция сталевоза мощностью 450 тонн представлена на рисунке 8. Транспортное средство предназначается для перемещения сталеразливочных ковшей. Основу конструкции формирует сварная рама, включающая продольные и поперечные балки с коробчатым профилем. Верхняя часть рамы защищена огнеупорной кирпичной футеровкой. Передвижение сталевоза обеспечивают два механизма с двигателями постоянного тока. При выходе одного механизма из строя второй поддерживает полноценное функционирование агрегата. Передача вращательного момента на колеса осуществляется через трехступенчатые редукторы.

Электропитание механизмов обеспечивается троллейной системой, встроенной внутри тоннельного пространства. Токосъемное устройство, закрепленное на сталевозе, скользит вдоль направляющего рельса, смонтированного на основании троллейного канала. Металлическая лента

эластичной конструкции служит защитным элементом верхней части тоннеля, поднимаясь при помощи роликового механизма, смонтированного на несущей раме.

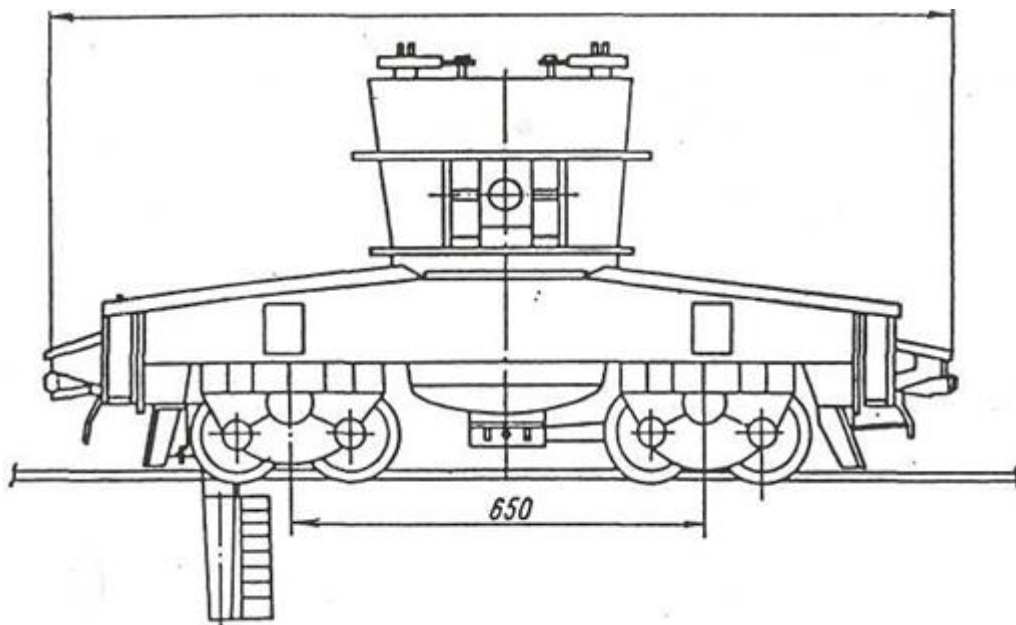


Рисунок 8 – конструкция сталлевоза грузоподъемностью 450 тонн

Техническая характеристика:

- ~ мощность привода, кВт – 4 х 22;
- ~ редукторы – 4 х ВКУ-950 Т;
- ~ тормоза (диаметр шкива, мм) – 300;
- ~ диаметр ходового колеса, мм – 1000;
- ~ масса, кг – 92 000;
- ~ скорость передвижения, км/ч – 4;
- ~ характеристика пути – прямой участок;
- ~ макс. нагрузка на колесо, кН – 750;
- ~ мощность двигателей, кВт – 4 х 22;
- ~ редукторы – 4 х ВКУ-950;
- ~ тормоза (диаметр шкива, мм) – 300;
- ~ диаметр ходового колеса, мм 1000 Масса, кг – 90 000.

Выбор типа электропитания при проектировании механических систем существенно влияет на конструктивные особенности установки. Характер электроснабжения напрямую определяет спецификацию силового агрегата механизма. Комплексный анализ экономической эффективности, затрат на эксплуатацию и ремонтпригодности оборудования позволяет принять оптимальное решение относительно применения электродвигателей переменного либо постоянного тока.

Металлургическое производство активно использует крановые электродвигатели различных типов. Асинхронные двигатели переменного тока обеспечивают надежную работу при высоких нагрузках. Машины постоянного тока с последовательным либо параллельным возбуждением дополняют спектр применяемого оборудования. Специфика эксплуатации подразумевает частые запуски агрегатов с существенными перегрузками при варьируемой скорости вращения. Металлургические цеха создают сложные условия для электродвигателей, включая воздействие агрессивной среды с парами, газами и температурой до 70 градусов Цельсия.

Электропривод механизма передвижения сталевого характеризуется необходимостью плавного регулирования скорости в широком диапазоне. Специфика эксплуатации включает многократные пусковые режимы за час работы, а также периодическое превышение номинальной скорости движения. Учитывая данные требования, рациональным выбором служат крановые электродвигатели постоянного тока серии Д, обеспечивающие оптимальные эксплуатационные характеристики механизма.

Регулировка скорости в тиристорном электроприводе серии КТЭ осуществляется посредством изменения якорного напряжения. Стабильность тока возбуждения электродвигателя обеспечивается специальным регулятором. Система тиристорный преобразователь-двигатель превосходит генератор-двигатель по эксплуатационным характеристикам, что определило выбор данного технического решения.

Механизм оснащён комплексной системой управления, включающей однозонное регулирование скоростных параметров на основе соподчинённого принципа контроля выходных величин.

Определение конкретного типа электропривода позволяет перейти к анализу эксплуатационных характеристик и расшифровке принципиальной схемы системы управления. Оценка предъявляемых требований раскрывает специфику функционирования выбранного электромеханического комплекса.

Электропривод КТЭ эксплуатируется внутри помещений при следующих рабочих параметрах. Монтаж оборудования допускается на высоте, не превышающей 1000 метров над уровнем моря. Механизм требует установки в местах, защищенных от вибрационных нагрузок и ударных воздействий. Диапазон рабочих температур составляет от + 1°С до + 40°С. Влажность воздуха не должна превышать 80%.

Размещение электропривода допускается исключительно в стационарных установках, при отсутствии взрывоопасных и пожароопасных факторов среды. Запрещена эксплуатация оборудования в пространствах с высокой концентрацией водяного пара или токопроводящей пыли. Указанные ограничения не распространяются на двигательный узел механизма.

2.3 Сбор данных о режимах работы сталево­за: частота пусков/остановок, продолжительность рабочих циклов, условия окружающей среды

Цифровые данные о режимах работы сталево­за будут выглядеть примерно следующим образом:

а) частота пусков/остановок:

- 1) средний интервал между запусками: 8 часов;
- 2) среднее количество запусков в сутки: 3 раза;
- 3) максимальная частота запусков: каждые 4 часа (при интенсивной нагрузке);

б) продолжительность рабочих циклов:

- 1) средняя продолжительность одного рабочего цикла: 7 часов;
- 2) минимальная продолжительность рабочего цикла: 4 часа;
- 3) максимальная продолжительность рабочего цикла: 10 часов;

в) условия окружающей среды:

- 1) диапазон температур эксплуатации: от -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- 2) рекомендуемая температура для оптимальной работы: $+10^{\circ}\text{C} \dots +30^{\circ}\text{C}$;
- 3) допустимая влажность воздуха: до 90%;
- 4) атмосферное давление: нормальное атмосферное давление (~ 760 мм рт. ст.).

Приведенные данные и зависят от конкретных условий эксплуатации конкретного транспортного средства и завода-изготовителя. Для точного определения режимов работы необходим индивидуальный расчет и анализ эксплуатационных характеристик именно вашего сталевоза.

2.4 Оценка износа и текущего состояния двигателя

Конвертерный цех оснащен специализированными транспортными средствами для перемещения жидкого металла - платформенными сталевозами с четырехколесной системой привода. Электромеханическая система перемещения включает два независимых привода, обеспечивающих движение колесных пар.

Транспортировка металла осуществляется на двух скоростных режимах: номинальном, равном одному метру в секунду, и маневровом - двадцать сантиметров в секунду. Система торможения реализована по принципу рекуперации электрической энергии при штатной эксплуатации. Аварийное замедление обеспечивается динамическим торможением до скорости десять сантиметров в секунду с последующей механической блокировкой.

При отключении электропитания срабатывает мгновенная механическая блокировка. Электропривод сталеваза должен соответствовать следующим эксплуатационным требованиям:

- ~ плавность хода при ускорении и замедлении для предотвращения расплескивания металла;
- ~ диапазон регулирования скорости пять к одному;
- ~ наличие пониженного скоростного режима при маневрировании во время разливки для точного позиционирования;
- ~ максимальная эксплуатационная надежность.

Нарушение функционирования электропривода сталеваза создает критические риски для производственного процесса, поскольку своевременная подача стали в конвертер определяет успешность всей операции. Задержки при транспортировке ковша к разливочной установке приводят к охлаждению металла ниже требуемых технологических параметров, делая невозможным непрерывное литье на машинах непрерывного литья заготовок.

Эксплуатационные характеристики привода должны соответствовать следующим производственным требованиям:

- ~ строгое соблюдение цикличности технологических операций для предотвращения сбоев в работе сопряженного электрооборудования;
- ~ обеспечение непрерывности производственного процесса при возникновении отклонений в работе электропривода;
- ~ контроль ускорения при маневрировании для поддержания безопасных режимов технологического процесса.

Автоматизация конверторного производства реализуется посредством многоуровневой системы управления технологическими процессами:

- ~ базовый уровень автоматизации обеспечивает функционирование основного оборудования: конверторов, фурм, миксеров, машин непрерывного литья заготовок. Автоматическое управление охватывает операции

транспортировки ковшей, разливки металла, подачи кислорода, дозирования сыпучих материалов;

~ промежуточный уровень автоматизации включает компьютеризированное управление технологическими процессами выплавки стали в конверторах и непрерывной разливки металла. Вычислительные системы контролируют параметры производства стальных заготовок, корректируя режимы работы агрегатов;

~ верхний уровень автоматизации координирует работу конверторного цеха с другими производственными подразделениями. Программное обеспечение решает задачи планирования производства, материально-технического снабжения, формирования производственной отчетности, анализа эффективности работы оборудования.

2.5 Выявление проблемных зон и факторов, влияющих на надежность и долговечность двигателя

Эксплуатация стелевозов протекает в экстремальных производственных условиях. При выходе машины из строя металлургическое производство терпит значительные финансовые потери. Аварийная остановка силового агрегата во время транспортировки расплавленного металла приводит к максимальным издержкам предприятия.

Неисправность силовой установки напрямую сказывается на коэффициенте технической готовности стелевозов, определяющем экономическую эффективность эксплуатации карьерного транспорта. Нормативные требования устанавливают минимальное значение данного показателя на уровне 0,95. Предприятия формируют обменный фонд исправных агрегатов для оперативной замены вышедших из строя узлов, минимизируя простои техники. Замена силовой установки, генераторного оборудования и электродвигателей требует значительных трудозатрат ввиду необходимости демонтажа множества сопутствующих систем.

Процесс замены и восстановления работоспособности оборудования, включая логистику запчастей и диагностические мероприятия, занимает минимум сутки, нередко растягиваясь до нескольких недель. Производители закладывают повышенные стандарты прочности при проектировании компонентов, гарантируя максимальную износостойкость механизмов.

Эксплуатационные расходы сталевоза составляют около 50 тысяч рублей за час работы. Внеплановый простой оборудования приводит к увеличению затрат на 30%. Своевременное выявление потенциальных неисправностей двигателя позволяет рационально планировать ремонтные работы и значительно сокращать операционные издержки предприятия.

Модернизация силовой установки позволит достичь существенного повышения эксплуатационного ресурса с 23000 до 26000 моточасов работы двигателя.

Прогнозирование срока службы оборудования позволяет минимизировать затраты на аварийный ремонт. Своевременная диагностика состояния механизмов сокращает простои производства благодаря планированию профилактических мероприятий.

Оптимизация процессов технического обслуживания силовых агрегатов путем рационального планирования замены компонентов с целью увеличения ресурса и надежности оборудования.

Оптимизация складских ресурсов предприятия достигается путем рационального прогнозирования потребности в комплектующих, что позволяет сократить затраты на хранение запасных частей.

Точное прогнозирование выхода из строя двигательных установок базируется на комплексном анализе массивов технических данных и глубоком понимании механизмов функционирования агрегатов. Множественные переменные, влияющие на работоспособность механизмов, существенно усложняют задачу предсказания сбоев. Среди определяющих факторов выделяются механический износ компонентов, нарушения регламента эксплуатации, особенности конструктивных решений, а также характеристики

применяемых материалов. Своевременное выявление потенциальных неисправностей требует учета взаимосвязи всех элементов системы.

Методы искусственного интеллекта существенно расширяют возможности анализа информации, позволяя выявлять скрытые корреляции между элементами массивов данных. Машинное обучение значительно превосходит классические статистические подходы при распознавании закономерностей и структурных взаимосвязей в сложноорганизованных системах.

Спектральные измерения металлов в масле позволяют отслеживать динамику деградации двигателя. Накопленные аналитические данные демонстрируют постепенный рост концентраций продуктов износа при эксплуатации силового агрегата. Регулярные замены смазочных материалов в процессе обслуживания существенно влияют на фиксируемые показатели частиц металлов. Методика не обеспечивает раннего выявления ускоренного разрушения поверхностей трения. Схематичное изображение традиционного подхода к оценке жизненного цикла двигателя представлено на рисунке 9.

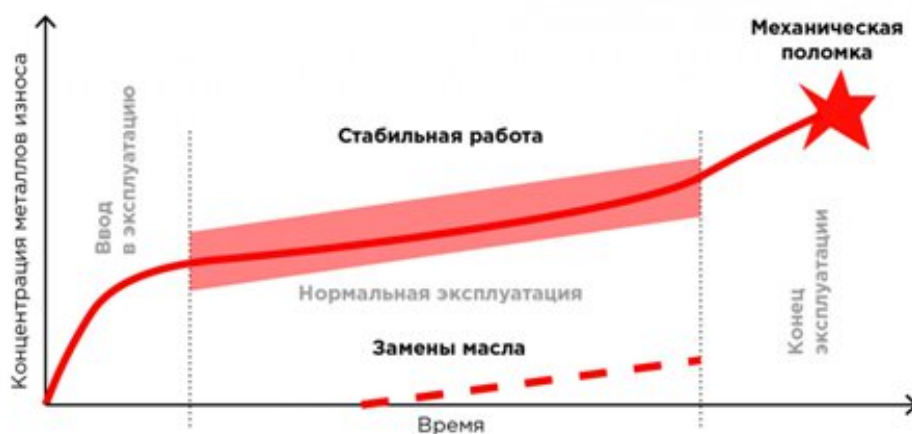


Рисунок 9 – Схематичное изображение традиционного подхода к оценке жизненного цикла двигателя

Традиционные методики оценки степени износа демонстрируют значительные погрешности при практическом применении. Многочисленные эксперименты подтверждают существенно более комплексный характер процессов деградации материалов. Современные исследования выявили постоянное нелинейное взаимовлияние химических элементов. Прогнозирование технического состояния силовых агрегатов требует применения алгоритмов машинного обучения, способных учитывать нелинейную природу происходящих процессов.

Мониторинг телеметрических показателей позволяет фиксировать отклонения параметров от установленных пределов. Продолжительная эксплуатация силовой установки за границами номинальных режимов приводит к существенному снижению ее эксплуатационного периода. Длительность воздействия критических факторов, включая недостаточную смазку механизмов, прямо пропорциональна степени сокращения работоспособности агрегата. Параметры, превышение пороговых значений которых влияет на оценку срока жизни двигателя показаны на рисунке 10.

№	Параметр	Пороговое значение
1	Повышенные обороты двигателя	Когда скорость двигателя ≥ 2200 об/мин
2	Значение перегрева двигателя	Когда температура охлаждающей жидкости двигателя ≥ 102 °C
3	Низкая температура охлаждающей жидкости двигателя	Когда температура охлаждающей жидкости двигателя ≤ 75 °C
4	Высокое давление наддува двигателя	Когда давление наддува ≥ 345 кПа
5	Низкое давление наддува двигателя	Когда давление наддува ≤ 96 кПа
6	Низкое давление масла в двигателе	Когда давление масла в двигателе ≤ 172 кПа
7	Высокое давление в картере	Когда давление в картере ≥ 34 кПа
8	Ограничение воздуха на впуске	Когда ограничение воздушного фильтра > 7 кПа
9	Высокая температура левого выпуска	Когда температура левого выпуска ≥ 750 °C
10	Высокая температура правого выпуска	Когда температура правого выпуска ≥ 750 °C

Рисунок 10 – Параметры, превышение пороговых значений которых влияет на оценку срока жизни двигателя

База данных временных рядов содержит телеметрические показатели работы двигателя. Сенсорные измерения преобразуются в бинарные сигналы

оповещения, принимающие значения единицы либо нуля. Превышение установленного порога фиксируется посредством изменения числового индикатора.

Система регистрации сигналов учитывает превышение пороговых значений длительностью более трех секунд, что позволяет отфильтровать кратковременные скачки и флуктуации входных параметров.

Выводы по разделу

В данном разделе проводилось исследование с целью выявления оптимального сочетания технических характеристик электродвигателя, обеспечивающего максимальную производительность и экономичность эксплуатации самоходного сталевоза ККЦ, предназначенного для транспортировки жидкой стали весом около 450 тонн.

Основные результаты:

- ~ электродвигатель постоянного тока показал хорошую динамику разгона и торможения, обеспечивая стабильность движения даже при значительных нагрузках. Однако эксплуатационная надёжность ограничивалась необходимостью частых ремонтов коллекторов и щеточных узлов, что снижало общий коэффициент полезного действия установки;

- ~ синхронные двигатели переменного тока обладают высокой эффективностью преобразования энергии, низким уровнем шума и вибраций, однако требуют сложной системы управления, что повышает капитальные затраты и увеличивает риск возникновения аварийных ситуаций;

- ~ асинхронные короткозамкнутые электродвигатели отличаются простотой конструкции и низкой стоимостью обслуживания, однако имеют ограничения по производительности и пусковым характеристикам, особенно при транспортировке больших масс жидкого металла;

- ~ наиболее перспективным решением стало использование асинхронных двигателей с фазным ротором, позволяющих оптимизировать режим работы оборудования путём изменения сопротивления цепи ротора.

Такой подход обеспечивает высокую динамичность и точность регулирования скорости вращения вала двигателя, минимизируя потери электроэнергии и повышая срок службы механизмов.

Полученные экспериментальные данные подтвердили необходимость комплексного подхода к выбору типа электродвигателя для тяжёлого транспортного средства типа стелевоз, учитывая особенности технологического цикла предприятия, интенсивность нагрузок и условия окружающей среды. Асинхронный двигатель с фазным ротором можно назвать действительно удачным выбором для производственных задач. Такой двигатель помогает заметно уменьшить потребление электроэнергии, что особенно важно в условиях постоянного роста тарифов и необходимости экономии ресурсов. Кроме того, использование асинхронного двигателя с фазным ротором положительно сказывается на общей эффективности производственного процесса: оборудование работает стабильнее, а управление запуском и регулировкой мощности становится более гибким и удобным. Всё это в итоге способствует не только снижению затрат, но и повышению надёжности и производительности предприятия.

3 Экспериментальная часть

3.1 Характеристика применяемого оборудования и материалов для исследования

Металлургическое производство в конвертерных цехах требует специализированного оборудования для транспортировки большегрузных ковшей. Сталевозы, применяемые при обслуживании конвертеров объемом свыше 300 тонн, представляют собой платформенные конструкции на 8 колесах. Система передвижения включает четыре ведущих и четыре ведомых колеса, работающих от двух автономных приводных механизмов. Каждый механизм оснащен парой электродвигателей, обеспечивающих надежное перемещение тяжелых грузов. Кинематическая схема сталевозной тележки и её параметры представлены на рисунке 11 и в таблице 5 соответственно.

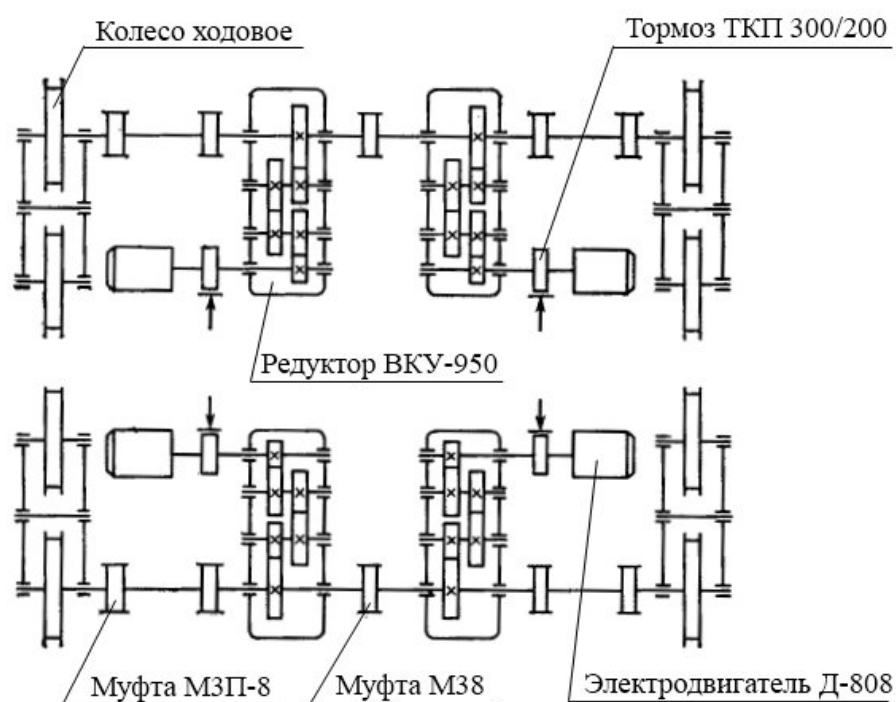


Рисунок 11 – Кинематическая схема сталевозной тележки

Таблица 5 – Параметры расчетной схемы

Масса сталеваза с полным ковшом	590 т
Масса порожнего сталеваза	96 т
Грузоподъемность	494 т
Диаметр ходового колеса	1000 мм
передаточное число редуктора	52,32
Скорость передвижения	0,82 м/с

Таким образом, современное оборудование не только облегчает труд работников, но и делает металлургическое производство более технологичным и безопасным.

3.2 Методика проведения эксперимента

«Производственный цикл транспортировки металла сталевозом включает несколько последовательных этапов:

- ~ перемещение пустого ковша осуществляется приводным сталевозом от участка ремонта непосредственно к конвертеру;
- ~ после наполнения металлом происходит передвижение сталеваза синхронно с процессом выпуска плавки;
- ~ наполненный ковш транспортируется приводным механизмом к установке непрерывной разливки стали;
- ~ далее выполняется перестановка порожней емкости на не приводную тележку при одновременном демонтаже заполненного ковша;
- ~ сталевоз без грузовой емкости перемещает не приводную тележку с ковшом к ремонтному пролету;
- ~ завершающей операцией становится демонтаж пустого ковша с не приводной платформы и монтаж подготовленной емкости на сталевоз для следующего производственного цикла» [3].

3.2.1 Составление детализированной таблицы производственного цикла сталевоза требует предварительного хронометража всех технологических операций

Первоочередной задачей выступает математический анализ временных затрат на перемещение агрегата. Расчетные данные позволят сформировать комплексную матрицу эксплуатационных нагрузок транспортного механизма.

«Общий путь: $S=84,5$ м.

Время разгона и торможения: $t_p=t_T = 5$ с.

Путь, проходимый во время пуска (торможения) при ускорении $\alpha = 0,2$ м/сек²:

$$S_p = S_m = \frac{0,2 \cdot 25}{2} = 2,5 \text{ м}, \quad (1)$$

$$S_p + S_m = 2,5 + 2,5 = 5 \text{ м}. \quad (2)$$

Путь, проходимый при установившемся движении:

$$S - (S_p + S_m) = 84,5 - 5 = 79,5 \text{ м}. \quad (3)$$

Время установившегося движения, $v = 0,82$ м/с:

$$t_y = \frac{S}{v} = \frac{79,5}{0,82} = 97 \text{ с}. \quad (4)$$

Время движения общее (операция № 1):

$$t_1 = t_y + t_p + t_m = 97 + 5 + 5 = 107 \text{ с} \gg [10]. \quad (5)$$

3.2.1.1 Статические нагрузки

Технические характеристики сталевоза включают следующие параметры эксплуатации:

- ~ максимальная транспортная нагрузка составляет 494 тонны при собственной массе агрегата 96 тонн;

- ~ масса пустого ковша достигает 87 тонн, а при стандартном наполнении увеличивается до 450 тонн;

- ~ перемещение установки осуществляется со скоростью 0,82 метра в секунду при сопротивлении токоприемной тележки 150 килограммов;

~ конструктивные особенности механизма определяются размерами ходового колеса диаметром 1000 миллиметров, внутренним диаметром подшипников 180 миллиметров и передаточным числом редуктора 52,32;

~ динамические характеристики ограничивают максимальное ускорение или замедление значением 0,2 метра в секунду.

При эксплуатации агрегата с двумя функционирующими парами двигателей выполняется анализ первой технологической операции.

Транспортная система включает металловоз без наполнения массой 183 тонны совместно с пустой пассивной платформой весом 90 тонн.

