

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»**

На правах рукописи

АНИКАНОВ Дмитрий Сергеевич

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МЕХАНИЗМА ЛЕНТОЧНОГО
КОНВЕЙЕРА ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ ПРИВОДНОГО
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Кипервассер Михаил Вениаминович

Новокузнецк – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ДИАГНОСТИКИ И ЗАЩИТЫ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ.....	12
1.1 Технические характеристики и классификация неисправностей механизмов ленточных конвейеров	12
1.2 Обзор существующих устройств, систем диагностики и защиты механизмов ленточных конвейеров	16
1.2.1 Защиты механической части ленточных конвейеров	16
1.2.2 Защиты приводных электродвигателей ленточных конвейеров.....	17
1.2.3 Оценка возможностей существующих методов диагностики и устройств защиты механизмов ленточных конвейеров	20
1.3 Данные о неисправностях и аварийных ситуациях механизмов ленточных конвейеров. Анализ эффективности используемых средств защиты на действующих предприятиях	30
1.4 Обоснование возможности функциональной диагностики, неисправностей и аварийных ситуаций механизмов ленточных конвейеров с использованием контроля величин приводного электродвигателя.....	37
1.5 Выводы.....	44
1.6 Постановка задач исследования	45
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА КАК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	46
2.1. Составление модели ленточного конвейера	46
2.1.1. Математическое описание приводного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором	46
2.1.2 Математическое описание механической части ленточного конвейера	48
2.1.3 Математическое описание совместной электромеханической модели механизма ленточного конвейера.....	53

2.2	Использование разработанной модели для определения величины изменений токов обмоток электродвигателя при возникновении аварий в механической части механизма ленточного конвейера.....	56
2.2.1	Определение численных значений для составления расчетной модели выбранного ленточного конвейера типа НЕ-К.....	56
2.2.2	Исследование модели ленточного конвейера как электромеханического комплекса в среде Matlab Simulink.....	65
2.2.3	Частотный анализ токового сигнала с помощью вейвлет-анализа.....	75
2.3	Результаты исследования изменений величины тока статора приводного электродвигателя при моделирование аварийных ситуаций ленточных конвейеров Обоганительной фабрики «Черниговская- Коксовая» ЗАО «Черниговец» с использованием совместной модели электромеханического комплекса	84
2.4	Выводы.....	89
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА.....		91
3.1	Моделирование аварийных режимов работы механизма ленточного конвейера на действующем предприятии	91
3.2	Обработка экспериментальных данных	104
3.3	Выводы.....	106
ГЛАВА 4. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА И УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ МЕХАНИЗМА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ		107
4.1	Разработка алгоритма функциональной диагностики состояния механизма ленточного конвейера.....	108
4.2	Разработка устройства защиты ленточного конвейера от аварийных режимов работы	111
4.3	Оценка эффективности предлагаемого алгоритма функциональной диагностики механической части ленточного конвейера.....	118

4.4 Расчет экономического эффекта по результатам внедрения способа функциональной диагностики механической части ленточного конвейера	120
4.5 Выводы.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Конвейерный транспорт, наряду с автомобильным и железнодорожным, является одним из основных способов перемещения горной массы и полезных ископаемых на предприятиях горной и металлургической промышленности.

Программы развития угольной и металлургической промышленности до 2035 года предусматривают рост объема добычи угля и выпуска металлургической продукции. Увеличение объемов производства приводит к росту нагрузки на оборудование и сокращению времени технологических пауз, необходимых для выполнения качественного и своевременного обслуживания транспортного оборудования горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. При этом количество обслуживающего персонала недостаточно для обеспечения необходимого контроля над техническим состоянием транспортных систем. Указанные обстоятельства увеличивают вероятность возникновения неисправностей и аварий ленточных конвейеров и, как следствие, перерывов в работе оборудования отдельных участков и производства в целом. Снижение рисков по причине возникновения неисправностей и аварий может быть достигнуто путем контроля фактического состояния механизмов ленточных конвейеров в режиме реального времени и, как следствие, повышения оперативности и точности диагностирования фактического состояния узлов и агрегатов ленточных конвейеров.

Степень разработанности темы исследования. При реализации существующих диагностических систем и комплексов, а также при разработке новых методов и устройств используются результаты научных исследований в области теории и практики диагностики как отдельной дисциплины. Большой вклад в решение задач практической диагностики внесли Биргер И.А., Болотин В.В., Бонгард М.М., Головин А.И., Герике Б.Л., Добромислов В.А., Ключев В.В.,

Ковалев А.В., Клишин В.И., Макаров Р.А., Мозгалеvский А.Г., Носов С.В., Огарь Ю.С., Петров В.А., Соснин Ф.Р., Сероштан В.И., Филипов В.Н., Хорешок А.А., Щербаков А.Г. и др.

Научные исследования указанных авторов велись в направлениях разработки методов получения и оценки диагностической информации, разработки диагностических моделей и алгоритмов принятия решений, а также повышения надежности и ресурса технических систем.

Результаты указанных исследований используются при построении диагностических систем и комплексов оборудования в различных отраслях промышленности, в том числе – ленточных конвейеров. Большинство методов диагностики основаны на контроле вибрации, параметров акустических колебаний (шумов), температуры и т.д.

Анализ используемых методов диагностики состояния ленточных конвейеров показывает ряд ограничений, накладываемых на их применение. К таким ограничениям относятся узконаправленное действие диагностических комплексов и малый спектр выявляемых аварийных событий; невозможность использования некоторых методов без остановки оборудования, а в некоторых случаях без демонтажа и разборки узлов и агрегатов; значительная стоимость диагностического оборудования; недостаточные точность и быстродействие.

Все эти ограничивающие факторы существующих методов не позволяют организовать систему комплексного анализа и диагностирования состояния механизма в режиме реального времени. Для реализации такой системы требуется метод на основе мониторинга величин, которые возможно контролировать без привлечения дополнительного оборудования в режиме реального времени.

В связи с вышеизложенным, разработка способа функциональной диагностики и защиты механизмов ленточных конвейеров является актуальной научной задачей.

Цель работы заключается в разработке и внедрении способа функциональной диагностики неисправностей и аварийных ситуаций и защиты

механизмов ленточных конвейеров по электрическим величинам приводного асинхронного электродвигателя.

Идея работы заключается в исследовании взаимосвязей неисправностей и аварий механической части ленточных конвейеров и электрических величин приводных электродвигателей, а также последующее использование полученных зависимостей для разработки способа функциональной диагностики.

Поставленная цель определяет следующие **основные задачи**:

1. Разработать модель электромеханического комплекса ленточного конвейера.
2. Исследовать предлагаемую модель с получением критериев и признаков аварийных событий.
3. Выполнить натурные исследования предлагаемого способа функциональной диагностики на реальном объекте для определения адекватности моделирования.
4. Разработать алгоритм реализации способа функциональной диагностики механизмов ленточных конвейеров.
5. Разработать устройство, необходимое для реализации способа функциональной диагностики механизмов ленточных конвейеров.
6. Выполнить промышленную апробацию алгоритма способа функциональной диагностики ленточного конвейера на реальном объекте.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель ленточного конвейера как электромеханической системы, объединяющая в себя восьмимассовую механическую систему и двухфазную модель асинхронного электродвигателя, описанного в системе координат α - β .
2. Получены критерии возникновения аварийных событий в механической части ленточного конвейера, таких как заштыбовка приемного бункера, нарушение соосности передач редуктора или биение в опорных подшипниках шестерней, поломка чистителя, срезание «пальцев» соединительной муфты, глухое заклинивание редуктора, заклинивание роликов грузонесущей части, на

основе динамики отклонений электрических величин приводного асинхронного электродвигателя от номинальных значений.

3. Разработан способ функциональной диагностики состояния механической части ленточных конвейеров, который позволяет реализовать алгоритм функциональной диагностики состояния ленточного конвейера с дополнительной обработкой токового сигнала при помощи вейвлет-анализа на базе современных программируемых логических контроллеров (ПЛК).

Теоретическая и практическая значимость работы. Практическая значимость работы заключается в возможности диагностировании аварийных ситуаций на ранней стадии возникновения, тем самым снижая тяжесть последствия и время технологических остановок.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученная математическая модель электромеханического комплекса конвейера может быть использована для дальнейших исследований процессов электромеханического преобразования энергии в указанном механизме, позволяя исследовать аварийные ситуации, не рассматриваемые в данной работе.