«Статическое сопротивление движению, возникающее при взаимодействии колесных подшипников и рельсового полотна, требует расчета с учетом механических характеристик системы.

$$F_{ст} = \frac{1}{2}[(G_{ст} + G_{тел}) \left(\frac{d\mu + 2f}{D}\right)\beta + F_{ст\ тел}], \quad (6)$$

где $\frac{d\mu + 2f}{D}\beta = f'$ – удельное сопротивление перемещению,

$d = 18$ см – внутренний диаметр подшипника ходового колеса,

$\mu = 0,015$ – коэффициент трения в подшипниках ходовых колес,

$f = 0,07$ – коэффициент трения качения ходовых колес по рельсам,

$\beta = 1,5$ – коэффициент, учитывающий трение реборд о рельсы,

$F_{ст.тел.} = 150$ кз – сопротивление перемещению токоприемной тележки.

$$f' = \frac{d\mu + 2f}{D} \cdot \beta = \frac{18 \cdot 0,015 + 2 \cdot 0,07}{100} \cdot 1,5 = 0,00615 \text{ т/т}, \quad (7)$$

$$F_{ст} = \frac{1}{2}[(183 + 90) \cdot 0,00615 + 15] = \frac{1}{2}(1,68 + 0,15) = 0,81 \text{ т}. \quad (8)$$

Необходимая нагрузка на ось сталевого для преодоления силы сопротивления движению:

$$G_{необх.} = \frac{F_{ст}}{\Psi}, \quad (9)$$

где Ψ – коэффициент сцепления,

$\Psi = 0,297$, при $v = 0,82$ м/с

(10)

$$G_{\text{необх}} = \frac{F_{\text{ст}}}{\Psi} = \frac{0,81}{0,297} = 2,73 \text{ т},$$

Действительная нагрузка на ось сталевого вагона:

$$G_{\text{действ.}} = \frac{G_{\text{ст}}}{4} = \frac{183}{4} = 45,8 \text{ т}, \quad (11)$$

$$G_{\text{необх.}} \leq G_{\text{действ.}}, \quad (12)$$

$$2,73 \text{ т} \leq 45,8 \text{ т} \quad (13)$$

При эксплуатации четырех силовых агрегатов сталевагонная машина с установленным пустым разливочным ковшом и неприводной тележкой успешно преодолевает возникающее сопротивление движению без потери сцепления колес с рельсами» [15].

Динамическое сопротивление перемещению сталевагонной машины определяется расчетным путем согласно математической зависимости:

$$F_{\text{д}} = \frac{1}{2} \frac{G_{\text{ст}} + G_{\text{тел}}}{g} a = \frac{1}{2} \frac{183 + 90}{9,8} 0,2 = 2,79 \text{ т}, \quad (14)$$

где $G_{\text{ст}} = 183 \text{ т}$ – вес сталевого вагона с порожним ковшом.

$G_{\text{тел}} = 90 \text{ т}$ – вес порожней неприводной тележки.

$a = 0,2 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение.

$\frac{1}{2}$ – коэффициент демонстрирует значительное снижение сопротивления перемещению при одновременной работе четырех двигателей по сравнению с функционированием двух силовых агрегатов, причем расчетный показатель сопротивления для каждой пары двигателей уменьшается вдвое.

Требуемая величина тягового усилия сталевого вагона определяется суммарным воздействием сил сопротивления движению при одновременном обеспечении заданных параметров ускорения транспортного средства. Динамические характеристики агрегата зависят от массы перевозимого груза, конструктивных особенностей ходовой части и условий эксплуатации на производственной площадке. Расчет оптимальных значений тяговых параметров учитывает коэффициент сцепления колес с рельсами, уклон пути

и механические потери в трансмиссии при различных режимах движения сталевоза:

$$F_{m \text{ полн } необх} = F_{см} + F_{\partial} = 0,81 + 2,79 = 3,6 \text{ т.} \quad (15)$$

«Действительное тяговое усилие одной приводной пары колес:

$$F_{m \text{ полн } действ} = \frac{G_{см}}{4} \psi_1, \quad (16)$$

где $G_{см} = 183 \text{ т}$ – вес сталевоза с порожним ковшем,

$\psi_1 = 0,33$ – коэффициент сцепления при $v = 0 \text{ м/с}$.

$$F_{m \text{ полн } действ} = \frac{183}{4} \cdot 0,33 = 15,1 \text{ т}, \quad (17)$$

$$F_{m \text{ полн } необх} \leq F_{m \text{ полн } действ}, \quad (18)$$

$$3,6 \text{ т} \leq 15,1 \text{ т} \text{ » [17]}. \quad (19)$$

При активной работе двух пар тяговых электродвигателей сталевоз обеспечивает уверенное перемещение порожнего ковша совместно с неприводной тележкой, гарантируя отсутствие пробуксовки и достижение расчетного ускорения $0,2 \text{ м/с}^2$.

3.2.1.2 Аварийный режим работы (работает одна пара двигателей)

«Сопrotивление перемещению подвижного состава включает комплексное взаимодействие сил трения, возникающих между элементами колесных пар и рельсового пути:

$$F_{ст} = (G_{ст} + G_{тел})f + F_{ст.тел.} + F_{ст.прив.}, \quad (20)$$

где $G_{ст} = 183 \text{ т}$ – вес сталевоза с порожним сталеразливочным ковшем,

$G_{тел} = 90 \text{ т}$ – вес порожней неприводной тележки,

$f = 0,00615 \text{ т/т}$ – удельное сопротивление перемещению,

$F_{ст.тел.}$ – сопротивление перемещению от токоприемной тележки,

$F_{ст.прив.}$ – сопротивление перемещению от нерабочего привода,

$$F_{ст.прив.} = \frac{M_{пп.i}}{D/2}, \quad (21)$$

где $M_{пп} = 2a \cdot M_{ном}$ – момент постоянных потерь,

$i = 52,32$ – передаточное число редуктора,

$D = 1000$ мм – диаметр ходового колеса,

где a – коэффициент постоянных потерь,

$M_{\text{ном}}$ – номинальный момент двигателя,

$$M_{\text{ном}} = 975 \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 975 \frac{35}{800} = 42,7 \text{ кГм} = 418 \text{ Н·м}, \quad (22)$$

$$a = \frac{1-n_{\text{н}}}{2n_{\text{н}}} = \frac{1-0,85}{2 \cdot 0,85} = 0,088, \quad (23)$$

$$M_{\text{пп}} = 2a \cdot M_{\text{ном}} = 2 \cdot 0,088 \cdot 42,7 = 7,5 \text{ кГм} = 73,5 \text{ Н·м}, \quad (24)$$

$$F_{\text{ст.прив.}} = \frac{M_{\text{пп}} \cdot i}{D/2} = \frac{7,5 \cdot 52,32}{0,5} = 0,785 \text{ т} = 7,69 \text{ кН}, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{ст}} &= (G_{\text{ст}} + G_{\text{тел}})f + F_{\text{ст.тел.}} + F_{\text{ст.прив.}} = \\ &= (183 + 90) + 0,00615 + 0,15 + 0,785 = 2,61 \text{ т}. \end{aligned} \quad (26)$$

Необходимая нагрузка на ось сталево­за для преодоления сил сопротивления:

$$G_{\text{необх.}} = \frac{F_{\text{ст}}}{\psi} = \frac{2,61}{0,297} = 8,8 \text{ т}, \quad (27)$$

$$\psi = 0,297. \quad (28)$$

Действительная нагрузка на одну ось сталево­за:

$$G_{\text{действ.}} = \frac{G_{\text{ст}}}{4} = \frac{183}{4} = 45,7 \text{ т}, \quad (29)$$

$$G_{\text{необх.}} \leq G_{\text{действ.}},$$

(30)

$$8,8 \text{ т} < 45,7 \text{ т} \text{ » [18]}. \quad (31)$$

При функционировании обоих силовых агрегатов передвижение сталево­за с незаполненным разливочным ковшом и пустой неприводной тележкой осуществляется без проскальзывания колес относительно рельсового пути, успешно преодолевая возникающие силы сопротивления.

«Сопротивление перемещению в динамике:

$$F_{\text{д}} = F_{\text{д1}} + F_{\text{д2}} = \frac{G_{\text{ст}} + G_{\text{тел}}}{g} a + \frac{G_1}{g} a = \frac{G_{\text{ст}} + G_{\text{тел}} + G_1}{g} a, \quad (32)$$

где $F_{\text{д1}}$ – сопротивление перемещению состава.

$F_{\text{д2}}$ – сопротивление перемещению от нерабочего привода.

$a = 0,2 \text{ м/с}^2$ – ускорение движения.

$$G_1 = \frac{G \cdot D_{\text{прив}}^2}{D^2}, \quad (33)$$

где $G \cdot D_{\text{прив}}^2$ – суммарный маховый момент двух двигателей и муфт,

$G \cdot D_{\text{дв}}^2 = 8,0 \text{ кгм}^2$ – маховый момент двигателя,

$G \cdot D_{\text{МЗ-4}}^2 = 2,45 \text{ кгм}^2$ – маховый момент муфты,

$G \cdot D_{\text{МЗ-8}}^2 = 8,3 \text{ кгм}^2$ – маховый момент муфты,

$G \cdot D_{\text{МЗП-8}}^2 = 16,5 \text{ кгм}^2$ – маховый момент муфты.

$$\begin{aligned} G \cdot D_{\text{прив}}^2 &= 2 \left(G \cdot D_{\text{дв}}^2 + 0,2 G \cdot D_{\text{дв}}^2 + G \cdot D_{\text{МЗ-4}}^2 \right) i^2 + G \cdot D_{\text{МЗ-8}}^2 + 4 G \cdot D_{\text{МЗП-8}}^2 = \\ &= 2 (8 + 0,2 \cdot 8 + 2,45) \cdot 52,32^2 + 8,3 + 4 \cdot 16,5 = 66074 \text{ кгм}^2. \end{aligned} \quad (34)$$

$$G_1 = \frac{G \cdot D_{\text{прив}}^2}{D^2} = \frac{66074}{1} = 66074 \text{ кг} = 66,074 \text{ т} = 647 \text{ кН} \quad - \quad \text{нагрузка от}$$

маховых масс одного привода, приведенных к валу

$$F_d = \frac{183+90+66,1}{9,8} 0,2 = 6,94 \text{ т} = 68 \text{ кН} \quad [13]. \quad (35)$$

Расчётная величина тягового усилия сталевоза определяется суммарным воздействием динамических нагрузок при перемещении тележки и преодолении инерционных сил в процессе разгона транспортного механизма с установленными параметрами ускорения:

$$\langle F_{\text{т.полн.необх.}} = F_d + F_{\text{ст}} = 2,61 + 6,94 = 9,55 \text{ т} = 93,6 \text{ кН}. \quad (36)$$

Действительное полное тяговое усилие:

$$F_{\text{т.полн.действ.}} = \frac{G_{\text{ст}}}{4} \psi_1, \quad (37)$$

где $\psi_1 = 0,33$ при $v = 0 \text{ м/с}$,

$$F_{\text{т.полн.действ.}} = \frac{183}{4} 0,33 = 15,1 \text{ т} = 148 \text{ кН}, \quad (38)$$

$$F_{\text{т.полн.необх.}} \leq F_{\text{т.полн.действ.}}, \quad (39)$$

$$9,55 \text{ т} < 15,1 \text{ т}. \quad (40)$$

При эксплуатации единственной пары двигателей сталевозного агрегата с установленным порожним сталеразливочным ковшом и неприводной

тележкой система обеспечивает равномерное движение без пробуксовки, достигая расчетного ускорения $0,2 \text{ м/с}^2$ » [16].

3.2.2 Расчет статических моментов

«Момент статической нагрузки определяется из выражения:

$$M_{cm} = \frac{F \cdot D}{2 \cdot \eta_x \cdot i}, \quad (41)$$

где F – сила сопротивления передвижению,

D – диаметр колес,

η_x – КПД механизма при его неполной загрузке.

$$\eta_x = \frac{1}{\frac{1}{\eta_1} + \frac{d}{x} - d}, \quad (42)$$

где η_1 – КПД механизма при полной загрузке,

x – степень загрузки механизма,

$d = 0,1$ – отношение момента потерь холостого хода к моменту при работе с полной нагрузкой.

За максимальную рабочую нагрузку сталевоза следует рассматривать силу сопротивления перемещению транспортного средства, загруженного металлическим ковшом, при функционировании единственной пары силовых агрегатов.

Значения M_{cm} , определенные по этой формуле, приведены в таблице 6» [27].

3.2.3 Определение динамического момента

«Расчет ведется на примере операции №1:

$$M_{дин} = \frac{GD_{1\partial\epsilon}^2 \cdot n_n}{375 \cdot t_p}. \quad (43)$$

Общий маховый момент 4 двигателей, приведенный к оси одной пары двигателей:

$$GD_{4\partial\theta}^2 = 4GD_{1\partial\theta}^2 + 4 \cdot 0,2GD_{1\partial\theta}^2 + 4GD_{M3-4}^2 + \frac{8GD_{M3П-8}^2}{i^2} + \frac{2GD_{M3-8}^2}{i^2} + GD_n^2 \quad (44)$$

где $GD_n^2 = 365 \cdot G \cdot (\frac{v}{n})^2$ – маховый момент поступательно движущихся масс» [20].

$$GD_{4\partial\theta}^2 = 4 \cdot 7,5 + 4 \cdot 0,2 \cdot 7,5 + 4 \cdot 2,45 + \frac{8 \cdot 16,5}{52,32^2} + \frac{2 \cdot 8,3}{52,32^2} + 365 \cdot 273 \cdot 10^3 (\frac{0,82}{800})^2 = 151,9 \text{ кгм}^2 \quad (45)$$

Рабочий маховый момент силового блока достигает значения 151,9 кгм² при возникновении аварийных условий эксплуатации, характеризующихся функционированием двух пар электродвигателей в стандартном операционном цикле:

$$GD_{2\partial\theta}^2 = \frac{GD_{4\partial\theta}^2}{2} = \frac{151,9}{2} = 75,95 \text{ кгм}^2. \quad (46)$$

«Маховый момент одного двигателя при аварийном режиме работы:

$$GD_{1\partial\theta A}^2 = \frac{GD_{4\partial\theta}^2}{2} = \frac{151,9}{2} = 75,95 \text{ кгм}^2. \quad (47)$$

Маховый момент одного двигателя при нормальном режиме работы:

$$GD_{1\partial\theta H}^2 = \frac{GD_{2\partial\theta}^2}{2} = \frac{75,95}{2} = 37,975 \text{ кгм}^2. \quad (48)$$

Момент динамический определяется по формуле:

$$M_{дин} = \frac{GD_{1\partial\theta}^2 \cdot n_n}{375 \cdot t_p}. \quad (49)$$

Моменты двигателей при пуске и торможении определим по формулам:

$$M_{пуск} = M_{дин} + M_{ст}, \quad (50)$$

$$M_{торм} = M_{дин} - M_{ст}. \quad (51)$$

Их величины указаны в таблице 6» [17].

3.2.4 Проверка двигателей по условиям нагрева

«Для проверки двигателей на нагрев, при условии $M_{\partial\theta} = const$ можно пользоваться методом эквивалентного момента.

$$M_{\text{экс}} = \sqrt{\frac{M_{\text{нукс}}^2 \cdot t_p + M_{\text{см}}^2 \cdot t_y + M_m^2 \cdot t_m}{t_p + t_y + t_m}} = \sqrt{\frac{\Sigma M^2 t}{t}}. \quad (52)$$

Нормальный режим работы двигателей (когда ковш со сталью на приводной тележке):

$$M_{\text{экс}} = \sqrt{\frac{\Sigma M^2 t}{t}} = \sqrt{\frac{11033363}{909,25}} = 110 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (53)$$

Аварийный режим работы двигателей (когда ковш со сталью на приводной тележке):

$$M_{\text{эксА}} = \sqrt{\frac{\Sigma M^2 t}{t}} = \sqrt{\frac{56182749}{909,25}} = 249 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (54)$$

Продолжительность включения:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% = \frac{909,25}{2100} \cdot 100\% = 43\%. \quad (55)$$

Определим допустимый момент двигателя при ПВ=43%. Допустимая мощность двигателя при ПВ=43% 26 кВт.

Допустимый момент двигателя:

$$M_{\text{дон}} = \frac{P}{\omega} = \frac{26000 \cdot 30}{\pi \cdot 800} = 310 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (56)$$

Следовательно: $M_{\text{эксА}} = 249 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{дон}} = 310 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и возможна нормальная работа на двух двигателях» [17].

3.2.5 Расчет максимального момента, развиваемого двигателем

При разработке технического решения максимально допустимое значение линейного ускорения установлено на уровне 0,2 м/с², что обеспечивает оптимальную производительность системы через соответствующее угловое ускорение механизма:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_H}{t_p} = \frac{800}{5} = 160 \frac{\text{мин}^{-1}}{\text{с}}. \quad (57)$$

Работа с двумя двигателями. Ковш со сталью на стелевозе.

$$M_{\text{дин}} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{1685,11}{375} \cdot 160 = 717,36 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (58)$$

Двигатель должен развивать момент:

$$M_{\partial в} = M_{сmax} + M_{\partial ин} = 279,3 + 717,36 = 997 \text{ кН}. \quad (59)$$

Двигатель Д808 допускает перегрузку по максимальному моменту:

$$M_{\partial оп. max} = 2,5 \cdot M_n = 2,5 \cdot 418,46 = 1046,15 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (60)$$

Предельно допустимое значение динамического момента возникает при установленном ограничении крутящего момента силового агрегата в рамках эксплуатационных параметров:

$$M_{\partial ин} = M_{с. max} \quad (61)$$

В этом случае электроприводу будет сообщаться ускорение:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{M_{\partial ин}}{GD^2} 375 = \frac{766,85}{1685,11} 375 = 171 \frac{\text{мин}^{-1}}{\text{с}}. \quad (62)$$

Вывод: данные двигатели обеспечивают необходимый динамический момент.

Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Статические нагрузки

		Операции			
		1	2	3	5
Время $t_p = t_T$, с		5	1,25	5	5
Время установившегося движения t_y , с		97	2,75	440	337
Полное время движения $t_{\text{полн}}$, с		107	5,25	450	347
Момент статический на 1 двигатель, Нм	4 дв	56,6	79,4	125	56,8
	2 дв	157	166	279	156
Момент динамический на 1 двигатель, Нм	4 дв	73,99	323,4	398,86	234,22
	2 дв	147,98	646,8	797,72	468,44
Момент пусковой на 1 двигатель, Нм	4 дв	130,536	402,78	524,3	291,06
	2 дв	304,78	812,91	1077	624,75
Момент тормозной на 1 двигатель, Нм	4 дв	17,395	244	273,42	177,38
	2 дв	8,82	482,65	518,42	312,13
$M_n^2 t + M_T^2 t + M_{ст}^2 t$	4 дв	310690	611215	1526314	313386
	2 дв	2384865	2676475	7566823	2369983

Выводы по разделу

Рассчитанный цикл работы электродвигателя сталевоза 450 тонн учитывал реальные производственные условия комбината чёрной металлургии и обеспечивал выполнение всех необходимых операций с оптимальной производительностью и энергоэффективностью.

Ключевые моменты расчета:

- ~ режимы нагрузки электродвигателя. Были определены различные стадии рабочего цикла сталевоза, включающие разгон, движение с постоянной нагрузкой, замедление и остановку. Это позволило установить зависимость потребляемой мощности от момента времени, учесть тепловые потери и подобрать оптимальный тип двигателя;

- ~ энергопотребление и тепловая нагрузка. Расчёт энергопотребления показал, что электродвигатель справляется с задачами, однако при длительных максимальных нагрузках возникает перегрев, что подтверждает важность учёта динамики процессов и неравномерности нагрузки;

- ~ выбор способа охлаждения. Анализ условий эксплуатации выявил целесообразность использования принудительной вентиляции для отвода тепла, предотвращающей перегрев обмоток и подшипников электродвигателя;

- ~ автоматизированное управление. Для повышения надежности и снижения износа элементов привода были разработаны алгоритмы автоматизированного управления двигателями, позволяющие плавно регулировать скорость вращения и исключать пиковые нагрузки;

- ~ практическая реализация. Полученные расчеты позволили создать проект модернизации существующих электродвигателей сталевоза, ориентированный на повышение долговечности и уменьшение расходов на электроэнергию.

Оптимальное сочетание характеристик электродвигателя сталевоза, тепловой защиты и автоматического управления, определённое расчётом, обеспечивает надёжную и экономичную работу оборудования. Эти результаты служат основой для модернизации сталевоза на заводе.

4 Результаты экспериментальных исследований

4.1 Исследование влияния мощности электродвигателя на производительность самоходного сталево­за

В качестве привода сталево­за используются двигатели Д808. Основные данные двигателя сведены в таблицу 7.

Таблица 7 - Технические характеристики двигателя Д808

Наименование	Размерность	Числовое значение
1	2	3
Тип двигателя	-	Д808
Номинальная мощность	кВт	26
Продолжительность включения	%	40
Номинальное напряжение	В	220
Номинальный ток	А	134
Номинальная скорость	мин^{-1}	825
Маховый момент	кгм^2	8
Кратность тока	-	2,5
Сопротивление обмотки якоря при 20°С	Ом	0,0342
Сопротивление обмотки добавочных полюсов	Ом	0,022
Температурный коэффициент сопротивления	-	1,38
Сопротивление якорной цепи двигателя	Ом	0,0775
Число пар полюсов	-	4
Число параллельных ветвей обмотки якоря	-	2
Число активных проводников якоря	-	278
Число витков обмотки возбуждения на полюс	-	1200
Номинальный ток возбуждения	А	3,74
Сопротивление обмотки возбуждения при 20°С	Ом	44,4
Общее рабочее сопротивление обмоток возбуждения	Ом	61,2
Номинальный магнитный поток на полюс	Вб	61,2
Номинальная ЭДС двигателя	В	205
Напряжение на обмотке возбуждения	В	229
Номинальная частота вращения	рад/с	86,4
Номинальный момент	Нм	301

Продолжение таблицы 7

Наименование	Размерность	Числовое значение
1	2	3
Индуктивность якорной цепи двигателя	Гн	$5,7 \cdot 10^{-3}$
Конструктивная постоянная	-	88,5
Индуктивность цепи возбуждения	Гн	56,2

«Определим коэффициент передачи двигателя:

$$k_{\partial} = \frac{1}{k \cdot \Phi_H} = \frac{\omega_H}{U_H - I_H \cdot R_a} = \frac{86,4}{220 - 134 \cdot 0,0775} = 0,412, B \cdot c. \quad (63)$$

Определим номинальный и максимальный моменты двигателя:

$$M_H = \frac{I_H}{k_{\partial}} = \frac{134}{0,412} = 325, H \cdot m, \quad (64)$$

$$M_{max} = \frac{I_{max}}{k_{\partial}} = \frac{2,5 \cdot I_H}{k_{\partial}} = \frac{335}{0,412} = 813, H \cdot m \gg [17]. \quad (65)$$

Регулятор тока представляет пропорционально - интегральное звено, он компенсирует электромагнитную инерцию якоря Тя. Физический смысл компенсации заключается в форсировке переходных режимов в цепях якоря. Регулятор ЭДС выполнен пропорциональным.

Структурная схема контура тока представлена на рисунке 12.

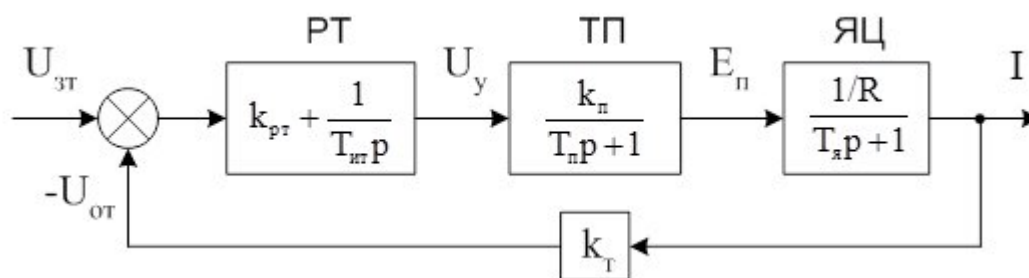


Рисунок 12 – Структурная схема контура тока

«Определим коэффициент обратной связи по току из условия, что пусковой ток равен $2,5I_H$:

$$k_T = \frac{U_{от-мах}}{I_{мах}} = \frac{10}{335} = 0,0299, \text{ Ом}, \quad (66)$$

$$k_{PT} = \frac{T_J}{2T_{II} \cdot \frac{k_{IT} k_T}{R}} = \frac{0,075}{2 \cdot 0,01 \cdot \frac{31 \cdot 0,0299}{0,121}} = 0,49, \text{ о.е.} \quad (67)$$

Коэффициент усиления пропорциональной части регулятора тока всегда меньше единицы.

Постоянная времени интегрирования регулятора тока:

$$T_{ИТ} = \frac{T_J}{k_{PT}} = \frac{0,075}{0,49} = 0,153, \text{ с.} \quad (68)$$

Передаточная функция регулятора тока:

$$W_{PT}(p) = 0,49 + \frac{1}{0,153 \cdot p} \gg [18]. \quad (69)$$

Коэффициент обратной связи по ЭДС:

$$k_C = \frac{U_{ОСМАХ}}{\omega_{МАХ}} = \frac{10}{86,4} = 0,116, \text{ В} \cdot \text{с.} \quad (70)$$

Коэффициент усиления регулятора ЭДС:

$$k_{PC} = \frac{T_M}{4 \cdot T_{II} \cdot \frac{k_{IT} k_C \cdot R}{k_T}} = \frac{0,756}{4 \cdot 0,01 \cdot \frac{0,412 \cdot 0,116 \cdot 0,121}{0,0299}} = 97,7, \text{ В} \cdot \text{с.} \quad (71)$$

Передаточная функция регулятора ЭДС:

$$W_{PЭ}(p) = 97,7. \quad (72)$$

Структурная схема модели и переходные процессы приведены на рисунке 13 и рисунке 14 соответственно.

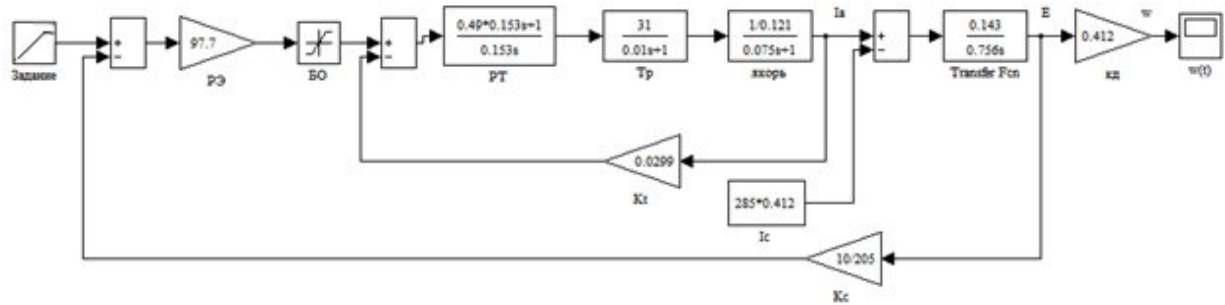


Рисунок 13 - Структурная схема модели с ДПТ

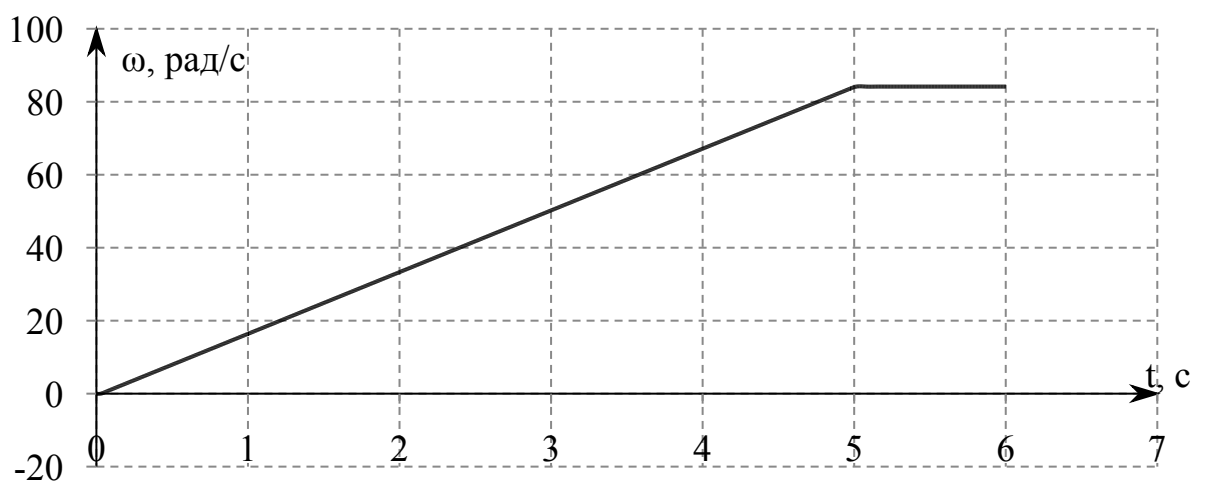


Рисунок 14 - Процесс разгона стелевозной тележки

Таким образом, структурная схема модели и переходные процессы являются результатом проведенных расчетов.

4.2 Изучение зависимости динамики разгона/торможения от типа и характеристик электродвигателя

«Асинхронные электродвигатели требуют тщательного анализа пусковых характеристик перед установкой. Рабочий цикл привода характеризуется значительными колебаниями статического момента от минимальных 56 Нм до максимальных 280 Нм. Расчетные параметры

показывают необходимость обеспечения крутящего момента в 1077 Нм для оптимального разгона сталево­за согласно техническим требованиям» [19].

«Пусковые характеристики электродвигателей постоянного тока позволяют достигать момента, превышающего номинальный в 2,5 раза. Регулирование продолжительности включения открывает возможности повышения мощностных показателей привода. Специализированные серии асинхронных машин обеспечивают двукратное превышение пускового момента относительно номинального значения» [19].

Расчет параметров асинхронного электродвигателя производится на основе максимальных значений крутящего момента, необходимых для реализации наиболее энергоемкой технологической операции.

В приводной системе сталево­за применяется асинхронный электродвигатель серии 4AP с короткозамкнутым ротором. Необходимая мощность агрегата определяется посредством расчета:

$$P_{\partial\partial} = M \cdot \omega = \frac{M_n \cdot \pi \cdot n}{2 \cdot 30} = \frac{1077 \cdot 3,14 \cdot 800}{60} = 45090 \text{ Вт}. \quad (73)$$

Принимаем к установке двигателя 4AP250S6Y3 мощностью 45 кВт, синхронная частота вращения 1000 мин⁻¹.

4.3 Оценка энергопотребления самоходного сталево­за в зависимости от режимов работы электродвигателя

Подбор асинхронного двигателя осуществляется с учетом его нагрузочной способности и температурных режимов работы. Проведем дополнительную проверку соответствия характеристик выбранного электродвигателя заданным условиям эксплуатации.

«Метод средних потерь применяется при проведении проверки нагрева оборудования. Расчет начинается с определения каталожных значений потерь при номинальных условиях работы.

Потери в номинальном режиме, кВт:

$$\Delta P_n = \frac{1-\eta_n}{\eta_n} \cdot P_n, \quad (74)$$

где P_n – номинальная мощность выбранного АД, Вт,

η_n – КПД в номинальном режиме по каталогу.

$$\Delta P_n = \frac{1-0,915}{0,915} \cdot 45 = 4180 \text{ Вт} \gg [15]. \quad (75)$$

Суммарные энергетические потери асинхронного двигателя складываются из нескольких компонентов:

~ неизменная составляющая включает механические потери, магнитные потери в стальном сердечнике и дополнительные расходы энергии при работе на холостом ходу;

~ нагрузочные потери, возникающие в медных обмотках статора и ротора электродвигателя, изменяются пропорционально квадрату тока нагрузки.

В большинстве случаев соблюдаются следующие соотношения:

$$P_o = P_c + P_{мех} \approx 0,35 \cdot \Delta P_n, \quad (76)$$

$$P_m \approx 0,65 \cdot \Delta P_n, \quad (77)$$

где P_m – потери в меди обмоток при номинальной нагрузке, Вт,

P_o – потери х.х. (постоянные потери), Вт.

$$P_m \approx 0,65 \cdot 4180 = 2770 \text{ Вт}, \quad (78)$$

$$P_o \approx 0,35 \cdot 4180 = 1463 \text{ Вт}. \quad (79)$$

Электрические потери, возникающие в процессе эксплуатации обмоток трансформатора, демонстрируют квадратичную зависимость от протекающего тока и коэффициента нагрузки, характеризуя переменный характер энергетических затрат.

Математическое описание нагрузочных характеристик трансформатора определяется ступенчатым графиком распределения мощности:

$$K_{ni} = \frac{P_i}{P_n}, \quad (80)$$

где P_i – мощность i -й ступени нагрузки,

K_{ni} – коэффициент нагрузки i -й ступени.

$$\begin{aligned}
K_{н1} &= \frac{P_1}{P_n} = \frac{12,8}{45} = 0,284; K_{н2} = \frac{P_2}{P_n} = \frac{34,1}{45} = 0,757; K_{н3} = \frac{P_3}{P_n} = \frac{45}{45} = 1; \\
K_{н4} &= \frac{P_4}{P_n} = \frac{26,2}{45} = 0,58; K_{н5} = \frac{P_5}{P_n} = \frac{0,369}{45} = 0,008; K_{н6} = \frac{P_6}{P_n} = \frac{20,2}{45} = 0,449; \\
K_{н7} &= \frac{P_7}{P_n} = \frac{21,7}{45} = 0,483; K_{н8} = \frac{P_8}{P_n} = \frac{13,1}{45} = 0,29; K_{н9} = \frac{P_9}{P_n} = \frac{13,1}{45} = 0,292; \\
K_{н10} &= \frac{P_{10}}{P_n} = \frac{13,9}{45} = 0,309; K_{н11} = \frac{P_{11}}{P_n} = \frac{23,4}{45} = 0,52; K_{н12} = \frac{P_{12}}{P_n} = \frac{13,1}{45} = \\
&= 0,292.
\end{aligned}$$

Потери на каждой ступени графика нагрузки, Вт,

$$\Delta P_1 = P_o + K_{н1}^2 \cdot P_m, \quad (81)$$

$$\Delta P_1 = P_o + K_{н1}^2 \cdot P_m = 1463 + 0,284^2 \cdot 2770 = 1686 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_2 = 3049 \text{ Вт}; \Delta P_3 = 4247 \text{ Вт}; \Delta P_4 = 2340 \text{ Вт}; \Delta P_5 = 1463 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_6 = 2022 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_7 = 2108 \text{ Вт}; \Delta P_8 = 1697 \text{ Вт}; \Delta P_9 = 1699 \text{ Вт}; \Delta P_{10} = 1727 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{11} = 2211 \text{ Вт}; \Delta P_{12} = 1697 \text{ Вт};$$

Средние потери за цикл, Вт:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{1789225}{909,25} = 1968 \text{ Вт}. \quad (82)$$

«Проверка выбранного двигателя по нагреву заключается в проверке условия:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n \quad (83)$$

$$1968 \text{ Вт} < 4180 \text{ Вт}. \quad (84)$$

В нашем случае условие выполняется, следовательно, двигатель проходит по нагреву» [23].

4.4 Анализ тепловых процессов в электродвигателе при различных нагрузках

«Для моделирования выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором марки 4AP со следующими паспортными данными:

- ~ номинальная выходная мощность $P_{2H}=45$ кВт;
- ~ номинальное фазное напряжение обмотки статора $U_{1H}=220$ В;
- ~ номинальная частота тока $f_1=50$ Гц;
- ~ номинальный коэффициент полезного действия $\eta_H=91,5$ %;
- ~ номинальный коэффициент мощности статорной обмотки $\cos\varphi=0,82$;
- ~ критическое скольжение ротора $S_k=9,5$ %;
- ~ номинальное скольжение ротора $S_H=2,9$ %;
- ~ число пар полюсов: $p=3$;
- ~ число фаз: $m=3$;
- ~ скорость холостого хода: $n_1=1000$ об/мин;
- ~ момент инерции на валу машины: $J=1,16$ кг $\times$ м².

Параметры Г-образной схемы замещения в относительных единицах, представленной на рисунке 15:

- ~ в номинальном режиме:
 $R'_1=0,033$, $X'_1=0,073$, $R''_2=0,015$, $X''_2=0,18$, $X_m=2,9$,
- ~ в режиме короткого замыкания:
 $R''_{2K3}=0,081$, $X''_{2K3}=0,11$ » [28].

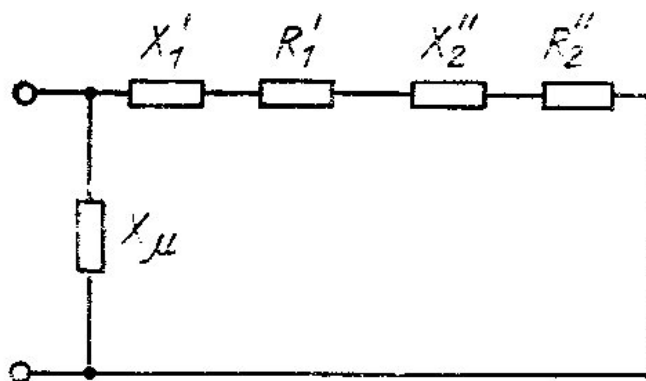


Рисунок 15 - Г-образная схема замещения

На основании предоставленных паспортных характеристик асинхронного двигателя и элементов Г-образной схемы производится комплексный расчет компонентов Т-образной схемы замещения при коротком замыкании (согласно представленному рисунку 16), включая определение параметров составных блоков модели асинхронной машины.

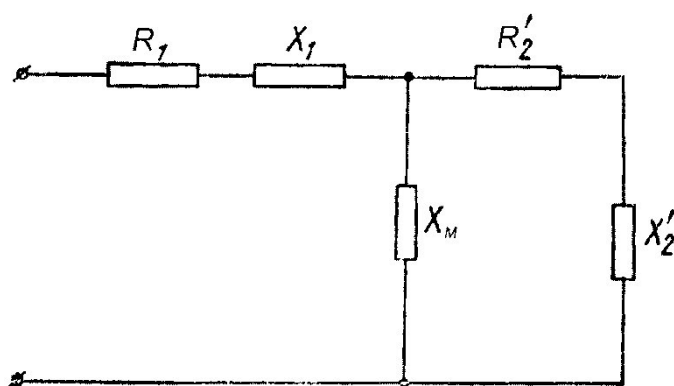


Рисунок 16 – Т-образная схема замещения

Номинальный фазный ток статора:

$$I_{1н} = \frac{P_{2н}}{3U_{1н}\eta_n \cos \varphi} = \frac{45000}{3 \cdot 220 \cdot 0,915 \cdot 0,82} = 90,9 \text{ A.} \quad (85)$$

Базисное значение сопротивления:

$$Z_{баз} = \frac{U_{1н}}{I_{1н}} = \frac{220}{90,9} = 2,42 \text{ Ом.} \quad (86)$$

Угловая частота тока:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ c}^{-1}. \quad (87)$$

Реактивное сопротивление рассеяния статора в относительных единицах:

$$X_{1*} = \frac{2X'_{1*}X_{m*}}{X_{m*} + \sqrt{X_{m*}^2 + 4X'_{1*}X_{m*}}} = \frac{2 \cdot 0,073 \cdot 2,9}{2,9 + \sqrt{2,9^2 + 4 \cdot 0,073 \cdot 2,9}} = 0,071 \text{ Ом.} \quad (88)$$

«Коэффициент, связывающий параметры машины в Т- и Г-образной схемах замещения:

$$c_1 = \frac{X'_{1*}}{X_{1*}} = \frac{0,073}{0,071} = 1,025. \quad (89)$$

Реактивное сопротивление рассеяния фазы статора:

$$X_1 = \frac{X'_{1*}Z_{\delta az}}{c_1} = \frac{0,073 \cdot 2,42}{1,025} = 0,172 \text{ Ом} \gg [30].$$

(90)

Активное сопротивление фазы статора:

$$R_1 = R_s = \frac{R'_{1*}Z_{\delta az}}{c_1} = \frac{0,033 \cdot 2,42}{1,025} = 0,078 \text{ Ом.} \quad (91)$$

Индуктивность рассеяния фазы статора:

$$L_{1S} = \frac{X_1}{\omega_1} = \frac{0,172}{314} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.} \quad (92)$$

Реактивное сопротивление рассеяния фазы ротора:

$$X'_2 = \frac{X'_{2*}Z_{\delta az}}{c_1} = \frac{0,18 \cdot 2,42}{1,025} = 0,415 \text{ Ом.} \quad (93)$$

Активное сопротивление фазы ротора:

$$R'_2 = R'_R = \frac{R'_{2*}Z_{\delta az}}{c_1} = \frac{0,015 \cdot 2,42}{1,025} = 0,035 \text{ Ом.} \quad (94)$$

Индуктивность рассеяния фазы ротора:

$$L_{2S} = \frac{X'_2}{\omega_1} = \frac{0,415}{314} = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (95)$$

Реактивное сопротивление взаимной индукции:

$$X_m = X_{m*} \cdot Z_{\delta az} = 2,9 \cdot 2,42 = 7,02 \text{ Ом.} \quad (96)$$

Индуктивность взаимной индукции:

$$L_m = \frac{X_m}{1,5\omega_1} = \frac{7,02}{1,5 \cdot 314} = 0,015 \text{ Гн.} \quad (97)$$

Полная индуктивность фазы статора:

$$L_S = L_m + L_{1S} = 0,015 + 5,49 \cdot 10^{-4} = 0,015 \text{ Гн.} \quad (98)$$

Полная индуктивность фазы ротора:

$$L_R = L_m + L_{2S} = 0,015 + 1,32 \cdot 10^{-3} = 0,016 \text{ Гн.} \quad (99)$$

Суммарные потери мощности в двигателе:

$$(\sum P)_{ном} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} - P_{2H} = \frac{45000}{0,915} - 45000 = 4180 \text{ Вт.} \quad (100)$$

Основные потери в обмотке статора:

$$p_{\varepsilon 1} = m \cdot I_{1H}^2 \cdot R_S = 3 \cdot 90,9 \cdot 0,078 = 1932 \text{ Вт.} \quad (101)$$

Намагничивающий ток:

$$I_m = \frac{U_{1H}}{X_1 + X_m} = \frac{220}{0,172 + 7,02} = 30,6 \text{ А.} \quad (102)$$

Потери в стали статора:

$$p_{cm1} = m \cdot I_m^2 \cdot r_m^* \cdot Z_{\sigma a3} = 3 \cdot 30,6 \cdot 0,08 \cdot 2,42 = 543 \text{ Вт,} \quad (103)$$

где r_m^* выбирается из диапазона 0,08-0,2.

Основные потери в обмотке ротора:

$$p_{\varepsilon 2} = S_H \cdot \left(\frac{P_{2H}}{\eta_H} - p_{\varepsilon 1} - p_{cm1} \right) = 0,029 \cdot \left(\frac{45000}{0,915} - 1932 - 543 \right) = 1354 \text{ Вт.} \quad (104)$$

Суммарные потери в стали и механические:

$$\begin{aligned} (p_{cm} + p_{мех})_{ном} &= (\sum P)_{ном} - p_{\varepsilon 1} - p_{\varepsilon 2} = 4180 - 1932 - 1354 = \\ &= 894 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (105)$$

Механические потери:

$$p_{мех} = (p_{cm1} + p_{мех})_{ном} - p_{cm1} = 894 - 543 = 351 \text{ Вт.} \quad (106)$$

Скорость идеального холостого хода двигателя:

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,72 \text{ с}^{-1}. \quad (107)$$

Номинальная скорость вращения двигателя:

$$\omega_n = \omega_1(1 - S_n) = 104,72 \cdot (1 - 0,029) = 101,68 \text{ с}^{-1}. \quad (108)$$

Коэффициент трения:

$$F = \frac{p_{\text{мех}}}{\omega_n^2} = \frac{351}{101,68^2} = 0,034. \quad (109)$$

Выводы по разделу

Цель проведенного исследования заключалась в определении зависимости производительности самоходного сталевоза от мощности устанавливаемого электродвигателя. Было установлено следующее:

- ~ зависимость производительности от мощности двигателя. Установлено наличие прямой корреляционной связи между мощностью электродвигателя и средней суточной производительностью сталевоза. Увеличение мощности способствует сокращению времени доставки и улучшению общего показателя выработки за смену;

- ~ экономическая оценка. Несмотря на очевидные преимущества высокопроизводительных установок, чрезмерное увеличение мощности двигателя ведёт к существенному росту первоначальной стоимости и увеличению потребления электрической энергии, что снижает рентабельность вложений;

- ~ оптимальная мощность электродвигателя. Определён диапазон значений мощности электродвигателя, позволяющий достичь максимальной экономической выгоды. Данный диапазон соответствует средним значениям производственной активности завода и гарантирует минимальный простой оборудования вследствие неисправностей;

- ~ факторы, влияющие на выбор мощности. Выявлены дополнительные факторы, влияющие на принятие решения о выборе электродвигателя определённой мощности, среди которых климатические условия, состояние путей следования и частота проведения ремонтных работ.

Таким образом, проведённое исследование подтвердило положительную связь между мощностью электродвигателя и производительностью самоходного сталеваза, предложив практическое решение для выбора оптимальной конфигурации силового агрегата исходя из конкретных производственных потребностей.

5 Практические рекомендации и перспективы дальнейшего развития

5.1 Выводы по результатам проведенных исследований

Применение принципа регулирования $U/f=\text{const}$ позволяет эффективно управлять асинхронными двигателями при различных режимах работы. Данный метод поддерживает номинальный уровень потокоцепления статора в базовом диапазоне скоростей. Регулирование скорости вращения сопровождается изменением характеристик магнитного поля: повышение приводит к ослаблению поля, снижение уменьшает перегрузочную способность.

«Разомкнутые системы с регулированием $U/f=\text{const}$ характеризуются отклонением фактической угловой скорости от заданной на величину частоты скольжения. Предельное значение погрешности скорости определяется номинальным скольжением, равным круговой электрической частоте тока ротора.

Существенным преимуществом приводов данного типа выступает стабильность работы при минимальных скоростях вращения, где векторные системы управления демонстрируют неустойчивость. Динамические характеристики приводов совершенствуются внедрением обратных связей в структуру системы управления» [18].

«Ключевая величина в этой системе управления – активный ток статора $i_{1\text{акт}}$. Он вычисляется в неподвижной системе координат по формуле:

$$i_{1\text{акт}} = i_{1\alpha} \cdot \cos \vartheta + i_{1\beta} \cdot \sin \vartheta \quad (110)$$

где ϑ – угловое положение вектора напряжения статора относительно неподвижной системы координат, получаемое в результате интегрирования частоты вращения поля ω_0 .

В структуре асинхронного электропривода величина активной составляющей тока статора имеет прямую пропорциональную зависимость от

электромагнитного момента, причем формирование заданного значения данного тока происходит посредством выходного сигнала регулятора частоты вращения.

Оценка скорости производится с использованием частоты вращения поля ω_0 , получаемой на выходе регулятора тока, и активного тока статора $i_{1акт}$, который пропорционален частоте скольжения.

Номинальная величина активного тока статора соответствует номинальной частоте скольжения $\omega_{2н}$. В этом случае оцененная величина угловой скорости вычисляется как

$$\omega = \frac{\omega_0 - \omega_2}{p}, \quad (111)$$

где $\omega_2 = i_{1акт} \cdot \omega_{2н} / i_{1акт.н}$

Линейная зависимость частоты скольжения от активного тока применима исключительно на линейном участке механической характеристики асинхронного двигателя. При динамических режимах работы, включая пусковые операции, метод оценки скорости демонстрирует значительные погрешности измерения вследствие нелинейности характеристик» [26].

Регулятор скорости формирует ограничение тока статора, позволяя осуществлять активный контроль внутренней обратной связи. Заданные параметры защищают электродвигатель от чрезмерных нагрузок во время эксплуатации.

«Положительная обратная связь по току статора выступает корректирующим сигналом, нейтрализующим спад напряжения на активном сопротивлении статорной обмотки электродвигателя» [26]. Математическое выражение закона регулирования принимает вид $U - IR/f = \text{const}$. Нейтрализация падения напряжения обеспечивает независимость амплитудного значения вектора потокосцепления статора от частоты, сохраняя неизменную перегрузочную способность двигателя.

Построение модели асинхронного электродвигателя осуществляется посредством программного комплекса Matlab с применением библиотеки SimPowerSystems. «Система регулирования включает алгоритм управления $U/f=\text{const}$, дополненный IR-компенсацией и задатчиком интенсивности. Длительность переходного процесса разгона составляет 5 секунд» [21]. Визуализация структурной схемы и полученных результатов моделирования представлена на рисунке 17 и рисунке 18.

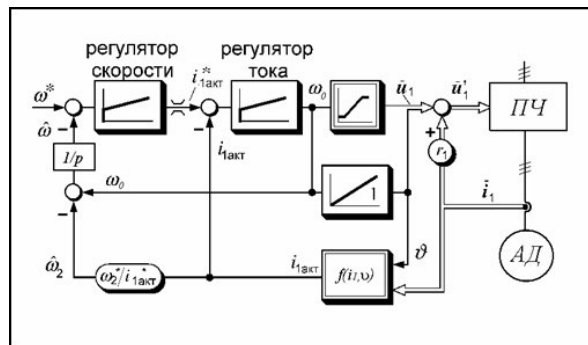


Рисунок 17 – Структурная схема модели привода

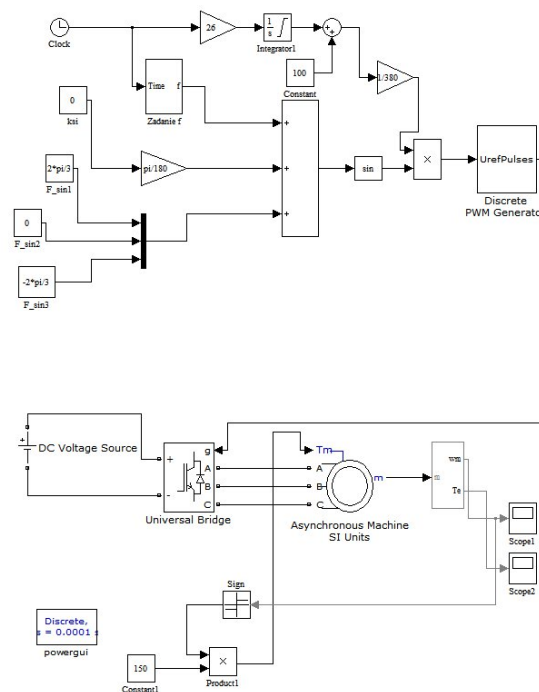


Рисунок 18 - Реализация модели привода в Matlab

Переходные процессы разгона сталеваза с пустым ковшом, представлены на рисунке 19.

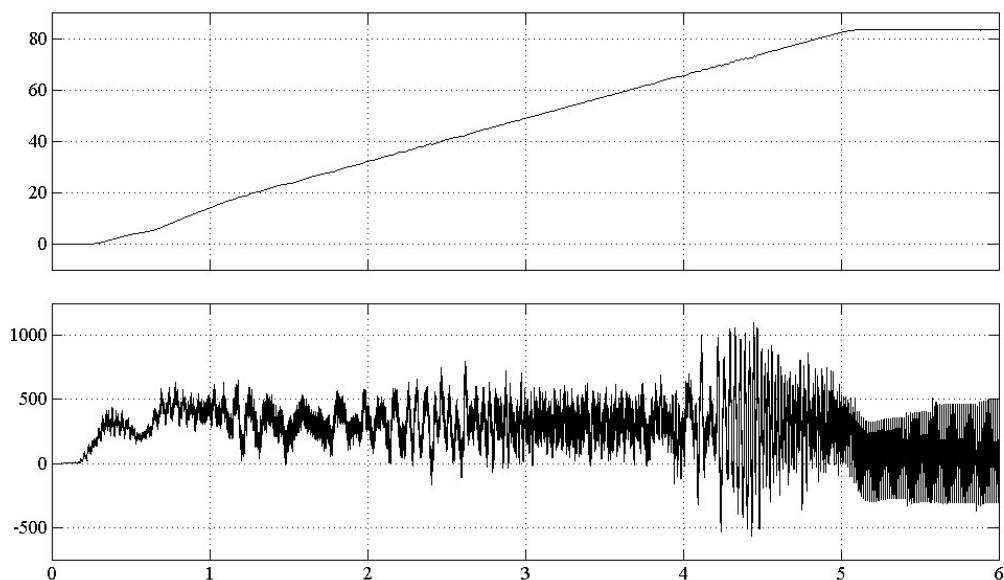


Рисунок 19 - Переходные процессы разгона сталеваза с пустым ковшом

Таким образом было реализовано построение модели асинхронного электродвигателя посредством программного комплекса Matlab с применением библиотеки SimPowerSystems.