Теоретическая и практическая значимость работы основана на:

1. Разработанном алгоритме способа функциональной диагностики состояния механической части ленточного конвейера, основанном на анализе электрических величин привода в режиме реального времени.
2. Предложенном комплексном решении, позволяющем организовать систему функциональной диагностики ленточного конвейера, в основе которой лежат полученные критерии, позволяющие по электрическим параметрам приводного электродвигателя определить наступление аварийной ситуации.
3. Установленной вероятности гарантированного фиксирования факта возникновения механических неисправностей с нижним порогом в 93%, величина которой подтверждена математическим моделированием в среде Matlab Simulink и экспериментальными данными промышленных испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

1. Сложность механической части ленточного конвейера и наличие большого числа узлов и агрегатов в ней не позволяют осуществлять мониторинг состояния механизма ленточного конвейера существующими системами или средствами диагностики. Для осуществления диагностики ленточный конвейер и приводной асинхронный электродвигатель следует рассматривать совместно, как единую электромеханическую систему с использованием восьмимассовой модели механической части с возможным поузловым моделированием аварийных режимов различной сложности.
2. Выявление различных аварийных режимов работы механизма ленточного конвейера возможно с использованием предложенной модели и полученных диагностических критериев и признаков наличия неисправностей и аварийных ситуаций в механической части конвейера.
3. Предложенный алгоритм функциональной диагностики состояния механизма ленточного конвейера позволяет реализовать предлагаемый способ на базе современных ПЛК и иных средств автоматизации в режиме реального времени.
4. Предложенное микропроцессорное устройство обеспечивает реализацию функциональной диагностики и защиты механизма ленточного конвейера в случае отсутствия средств автоматизации и диспетчеризации на защищаемом оборудовании.

Реализация результатов работы. Результаты работы апробированы и внедрены на предприятиях ОАО «Кузбассразрезуголь»: Обогажительная фабрика «Энергетическая» (г. Калтан), «Бачатский угольный разрез» (фильтр-прессовальное отделение).

Методология и методы исследования. Теоретической базой исследования являются теория электропривода, теория автоматического управления, теория механизмов и машин в приложении к многомассовым системам, теория численного моделирования и вейвлет-анализа. Исходные данные для математического моделирования определялись в ходе натурных исследований на реальных объектах. Компьютерное моделирование и экспериментальные

исследования осуществлялись с использованием программного комплекса Matlab Simulink.

Степень достоверности. Исследования выполнены с применением современных измерительных устройств, прошедших поверку. Достоверность экспериментальных данных подтверждается использованием лицензированных измерительных комплексов и методик измерения электрических величин приводных асинхронных электродвигателей. Эффективность предлагаемого способа подтверждается результатами испытаний на промышленных объектах.

Апробация результатов. Результаты проведенного исследования представлены на Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве», г. Новокузнецк, 2011, 2019г.; конференциях «Научоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (г. Новокузнецк, 2012-2021 гг.); «Академические науки – проблемы и достижения» (North Charleston, SC, USA 2015 г.); «Молодежная научно-практическая конференция «Введение в энергетику»» (г. Кемерово, КузГТУ, 2016 г.); «Современные научные исследования и разработки» (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 21 печатной работе, в том числе в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ; 1 публикация в издании, индексируемом в наукометрической базе SCOPUS. По результатам внедрения результатов исследования получено 4 патента и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для электронных вычислительных машин или базы данных.

Личный вклад автора состоит в проведении натурных экспериментов, в разработке и исследовании способа защиты ленточного конвейера по энергетическим показателям приводного асинхронного двигателя (АД) с определением контролируемых величин и их соответствия механическим неисправностям, в обработке и анализе полученных результатов и формулировании выводов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 145 страницах, содержит 23 таблицы, 49 рисунков, список использованных источников из 121 наименования и 4 приложения, в которых изложены материалы, относящиеся к практической реализации.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ДИАГНОСТИКИ И ЗАЩИТЫ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

1.1 Технические характеристики и классификация неисправностей механизмов ленточных конвейеров

На предприятиях горной и металлургической промышленности одним из основных элементов транспортной инфраструктуры является конвейерный транспорт. Надежная работа конвейерного транспорта является одним из необходимых условий бесперебойной работы шахт, обогатительных фабрик и разрезов. Интенсивное использование оборудования и высокие статические и динамические нагрузки неизбежно приводят к значительному увеличению числа отказов узлов и агрегатов основных рабочих механизмов.

Основными технологическими показателями ленточных конвейеров являются скорость передвижения грузов и удельная масса груза на одном погонном метре ленты. В некоторых случаях показатели ленточных конвейеров могут достигать весьма значительных величин: производительность – до 6000 т/ч, ширина ленты – до 2000 мм, мощность приводных двигателей – до 3000 кВт; длина одного става – до 10-15 км при угле наклона 16-18°; скорость перемещения груза – до 10 м/с [1, 2].

Ленточные конвейеры с высокой производительностью, большим углом наклона и другими нестандартными характеристиками являются единичными. Наиболее распространенными в горной и металлургической промышленности Кузбасса являются конвейеры со следующими техническими характеристиками: длина става от 50 до 100 м; ширина ленты не более 1000-1200 мм; асинхронный электропривод с мощностью приводного двигателя от 20 до 75 кВт.

Поскольку в последнее время в промышленности наблюдается тенденция [3, 4]. Расширяется применение промежуточных приводов для ленточных конвейеров, которые позволяют повысить длину ставов и, тем самым, уменьшить

количество промежуточных перегрузок (или полностью исключить их), снизить оборачиваемость ленты и повысить срок ее службы [3, 4]. Усовершенствование погрузочных устройств, роlikоопор и опорных конструкций ставов, а также создание новых специальных типов ленточных конвейеров (ленточно-тележечных) дает возможность повысить размер фракции перемещаемых конвейерами грузов [3, 4].

Несмотря на улучшение конструктивно-технологических характеристик узлов и агрегатов, а также электрической пускорегулирующей аппаратуры, конвейерный транспорт по-прежнему остается аварийно-непрогнозируемым механизмом [5, 6]. При этом остановки конвейерного транспорта приводят к значительным экономическим потерям.

Общий вид механизма ленточного конвейера представлен на рисунке 1.1 [7, 8].

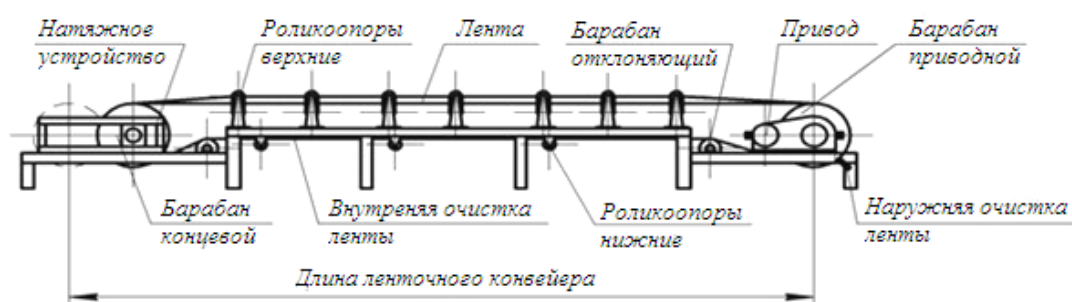


Рисунок 1.1 – Механизм ленточного конвейера

Общее технологическое состояние оборудования можно разделить на три основных вида:

1. **Работоспособное** (ГОСТ Р 27.002-2015, п 3.2.3) – это состояние объекта, в котором он способен выполнить требуемые функции.
2. **Предельное** (ГОСТ Р 27.002-2015, п 3.2.7) – это состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна.
3. **Нерабочее состояние** (ГОСТ Р 27.002-2015, п 3.2.6) – это состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.

В процессе работы возникающий износ, проявляющиеся дефекты и другие причины перехода оборудования из исправного состояния в неисправное

проявляются на всех уровнях. Тяжесть неисправности характеризуется степенью повреждения узла или агрегата.

С точки зрения диагностирования и эксплуатации оборудования, распознавание состояния узлов и агрегатов оборудования должно происходить на стадии возможности своевременной локализации в период планово-предупредительного ремонта (ППР) без ущерба для выпуска продукции. Наиболее распространенные неисправности в механической части ленточного конвейера и места их локализации представлены в таблице 1.1 [118, 119].