5.2 Предложения по модернизации конструкции самоходного сталеваза с учетом полученных данных

Электроприводное оборудование сталеваза включает 4 двигателя, обеспечивающих максимальную безотказность производственного процесса. Система автоматизированного контроля гарантирует бесперебойную работу механизма даже при выходе из строя половины силовых агрегатов, позволяя завершить начатый технологический цикл на оставшихся двух двигателях.

Регулирование перемещения сталеваз осуществляется в пределах скоростного диапазона от 1 до 5 единиц. При сопровождении потока расплавленного металла из конвертера сталеваз движется на минимальной скорости. Аналогичный режим работы требуется для обеспечения прецизионной остановки агрегата в заданной позиции.

Регулировка скоростного режима электропривода выполняется посредством модификации амплитудных и частотных параметров питающего напряжения на контактной сети. Малый диапазон регулирования и отсутствие технической возможности организации обратной связи по скорости электродвигателя обуславливают выбор скалярного принципа управления приводом.

Контроль позиционирования сталеваз осуществляется посредством секционирования питающей троллеи специальными разрезами, к которым подсоединяются релейные устройства.

Плавная динамика электропривода при транспортировке расплавленного металла обеспечивается строгим контролем ускорения, не превышающего установленный предел $0,2 \text{ м/с}^2$.

Преобразователь частоты оснащен системой I2t, обеспечивающей тепловую защиту электродвигателей от чрезмерных нагрузок.

Модульная конструкция преобразователя SINAMICS G120 предоставляет расширенный набор функциональных возможностей для управления электроприводами. Продуманная архитектура устройства позволяет точно регулировать частотные параметры и адаптировать работу под различные производственные задачи.

Модульная архитектура преобразователя включает центральный блок управления и силовую систему, дополняемую специализированными компонентами. Модификация силового блока возможна путем интеграции сетевых дросселей, фильтрующих элементов, выходных дросселей и синусоидальных фильтров. Расширенная комплектация предусматривает

установку тормозных прерывателей, резисторов и реле, обеспечивающих безопасное торможение привода.

Контроллер осуществляет управление силовым блоком, обеспечивающим работу электродвигателя через многофункциональные коммуникационные интерфейсы, позволяющие осуществлять мониторинг всей системы электропривода.

Гибкая модульная архитектура обеспечивает масштабируемость решений под различные технические задачи при мощностях от 0.37 кВт до 250 кВт, адаптируясь под специфические требования производства.

Продвинутая система безопасности включает функции рекуперации энергии и современную систему охлаждения:

- ~ программные инструменты SIZER и STARTER существенно упрощают процессы проектирования и запуска оборудования. Панель оператора BOP, IOP совместно с картой MMC обеспечивают надежное резервное копирование данных;

- ~ концепция Комплексной Автоматизации (Totally Integrated Automation-TIA) позволяет создавать энергоэффективные решения для производства;

- ~ система SINAMICS демонстрирует полную совместимость со всеми уровнями автоматизации технологических процессов.

«SINAMICS G120 зарекомендовал себя как универсальное решение для автоматизации производственных процессов, демонстрируя высокую эффективность при управлении технологическими операциями во всех отраслях промышленности. Общие эксплуатационные характеристики силового модуля и технические данные силового модуля РМ 240 приведены в таблице 8 и таблице 9 соответственно.

Таблица 8 – Общие эксплуатационные характеристики силового модуля

Показатель	Данные
Рабочее напряжение электрической сети	3 АС 380...480 В $\pm$ 10% (допустимое напряжение зависит от рабочей высоты)
Входная частота	47...63 Гц
Коэффициент мощности	0,7...0,85
Перегрузочная способность базовой нагрузки (LO)	1,36 х номинальный выходной ток (136% перегрузка) в течение 57 с каждые 300 с
	1,6 х номинальный выходной ток (160% перегрузка) в течение 3 с каждые 300 с
Пусковой ток	Меньше номинального входного тока
Частота следования импульсов	2 КГц стандарт 90...200 КВт (НО) (увеличение частоты импульсов выше стандартной приводит к падению выходного тока)
Электромагнитная совместимость	Согласно EN 55011 доступны фильтры класса А
Торможение	Торможение постоянным током, смешанное торможение, рекуперативное торможение с интегральным прерывателем
Уровень защиты	IP20 или IPXXB
Диапазон температур без снижения показателей (НО)	132...200 КВт 0...+50 С
Диапазон температур без снижения показателей (LO)	160...250 КВт 0...+40 С
Диапазон температур со снижением показателей	Допустимая рабочая температура до +60 С
Влажность	Относительная влажность < 95%, без конденсации

Таблица 9 – Технические данные силового модуля РМ 240

Параметр	Размерность	Значение
Номинальная мощность на базе нагрузки НО	КВт	45
Мощность потерь	КВт	1,5
Номинальный входной ток (НО)	А	108
Номинальный выходной ток (НО)	А	90
Номинальный входной ток (LO)	А	129
Номинальный выходной ток (LO)	А	110
Плавкий предохранитель	А	160
Требуемый расход охлаждающего воздуха	л/с	150
Входной кабель/ выходной кабель	мм ²	35...1200
Масса	кг	176

Изменение тока от температуры и изменение тока от высоты над уровнем моря показаны на рисунке 20 и рисунке 21 соответственно.

Допустимый выходной ток базовой нагрузки [%]
Входные токи при высоких перегрузках (НО) и малых перегрузках (ЛО)

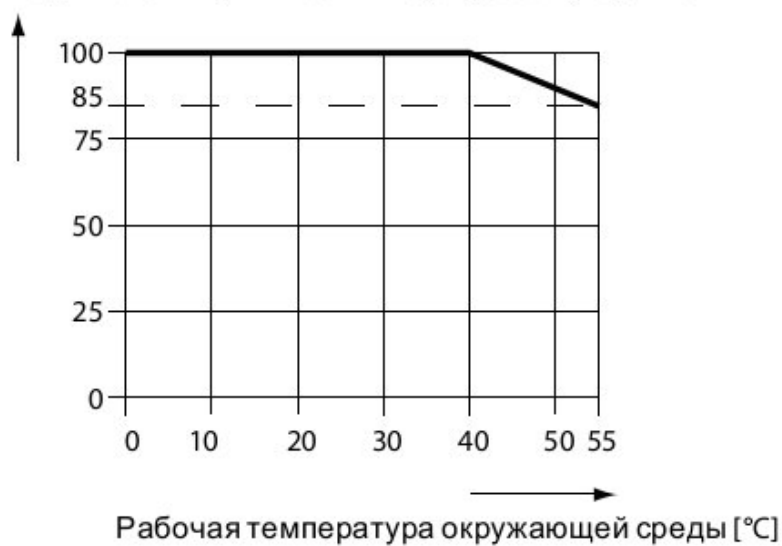


Рисунок 20 – Изменение тока от температуры

Допустимый выходной ток базовой нагрузки [%]
Входные токи при высоких перегрузках (НО) и малых п

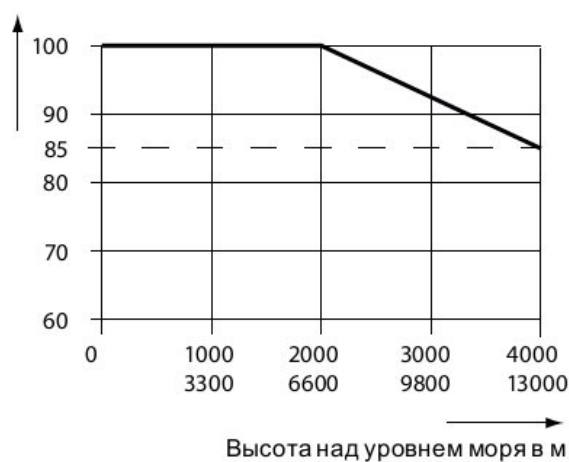


Рисунок 21 – Изменение тока от высоты над уровнем моря

Технические данные управляющего модуля CU240E-2 DP-F отображены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические данные управляющего модуля CU240E-2 DP-F

Показатель	Данные
Рабочее напряжение	Питание из силового модуля или с помощью внешнего источника питания 24 В DC, через управляющие клеммы 31 и 32
Мощность потерь	5 Вт плюс мощность потерь выходных напряжений
Выходные напряжения	18...30 В (макс. 200 мА) 10 В $\pm$ 0,5 В (макс. 10 мА)
Разрешение заданного значения	0,01 Гц
Полевая шина	PROFIBUS-DP с PROFIsafe
Встроенные функции безопасности	STO (безопасное электрическое отключение), SS1 (безопасная целенаправленная остановка), SLS (безопасное ограничение скорости)
Цифровые входы	6 цифровых входов DI0...DI5, с гальванической развязкой (время реакции 10 мс)
Импульсный вход	Цифровой вход 3, макс частота модуляции 32 КГц
Аналоговые входы (дифф. входы, разрешение 12 бит)	AI 0, AI 1: разрешение 12 Бит, дифф. входы, 0...10 В, 0...20 мА (время реакции 13 мс)
Цифровые выходы/релейные выходы	DO 0: релейный выход, 30 В DC / макс 0,5 А при омической нагрузке DO 1: транзисторный выход, 30 В DC / макс 0,5 А при омической нагрузке DO 2: релейный выход, 30 В DC / макс 0,5 А при омической нагрузке Время актуализации всех DO: 2мс
Аналоговые выходы	AO 0, AO 1: 0...10 В или 0...20 мА, опорный потенциал GND, разрешение 16 Бит, время актуализации 4мс
Рабочая температура	0...55 C
Вес	0,49 кг

Опциональная система силового модуля PM 240 формата FSGX включает специализированный сетевой дроссель, обеспечивающий оптимизацию электрических параметров. Основная функция дросселя заключается в минимизации искажений синусоидального тока, что приобретает особую значимость при эксплуатации оборудования от источников питания с показателем мощности короткого замыкания u_K , превышающим один процент» [25].

Монтажная схема предусматривает крепление дросселя к поверхности установки с последующим размещением силового модуля непосредственно на корпусе дросселя.

Конструктивное исполнение дросселя включает предварительно подключенные соединительные кабели для силового модуля, а подключение к электрической сети осуществляется через специальные клеммные соединения. Схема подключения сетевого дросселя и его технические характеристики представлены на рисунке 22 и в таблице 11 соответственно.

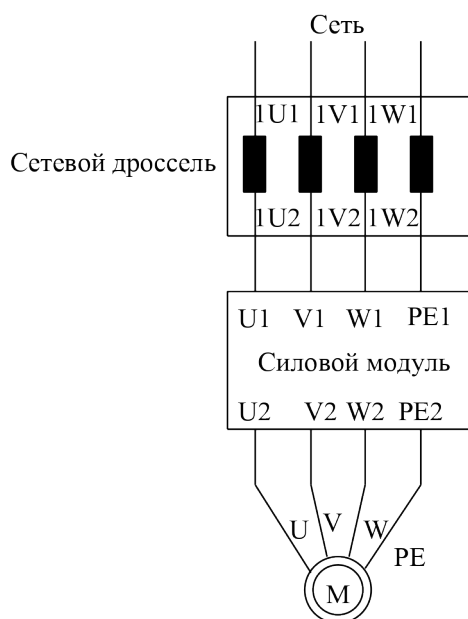


Рисунок 22 – Схема подключения сетевого дросселя

Таблица 11 – Технические характеристики сетевого дросселя

Показатель	Значение
Индуктивность	42 мГн
Мощность потерь при частоте 50/60 Гц	365 Вт
Класс защиты	IP 00
Габаритные размеры:	
~ ширина	300 мм
~ высота	269 мм
~ глубина	212,5 мм
Масса	38 кг

«При подключении внешнего сетевого фильтра, характеристики которого представлены в таблице 12, силовой модуль обеспечивает соответствие расширенным стандартам электромагнитной совместимости по

подавлению радиочастотных помех» [21]. Схема подключения сетевого фильтра представлена на рисунке 23.

Таблица 12 – Технические характеристики сетевого фильтра

Показатель	Значение
Мощность потерь при частоте 50/60 Гц	55 Вт
Класс защиты	IP 00
Габаритные размеры:	
~ ширина	400 мм
~ высота	265 мм
~ глубина	140 мм
Масса	19 кг

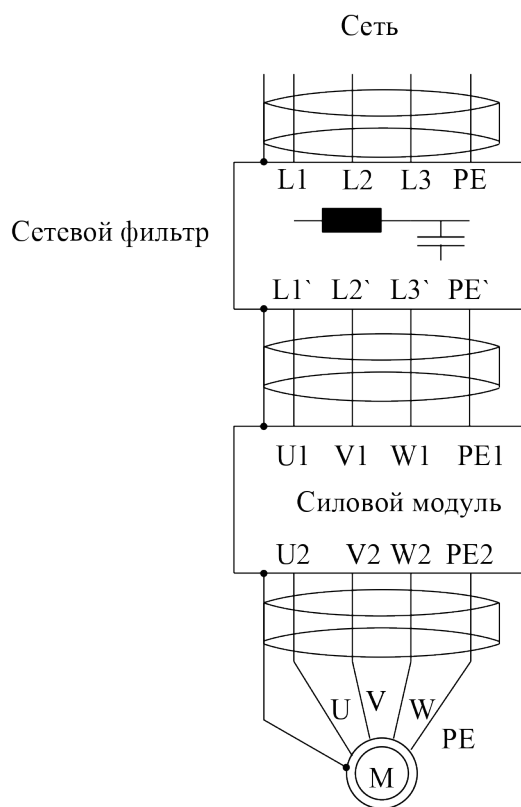


Рисунок 23 – Схема подключения сетевого фильтра

Выходное напряжение синусоидального фильтра подавляет резкие скачки токов заряда и разряда конденсаторов, возникающие при эксплуатации преобразовательного оборудования. Механизм ограничения амплитуды импульсов базируется на плавном изменении электрических параметров в

цепи. Технические характеристики и схема подключения синусоидального фильтра представлены в таблице 13 и на рисунке 24 соответственно.

Таблица 13 – Технические характеристики синусоидального фильтра

Показатель	Значение
Максимально допустимая скорость нарастания напряжения	$\leq 500 \text{ В/мкс}$
Мощность потерь при частоте 50/60 Гц	230 Вт
Класс защиты	IP 00
Габаритные размеры: ~ ширина ~ высота ~ шлубина	620 мм 370 мм 360 мм
Масса	198 кг

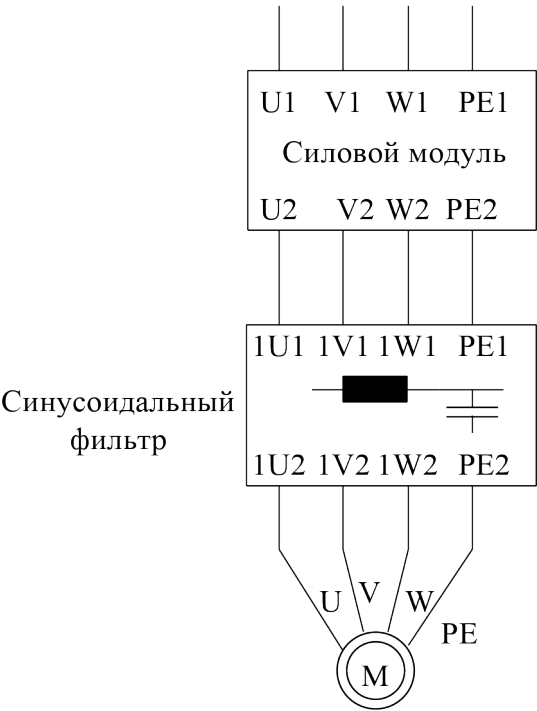


Рисунок 24 – Схема подключения синусоидального фильтра

Опциональное оснащение силового модуля FSGX включает тормозной прерыватель, показанный на рисунке 25 и монтируемый в специализированный разъем устройства. Система принудительного

охлаждения модуля обеспечивает оптимальный температурный режим прерывателя. Стандартная комплектация содержит гибкие кабели для соединения прерывателя с контуром постоянного тока.

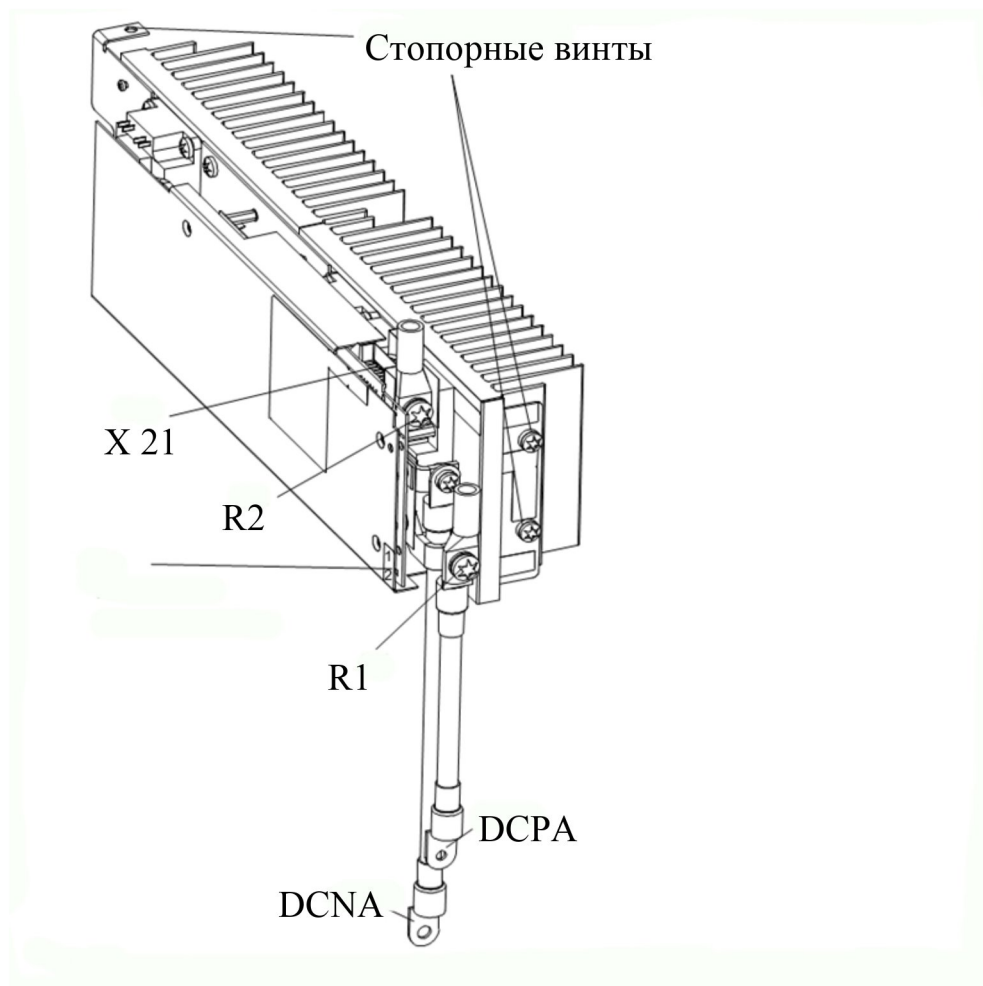


Рисунок 25 – Тормозной прерыватель

Конструкция тормозного прерывателя обеспечивает возможность коммутации через гибкие кабельные соединения либо стационарные шины как для контура постоянного тока, так и для тормозного резистора.

Система управления включает цифровой входной канал, реализующий функции блокировки прерывателя при высоком уровне сигнала и сброса ошибок по отрицательному фронту.

Мониторинг работоспособности устройства осуществляется посредством цифрового выходного канала, сигнализирующего о возникновении неисправностей.

Безопасность эксплуатации обеспечивается подключением защитного заземляющего проводника. Схема подключения тормозного прерывателя и характеристики клеммной колодки показаны на рисунке 26 и в таблице 14 соответственно.

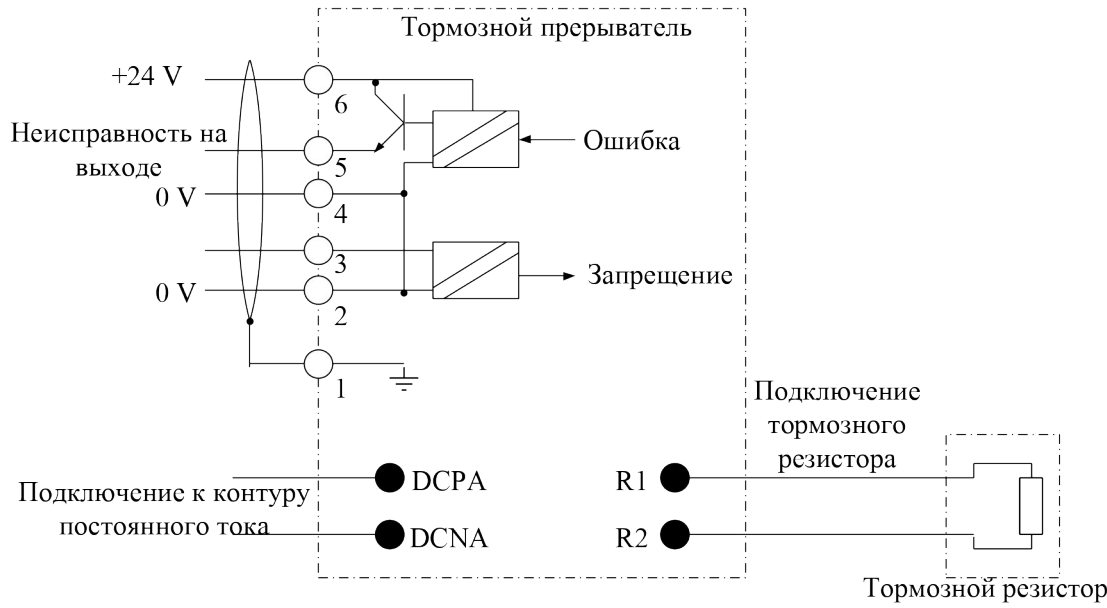


Рисунок 26 – Подключение тормозного прерывателя

Таблица 14 – Клеммная колодка тормозного прерывателя

Клемма	Назначение	Технические характеристики
1	Экран	Подключение экрана для клемм 2-6
2	0 В	Высокий уровень сигнала: +15...30 В Потребление тока: 2...15 мА Низкий уровень сигнала: -3...5 В
3	Блокировка (цифровой вход)	
4	0 В	Высокий уровень сигнала: неисправность отсутствует Низкий уровень сигнала: неисправность Ток: 0,5...0,6 мА Напряжение: 24 В DC
5	Неисправность (цифровой выход)	
6	+ 24 В	Напряжение: +18...+30 В Типичное потребление тока (индуктивного тока) : 10 мА при 24 В

Пороговые значения активации тормозного прерывателя и формирования напряжения в цепи постоянного тока при торможении представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Пороги включения тормозного прерывателя

Номинальное напряжение	Порог включения	Положение переключателя	Комментарий
3 AC 380...480 В	673 В	1 (вверх)	774 В – заводская установка по умолчанию. При напряжении между 380 В и 400 В порог включения можно выставить на 673 В, чтобы снизить нагрузку на двигатель и преобразователь. Это, однако, снижает возможную мощность торможения на квадрат напряжения $=0.75$. Таким образом, максимальная мощность торможения составляет 75%.
	774 В	2 (вниз)	

Разработанный тормозной резистор для преобразователей SINAMICS G120 обеспечивает эффективное замедление механизмов с существенным моментом инерции благодаря встроенному тормозному прерывателю. При торможении электропривода избыточная энергия поступает в преобразовательное устройство, вызывая рост напряжения в цепи постоянного тока. Преобразователь направляет накопленную энергию на внешний тормозной резистор, предотвращая критическое повышение напряжения в системе.

Термореле, встроенное в конструкцию тормозного резистора, обеспечивает надежную защиту устройства от температурных перегрузок при эксплуатации. Производитель комплектует каждый резистор специальным температурным датчиком, контролирующим рабочий режим оборудования.

«Силовой модуль требует подключения через специальный контактор, обеспечивающий автоматическое прерывание электропитания при достижении критических температур тормозного резистора. Монтаж

термореле осуществляется последовательным способом с применением скрученного проводника основного контактора» [13]. После охлаждения резистора до заданных параметров происходит самостоятельное замыкание контактов термореле. Подключение тормозного резистора и его технические характеристики представлены на рисунке 27 и в таблице 16 соответственно.

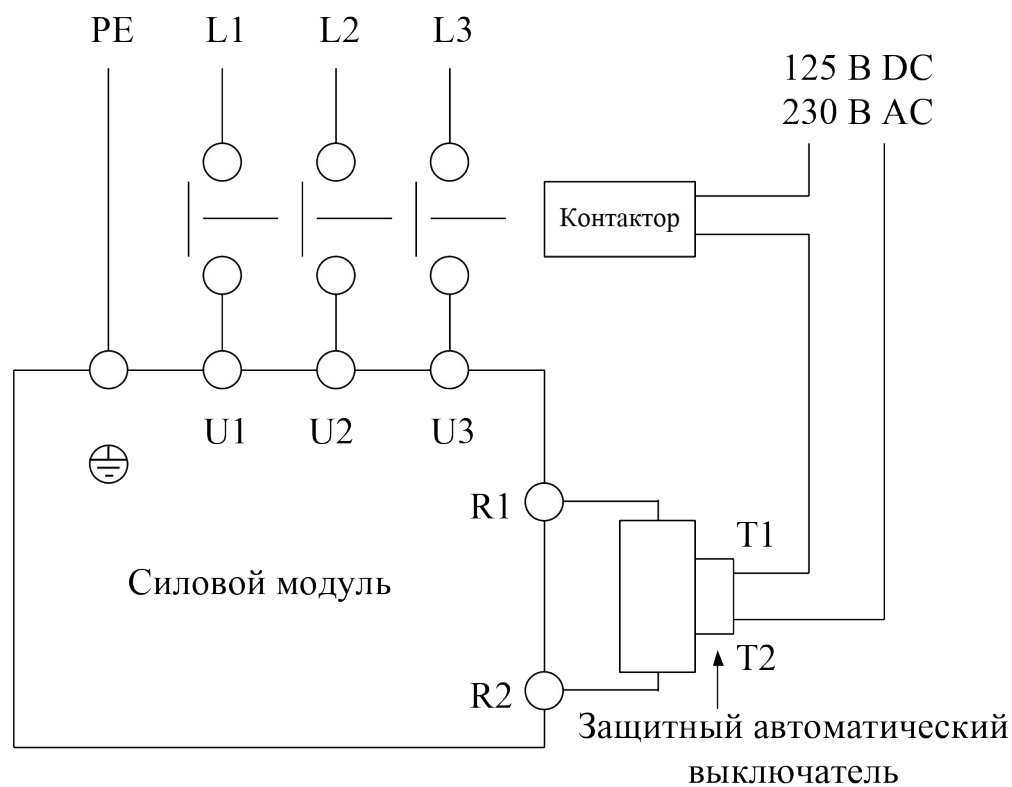


Рисунок 27 – Подключение тормозного резистора

Таблица 16 – Технические характеристики тормозного резистора

Показатель	Значение
Номинальная мощность силового модуля	132...200 KBT
Сопротивление	2,2 Ом
Номинальная мощность P_{DB}	50 KBT
Пиковая мощность P_{max}	300 KBT
Класс защиты	IP 20
Масса	120 кг

Современные системы торможения электродвигателей включают специализированные реле для соединения тормозного соленоида с силовым блоком.

Базовая модификация тормозного реле выполняет стандартные операции управления механизмом торможения.

Усовершенствованная версия реле интегрируется в комплексную систему безопасности оборудования, расширяя функционал контроля торможения.

Подключение тормозного реле и его технические характеристики представлены на рисунке 28 и в таблице 17 соответственно.

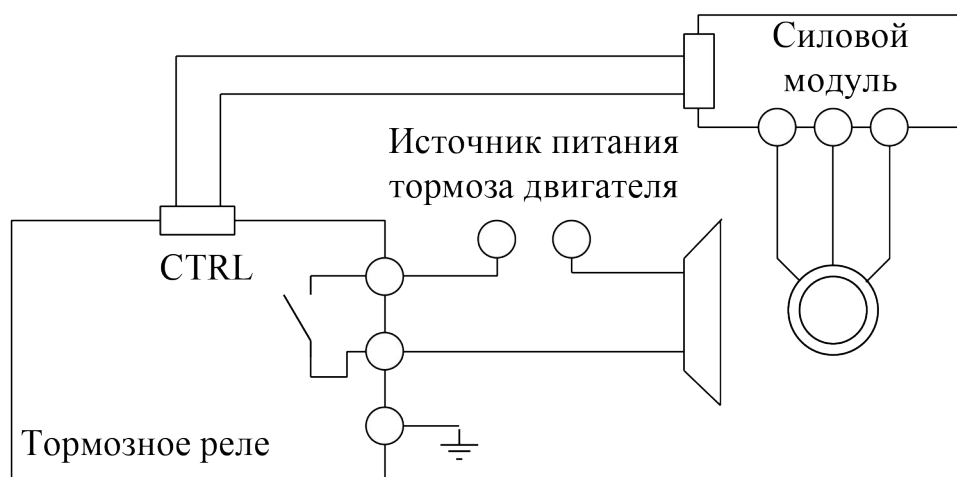


Рисунок 28 – Подключение тормозного реле

Таблица 17 – Технические характеристики тормозного реле

Показатель	Значение
Входное напряжение	Подключается к внутреннему источнику тока
Входной ток	
Выходное напряжение	24 В
Выходной ток	не более 2 А
Класс защиты	IP 20

Новейшая разработка позволяет подавать варьируемое напряжение на реле безопасного торможения, обеспечивая диагностику работоспособности устройства без активации тормозного механизма.

5.2.1 Принципиальные схемы подключения преобразователя частоты SINAMICS G120

Силовая система сталевого вагона оснащена четырьмя преобразовательными устройствами Sinamics G120 производства компании Siemens, обеспечивающими точное регулирование электропривода.

Понижающий сухой трансформатор обеспечивает электропитание силовой якорной цепи преобразователей, включая встроенную систему температурных датчиков, разъединительные механизмы и линейную контакторную группу.

Конструкция привода предусматривает резервный режим функционирования с использованием двух силовых агрегатов, что обеспечивает бесперебойную работу механизма при возникновении нештатных ситуаций.

Схематическое изображение подключения силового узла частотного преобразователя, обеспечивающего работу электропривода сталевого вагона, отражено на рисунке 29. Подведение электропитания к двигателю осуществляется посредством кабеля, характеризующегося максимальной протяженностью 450 метров при диапазоне поперечного сечения от 120 до 2х240 квадратных миллиметров.

Пользовательские интерфейсы частотного преобразователя Sinamics G120 отображены на рисунке 30. Расположение клемм модуля управления CU240E-2 DP-F визуальное представлено схемой на рисунке 31. Полное описание функционала клеммных соединений содержится в таблице 18.

Таблица 18 – Значение клемм пользовательской клеммной колодки

Клемма	Пояснение
31	18...30 В опциональное питание электроники
32	Опорный потенциал для клеммы 31
34	Опорный потенциал для цифровых входов 1,3 и 5
10	Аналоговый вход 1 (-10...10 В, 0/4...20 мА, -20...20 мА)
11	Опорный потенциал для аналогового входа 0
26	Аналоговый выход 1 (0...10 В, 0...20 мА)
27	Общий опорный потенциал
1	Выход 10 В относительно GND, макс. 10 мА
2	Общий опорный потенциал
3	Аналоговый вход 0 (-10...10 В, 0/4...20 мА, -20...20 мА)
4	Опорный потенциал для аналогового входа 0
12	Аналоговый выход 0 (0...10 В, 0...20 мА)
13	Общий опорный потенциал
21	Цифровой выход 1, положительный, 0.5 А, 30 В DC
22	Цифровой выход 1, отрицательный, 0.5 А, 30 В DC
14	Датчик температуры двигателя
15	Датчик температуры двигателя
9	Выход 24 В, опорный потенциал GND, макс. 200 мА
28	Общий опорный потенциал
69	Общий опорный потенциал для цифровых входов 0,2 и 4
5	Цифровой вход 0
6	Цифровой вход 1
7	Цифровой вход 2
8	Цифровой вход 3
16	Цифровой вход 4
17	Цифровой вход 5
19	Цифровой выход 0, замыкающий контакт, 0,5 А, 30 В DC
20	Цифровой выход 0, средний контакт
18	Цифровой выход 0, размыкающий контакт
24	Цифровой выход 2, замыкающий контакт, 0,5 А, 30 В DC
25	Цифровой выход 2, средний контакт
23	Цифровой выход 2, размыкающий контакт

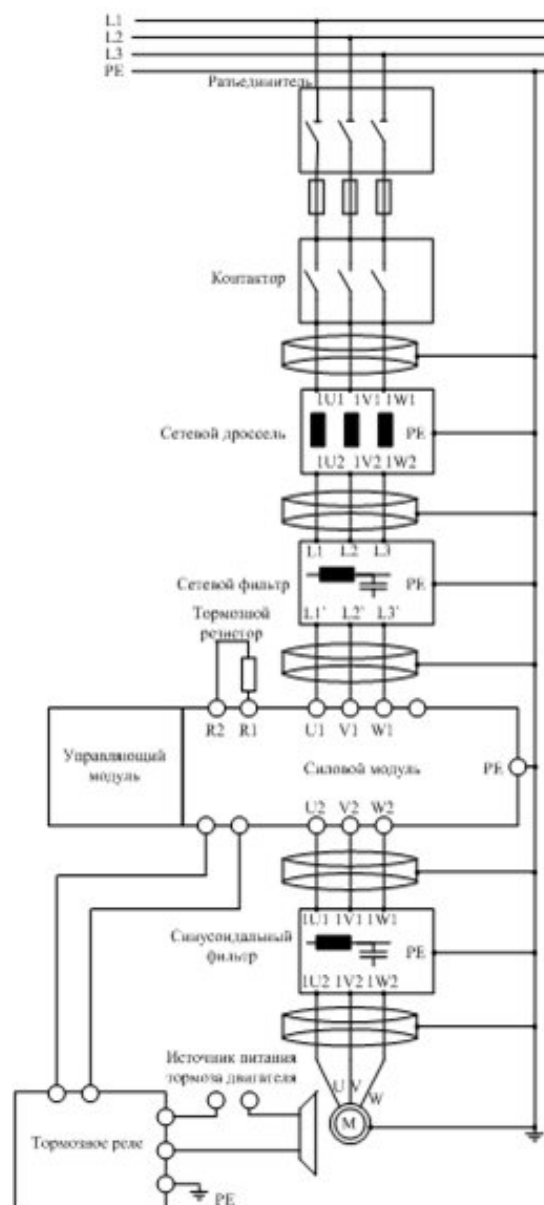


Рисунок 29 – Принципиальная схема подключения силового модуля РМ 240

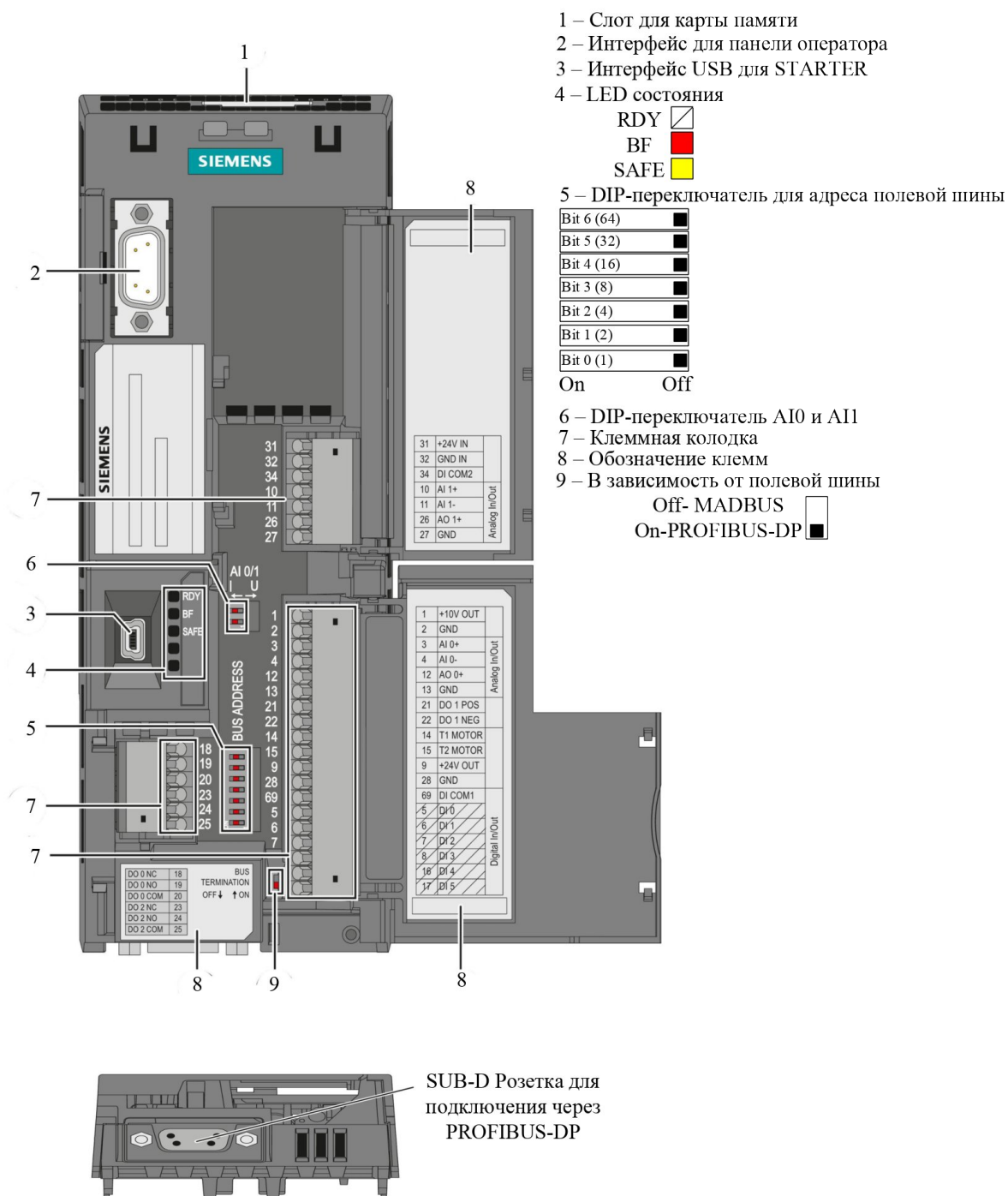
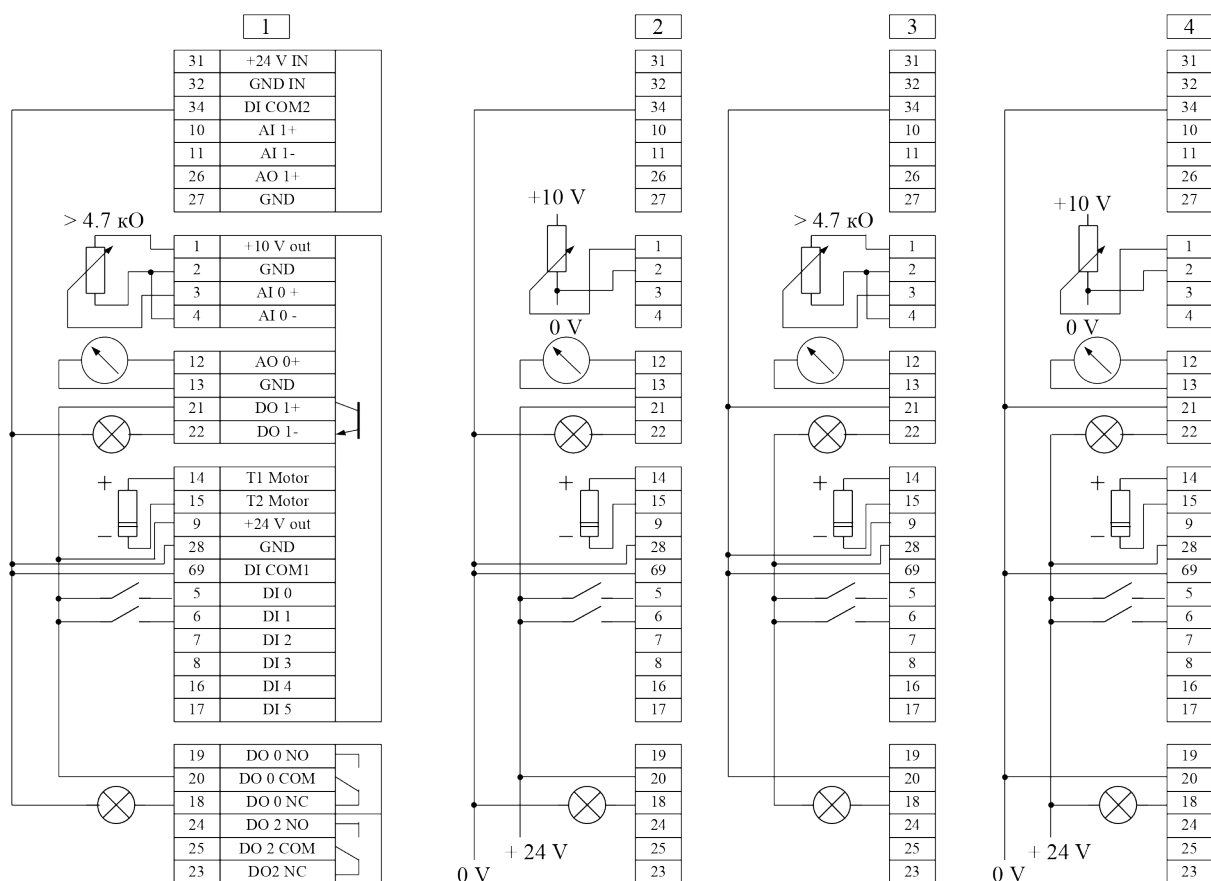


Рисунок 30 – Интерфейсы и клеммные колодки управляющего модуля
 CU240E-2 DP-F



- 1 – Проводка при использовании внутренних источников питания (DI=high)
- 2 – Проводка при использовании внешних источников питания (DI=high)
- 3 – Проводка при использовании внутренних источников питания (DI=low)
- 4 – Проводка при использовании внешних источников питания (DI=low)

Рисунок 31 – Разводка пользовательской клеммной колодки управляющего модуля CU240E-2 DP-F

Таким образом, в данном разделе наглядно представлены Принципиальные схемы подключения преобразователя частоты SINAMICS G120.

5.2.2 Ввод в эксплуатацию преобразователя частоты SINAMICS G120

Процедура запуска частотного преобразователя предусматривает два основных метода настройки: применение стандартных заводских параметров либо выполнение базовой конфигурации посредством BOP-2.

Эксплуатация устройства с заводскими параметрами требует предварительного анализа применимости стандартных настроек и определения необходимых модификаций функционала. Корректная работа преобразователя при использовании заводских установок обеспечивается при соблюдении ключевых требований к электрическим характеристикам оборудования.

Номинальные значения тока преобразователя должны соответствовать параметрам подключаемого двигателя. Мощностные показатели электродвигателя находятся в диапазоне от четверти до полной мощности преобразователя.

Базовые параметры конфигурации при использовании заводских настроек приведены в таблице 19. Схема подключения пользовательского клеммного блока для работы со стандартными установками отображена на рисунке 32.

Таблица 19 – Основные параметры для ввода в эксплуатацию

Параметр	Установка	Значение установки	Комментарии
p0010	0	Готовность к вводу	Привод, ввод в эксплуатацию, фильтр параметров
p0100	0	Европа [50 Гц]	Стандарт двигателя ИЕС
p0300	1	Асинхронный двигатель	Выбор типа двигателя (асинхронный двигатель/синхронный двигатель)
p0304	380	В	Номинальное напряжение двигателя
p0305	91	А	Номинальный ток двигателя
p0307	45	кВт	Номинальная мощность двигателя
p0308	0,82	Cos фи	Номинальный коэффициент мощности двигателя
p0308	0,82	Cos фи	Номинальный коэффициент мощности двигателя
p0310	50	Гц	Номинальная частота двигателя
p0311	990	c ⁻¹	Номинальная скорость двигателя

Продолжение таблицы 19

Параметр	Установка	Значение установки	Комментарии
p0335	0	Самовентиляция: вентилятор навалу двигателя	Тип охлаждения двигателя
p0625	20	с*	Температура двигателя
p0970	0	блокировка	Сброс параметров привода
p1080	0	с ⁻¹	Минимальная скорость двигателя
p1082	1000	с ⁻¹	Максимальная скорость двигателя
p1120	5	с	Время разгона
p1121	5	с	Время торможения
p1300	0	Управление U/f с линейной характеристикой	Режим работы управления/ регулирования

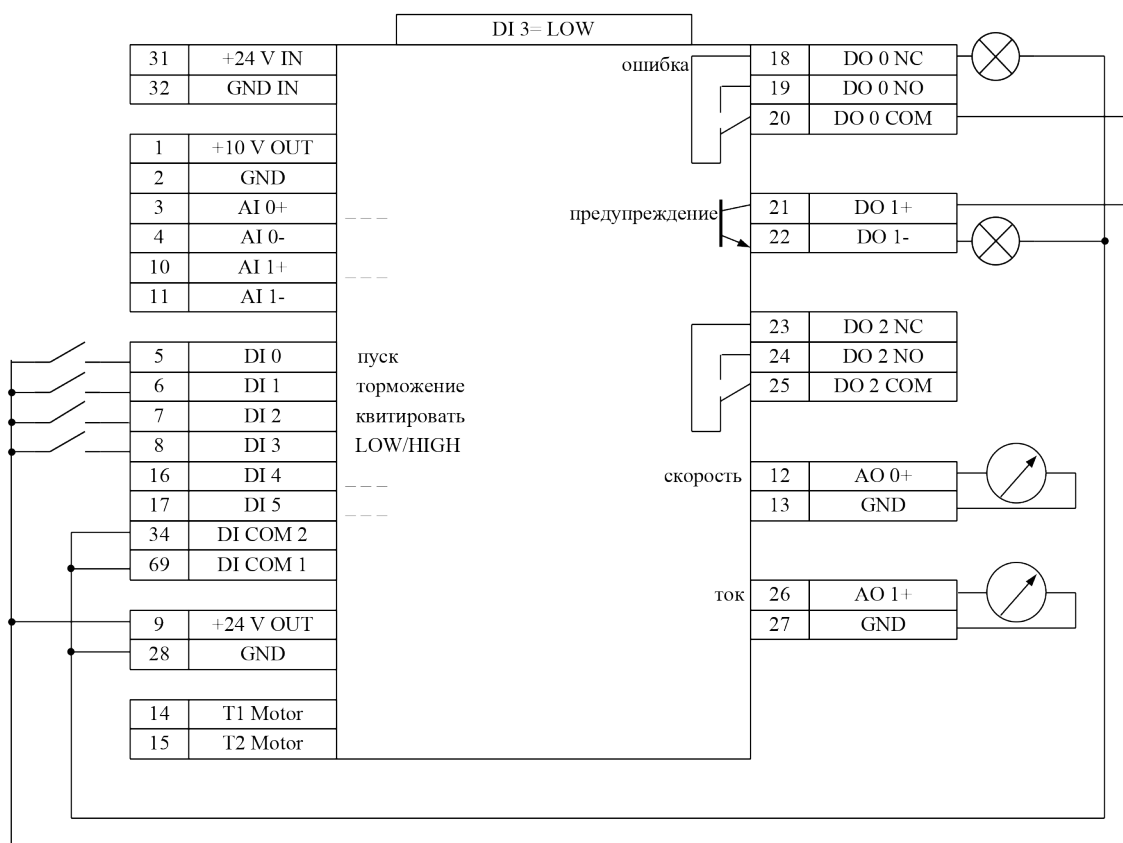


Рисунок 32 – Соединение пользовательской клеммной колодки

Базовая операторская панель второго поколения представляет собой специализированное устройство контроля и мониторинга

преобразовательного оборудования. Монтаж панели осуществляется путем встраивания в основной блок управления преобразователем при проведении пусконаладочных работ.

Индикация и органы управления ВОР-2 отображены на рисунке 33. Организация программного интерфейса устройства детально представлена схемой на рисунке 34.

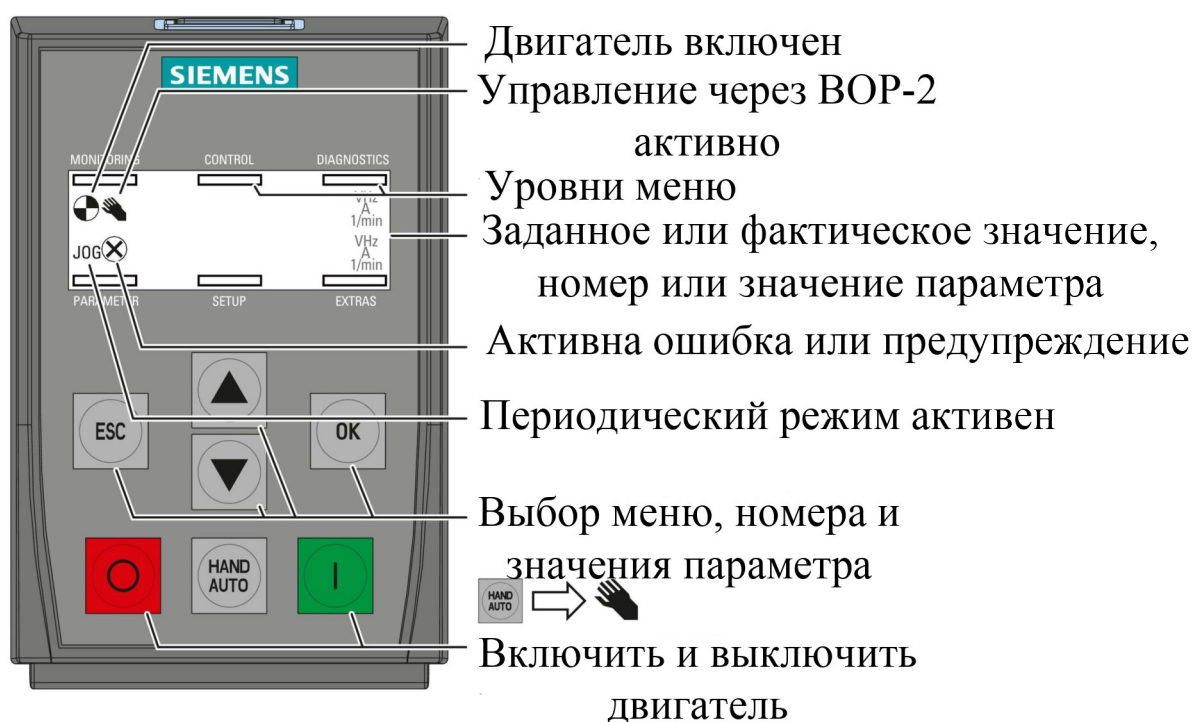


Рисунок 33 – Индикация и элементы управления ВОР-2

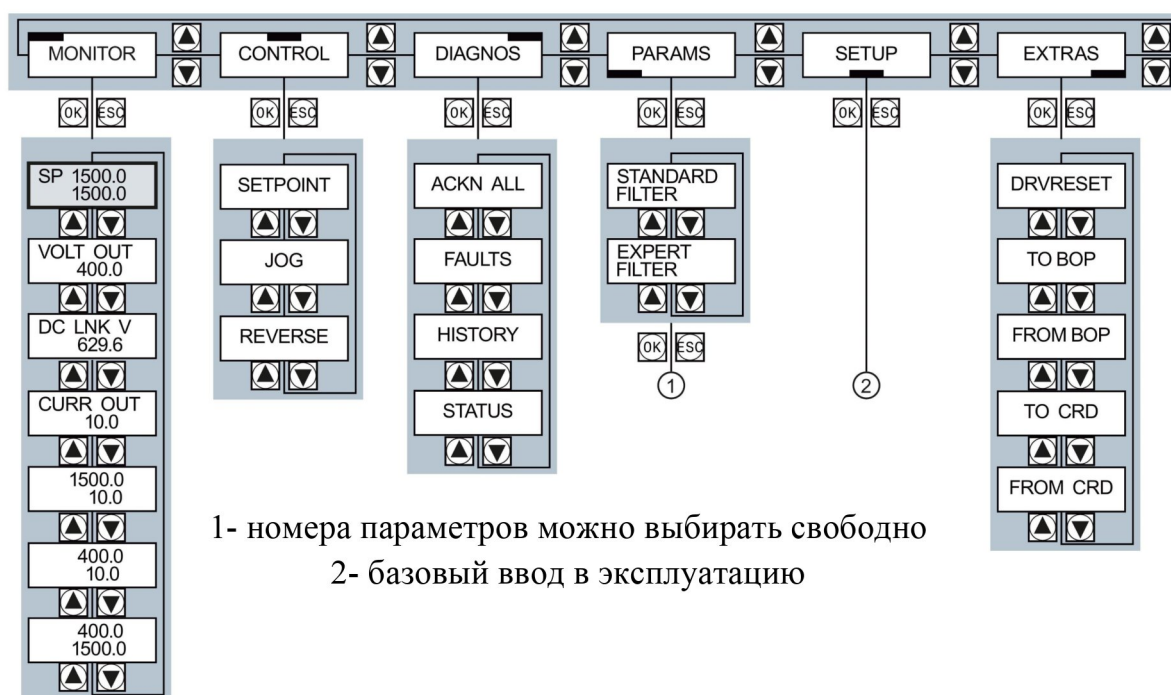


Рисунок 34 – Структура меню BOP-2

Настройка параметров преобразователя посредством BOP-2 осуществляется путем последовательного выбора и корректировки числовых значений. Изменение параметров выполняется через разделы «PARAMS» либо «SETUP», представленные схематично на рисунке 35. Выбор требуемого номера параметра производится двумя способами: навигация клавишами-стрелками до отображения необходимого значения либо поразрядное редактирование после удержания кнопки «OK» свыше двух секунд.