Таблица 1.1 – Основные неисправности и места их локализации в механической части ленточного конвейера [119]

Признаки и последствия	Причины появления
<i>Редуктор</i>	
Повышенный шум на холостом ходу и под нагрузкой	Повышенный боковой зазор в зубчатой передаче из-за разрегулировки
Повышенный шум под нагрузкой, частые стуки	Повышенный износ зубчатых передач, износ подшипников
Неравномерные резкие стуки в редукторе, усиливающиеся под нагрузкой	Поломка зубьев в зубчатых передачах
«Воющий» звук, скрежетание	Мал боковой зазор между зубьями конической передачи
	Тугая затяжка или повреждение подшипников
Нагрев корпуса редуктора	Недостаточное количество масла в редукторе
	Загрязнение масла
Течь масла по плоскости разъема редуктора	Ослаблены крепежные болты
Течь масла по входному или выходным валам	Неисправность манжета
<i>Барабаны ленточного конвейера</i>	
Чрезмерный нагрев корпусов подшипников барабанов («стаканов» отклоняющих роликов)	Неисправность подшипников, отсутствие смазки
Приводные барабаны не вращаются	Неисправность муфты
<i>Тормозное устройство</i>	
При остановке конвейера не срабатывает тормозной механизм	Заедание в шарнирных соединениях
	Попадание на тормозной шкив масла и грязи
	Износ тормозных накладок
	Выход из строя пружины

Продолжение таблицы 1.1

Признаки и последствия	Причины появления
<i>Тормозное устройство</i>	
Тормозной шкив не растормаживается при работе конвейера	Заедание в рычажной системе
	Чрезмерная затяжка пружины
	Выход из строя электромагнита
	Недостаточный отход колодок от тормозного шкива
<i>Лента</i>	
Лента «сбегает» в сторону на приводных, отклоняющих и хвостовом барабанах	Нарушена перпендикулярность осей барабанов относительно продольной оси конвейера
	Неправильно выполнена стыковка ленты
Лента «сбегает» на поддерживающих роликах верхней или нижней ветви	Нарушен угол установки роликов
	Часть роликов не вращается
«Пробуксовка» ленты на приводных барабанах	Недостаточное натяжение ленты
	Попадание масла и «штыба» на приводные барабаны
	Заштыбовка верхних и нижних роликов
	Перегрузка конвейера
Разрыв стыка ленты или ее поперечный разрыв	Некачественное соединение ленты
	Чрезмерное натяжение ленты
Износ кромок ленты	Стирание кромок ленты о неподвижные элементы конвейера
Остановка конвейера	Сход ленты в сторону
	Неисправность гидродатчика натяжения ленты
	Вытяжка ленты
<i>Став конвейера</i>	
Заклинивание роликов	Неисправность роликов
	Ослабление натяжения канатов става

Исходя из данных, приведенных в таблице 1.1, неисправности ленточных конвейеров можно разделить на три группы:

1. Неисправности, при которых дальнейшая эксплуатация механизма приведет к развитию необратимых последствий.
2. Неисправности пограничного состояния узлов и агрегатов механизма. Эксплуатация оборудования возможна до плановых ремонтов.
3. Состояние узлов и агрегатов, предшествующее появлению неисправности. Устраняется персоналом в ходе эксплуатации.

Для предотвращения развития аварий с необратимыми последствиями средства диагностики и защиты механизмов ленточных конвейеров должны диагностировать неисправности и аварии, относящиеся ко второй и третьей группе по приведенной классификации.

1.2 Обзор существующих устройств, систем диагностики и защиты механизмов ленточных конвейеров

Существующие системы диагностики и защиты предназначены для выявления и распознавания неисправностей и аварийных режимов, что косвенно повышает надежность узлов и агрегатов ленточных конвейеров. Под надежностью понимается способность машины, механизма, детали или другого объекта выполнять функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение заданного промежутка времени или требуемой наработки [9].

Основной задачей диагностики механизмов ленточных конвейеров является распознавание технического состояния механизма в режиме реального времени, в условиях ограниченной информации с целью фиксации неисправности на раннем этапе формирования. Устройства защиты служат для фиксации крайних проявлений аварийных ситуаций механической части ленточных конвейеров.

1.2.1 Защиты механической части ленточных конвейеров

Согласно [8] ленточные конвейеры должны быть оборудованы следующими устройствами защиты:

- датчиками бокового схода ленты;
- датчиками, отключающими привод при снижении скорости до 75 % от номинальной (датчики скорости; осуществляет защиту механизма от обрыва или проскальзывания ленточного полотна);

- датчиками контроля уровня транспортируемого материала в местах перегрузки (датчик предназначен для избегания заштыбовки устройств перегрузки транспортируемого материала).

Опыт эксплуатации показывает, что все используемые датчики фиксируют конечное проявление аварийного режима работы ленточного конвейера в целом, не позволяя определить место появления неисправности и, тем более, предотвратить его.

1.2.2 Защиты приводных электродвигателей ленточных конвейеров

Релейная защита и автоматика приводных двигателей выполняется в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и Правилами технической эксплуатации и промышленной безопасности (ПТЭ и ПБ) [10-12]. Согласно нормативным документам, для рассматриваемых в работе асинхронных двигателей применяются следующие типовые защиты:

- максимально-токовая защита (от коротких замыканий (КЗ) и перегрузки);
- нулевая защита (от чрезмерного снижения питающего напряжения или его исчезновения);
- защита от неполнофазных режимов работы.

Максимально-токовая защита позволяет отключить двигатель при коротких замыканиях в силовых цепях привода или при сравнительно длительной перегрузке машины. К устройствам защиты от КЗ относятся плавкие предохранители, электромагнитные реле, автоматические выключатели. Защита двигателя от перегрузки (тепловая защита) также обычно реализуется автоматическим выключателем с тепловым расцепителем либо тепловыми реле; при этом рекомендуется ее применение только для тех приводов, где возможны сравнительно длительные промежутки времени работы машины в установившихся режимах с нагрузкой, превышающей номинальную. Также рекомендуется такая настройка тепловой защиты, при которой она срабатывает с выдержкой времени, обратно пропорциональной величине перегрузки.

Нулевая защита, реализуемая с помощью реле минимального напряжения или микропроцессорных устройств, автоматически останавливает двигатель при снижении напряжения на его статоре ниже допустимого или при полном его исчезновении. Как правило, автоматика нулевой защиты также препятствует самопроизвольному запуску двигателя (самозапуску) при восстановлении номинальной величины питающего напряжения, хотя в некоторых случаях может и реализовывать автоматический пуск двигателя до номинального режима.

Защита от неполнофазных режимов (иначе называемая защитой от пропадания или обрыва фазы) действует на отключение двигателя при чрезмерном снижении или пропадании напряжения в одной или двух фазах питающей двигатель сети. Это необходимо по причине того, что при таком перекосе системы питающих двигатель напряжений существенно ухудшаются его энергетические характеристики, а также значительно падает развиваемый двигателем момент, что приводит к остановке двигателя под нагрузкой и его перегреву. Обычно такая защита так же, как и предыдущие, реализуется с помощью реле напряжения или тепловых реле.

На практике, кроме перечисленных выше типовых защит, могут применяться и другие, такие как защита от чрезмерно больших напряжений, защита двигателя по максимальной скорости и т.п.

При этом выбор конкретных типов защит производится индивидуально для каждого конкретного электропривода или типа электропривода с учетом множества как технико-технологических, так и экономических факторов. Выбор того или иного вида защиты или нескольких видов одновременно производится в каждом конкретном случае с учетом степени ответственности привода, его мощности, условий работы и порядка обслуживания (наличия или отсутствия постоянного обслуживающего персонала). Как правило, для правильного выбора защит необходим анализ наиболее распространенных для данного привода или механизма неисправностей или нештатных режимов работы.

Кроме описанных выше способов защит, получивших широкое распространение, ведутся разработки альтернативных методов защиты. Так,

например, в [13] представлена процедура мониторинга состояния электрических машин с помощью сигнатурного анализа тока двигателя. В [14] разработан метод моделирования асинхронных двигателей с многофазным сепаратором при межвитковых коротких замыканиях (КЗ) в обмотке статора машины и разработан аналитический метод, который указывает на различия в спектральном составе в сигналах тока исправных и неисправных машин. В [15] предлагается новый метод обнаружения неисправностей двигателя, основанный на анализе спектрограммы сигналов тока и напряжения с помощью быстрого преобразования Фурье и дополнительной комбинации методов вейвлета и спектральной плотности мощности (PSD). Предложенные алгоритмы были применены для обнаружения сломанных стержней ротора, а также межвитковых КЗ.

В [16] описано промышленное применение сигнатурного анализа тока двигателя (MCSA) для диагностики неисправностей в трехфазных асинхронных двигателях. При этом указанный способ является составной частью стратегий технического обслуживания на основе надежности (RBM) и технического обслуживания на основе состояния (CBM), которые в настоящее время широко используются в промышленности.