Изменение значения параметра возможно двумя путями описанными выше.

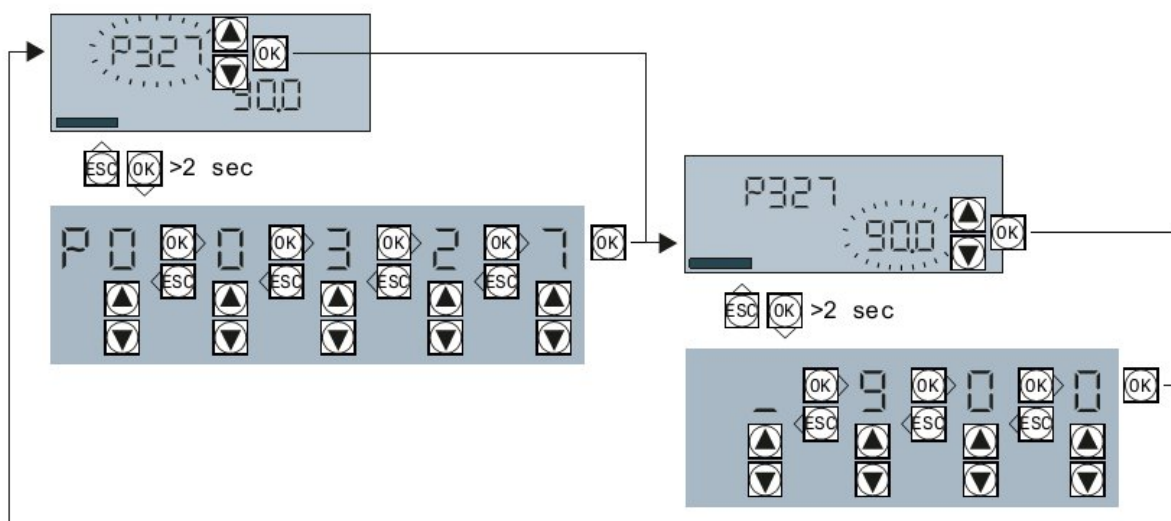


Рисунок 35 – Пример изменения значения параметра

После успешного запуска системы все параметры конфигурации автоматически фиксируются во внутренней энергонезависимой памяти преобразовательного устройства. Создание резервной копии настроек на отдельном носителе существенно упрощает процедуру замены управляющих элементов или силовых компонентов при возникновении технических неполадок.

В конвертерном отделении расположена РП-52 с распределительным устройством (РУ) 10 кВ.

Шины РУ-10 кВ РП-52 разделены на три секции. Первая и вторая секции питаются кабельными линиями от ГПП-16, третья секция - от секции «Т» ГПП-16 (ТЭЦ НЛМК).

Секции РП-52 соединяются секционными выключателями с автоматическим включением резерва (АВР). При отключении одного из вводов №1 или №2 включается секционный выключатель I и II секции; секционный выключатель II и III секций включается только при отключении ввода №3 (ТЭЦ).

РУ-10 кВ комплектуется из шкафов КРУ. Для компенсации реактивных нагрузок потребителей первой и второй секций 10 кВ установлены

конденсаторные батареи мощностью 3600 кВАр каждая с номинальным напряжением 11 кВ. Компенсация реактивной мощности по 0,4 кВ не предусмотрена.

Основной нагрузкой РП-52 являются электродвигатели переменного тока (асинхронные), электродвигатели постоянного тока с тиристорными преобразователями, крановая нагрузка и освещение.

Питание всех нагрузок конвертерного отделения осуществляется от подстанции РП-52 с РУ-10 кВ. Напряжение питающей сети идет на:

- ~ питание КТП трансформаторов тиристорных преобразователей приводов поворота конвертеров - от сети 10 кВ;
- ~ КТП общецеховых и крановых нагрузок;
- ~ РП - дымососная от сети 10 кВ;
- ~ все остальные нагрузки переменного тока -380 В;
- ~ двигатели постоянного тока -220 В от тиристорных преобразователей.

Для питания нагрузок 0,4 кВ приняты комплектные двухтрансформаторные подстанции с трансформаторами мощностью 1600 кВА.

При бесперебойном электроснабжении все потребители отделения делятся следующим образом:

- ~ нагрузки особоответственной категории: насосы высокого давления, циркуляционные насосы, насосы подкачки воды к «юбке» конвертеров, отсечка кислорода, нагрузки котла - охладителя, конвертер, сталевоз, шлаковоз, фурма, аварийное освещение, аппаратура противопожарной безопасности;
- ~ нагрузки первой категории: газоотводящий тракт с нагнетателями, заливочные краны;
- ~ все остальные нагрузки - вторая категория.

Нагрузки особоответственной категории получают питание от трансформаторов КТП № 4 и от КТП № 5. Трансформаторы 1Т КТП № 4 и КТП № 5 подключены к I секции распределительной подстанции № 52; трансформаторы 2Т КТП № 4 и КТП № 5 питаются от III секции распределительной подстанции № 52, то есть от ТЭЦ НЛМК. Между секциями щитов КТП имеется выключатель с АВР.

Однолинейная схема электроснабжения сталево­за приведена на рисунке 36.



99

высоковольтные кабели присоединяются непосредственно к выводам силового трансформатора.

В КТП применяются трехфазные двухобмоточные трансформаторы сухие типа ТСЛ.

РУНН состоит из набора шкафов:

- ~ шкаф ввода низшего напряжения (ШНВ);
- ~ шкаф отходящей линии (ШНЛ);
- ~ шкафа секционного (ШНС).

В шкафах РУНН установлены автоматические выключатели выдвижного исполнения. Оперативное управление автоматическими выключателями выведено на дверь шкафа. Для учета электроэнергии в КТП установлены счетчики активной и реактивной энергии.

Основными потребителями мощности данной КТП являются три сталевоза и три шлаковоза. Рассчитаем суммарную мощность потребителей КТП:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma} &= S_{\Sigma c} + S_{\Sigma ш} = S_{np.c} \cdot n_{np.c} \cdot n_c + S_{np.ш} \cdot n_{np.ш} \cdot n_{ш} = \\ &= 45 \cdot 4 \cdot 3 + 45 \cdot 4 \cdot 3 = 1080 \text{ кВА}, \end{aligned} \quad (112)$$

где $S_{\Sigma c}$ – суммарная мощность сталевозов;

$S_{\Sigma ш}$ – суммарная мощность шлаковозов;

$S_{np.c}$ – мощность частотного преобразователя сталевоза;

$n_{np.c}$ – количество преобразователей сталевоза;

n_c – количество сталевозов;

$S_{np.ш}$ – мощность частотного преобразователя шлаковоза;

$n_{np.ш}$ – количество преобразователей шлаковоза;

$n_{ш}$ – количество шлаковозов;

Определение номинальной мощности силовых трансформаторов напряжением до 110 кВ регламентируется требованиями ГОСТ 14209-97, согласно которым при аварийных ситуациях допустимая перегрузка

оборудования составляет сорок процентов от номинальной мощности. Расчетная мощность каждого трансформатора двухтрансформаторной подстанции должна соответствовать установленным нормативным значениям $0,7P_{ном}$ с учетом возможной перегрузки при выходе из строя одного из них.

Паспортные данные трансформатора ТСЛ-1600/10-0,4 УЗ представлены в таблице 20.

Определим расчетную мощность трансформатора:

$$S_{тр.расч} = \frac{S_{\Sigma}}{0,7} = \frac{1080}{0,7} = 1543 \text{ кВА.} \quad (113)$$

Трансформаторы выбираются, исходя из условия:

$$S_{тр} > S_{тр.расч}. \quad (114)$$

Выберем трансформатор ТСЛ-1600/10-0,4 УЗ.

Таблица 20 – Паспортные данные трансформатора ТСЛ-1600/10-0,4 УЗ

Тип	S, кВА	Напряжение обмотки		ΔP_k , Вт	P_x , Вт	u_k , %
		ВН	НН			
ТСЛ-1600/10	1600	10	0,4	12500	2800	6

Основные параметры выбранной КТП приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Технические характеристики КТП

Наименование параметра	2КТП-1600
Мощность силового трансформатора, кВА	1600
Номинальное напряжение на стороне ВН, кВ	10
Номинальное напряжение на стороне НН, кВ	0,4
Номинальный ток сборных шин (РУНН), А	3000
Ток термической стойкости в течении 1 с, кА	30
Ток электродинамической стойкости, кА	70

«Выбор сечения кабелей производится с тем, чтобы обеспечить наименьшие потери электроэнергии в нормальном режиме работы. Для этого используют понятие экономической плотности тока. С помощью этого

параметра можно определить такую величину сечения кабеля, при которой потери электроэнергии будут минимальными» [18].

Ток в кабеле от РУ 10 кВ до шкафа «глухого ввода»:

$$I_1 = \frac{0,7 \cdot S_T}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot 0,95} = \frac{0,7 \cdot 1,6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,95} = 0,068 \text{ кА} \quad (115)$$

Закладываем кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена с наружной оболочкой из ПВХ пластика, не распространяющей горение и с низким выделением дыма и коррозионно-активных газов с жилами из меди.

Экономическая плотность тока для данного типа кабелей:

$$j_{\text{эк}} = 1,6 \text{ А/мм}^2. \quad (116)$$

Экономическое сечение проводника:

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_{H1}}{j_{\text{эк}}} = \frac{68}{1,6} = 42,5 \text{ мм}^2. \quad (117)$$

К установке принимаем кабели с изоляцией из СПЭ фирмы «АББ-Москабель», сечение 50 мм², экран 15 мм², смотрим таблицу 22. Кабельная линия смонтирована в воздухе, кабели уложены в плоскости.

Таблица 22 – Технические характеристики кабеля

Номинальное напряжение, кВ	10
Максимальное напряжение, кВ	12
Максимальный ток КЗ по жиле в течение 1 с, кА	4,7
Максимальное сопротивление постоянному току при 20°С гуд, Ом/км	0,387
Индуктивное сопротивление, Ом/км	0,394

$$X_3 = X_{yД} \frac{l}{1000} = 0,394 \cdot \frac{60}{1000} = 0,0236 \text{ Ом}, \quad (118)$$

$$R_3 = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{60}{58,8 \cdot 50} = 0,0204 \text{ Ом}, \quad (119)$$

где $\gamma = 58,8$ - удельная проводимость для алюминия, м/(Ом·мм)²,

$X_{yД} = 0,394$ Ом/км – удельное индуктивное сопротивление кабеля.

Ток в кабеле, питающем троллей:

$$I_{1н} = \frac{P_{2н}}{3U_{1н}\eta_{н}\cos\varphi} = \frac{45000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,915 \cdot 0,82} = 91 \text{ A} \quad (120)$$

Закладываем кабель с резиновой изоляцией и ПВХ оболочкой не распространяющей горение с жилами из меди.

Экономическая плотность тока для данного типа кабелей:

$$j_{эк} = 2 \text{ A/мм}^2. \quad (121)$$

Экономическое сечение проводника:

$$S_{эк} = \frac{I_{н1}}{j_{эк}} = \frac{91}{2} = 45,5 \text{ мм}^2. \quad (122)$$

К установке принимаем кабели фирмы «АББ-Москабель» с медными жилами, сечение 50 мм^2 , смотрим таблицу 23.

Таблица 23 – Технические характеристики кабеля

Номинальное напряжение, В	660
полное сопротивление петли «фаза-нуль», Ом/км	1,03

Расчёт токов короткого замыкания выполняется для выбранных расчётных точек подстанционного оборудования. Корректное определение мест возникновения коротких замыканий позволяет оценить воздействие термических и электродинамических нагрузок на шины, реакторы и кабельные линии. Анализ полученных значений токов КЗ обеспечивает проверку устойчивости электрооборудования к аварийным режимам работы.

При вычислении токов короткого замыкания следует принимать во внимание дополнительное питание от установленных электродвигателей синхронного и асинхронного типа, работающих на напряжении 10 кВ.

При вычислении значений токов короткого замыкания расчетная модель не включает сопротивление шинпровода, поскольку его величина значительно меньше импедансов других компонентов энергосистемы. Дополнительный вклад потребителей комплектной трансформаторной подстанции в точке короткого замыкания также исключается из расчета ввиду их подключения через понижающие трансформаторы.

Расчеты проведем в относительных единицах при следующих базисных условиях: $S_{\delta} = 1000 \text{ МВ} \times \text{А}$, базисное напряжение принимаем равным: $U_{\delta} = U_{\text{ср1}} = 10,5 \text{ кВ}$, базисный ток:

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta 1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА}, \quad (123)$$

Рассчитаем токи короткого замыкания в точке К2 для проверки кабеля 10 кВ . Схема замещения представлена на рисунке 37.

Суммарное сопротивление системы до шин РП-52:

$$Z_{1*} = 5,89 \text{ о.е.} \quad (124)$$

Сопротивление кабельной линии РП-52 – КТП:

$$Z_{3*} = \sqrt{X_3^2 + R_3^2} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} = \sqrt{0,0204^2 + 0,0236^2} \frac{1000}{100} = 0,312 \text{ Ом.} \quad (125)$$

Средние значения сверхпереходной ЭДС асинхронных двигателей для приближенных расчетов примем по [6] – $E_*'' = 0,9$.

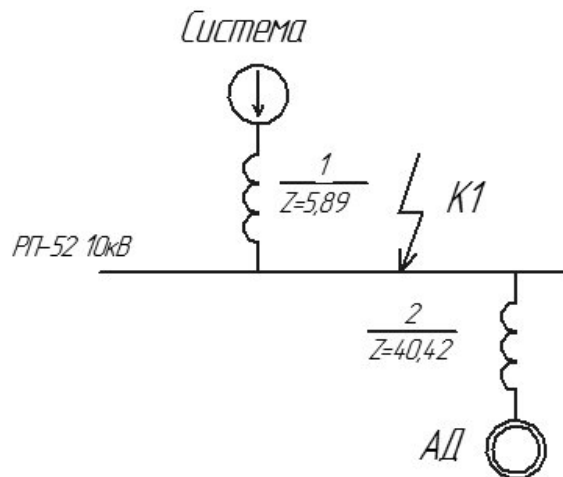


Рисунок 37 – Схема замещения для определения тока короткого замыкания в КЛ 10 кВ

Расчет тока короткого замыкания в точке К-1:

Ток периодической составляющей:

$$I_{\text{п0.с}} = \frac{I_{\delta}}{Z_{\text{с*}}} = \frac{55}{5,89} = 9,32 \text{ кА}, \quad (126)$$

Ток апериодической составляющей:

$$i_{a.\kappa 1} = \sqrt{2} \cdot I_{n0.\kappa 1} = \sqrt{2} \cdot 9,32 = 13,2 \text{ кА.} \quad (127)$$

Ударный ток:

$$i_{y.c} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0.c} = 2,55 \cdot 9,32 = 23,77 \text{ кА.} \quad (128)$$

где $K_y = 1,8$,

Подпитка от АД:

Ток периодической составляющей:

$$I_{n0.ad} = \frac{E_{экв}^* \cdot I_{\delta}}{Z_{ad*}} = \frac{0,9 \cdot 55}{40,42} = 1,22 \text{ кА,} \quad (129)$$

Ток апериодической составляющей:

$$i_{a.ad} = \sqrt{2} \cdot I_{n0.ad} = \sqrt{2} \cdot 1,22 = 1,73 \text{ кА.} \quad (130)$$

Ударный ток:

$$i_{y.ad} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0.ad} = 2,55 \cdot 1,22 = 3,12 \text{ кА.} \quad (131)$$

Суммарное значение тока КЗ:

~ ток периодической составляющей:

$$I_{n0\Sigma} = I_{n0.c} + I_{n0.ad} = 9,32 + 1,22 = 10,54 \text{ кА,} \quad (132)$$

~

ударный ток:

$$i_{y\Sigma} = i_{y.c} + i_{y.ad} = 23,77 + 3,12 = 26,89 \text{ кА.} \quad (133)$$

«На секции РУ 0,4 кВ (QF1, QF2, QF3) выберем автоматические выключатели марки Schneider Electric Masterpact NW32 втычного исполнения с моторным приводом, с характеристиками, приведенными в таблице 24.

Таблица 24 – Технические характеристики выключателя Masterpact NW32

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	0,4
Номинальный ток, А	3200
Номинальный ток отключения, кА	85
Полное время отключения, мс	25

Для отключения ШР сталевого и шлакового (QF6, QF7, QF9) выберем автоматические выключатели Schneider Electric Masterpact NW25 втычного исполнения с моторным приводом, с характеристиками, приведенными в таблице 25.

Таблица 25 – Технические характеристики выключателя Masterpact NW25

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	0,4
Номинальный ток, А	2500
Номинальный ток отключения, кА	65
Полное время отключения, мс	25

Для отключения питания преобразователей двигателей выберем автоматические выключатель Schneider Electric Easypact CVS втычного исполнения, с характеристиками, приведенными в таблице 26.

Таблица 26 – Технические характеристики выключателя Easypact CVS

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	0,4
Номинальный ток, А	100
Номинальный ток отключения, кА	25
Полное время отключения, мс	25

Защитные электрические аппараты должны функционировать с гарантированным отключением при возникновении однофазного короткого замыкания согласно установленным параметрам срабатывания:

$$k_{31} \cdot I_3 \leq I_k, \quad (134)$$

где k_{31} – допустимая кратность минимального тока КЗ по отношению к номинальному току максимального расцепителя автомата» [11].

I_k – наименьшая величина однофазного тока КЗ.

Нормативные документы в области электробезопасности регламентируют минимальное соотношение между током короткого замыкания и номинальным током автоматического выключателя, которое должно превышать трехкратное значение.

Расчет величины однофазного тока короткого замыкания производится согласно упрощенной математической модели:

$$I_k = \frac{U_\phi}{Z_n} \quad (135)$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети.

Z_n – полное сопротивление петли «фаза-нуль»

$$I_k = \frac{U_\phi}{Z_n} = \frac{220}{0,793 \cdot 0,1} = 2774 \text{ А}. \quad (136)$$

Следовательно условие $I_k \geq 300 \text{ А}$ выполняется, автоматический выключатель удовлетворяет условиям надежности.

«По условию длительного нагрева проводники должны удовлетворять утяжелённому режиму.

Условия по длительному нагреву для кабелей

$$I_{\text{форс}} \leq 1,3 \cdot I_{\text{дл.доп}}, \quad (137)$$

где $I_{\text{форс}}$ – ток в цепи в утяжелённом режиме, А,

Длительно допустимый ток для кабеля «АББ-Москабель» с СПЭ изоляцией класса напряжения 10 кВ и алюминиевой жилой сечением 50 мм² составляет 169 А. За ток в форсированном режиме примем:

$$I_{\text{форс}} = 86,4 \text{ А} \leq 1,3 \cdot I_{\text{дл.доп}} = 1,3 \cdot 169 = 220 \text{ А}. \quad (138)$$

Выбранный кабель напряжением 10 кВ удовлетворяет условию нагрева от длительного выделения тепла рабочим током» [17].

Термическая устойчивость одиночных кабелей проверяется путем расчета короткого замыкания в начальной точке К-1 кабельной линии определенной строительной длины [6]. Для электроустановок с номинальным напряжением 10 кВ проверка проводников и электрооборудования производится при трехфазном коротком замыкании как наиболее тяжелом режиме.

При оценке термической стойкости проводников и электрооборудования к короткому замыканию необходимо учитывать совокупное время срабатывания основных защитных реле, охватывающих контролируемые элементы сети, включая период полного размыкания ближайшего автоматического выключателя от точки возникновения короткого замыкания.

Интеграл Джоуля выступает основным критерием при расчете термического влияния токов короткого замыкания на проводящие элементы и коммутационную аппаратуру, что подтверждается исследованиями, представленными в работе [6]. «Количественная оценка степени нагрева оборудования позволяет определить границы допустимых значений и предотвратить повреждение изоляции.

$$B_K = I_{п0}^2 \cdot \left[t_{откл} + T_{a.эк} \cdot \left(1 - e^{\frac{-2t_{откл}}{T_{a.эк}}} \right) \right], \quad (139)$$

где B_K - интеграл Джоуля, $A^2 \cdot c$;

$I_{п0} = I_{п0, maxK-3} = 10540$ А - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке К-1;

$t_{откл} = t_{р.з} + t_{о.в}$ - расчетная продолжительность КЗ, с;

$T_{a.эк}$ - эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с.

Ориентировочно время действия основной релейной защиты, установленной на отходящей линии, принимается равным 1,5 с и полное время отключения выключателя - 0,025 с. Итого $t_{откл}$ составляет 1,525 с.

$$B_k = 10540^2 \cdot \left[1,525 + 0,05 \cdot \left(1 - e^{\frac{-2 \cdot 1,525}{0,05}} \right) \right] = 175 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с} \quad (140)$$

При проверке термической стойкости проводника, имеющего стандартное сечение q , мм², должно выполняться условие

$$q \geq q_{\min}, \quad (141)$$

где $q_{\min}$ – минимальное сечение проводника по термической стойкости.

Произведем расчет минимального сечения кабеля

$$q_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_m} = \frac{\sqrt{175 \cdot 10^6}}{65} = 20,3 \text{ мм}^2, \quad (142)$$

где $C_m = 65 \text{ A} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$ – коэффициент, значения приведены в таблице 27» [6].

Условие выполняется, следовательно, по термической стойкости кабель проходит.

Выбор троллейных шинопроводов

Троллейные шинопроводы выбираются по токовой нагрузке. Расчетный ток в троллее:

$$I_m = \frac{P_n}{3U_n \eta_n \cos \varphi} = \frac{45000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,915 \cdot 0,82} = 91 \text{ A}. \quad (143)$$

где P_n – мощность нагрузки подключенной к троллею.

U_n – напряжение питания нагрузки.

η_n – КПД нагрузки.

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки.

Выбираем к установке троллейные системы повышенной защиты с троллейными шинопроводами VAHLE F 45. Технические характеристики приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Технические характеристики троллейных шинопроводов

Поперечное сечение, мм	50	
полное сопротивление при 50 Гц, Ом/км	0,266	
Максимальный ток длительной нагрузки, А	495	

Проверка кабелей, питающих троллеи

Кабели и троллеи на напряжение 0,4 кВ требуется проверять по потере напряжения:

$$\Delta U = \frac{P \cdot l}{c \cdot S} \leq 5\%. \quad (144)$$

где P – мощность нагрузки,

l – длина кабеля,

c – коэффициент для медных жил при напряжении 380 В,

S – сечение кабеля.

Потеря напряжения в троллее:

$$\Delta U_m = \frac{P \cdot l}{c \cdot S} = \frac{45 \cdot 370}{74 \cdot 50} = 4,2\% < 5\% \quad (145)$$

Потеря напряжения в кабеле, питающем троллеи:

$$\Delta U_k = \frac{P \cdot l}{c \cdot S} = \frac{45 \cdot 60}{74 \cdot 50} = 0,73\% < 5\% \quad (146)$$

Суммарная потеря напряжения в линии кабель-троллеи:

$$\Delta U = \Delta U_m + \Delta U_k = 4,2 + 0,73 = 4,93\% < 5\% \quad (147)$$

Потеря напряжения не превышает допустимого предела, следовательно, сечения проводников выбраны верно.

5.3 Экономический эффект от внедрения предложенных рекомендаций

«Показатель эффекта определяет все позитивные результаты, достигаемые при внедрении разработанной системы. Экономический эффект за расчётный период T от применения разработанной системы электропривода поворота конвертера определяется из [11] по формуле:

$$\mathcal{E}_T = P_T - \mathcal{Z}_T, \quad (148)$$

где P_T – стоимостная оценка результатов внедрения разработанной системы в течение периода T , руб.,

$\mathcal{Z}_T$ – стоимостная оценка затрат на создание и внедрение разработанной системы в течение периода T , руб.

Стоимость затрат на создание и внедрение разработанной системы:

$$\mathcal{Z}_T = \mathcal{Z}_{созд} + \mathcal{Z}_{обор}, \quad (149)$$

где $\mathcal{Z}_{созд}$ - затраты на проектирование системы» [16].

Разработка проекта велась на протяжении шестимесячного периода с использованием половины установленного рабочего времени. «Расчетная стоимость создания системы определяется пропорционально затраченным трудочасам:

$$\mathcal{Z}_{созд.} = \frac{T_{\text{пр}}}{2} \cdot \mathcal{Z}_{\text{ЗП}} = 3 \cdot 20000 = 60000 \text{ руб.} \quad (150)$$

$\mathcal{Z}_{обор}$ - затраты на покупку необходимого оборудования и его монтаж:

$$\mathcal{Z}_{обор} = \mathcal{Z}_{дв} + \mathcal{Z}_{пр} + \mathcal{Z}_{каб} + \mathcal{Z}_{тр} + \mathcal{Z}_{выкл} + \mathcal{Z}_{САУ} + \mathcal{Z}_{мон}, \quad (151)$$

где $\mathcal{Z}_{дв.}$ - затраты на покупку двигателя 4AP250S6Y3,

$\mathcal{Z}_{пр.}$ - затраты на покупку преобразователя частоты Sinamics G120,

$\mathcal{Z}_{каб}$ - затраты на покупку кабеля,

$\mathcal{Z}_{тр.}$ - затраты на покупку трансформатора,

$\mathcal{Z}_{выкл.}$ - затраты на покупку выключателей на стороне 0,4 КВ,

$\mathcal{Z}_{сист.упр.}$ - затраты на покупку системы управления,

$Z_{\text{мон}}$ - затраты на монтаж.

$P_{\text{дв.}} = 69000$ руб. – стоимость 1 двигателя марки 4AP250S6Y3 [12].

Затраты на покупку 4 двигателей марки 4AP250S6Y3:

$$Z_{\text{дв.}} = P_{\text{дв.}} \cdot n_{\text{дв.}} = 69000 \cdot 4 = 276000 \text{ руб.} \quad (152)$$

$P_{\text{пр.}} = 295000$ руб. – стоимость преобразователя частоты Sinamics G120 [14]. Затраты на покупку 3 преобразователей частоты Sinamics G120:

$$Z_{\text{пр.}} = P_{\text{пр.}} \cdot n_{\text{пр.}} = 295000 \cdot 3 = 885000 \text{ руб.} \quad (153)$$

$P_{\text{тр.}} = 250000$ руб. – стоимость трансформатора ТС3-1600/10 [15]. Затраты на покупку 6 трансформаторов ТС3-1600/10:

$$Z_{\text{тр.}} = P_{\text{тр.}} \cdot n_{\text{тр.}} = 250000 \cdot 2 = 500000 \text{ руб.} \quad (154)$$

$P_{\text{каб}} = 150$ руб. – стоимость 1 м кабеля с СПЭ изоляцией в оболочке из полиэтилена [14]. Общая длина кабеля составит 1150 м. Затраты на покупку кабеля составят:

$$Z_{\text{каб}} = P_{\text{каб}} \cdot l_{\text{каб}} = 150 \cdot 1150 = 172500 \text{ руб.} \quad (155)$$

$P_{\text{выкл}} = 10000$ руб. – стоимость автоматического выключателя на 0,4 КВ [15]. Затраты на покупку выключателей на 0,4 КВ:

$$Z_{\text{выкл.}} = P_{\text{выкл.}} \cdot n_{\text{выкл.}} = 10000 \cdot 4 = 40000 \text{ руб.} \quad (156)$$

$P_{\text{САЦ}} = 133249$ руб. – стоимость системы управления для одного сталевоза [17]. Затраты на покупку систем управления сталевозом и шлаковозом:

$$Z_{\text{САУ}} = P_{\text{САУ}} \cdot n_{\text{САУ}} = 133249 \cdot 2 = 266498 \text{ руб.} \quad (160)$$

При зарплате 120 руб/ч затраты на монтаж составят:

$$Z_{\text{мон}} = T_{\text{мон}} \cdot Z_{\text{ЗП}} = 7300 \cdot 120 = 876000 \text{ руб.} \quad (157)$$

Затраты на покупку оборудования и монтаж:

$$Z_{\text{обор}} = 276000 + 885000 + 500000 + 172500 + 40000 + 266498 + 876000 = 3015998 \text{ руб.} \quad (158)$$

Суммарные затраты составят:

$$Z_T = 60000 + 3015998 = 3075998 \text{ руб.} \quad (159)$$

Стоимостная оценка результатов применения разработанной системы за расчётный период T :

$$P_T = \sum_{t=0}^T P_t \cdot \alpha_t, \quad (160)$$

где T – расчётный период,

P_t – стоимостная оценка результатов года t расчётного периода, руб.,

α_t – дисконтирующая функция, которая вводится с целью приведения всех затрат и результатов к одному моменту времени.

Дисконтирующая функция:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+p)^t}, \quad (161)$$

где p – норма дисконта ($p = 0,25$)» [11].

Таким образом, стоимостная оценка результатов применения разработанной модели:

$$P_T = \sum_{t=0}^T \frac{P_t}{1,25^t}. \quad (162)$$

Внедрение созданной модели позволило сократить время простоя оборудования, минимизировать количество производственного брака и снизить выпуск несоответствующей продукции. Экономическую эффективность предложенных решений демонстрируют расчетные данные.

$$\langle P_T = P_{ПР} + P_{БР} + P_{НП}, \quad (163)$$

где $P_{ПР}$ – стоимостная оценка сокращения времени простоев,

$P_{БР}$ – стоимостная оценка сокращения брака,

$P_{НП}$ – стоимостная оценка сокращения несоответствующей продукции.

Стоимостная оценка сокращения времени простоев:

$$P_{ПР} = \mathcal{E}_\epsilon \cdot \Pi \cdot C_{np} = 24 \cdot 600 \cdot 2000 = 28800000 \text{ руб}, \quad (164)$$

где $\mathcal{E}_\epsilon = 24$ ч – возможная экономия времени простоя в год,

Π – производительность сталевоза, т/ч,

расчётная производительность $\Pi = 600 \text{ т/ч}$,

$C_{np} = 2000 \text{руб}/\text{т}$ – стоимость тонны стали.

$P_T = 28800000 \text{руб.}$

Экономический эффект от использования разработанной системы за год:

$$\mathcal{E}_T = P_T - E_n \cdot 3_T = 28800000 - 0,25 \cdot 3175998 = 2800600 \text{руб.} \quad (165)$$

Эффективность разработки:

$$\mathcal{E}_P = \frac{\mathcal{E}_T \cdot 0,4}{3_T} = \frac{28006000 \cdot 0,4}{3175998} = 3,5 \gg [27]. \quad (166)$$

Поскольку $\mathcal{E}_P > 0,25$, разработка является экономически целесообразной.

Определим срок окупаемости разработанной системы:

$$3_T = P_T = \sum_{t=0}^T \frac{P_t}{1,25^t}; \quad (167)$$

$$3175998 = \frac{28800000}{1,25} \cdot t_{ок}; \quad (168)$$

$$t_{ок} = \frac{3075998 \cdot 1,25}{28800000} = 0,54 \text{ года}. \quad (169)$$

Расчёт показал, что проведенная модернизация электропривода передвижения сталеваза является экономически целесообразной. Затраты, связанные с разработкой системы, приобретением и монтажом нового оборудования окупаются меньше, чем за год.

Комплексная система технического обслуживания и ремонта электрооборудования представляет собой структурированный набор организационно-технических мероприятий, обеспечивающих бесперебойную эксплуатацию энергетических установок:

~ планово-предупредительные работы включают регулярное обслуживание, плановые ремонты различной сложности согласно утвержденным графикам, диагностическое тестирование и модернизацию оборудования;

~ методология обслуживания электротехнических систем охватывает систематизацию оборудования по категориям, детальную спецификацию

ремонтных операций, определение периодичности профилактических мероприятий для каждой группы устройств;

- ~ эффективная реализация программы требует создания специализированной ремонтной инфраструктуры, укомплектованной современным инструментарием и квалифицированным персоналом;

- ~ успешное функционирование системы обеспечивается постоянным совершенствованием технологических процедур, рациональной организацией складского хозяйства запасных частей, строгим документированием всех производственных операций при неукоснительном соблюдении нормативных требований.

5.4 Перспективы дальнейшего совершенствования системы управления электродвигателями самоходных стелевозов

При рассмотрении скалярной системы управления электроприводом стелевоза были выявлены следующие недостатки данной системы:

- ~ при аварийном режиме работы наблюдается задержка при пуске;
- ~ появление погрешности в скорости $\Delta\omega$ при изменении нагрузки на валу двигателя.

Данные особенности системы управления обусловлены отсутствием обратной связи по скорости. Таким образом, инерционность механизма не учитывается САУ. На рисунке 38 приведены процессы разгона стелевоза с порожним ковшем и полным.

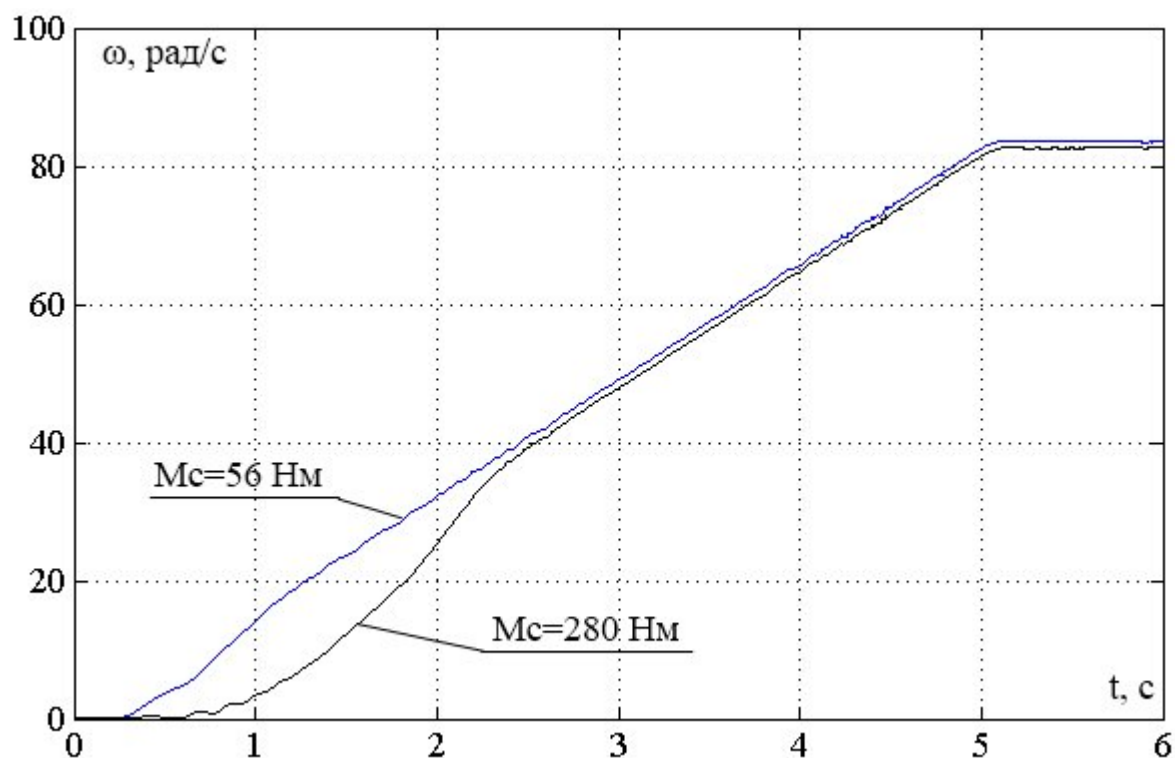


Рисунок 38 – Процесс разгона сталево́з

Как показало моделирование привода с разомкнутой системой управления, плавность динамических характеристик достигается высоким значением момента инерции механизма.

На рисунке 39 и рисунке 40 приведены характеристики $M(t)$ показывающие, что в системе происходят значительные колебания момента двигателя, оказывающие негативное влияние на механическую часть сталево́з, образуя резкие скачки динамического момента.

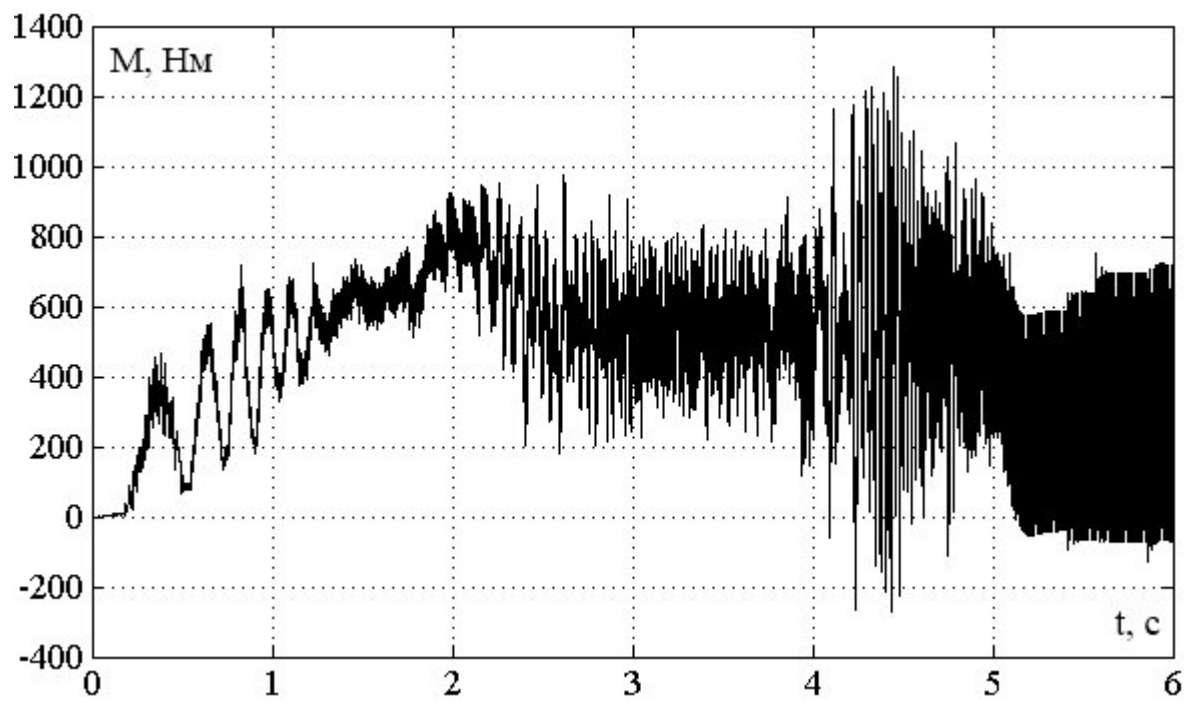


Рисунок 39 – Переходные процессы пуска двигателя $M(t)$
при $M_c = 280 \text{ Нм}$

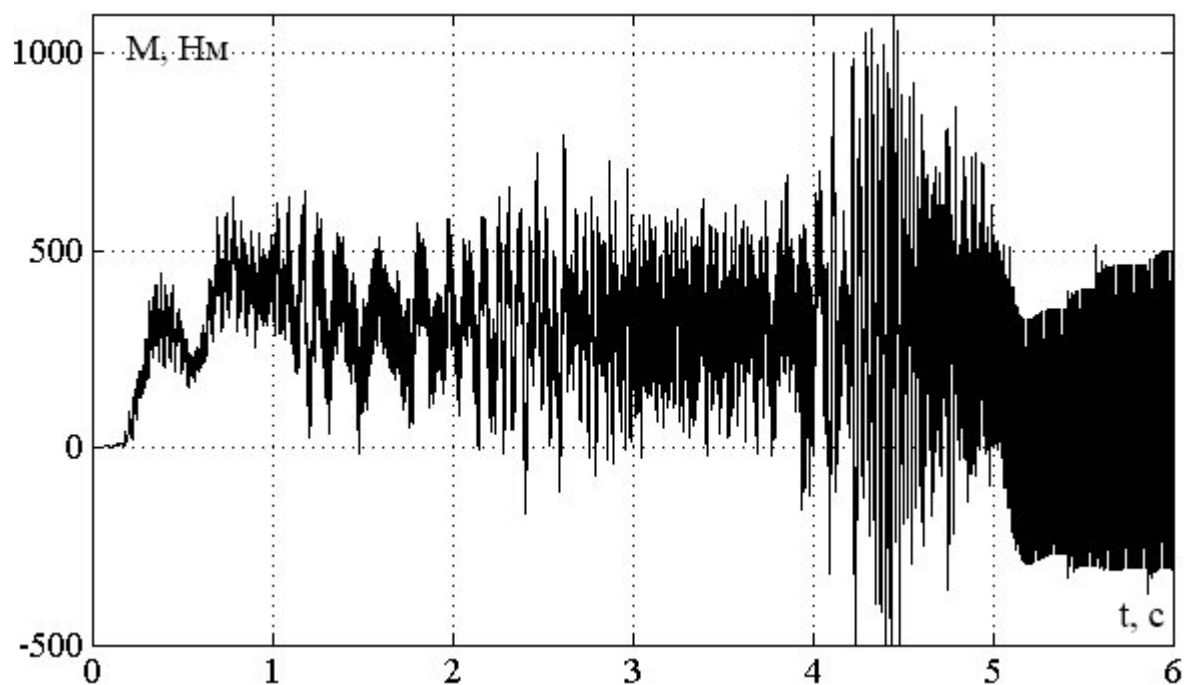


Рисунок 40 – Переходные процессы пуска двигателя $M(t)$
при $M_c = 56 \text{ Нм}$

Для улучшения энергетических и динамических характеристик системы частотного асинхронного электропривода целесообразно применять замкнутые системы. Существует четыре основных закона управления в замкнутых асинхронных системах:

$$\frac{U_s}{w_k} = \text{const}, \frac{E_s}{\omega_k} = \psi_s = \text{const}, \frac{E_s}{\omega_k} = \psi_m = \text{const}, \frac{E_s}{\omega_k} = \psi_R = \text{const}. \quad (170)$$

Наиболее приоритетной является система со стабилизацией потокосцепления ротора $\psi_R = \text{const}$, так как при данном способе управления асинхронный электропривод приобретает свойства двигателя постоянного тока:

- ~ возможность получить линейные механические характеристики;
- ~ большая жесткость на рабочем участке механической характеристики;
- ~ уменьшение динамических нагрузок на механическую часть сталеваза.

На рисунке 41 приведены механические характеристики замкнутой асинхронной системы для всех четырех законов

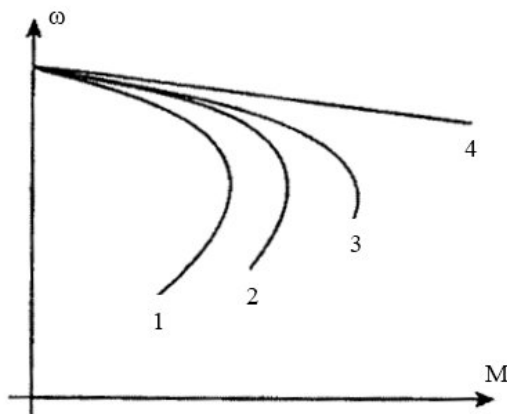


Рисунок 41 – Механические характеристики АКЗ при различных законах управления (1 – $\frac{U_s}{w_k} = \text{const}$, 2 – $\psi_s = \text{const}$, 3 – $\psi_m = \text{const}$, 4 – $\psi_R = \text{const}$)

Вращающаяся координатная система, выстроенная относительно векторов потокосцепления ротора, позволяет реализовать независимое регулирование по двум взаимосвязанным управляющим каналам.

Организация системы управления электроприводом включает два независимых канала регулирования. Первый канал контролирует потокосцепление ротора через составляющую x . Второй канал регулирует составляющую тока статора i_{sy} по оси y . При поддержании неизменного уровня сигнала в канале x обеспечивается стабильное потокосцепление ротора. Величина момента электропривода определяется значением сигнала в канале y .

Реализация автоматизированного комплекса защиты выполняется по аналогичной двигателю постоянного тока схеме. Канал x требует разработки специального регулятора, обеспечивающего стабильное потокосцепление при неизменном входном сигнале. «Параллельно в канале y выполняется синтез регуляторов, контролирующих токовые характеристики и скоростные параметры системы.

Векторная система частотного управления с замкнутым контуром представлена схематически на рисунке 42» [17].

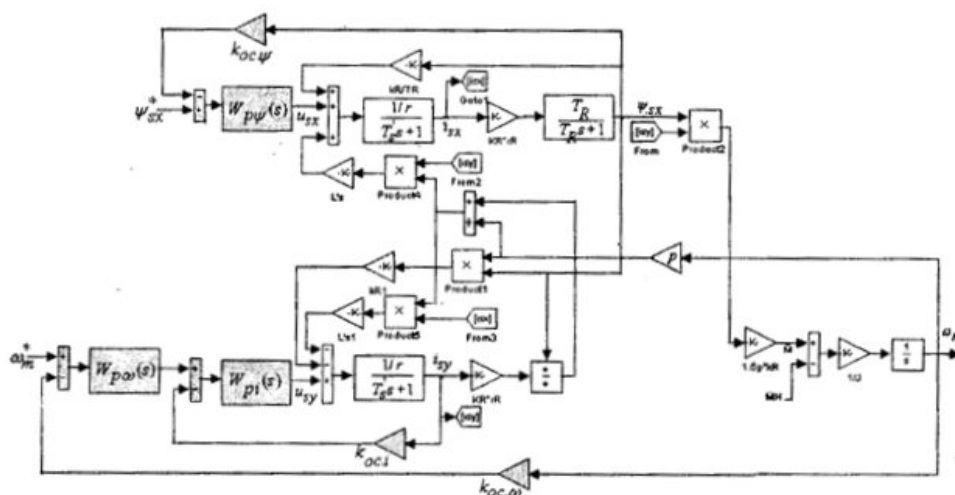


Рисунок 42 – Структурная схема замкнутой асинхронной системы с векторным управлением

«В канале регулирования потокосцепления ротора, как правило, $T_R \gg T'_S$, поэтому в качестве регулятора потокосцепления целесообразно выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s}. \quad (171)$$

Тогда для реализации в этом канале оптимума по модулю коэффициент усиления регулятора рассчитывается из условия:

$$k_{p\psi} = \frac{r}{2T'_S k_R R_R k_{oc.\psi}}. \quad (172)$$

Рассчитанный таким образом ПИ-регулятор компенсирует перекрестные связи в канале x .

Для компенсации влияния перекрестных связей в канале y следует также выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T'_S s + 1)}{T'_S s}. \quad (173)$$

Тогда передаточная функция замкнутого токового контура в канале y будет равна:

$$W_{pi}(s) = \frac{1}{k_{oc.i}} \frac{1}{\frac{T'_S}{k_{pi} k_{oc.i}} s + 1} \approx \frac{1}{k_{oc.i}}, \text{ при } k_{pi} \gg 1. \quad (174)$$

При компенсированных перекрестных связях канал y , отвечающий за момент, полностью аналогичен системе постоянного тока. Для придания этой системе астатизма по скорости необходимо выбрать ПИ-регулятор скорости с передаточной функцией:

$$W_{p\omega}(s) = \frac{k_{p\omega}(T_{p\omega} s + 1)}{T_{p\omega} s} \gg [23]. \quad (175)$$

Векторное управление асинхронной системой частотно-токового типа реализовано в среде моделирования MATLAB. Программная модель включает инвертор напряжения с функцией токового коридора. Координатная система вращается синхронно с потокосцеплением ротора. Расчет параметров регуляторов потокосцепления и скорости производится согласно уравнениям 146-149. Модель системы представлена графически на рисунке 43.

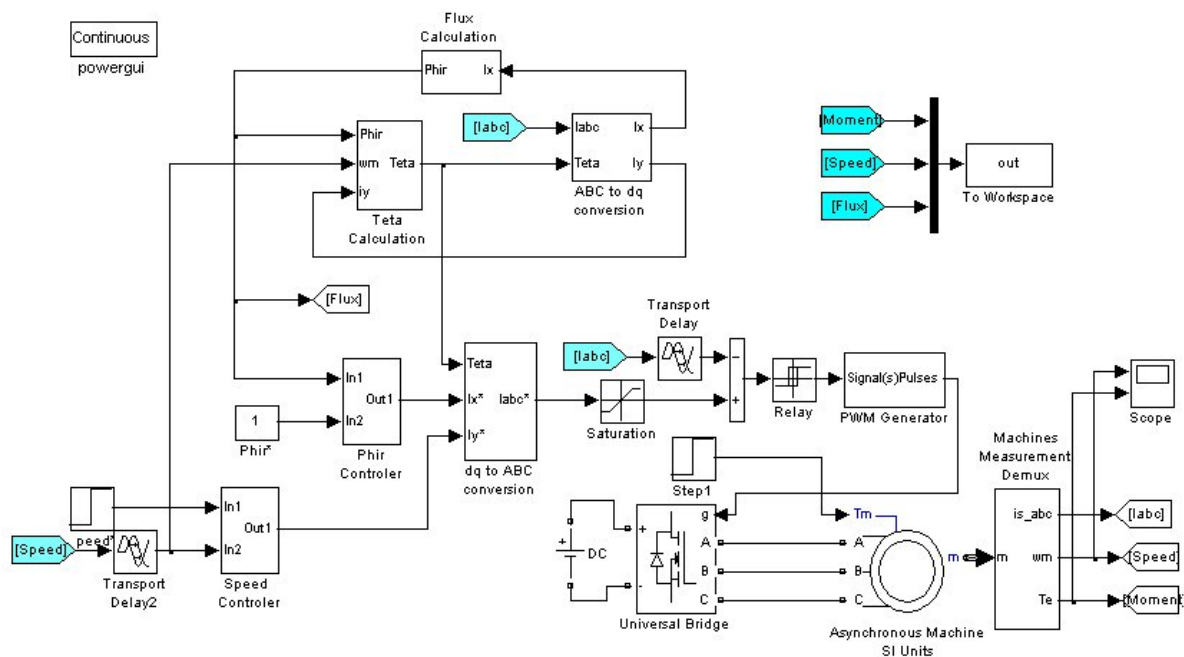


Рисунок 43 – Виртуальная частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением

Управление инвертором осуществляется посредством схемы с релейным элементом, обеспечивающей поддержание тока в заданных пределах благодаря отрицательной обратной связи.