Анализ функциональных возможностей устройств и способов защит электропривода конвейеров показывает, что зоной их контроля является собственно электродвигатель. На механическую часть ленточного конвейера действие защиты электродвигателя не распространяется. Достоинством существующих и описанных выше перспективных защит электрических двигателей является использование сигналов токов обмоток электродвигателей, замер которых может быть выполнен с практически необходимой точностью, а полученная информация передается в устройство защиты с необходимым быстродействием. Исходя из этого, можно прийти к выводу о том, что следует использовать информацию о величинах токов электродвигателя для контроля состояния и механической части ленточных конвейеров.

1.2.3 Оценка возможностей существующих методов диагностики и устройств защиты механизмов ленточных конвейеров

Для диагностики состояния ленточных конвейеров используется несколько основных методов.

1. Вибрационный метод.

Этот метод диагностики технических элементов и оборудования основан на анализе параметров колебательного процесса, создаваемого узлами работающего оборудования. При этом фиксируются потери энергии в виде механических колебаний [17, 18]. Метод решает задачи выявления момента появления неисправностей и оценки технического состояния, в основном узлов, машин и механизмов [19]. Наибольшее развитие метод получил при диагностировании узлов подшипников качения, узлов зубчатых зацеплений, соосности и балансировки вращающихся частей механизмов.

2. Метод анализа состава технологических жидкостей

В тех случаях, когда узел машины или агрегата машины имеют систему проточной жидкой смазки, используется метод химического анализа состава смазки [20].

Результаты анализа используются для прогнозирования состояния машин и механизмов путем:

- построения кривых характера износа деталей;
- определения пороговых значений для «нормального» механизма на основе аппарата математической статистики;
- выявления характера поломок и прогнозирования их проявления;
- определение скорости загрязнения масляной системы.

Блок-схема процесса данного способа диагностики приведена на рисунке



Рисунок 1.2 – Блок-схема процесса химико-аналитической диагностики

При реализации данного способа диагностики могут применяться более 50 различных методов, такие как инфракрасная спектроскопия, оптическая флуоресцентная спектроскопия, фотометрия и другие.

При этом диагностика состояния механизмов и машины в соответствии с данным способом обычно проводится путем исследования состава машинных масел, смазок и других технологических жидкостей [8]. Анализ состава масла позволяет определить следующее:

- концентрацию поверхностно-активных веществ;
- содержание воды, солей, кислот, степень расщепления масла;
- количество микроскопических частиц в пробах;
- размер и формы микрочастиц в пробах;
- содержание в масле частиц алюминия, меди, железа и других металлов.

Указанные выше параметры позволяют диагностировать следующие технологические факторы:

- техническое состояние элементов технологического механизма, использующих подвергающуюся анализу смазку;
- состояние трущихся деталей;
- качество фильтрации масла.

Результаты анализа используются для прогнозирования состояния машин и механизмов путем:

- построения кривых характера износа деталей;
- определения пороговых значений для «нормального» механизма на основе аппарата математической статистики;
- выявления характера поломок и прогнозирования их проявления;
- определение скорости загрязнения масляной системы.

3. Тензометрический метод диагностики

При использовании этого метода диагностика узлов и конструктивных элементов машин и механизмов осуществляется путем замера усилий в элементах конструкции с использованием закрепляемых на данном элементе датчиков усилий. Последние позволяют фиксировать деформационные процессы в конструкциях и оценивать тем самым степень их работоспособности [21- 23]. Функциональная схема тензометрического метода представлена на рисунке 1.3.

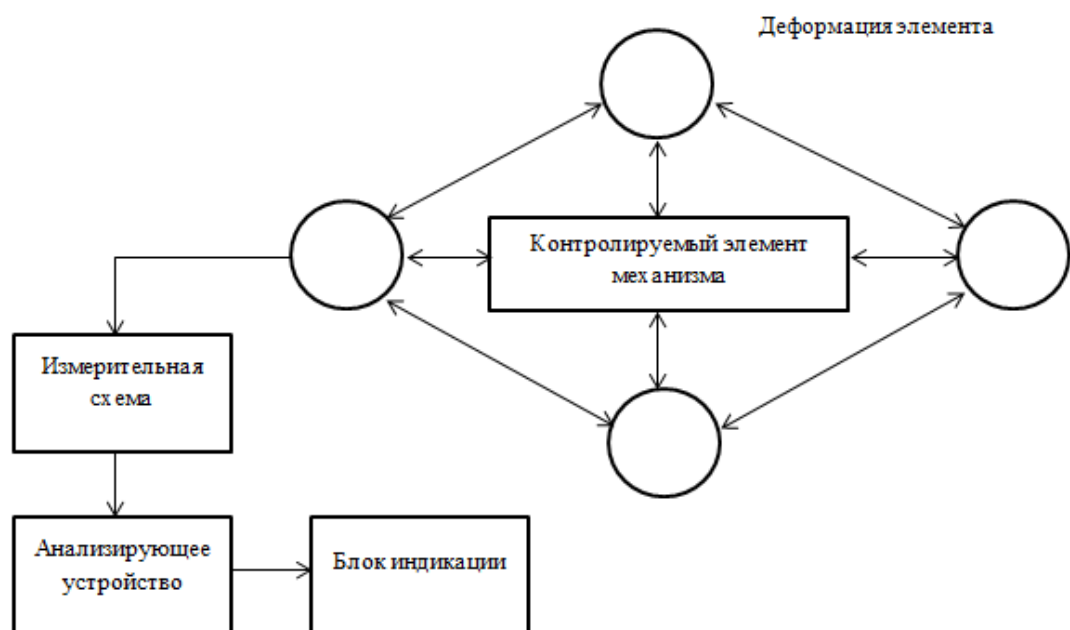


Рисунок 1.3 – Функциональная схема тензометрического метода

4. Акустический метод диагностики

Метод позволяет проводить диагностику неподвижных элементов механизма с помощью фиксации акустических сигналов деформируемого материала [24]. Особенность этого метода заключается в способности выявлять в конструкциях машины появление микротрещин и возможность наблюдать за происходящим в конструкции процессом роста повреждаемости материала.

5. Электрорезистивный метод диагностики

Метод основан на определении характеристик объекта путем изменений активного электрического сопротивления или проводимости объекта или его элементов [18]. Определение необходимых характеристик объекта осуществляется с помощью соответствующих алгоритмов обработки информации (рисунок 1.4). Функциональная схема самого метода представлена на рисунке 1.5.



Рисунок 1.4 – Алгоритмы сканирования при поиске дефектов с использованием электрорезистивного метода

При использовании данного метода анализируются геометрия рабочих поверхностей, толщина и фактическое состояние разделяющей поверхности смазочной пленки и некоторые другие параметры.

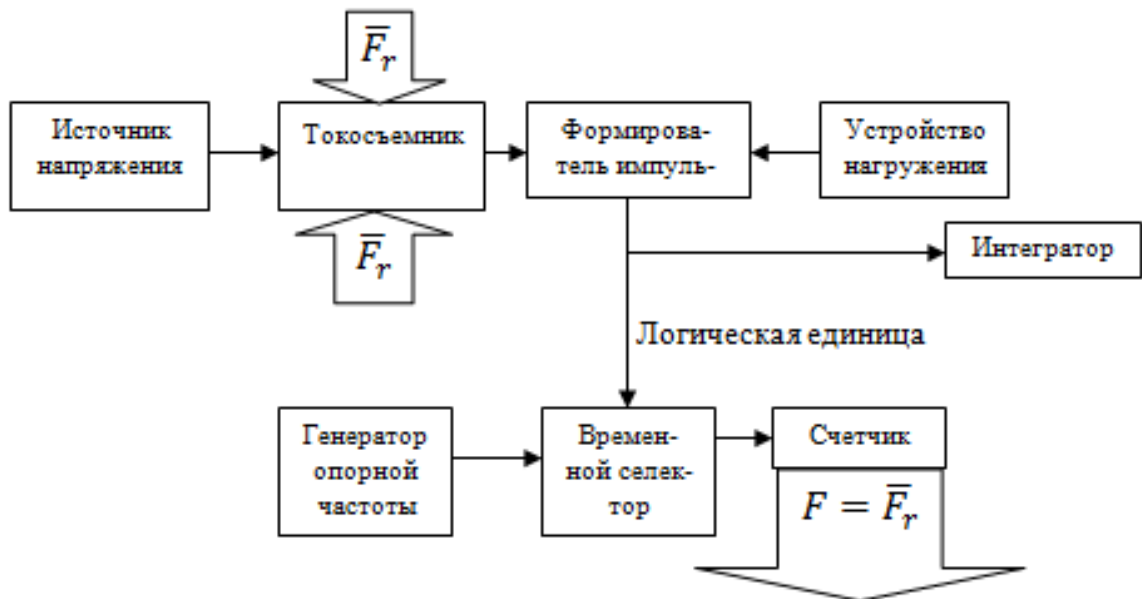


Рисунок 1.5 – Функциональная схема электрорезистивного метода

6. Метод температурной диагностики

Такая диагностика основана на анализе взаимодействия внешнего температурного поля с объектом контроля (активный метод) или на анализе температурного поля самого объекта (пассивный метод) [18]. Блок-схема метода представлена на рисунке 1.6.