В промышленных установках измерение потокоцепления ротора выполняется двумя методами: прямым способом при помощи датчиков эффекта Холла либо расчетным путем согласно математическим зависимостям.

$$\psi_{Rx} = \frac{k_R T_R}{1 + T_R s} i_{Sx}, \quad (176)$$

$$\text{где } k_R = \frac{L_m}{L_R},$$

$$T_R = \frac{L_R}{R_R}.$$

Значение тока статора i_{Sx} определяется на основании реального сигнала с датчика тока.

Представленная модель включает несколько компонентов электропривода. Основу составляет виртуальная модель асинхронного электродвигателя, соединенная с силовым преобразователем на базе IGBT-транзисторов. Координатные преобразователи ABC-XY и XY-ABC выполняют математические операции по трансформации трехфазных величин в двухфазную систему координат и обратно. Расчетный модуль Theta Calculation определяет текущий угол поворота координатной системы, вычисляя частоту выходного напряжения инвертора согласно заданному алгоритму управления.

$$\omega_k = \frac{k_R R_{Ri} s_y}{\psi_{Rx}} + p \omega_m, \quad (177)$$

где ω_m – угловая скорость вала машины,

т.к. только в этом случае оси координат вращающейся системы будут сориентированы заданным образом ($\psi_{Rx} = \psi_R$, $\psi_{Ry} = 0$),

«Модуль содержит несколько функциональных элементов управления. Вычислительный блок рассчитывает потокосцепление ротора согласно уравнению 175, что отражено на рисунке 44 как Flux Calculator. Регулирование параметров обеспечивается блоком задания потокосцепления Phir* совместно с контроллером тока по оси x (Phir Controler). Управление скоростными характеристиками реализуется через блок Speed* и соответствующий регулятор Speed Controler» [22].

Графики изменения скоростных параметров представлены на рисунке 45, а динамика моментных характеристик отражена на рисунке 46 и рисунке 47. Переходные процессы по моменту отражены на рисунке 48, рисунке 49 и рисунке 50.

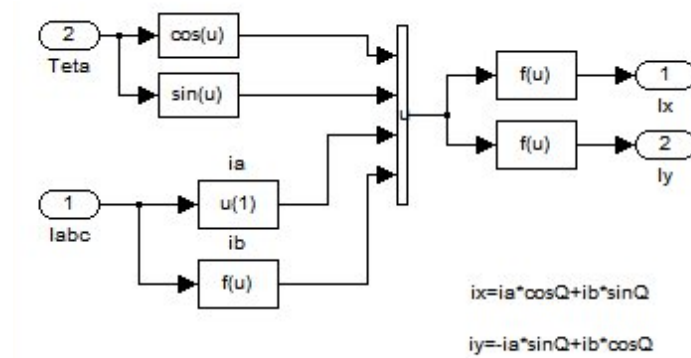


Рисунок 44 – Блок ABC-XY

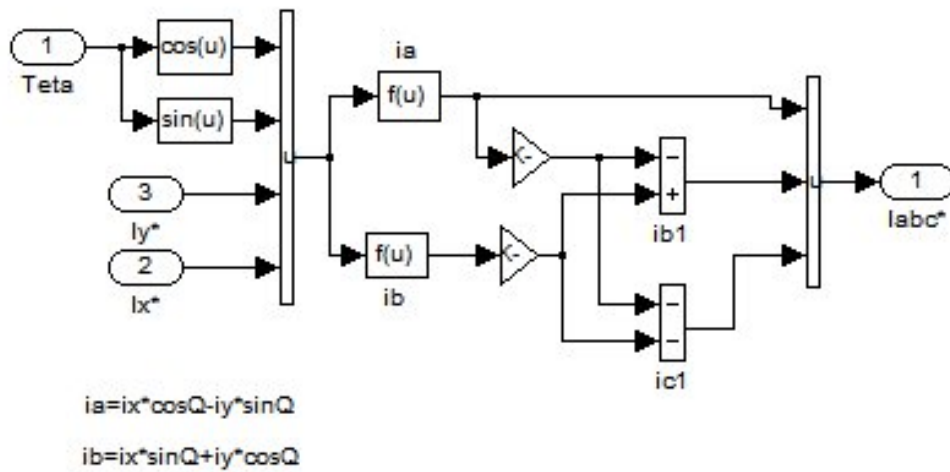


Рисунок 45 – Блок XY-ABC

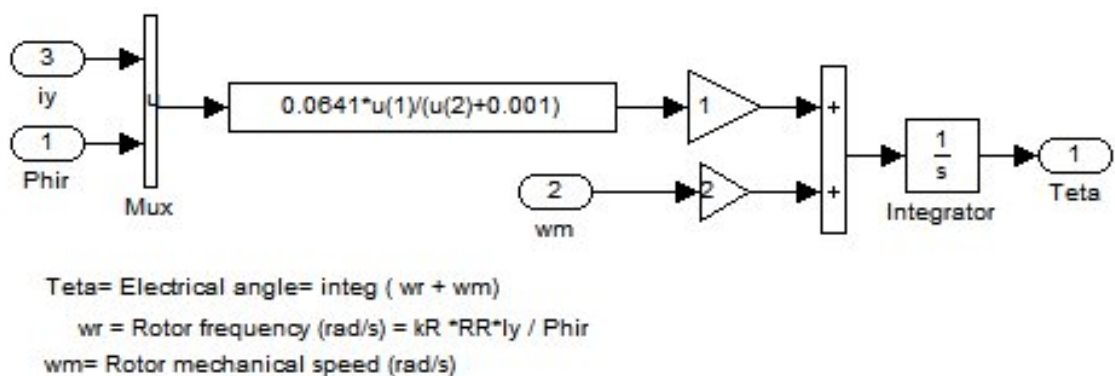
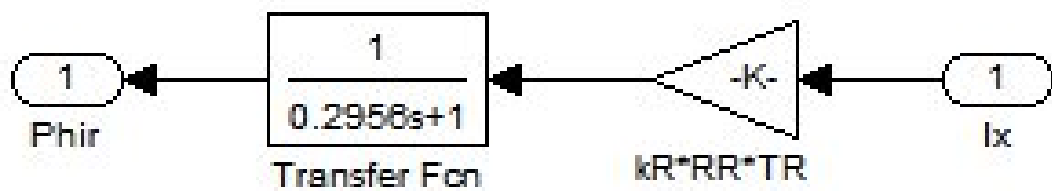


Рисунок 46 – Блок определения угла поворота системы координат



$$\Phi_{ir} = k_R \cdot R_R \cdot T_R \cdot I_x / (1 + T_R \cdot s)$$

Рисунок 47 – Блок вычисления потокоцепления ротора

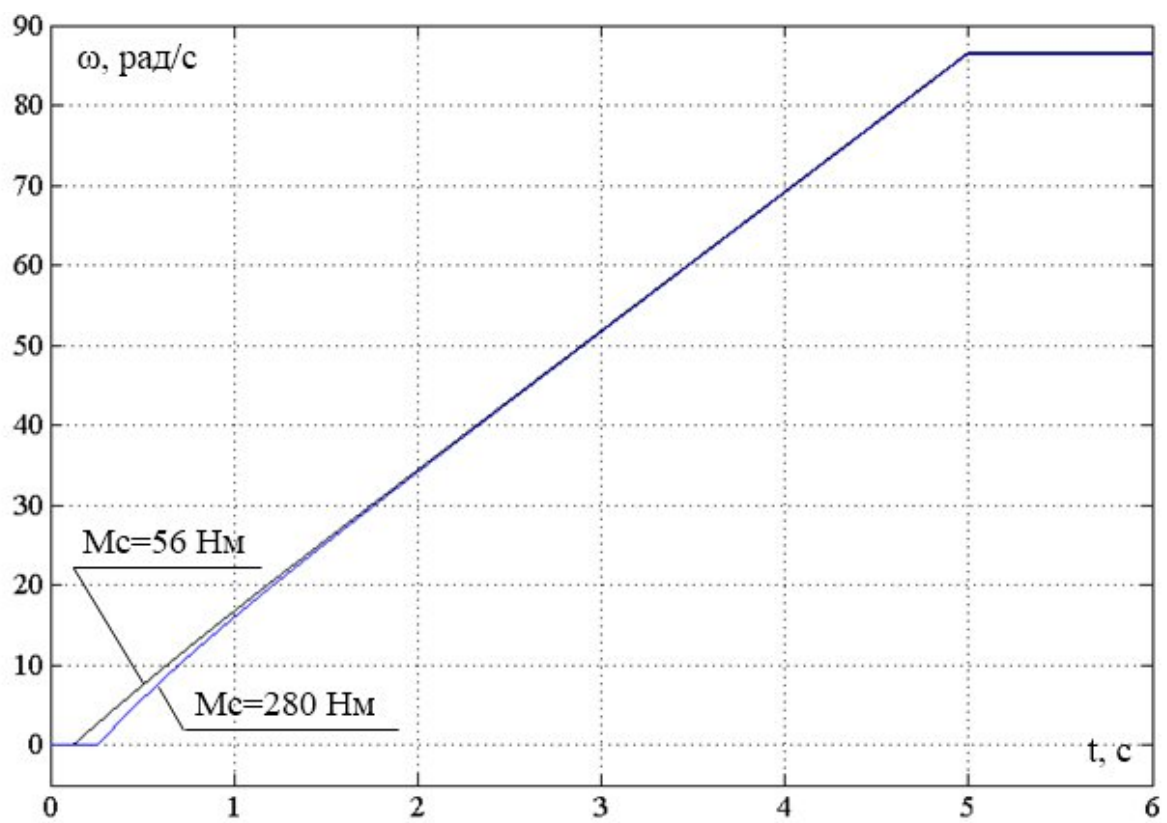


Рисунок 48 – Переходные процессы по скорости

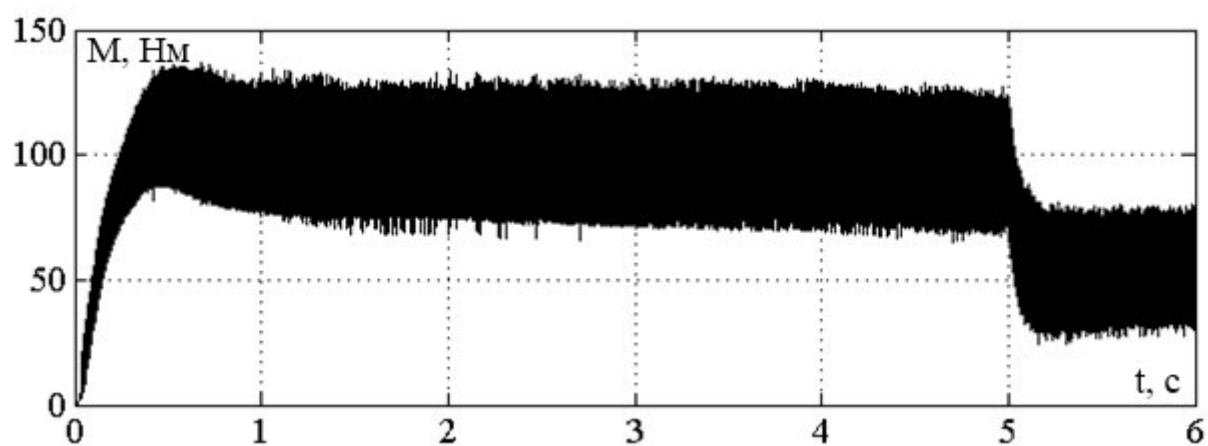


Рисунок 49 – Переходные процессы по моменту, пуск с порожним ковшом, $M_c = 56 \text{ Hm}$

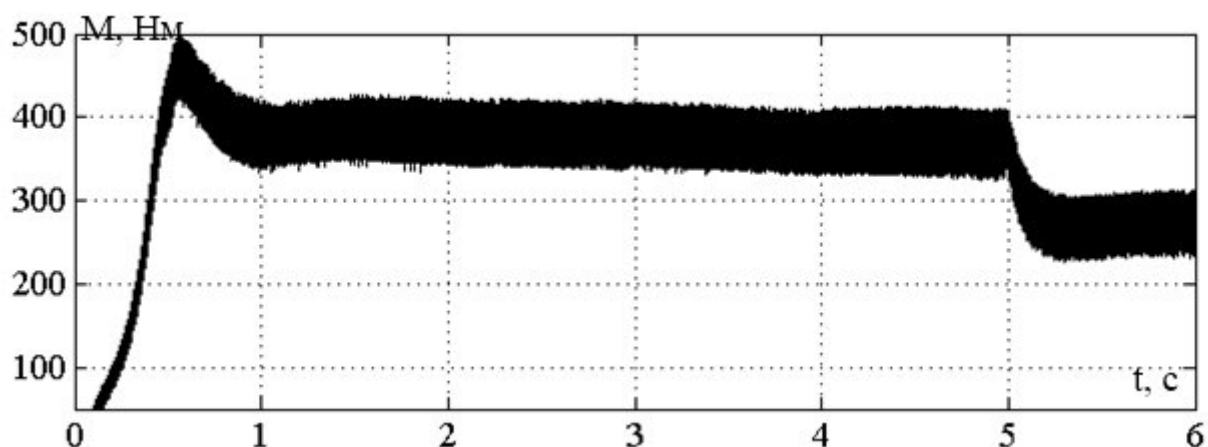


Рисунок 50 – Переходные процессы по моменту, аварийный пуск с полным ковшом, $M_c = 280 \text{ Hm}$

На рисунке 51 показан график изменения потокосцепления ротора в процессе работы двигателя. Условие $\psi_R = \text{const}$ соблюдается, следовательно, система работает верно.

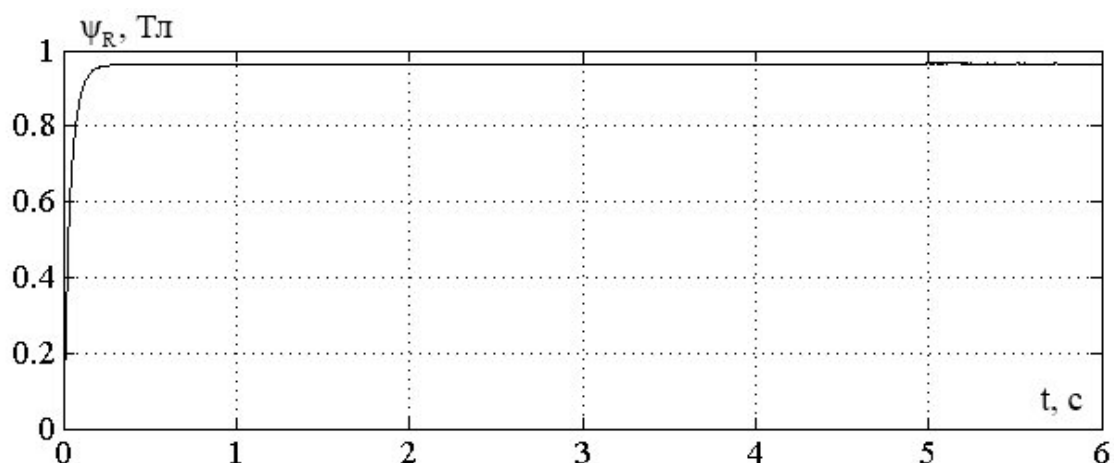


Рисунок 51 – Переходный процесс $\psi_R(t)$

Для реализации данной системы необходимо построение канал обратной связи по скорости. На рисунке 52 приведена принципиальная схема привода с использованием радиоканала для передачи данных датчика скорости частотному преобразователю.

Радиосвязь рекомендуется применять с использованием частотного диапазона 2,4 ГГц. В данном диапазоне связь устойчива к помехам, позволяет передавать данные с высокой скоростью и на большие расстояния. Примером может служить промышленный радиомодем XSTREAM. Для связи с преобразователем SINAMICS в нем имеется интерфейс RS-485, позволяющий производить передачу информации со скоростью 19,2 кбит/с.

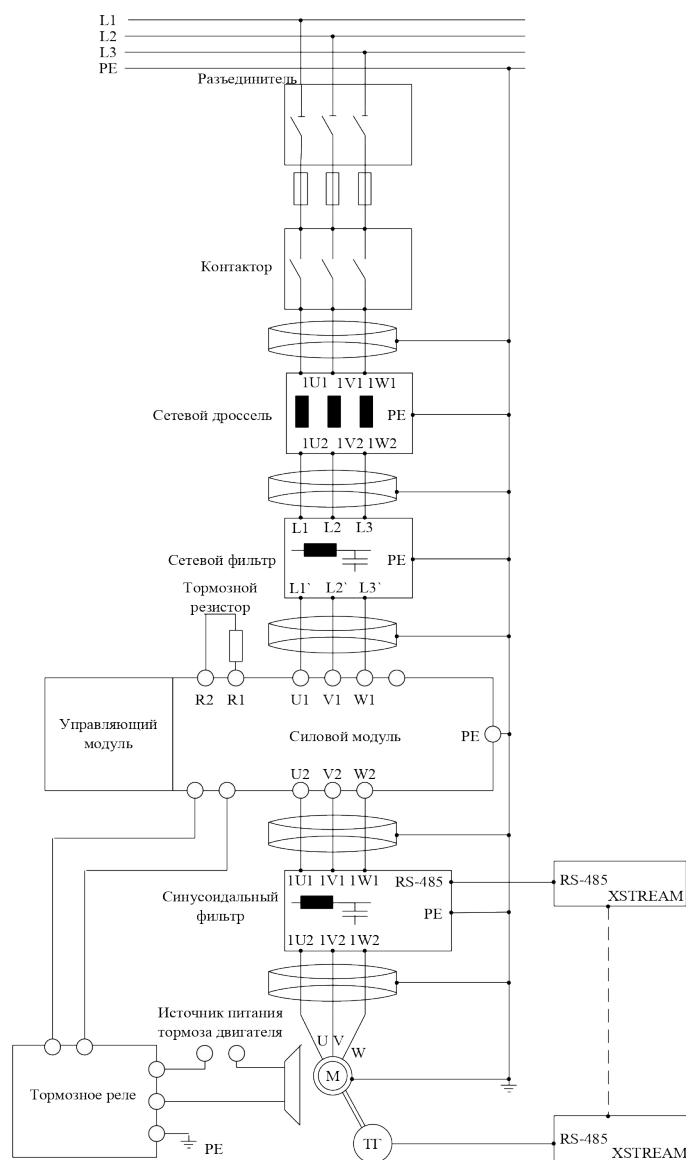


Рисунок 52 – Принципиальная схема подключения силового модуля при использовании векторного управления

Вывод по разделу

В данном разделе представлены практические рекомендации и перспективы дальнейшего развития системы управления. Внедрение этой системы управления асинхронным электроприводом позволяет добиться такого же качества работы, как у электроприводов постоянного тока. Благодаря предложенному алгоритму асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором по своим механическим и динамическим характеристикам становится сопоставим с системами на постоянном токе.

Заключение

Развитие промышленного сектора предъявляет повышенные требования к автоматизации производственных линий. Внедрение регулируемых электроприводов позволяет модернизировать технологические процессы во множестве отраслей. Современные системы электропривода существенно улучшают качество управления оборудованием, обеспечивая точность и надежность производственных операций.

Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором занимают лидирующие позиции среди электроприводов промышленного назначения. Конструктивная простота, высокая надежность и экономическая доступность обеспечивают их широкое применение при различных мощностях и скоростных режимах работы.

Расчетно-аналитическая часть дипломного проекта включала подбор асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, определение параметров системы управления и выбор преобразователя частоты. Математическое моделирование электропривода в среде MATLAB подтвердило соответствие динамических характеристик заданным требованиям и возможность плавного регулирования скорости вращения в широком диапазоне.

Современный электропривод на базе частотного преобразователя с асинхронным двигателем демонстрирует превосходные показатели энергоэффективности при эксплуатации. Внедрение подобных решений открывает широкие возможности для создания комплексных автоматизированных систем управления производственными процессами, охватывающих все уровни технологической цепочки предприятия.

Модернизация привода сталевоза позволила установить асинхронные электродвигатели с номинальной частотой вращения 1000 мин⁻¹, превосходящей показатели прежних двигателей постоянного тока на 200 мин⁻¹. Повышенная частота вращения обеспечивает рост производительности

агрегата. Сохранение параметров пуска и торможения при ускорении до $0,2\text{ м/с}^2$ позволяет развивать максимальную скорость на протяженных маршрутах между конверторным пролетом и УНРС. Сокращение длительности рабочего цикла электропривода сталево­за на 220 секунд обеспечивает прирост производительности оборудования на 10,5%.

Моделирование замкнутой асинхронной частотно-токовой системы с векторным управлением выявило значительное улучшение энергетических и динамических показателей привода при выполнении индивидуального исследовательского проекта.

Реализация производственной системы требует организации скоростной обратной связи. Особенности троллейного электропитания обуславливают применение промышленных радиомодемов, обеспечивающих надежную передачу данных между стале­возом и управляющим комплексом при минимальном влиянии помех.

Применение разработанной системы управления асинхронным электроприводом позволяет достичь показателей качества регулирования, характерных для электроприводов постоянного тока. Механические характеристики и динамические свойства привода с асинхронным короткозамкнутым двигателем при использовании предложенного алгоритма управления соответствуют параметрам систем постоянного тока.

Список используемых источников

1. Анисимов Б.В., Перегонцев Д.А. Выбор электрических машин для тяговых установок // Промышленная энергетика. — 2018. — №7. — С. 23–28.
2. Асинхронные двигатели серии 4А [Текст]: справочник/ А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов [Текст]: учеб. для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М.: Академия, 2004. – 458 с.
4. Блок В. М. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов [Текст] / В. М. Блок, Г. К. Обушев, Л. Б. Паперно. – М.: Высш. шк., 1990. – 383 с.
5. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст]: учеб. пос. / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320с.
6. Гордеев Н.И. Автоматизация промышленных предприятий черной металлургии: Учебник / Н.И. Гордеев, Ю.С. Красавин, М.Н. Алексеенко. — Москва: Академия, 2019. — 368 с.
7. Гультияев, А. Визуальное моделирование в среде MATLAB [Текст]: учеб. пос. / А. Гультияев. – СПб: Питер, 2000. – 287 с.
8. Иванов, В.В. Некоторые способы защиты асинхронных двигателей от перегрузки [Текст]: учеб. пос. / В. В. Иванов. – М.: Электротехника, 2001. – 286 с.
9. Ковчин, С. А. Теория электропривода [Текст]: учеб. для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
10. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст]: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
11. Кузнецов Е.М. Электрические машины металлургических заводов: Учебное пособие. — Екатеринбург: УрФУ, 2017. — 212 с.

12. Ладыгин Г.Д. Основы проектирования электроприводов для металлургического транспорта // Известия вузов. Черная металлургия. — 2016. — №1. — С. 14–19.
13. Михайлов О.Б., Петрова Т.П. Повышение энергетической эффективности электромеханических комплексов подвижного состава металлургических предприятий // Вестник Томского государственного университета. Инженерные науки. — 2017. — №3. — С. 56–63.
14. Павловская Т.Ю. Механика мобильных погрузочно-разгрузочных средств металлургических предприятий: Монография. — Челябинск: ЧГАУ, 2018. — 234 с.
15. Попов Р.Е. Проблемы подбора мощных синхронных электродвигателей для шахтных электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. — 2019. — №1. — С. 13–18.
16. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. [Текст].— М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.— 184 с.
17. Семёнова Э.Ф. Эксплуатация электрооборудования в сложных климатических условиях металлургических предприятий // Железнодорожный транспорт. — 2016. — №12. — С. 34–39.
18. Сергеев В.Г. Совершенствование конструктивных решений крупных электроприводов металлургического назначения // Промышленные ведомости. — 2018. — №3. — С. 12–17.
19. Симонов В. С. Экономика предприятий энергетического комплекса [Текст]: учеб. для вузов/ В. С. Самсонов, М.А. Вяткин – М.: Высш.шк., 2001. – 416 с.
20. Усынин, Ю. С. Системы управления электроприводов [Текст]: учеб. пособие / Ю. С. Усынин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 358 с.
21. Федотов В.А. Практикум по расчету характеристик электродвигателей тяжёлых механизмов металлургических цехов: Методическое пособие. — Магнитогорск: МГТУ, 2019. — 128 с.

22. Харламова Н.В. Применение асинхронных электродвигателей большой мощности в транспортной технике черной металлургии // Труды Российского общества инженеров железнодорожного транспорта. — 2017. — №4. — С. 22–27.
23. Шлыков А.А. Диагностика повреждений электродвигателей тяжелого машиностроительного оборудования : Автореферат дис. ... кандидата техн. наук. — Самара, 2018. — 23 с.
24. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст]: учеб. пос. / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
25. Яковлев С.Л. Организация работы стального передела на заводах ОАО “Северсталь” // Современная наука и образование. — 2016. — №1. — С. 45–51.
26. Lee K.H., Kim D.S., Cho B.K. Development of a power-saving system for steelmaking furnace crane operation using energy recovery from regenerative braking // Applied Sciences. — Vol. 10, No. 13, July 2020. — Article ID 4567.
27. Liu W., Liang C., Guan T. Comparative study of AC and DC motor drives for high-capacity transport systems in metallurgical plants // International Conference on Mechatronics and Automation. — IEEE Press, 2018. — Pp. 1234–1239.
28. Luo X., Zhao H., Chen J. Energy-efficient design for large-scale steelmaking cranes // Journal of Mechanical Engineering Science. — Vol. 233, Issue 11, November 2019. — Pp. 4156–4167.
29. Rao V.R., Chandra A.K., Venkatesh M.V. Electric drive selection methodology for heavy duty material handling equipment in the iron & steel industry // IETE Technical Review. — Vol. 36, No. 4, August 2019. — Pp. 412–421.
30. Zheng Y., Zhang L., Wang Z. Power consumption optimization of electric motors in heavy-duty industrial vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — Vol. 66, No. 5, May 2019. — Pp. 3456–3464.