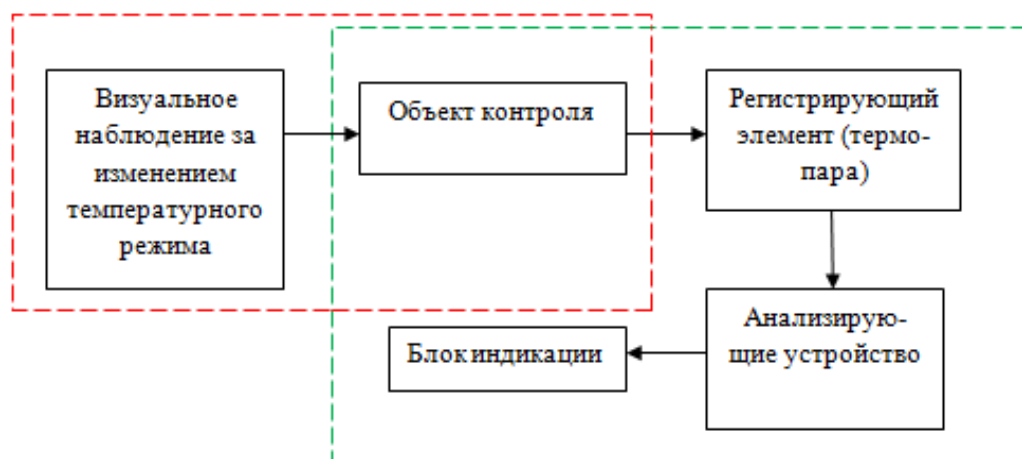


Рисунок 1.6 – Блок-схема метода температурной диагностики

Возможности использования перечисленных методов применительно к диагностированию состояния механизма ленточного конвейера, их достоинства и недостатки показаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Достоинства и недостатки методов диагностирования

Наименование метода	Применение метода диагностирования к механизму ленточного конвейера	Характеристики метода	
		Достоинства	Недостатки
Вибрационный	Контроль состояния опорных узлов редуктора, электродвигателя	Высокая информативность контролируемого сигнала	Возможность диагностирования работы только некоторых узлов.
Анализ технических жидкостей	Контроль состояния редуктора	Позволяет оперативно получить картину о состоянии целиком агрегата охватить диагностирование не только узлы, но и агрегаты механизма (редуктор, шестерни клетки и т.д.), оценить износ контролируемого агрегата.	Для конкретизации места локализации необходим демонтаж агрегата, значительное время для получения результатов анализа.
Тензометрический	Контроль состояния опорных подшипников и других несущих узлов	Точность определения места появления начальной стадии дефекта.	Возможность диагностирования состояния только узлов, а так же невозможность получения информации о состоянии узлов и агрегатов исследуемого объекта, низкая информативность контролируемых элементов, не позволяющая адекватно оценить степень дефекта.
Акустический	Контроль износа шестерней редуктора, наличие дефектов передающих валов, роlikоопор.	Способность выявлять в конструкциях машины появление микротрещин; возможность наблюдения за происходящим в конструкции процессом роста повреждаемости материала.	Диагностирование работы только узлов.

Продолжение таблицы 1.2

Наименование метода	Применение метода диагностирования к механизму ленточного конвейера	Характеристики метода	
		Достоинства	Недостатки
Электрорезистивный	Контроль опорных узлов редуктора, роlikоопор, электродвигателя.	Контролируемый сигнал снимается непосредственно с трущихся деталей	Диагностирование работы только узлов и невозможность получения информации о повреждении без демонтажа узла

Все представленные в таблице 1.2 методы диагностирования используются в практике на действующих предприятиях. Кроме них, в настоящее время ведутся исследовательские работы по разработке методов, устройств диагностики и защиты механической части различного технологического оборудования. Эти работы ведутся в нескольких основных направлениях: диагностика отдельных узлов и агрегатов электромеханического оборудования по отдельным контролируемым сигналам; конструкционное совершенствование отдельных элементов электромеханического объекта; разработка математических моделей отдельных элементов электрических и механических систем электромеханического оборудования.

Так, например, в [25] показана возможность использования теории Шенли, амплитудно-частотной характеристики и уровня вибрации для исследования усталостного разрушения вала привода механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок и определения текущей длины трещины. В [27] показана возможность оценки фактического состояния и остаточного ресурса бурошнековых машин по параметрам вибрации. Для этого необходимо проведение ряда измерений: диагностических и контрольных. Диагностические измерения служат для выявления дефекта и оценки развития дефекта, контрольные измерения служат для определения и прогнозирования технического состояния. В них входит ряд мероприятий: осмотр оборудования, ознакомление с проектной документацией, замер вибрации на механизме и др. Также в [27] представлены методы диагностики горных машин и показана возможность

использования преобразования Фурье и вейвлет-анализа сигнала тока статора для обнаружения неисправности электродвигателя.

Системы, позволяющие осуществлять комплексную оценку механических и электрических частей привода, описаны в [26, 28]. Показана не только возможность оперативного устранения аварийных ситуаций из-за попадания в зону дробления недробимого материала, но и оценки остаточного ресурса без остановки и вывода из эксплуатации электромеханического оборудования.

Основным недостатком этого направления исследований является сложность применения предложенных решений в реальных условиях производства. Кроме того, для реализации необходимо привлечение сторонних специалистов с технически сложным оборудованием и остановка обследуемого механизма, что приводит к дополнительным расходам.

В [29-32] описаны системы, позволяющие осуществлять комплексную оценку состояния механических и электрических частей и показана не только возможность оперативного устранения аварийных ситуаций, но и оценки остаточного ресурса без остановки и вывода в ремонт электромеханического оборудования.

В [33] рассмотрены особенности моделирования процесса возникновения биения в силовых цепях электромеханических систем и изучено влияние зазоров на динамику переходных процессов в упругих связях.

В [34] рассмотрена проблема улучшения показателей качества протекания динамического процесса (пуска) скребковых конвейеров путем моделирования электромеханической системы скребкового конвейера на основе представления тягового органа совокупностью элементарных динамических звеньев.

В [35-37], рассмотрены различные модели электромеханических объектов, которые позволяют проводить модельные исследования аварийных режимов без необходимости использования действующего оборудования.

Анализ рассмотренных методов позволяет сформулировать следующие их основные недостатки: получение информации о состоянии контролируемого узла возможно только после демонтажа и разборки агрегата; обработка полученных

данных регистрируемых приборов возможна только специально обученным персоналом; значительная стоимость диагностического оборудования; недостаточная точность и чувствительность датчиков и систем обработки сигналов; невозможность локализации места появления дефекта; диагностика отдельных узлов при отсутствии контроля состояния механизма в целом [120].

Дополнительно к обзору устройств и средств диагностирования был выполнен патентный поиск существующих реализаций защит ленточных конвейеров.

В [38] описан датчик контроля обрыва конвейерной ленты. Датчик состоит из двуплечего рычага, свободно вращающегося на оси, закрепленной в кронштейнах, установленных на роликовой опоре. В верхней части крепится элемент контакта с конвейерной лентой, а на нижней противовес.

В [39] рассмотрено устройство для остановки ленты конвейера в случае ее обрыва. Устройство включает в себя рабочий орган «останова», шарнирно закрепленный на ставе конвейера и размещенный под углом к ленте. Рабочий орган размещен с зазором относительно ленты при рабочем ее движении.

В [40] представлено устройство для улавливания ленты конвейера в случае ее обрыва. Устройство содержит шарнирно установленные на стойках поворотные опоры и расположенные на них «башмаки», предназначенные для удержания ленты конвейера при ее обрыве.

В конструкциях устройств защит ленточного конвейера описанных в [38-40, 44] присутствуют механические узлы, подверженные интенсивным нагрузкам и механическому износу, что снижает эксплуатационный срок устройства. По этой причине для поддержания требуемого качества функционирования данные устройства требуют постоянного обслуживания. При этом к их достоинствам можно отнести низкую себестоимость.

В [41] описано устройство контроля нагрева барабана ленточного конвейера. Отключающий механизм выполнен в виде трубопроводов, один из которых соединен с пневмоэлектрическим преобразователем, а другой – с источником сжатого воздуха и перекрыт в нормальном положении отогнутым

концом биметаллической пластины. В состав [41] входит элемент, обслуживание которого требует определенной компетенции от персонала, и который имеет низкую надежность при использовании вне производственных помещений.

В [42] описано устройство автоматического контроля состояния тросовой основы ленты и стыкового соединения. При появлении в тросовой основе ленты или стыковом соединении повреждений, превышающих предельно допустимые значения, во внешние цепи сигнализации и управления приводом конвейера выдается аварийный сигнал.

В [43] рассмотрено устройство контроля схода ленты конвейера, содержащее размещенные вдоль ленты датчики, контактирующие с кромками ленты при ее сходе и отправляющие аварийный сигнал в блок управления.

В устройствах [42, 43] используются чувствительные элементы, которые имеют прямой контакт с движущимися частями ленточного конвейера, что снижает срок их эксплуатации и повышает вероятность ложных срабатываний.

В [44] описано устройство для контроля пробуксовки ленты конвейера. Устройство содержит блок с возможностью свободного вращения на подпружиненном Г-образном штоке, смонтированном подвижно в направляющих с возможностью взаимодействия с датчиком, и термочувствительный элемент в виде замкнутого гибкого элемента, охватывающего приводной барабан конвейера. Гибкий элемент выполнен из материала, обладающего свойством уменьшать при нагреве свою длину.

В [45] представлено устройство для улавливания ленты конвейера. Устройство состоит из жестко закрепленных рычагов, на нижних концах которых установлены эллипсовидные ролики со стороны выгрузки. Устройство [45] имеет несложную конструкцию на простой элементной базой. Работа устройства направлена на минимизацию последствий порыва ленточного полотна и сокращение времени на восстановительные работы.

Таким образом, проведенный анализ текущего состояния вопросов защиты и диагностики механизмов ленточного конвейера показал, что в настоящий момент существует значительно количество средств и методов защиты и

диагностирования аварийных или близких к ним режимов работы конвейера. Для указанных решений можно выделить следующие недостатки: фиксирование уже случившихся аварийных ситуаций, снижение надежности из-за участия механических элементов, отсутствие унифицированного устройства для применения на различных механизмах, значительное время получения результатов диагностирования, при существующей технической сложности диагностических комплексов отсутствует возможность единоличного обслуживания, также требуется длительное обучение персонала правилам работы с диагностическими комплексами.

В настоящее время главными критериями предъявляемым к системам и средствам защиты являются: универсальность и возможность применения с различным оборудованием, простота обслуживания, способность системы обрабатывать получаемую информацию в режиме реального времени и стоимость применительно к единице оборудования. Очевидно, что для выполнения всех предъявляемых требований необходимо применение диагностических комплексов для надлежащего контроля состояния механизма.

Следовательно, для выполнения поставленных технических требований необходимо соблюдения ряда критериев: возможность адаптации оборудования к любому механическому агрегату, обработка данных в режиме реального времени, возможность стыковки со штатными устройствами защиты и управления.

1.3 Данные о неисправностях и аварийных ситуациях механизмов ленточных конвейеров. Анализ эффективности используемых средств защиты на действующих предприятиях

Для оценки эффективности функционирования существующих средств защит и методов диагностики механизмов ленточных конвейеров была изучена информация об аварийных ситуациях на следующих предприятиях горно-металлургической промышленности [121].

Общий объем выборки составил 124 механизма:

- ОАО «Евраз ЗСМК» (коксохимическое производство) – 9 ленточных конвейеров;
- ОАО «Евраз ЗСМК» (агломерационное производство) – 31 ленточный конвейер;
- Западно-Сибирская ТЭЦ в составе ОАО «Евраз ЗСМК» – 12 ленточных конвейеров;
- Обогажительная фабрика «Черниговская-Коксовая» ЗАО «Черниговец» – 48 ленточных конвейеров;
- Обогажительная фабрика «Энергетическая» в филиале Калтанский угольный разрез – 24 ленточных конвейера.

В таблице 1.3 представлены данные о времени безаварийной работы и времени простоя механизмов ленточных конвейеров по причине аварийных ситуаций [121].

Таблица 1.3 – Оценка времени безаварийной работы и времени простоя по причине аварийных ситуаций за период с февраля 2017 г. по сентябрь 2018 г.

Предприятие	Суммарное время простоя по причине аварийных ситуаций за год, ч.	Экономические потери при средней стоимости готового продукта в ценах 17-18г., млн. руб.	Время без аварийной работы оборудования за год, ч	Время, затраченное на проведение планово-предупредительных ремонтов за год, ч.
Коксохимическое производство ОАО «Евраз ЗСМК»	122	-	7078	277
Обогажительная фабрика «Черниговская-Коксовая» ЗАО «Черниговец»	264	2,711	6936	644

Продолжение таблицы 1.3

Предприятие	Суммарное время простоя по причине аварийных ситуаций за год, ч.	Экономические потери при средней стоимости готового продукта в ценах 17-18г., млн. руб.	Время без аварийной работы оборудования за год, ч	Время, затраченное на проведение планово-предупредительных ремонтов за год, ч.
Обогатительная фабрика «Энергетическая» в филиале «Калтанский угольный разрез» ОАО «Угольная компания» «Кузбассразрезуголь»	290	1,983	6910	558
ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» Аглофабрика.	303	-	6897	631
Западно-Сибирская ТЭЦ в составе ОАО Евраз ЗСМК	200	-	7000	454

Анализ полученных данных показывает, что на обследованных предприятиях время технологических простоев, связанных с аварийными ситуациями механизмов ленточных конвейеров, достигает 44% от времени, запланированного на выполнение планово-предупредительных ремонтов. В таблице 1.4 представлены данные о суммарном времени простоя механизмов ленточных конвейеров в связи с внеплановым устранением неисправностей. Была выполнена оценка эффективности работы типовых устройств защит на действующем оборудовании. Информация приведена в таблице 1.5.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рисунках 1.7, 1.8.

Таблица 1.4 – Статистические данные простоя механизмов ленточных конвейеров в результате аварийных ситуаций на действующих предприятиях за период с февраля 2017 по сентябрь 2018 [121]

Аварийные ситуации происходившие за отчетный период	Обрыв (расхождение) ленточного полотна		Заклинивание редуктора (опорных подшипников, звездочек передач)		Обрыв грузов или тросов натяжительной станции		Заклинивание подшипников в отклоняющих барабанах		Заклинивание роликов холостой и грузонесущей ветви		Поломка чистителей ленты и барабанов		Срезание пальцев соединительной муфты		Расцентровка соединительной муфты		Защиты конвейера холостой или грузовой ветви		Другие виды аварийных ситуаций		Общее количество ленточных конвейеров
	час	количество	час	количество	час	количество	час	количество	час	количество	час	количество	час	количество	час	количество	час	количество	час	количество	
Предприятия, на которых происходил мониторинг аварийных режимов ленточных конвейеров																					
Коксохимическое производство ОАО «Евраз ЗСМК»	9	1	14	1	4	2	16	63	38	151	6	2	-	-	-	-	23	23	12	12	9
Обогатительная фабрика «Энергетическая» в филиале «Калтанский угольный разрез»	9	1	28	2	4	2	46	183	54	216	24	8	6	2	-	-	59	59	60	60	24
Обогатительная фабрика «Черниговская-Коксовая» ЗАО «Черниговец»	18	2	14	1	2	1	49	193	55	220	18	6	9	3	-	-	48	48	51	51	48
«ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» Агломерационная фабрика	27	3	14	1	8	4	43	169	59	235	12	4	1 2	4	3	1	62	62	63	63	31
Западно-Сибирская ТЭЦ Евраз ЗСМК	9	1	14	1	6	3	28	112	49	194	6	2	-	-	-	-	52	52	36	36	12
Итого по предприятиям	72	8	84	6	24	12	182	720	255	1016	66	22	27	9	3	1	244	244	222	222	124

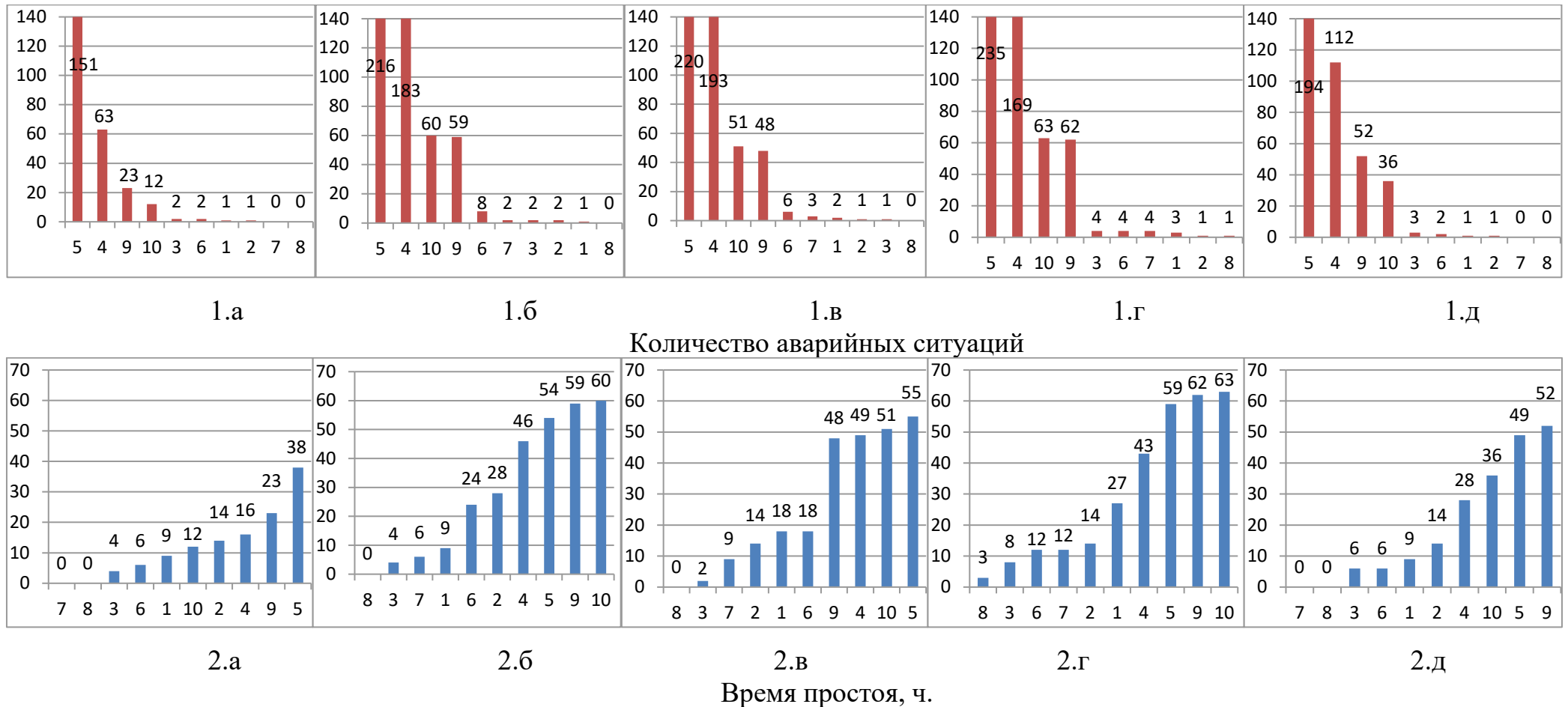
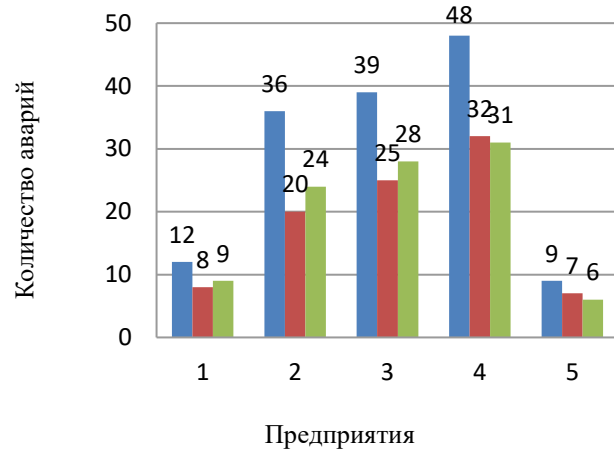


Рисунок 1.7 – Статистические данные простоя механизмов ленточных конвейеров в результате аварийных ситуаций на действующих предприятиях за период с февраля 2017 по сентябрь 2018

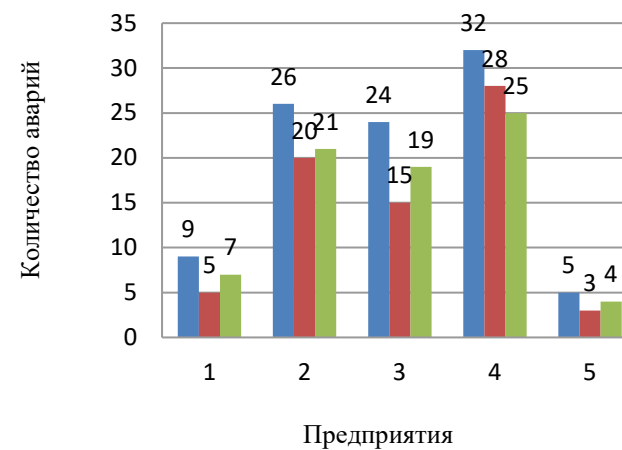
1.а (Количество аварийных ситуаций), 2.а (Время простоя, ч.) – Коксохимическое производство ОАО «Евраз ЗСМК»; 1.б, 2.б – Обогащительная фабрика «Энергетическая» в филиале «Калтанский угольный разрез» ОАО «Угольная компания» «Кузбассразрезуголь»; 1.в, 2.в – Обогащительная фабрика «Черниговская-Коксовая» ЗАО «Черниговец»; 1.г, 2.г – «ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» Агломерационная фабрика; 1.д, 2.д – Западно-Сибирская ТЭЦ Евраз ЗСМК. 1. Обрыв (расхождение) ленточного полотна, 2. Заклинивание редуктора (опорных подшипников, звездочек передач), 3. Обрыв грузов или тросов натяжительной станции, 4. Заклинивание подшипников в отклоняющих барабанах, 5. Заклинивание роликов холостой и грузонесущей ветви, 6. Поломка чистителей ленты и барабанов, 7. Срезание пальцев соединительной муфты, 8. Расцентровка соединительной муфты, 9. Заштыбовка конвейера холостой или грузовой ветви, 10. Другие виды аварийных ситуаций [121]

Таблица 1.5 – Статистические данные срабатывания устройств защит ленточных конвейеров на действующих предприятиях за период с февраля 2017 по сентябрь 2018 [121]

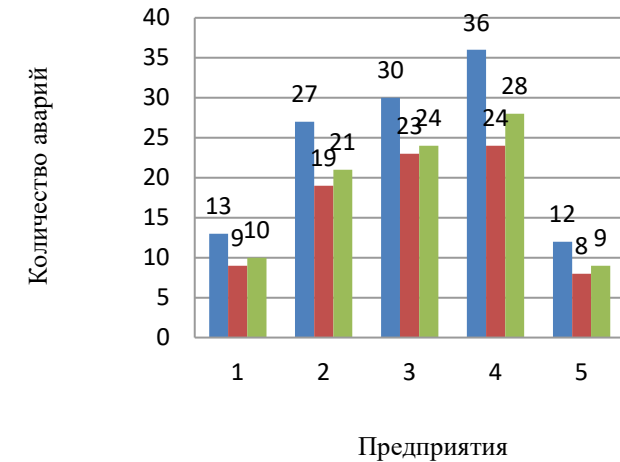
<i>Средства защиты</i>	<i>Устройства контроля схода ленты (КСЛ)</i>			<i>Выключатель кабель - тросовый (КТВ)</i>			<i>Электрические устройства защиты приводного электродвигателя</i>			<i>Датчики защиты бочки</i>			<i>Датчик крайнего положения натяжительной станции</i>			<i>Датчик скорости</i>		
	Наличие аварийного режима	Распознанные аварийные режимы	Ложное срабатывание	Наличие аварийного режима	Распознанные аварийные режимы	Ложное срабатывание	Наличие аварийного режима	Распознанные аварийные режимы	Ложное срабатывание	Наличие аварийного режима	Распознанные аварийные режимы	Ложное срабатывание	Наличие аварийного режима	Распознанные аварийные режимы	Ложное срабатывание	Наличие аварийного режима	Распознанные аварийные режимы	Ложное срабатывание
Предприятия, на которых происходил мониторинг аварийных режимов ленточных конвейеров																		
Коксохимическое производство ОАО «Евраз ЗСМК»	12	8	9	9	5	7	13	9	10	16	11	12	5	3	4	15	9	13
Обогатительная фабрика «Энергетическая» в филиале «Калтанский угольный разрез» ОАО «Угольная компания» «Кузбассразрезуголь»	36	20	24	26	20	21	27	19	21	24	19	21	11	7	9	23	19	21
Обогатительная фабрика «Черниговская- Коксовая» ЗАО «Черниговец»	39	25	28	24	15	19	30	23	24	31	23	24	13	8	9	29	19	20
«ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» Агломерационная фабрика.	48	32	31	32	28	25	36	24	28	23	16	19	19	10	11	37	21	25
Западно-Сибирская ТЭЦ Евраз ЗСМК	9	7	6	5	3	4	12	8	9	6	4	5	12	10	9	9	5	8



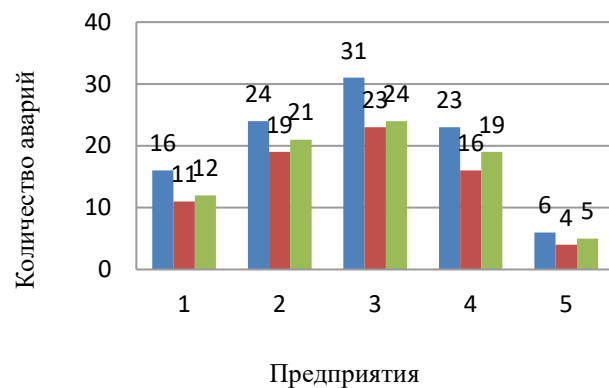
Статистические данные срабатывания устройства контроля схода ленты (КСЛ)



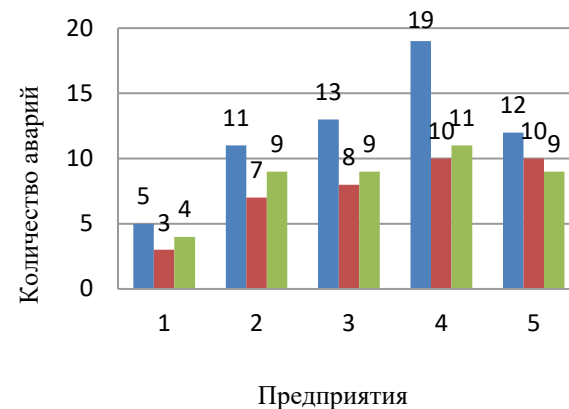
Статистические данные срабатывания выключателя кабель-тросового (КТВ)



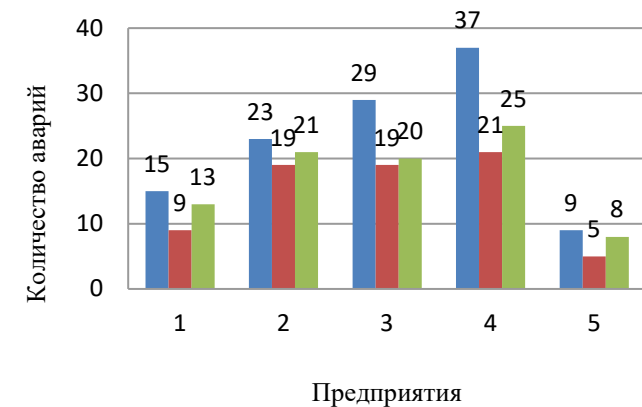
Статистические данные срабатывания электрических устройств защиты приводного электродвигателя



Статистические данные срабатывания датчиков защиты



Статистические данные срабатывания датчиков крайнего положения натяжительной станции



Статистические данные срабатывания датчиков скорости

Рисунок 1.8 – Данные о срабатывании устройств защит ленточных конвейеров.

Коксохимическое производство ОАО «Евраз ЗСМК»; 2 - Обогащительная фабрика «Энергетическая» в филиале «Калтанский угольный разрез» ОАО «Угольная компания» «Кузбассразрезуголь»; 3- Обогащительная фабрика «Черниговская- Коксовая» ЗАО «Черниговец»; 4- «ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» Агломерационная фабрика; 5 - Западно-Сибирская ТЭЦ Евраз ЗСМК. Каждый из столбцов легенды имеет соответствующий цвет: синий – наличие аварийных режимов работы; красный – аварийный режим работы распознанный штатными устройствами защиты; зеленый ложное срабатывание штатных устройств защит [121]

Анализ сведений о возникновении неисправностей и аварийных ситуаций механизмов ленточных конвейеров на предприятиях горной, металлургической промышленности Кузбасса показывает следующее:

- среднее количество неисправностей на единицу оборудования в рассматриваемый период в горной промышленности составляет 4,4;
- среднее количество неисправностей на единицу оборудования в рассматриваемый период в металлургической промышленности составляет 6,1;
- в работе штатных устройств защиты присутствуют ложные срабатывания, увеличивающие время технологического простоя;
- в горной промышленности количество нераспознанных аварийных ситуаций составляет 69 %;
- в металлургической промышленности количество нераспознанных аварийных ситуаций составляет 67%.

1.4 Обоснование возможности функциональной диагностики, неисправностей и аварийных ситуаций механизмов ленточных конвейеров с использованием контроля величин приводного электродвигателя

При обосновании способа диагностики следует определить систему диагностирования, структуру объекта и диагностические признаки [18].

В условиях эксплуатации важным является понятие работоспособного технического состояния объекта. Объект работоспособен, если он может выполнять все заданные функции с сохранением значений заданных параметров в требуемых пределах [20].

Различают системы диагностирования двух основных типов: тестового и функционального. В системах тестового диагностирования регистрируются отклики контролируемой системы на внешнее воздействие (ультразвуковое, лазерное, электромагнитное и другие). Функциональное диагностирование базируется на пассивных методах, регистрирующих сигналы, которые возникают в самом объекте под влиянием внешних факторов (акустическая и

электромагнитная эмиссия, вибрация, электрические и электромагнитные шумы, тепловые поля) [118].

Рассмотрение механизма как сложной многоуровневой, взаимосвязанной и взаимообусловленной системы проведено в работе [46]. Исследуемый технологический механизм описывается как электромеханическая система, рассмотрен процесс преобразования электрической энергии, получаемой приводным электродвигателем, в механическую работу, выполняемую механизмом.

Выявлено, что при более детальном рассмотрении энергетических процессов, происходящих в исследуемом механизме, появляется возможность использования электрических величин электродвигателя в качестве источника информации о состоянии механической части оборудования и, таким образом, появляется возможность создания соответствующих диагностических методов и комплексов.

Для выбора подходящей методики контроля произведена декомпозиция технологического агрегата (ленточного конвейера) как сложной технической системы. Принципы декомпозиции разработаны в теории формирования сложных технических систем [47, 48].

Сложная система определяется как многоэлементный взаимосвязанный технический объект (ленточный конвейер), состоящий из различных, в том числе противоположных по свойствам, элементов, то или иное количественное сочетание которых обеспечивает системе уникальные, не присущие ни одному из элементов свойства. Это определение позволяет представить ленточный конвейер как сложную техническую систему, состоящую из трех групп элементов: группу элементов $\{a_{ij}\}$, обладающих качеством (электрические параметры и величины) A (асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором); группу элементов $\{\bar{a}_{ij}\}$, имеющих противоположное качество (механические характеристики системы) $\bar{A}$ (механическая часть оборудования, редуктор и исполнительная часть агрегата); группу элементов $\{a \ \bar{a}_{ij}\}$ с качеством (объединяющий параметр электромеханический момент системы) $A \ \bar{A}$, исключая аннигиляцию

элементов первых двух групп, то есть обладающих качеством, индифферентным к качеству элементов первых двух групп [46].

Графически состав системы ленточного конвейера представлен на рисунке 1.9 [46].

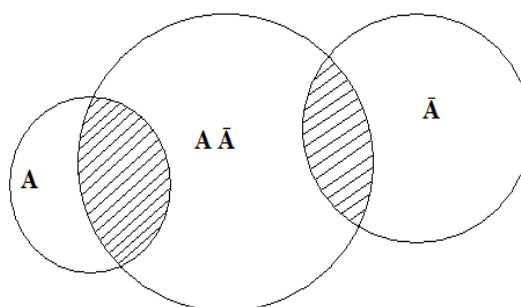


Рисунок 1.9 – Модель компоновки одного уровня системы ленточного конвейера

Такая модель системы ленточного конвейера дает возможность разделить ее на три подсистемы элементов с качествами $(A, \bar{A}, A \bar{A})$ более низкого по сложности уровня. Если при делении получаются сложные системы, их снова можно разделить на три составляющие, следующего более низкого по сложности уровня, и т.д. Таким образом, может быть реализована декомпозиция любой сложной системы [46].

В данной работе технологический агрегат ленточного конвейера по уровням сложности разделен на составляющие, показанные на рисунке 1.10.

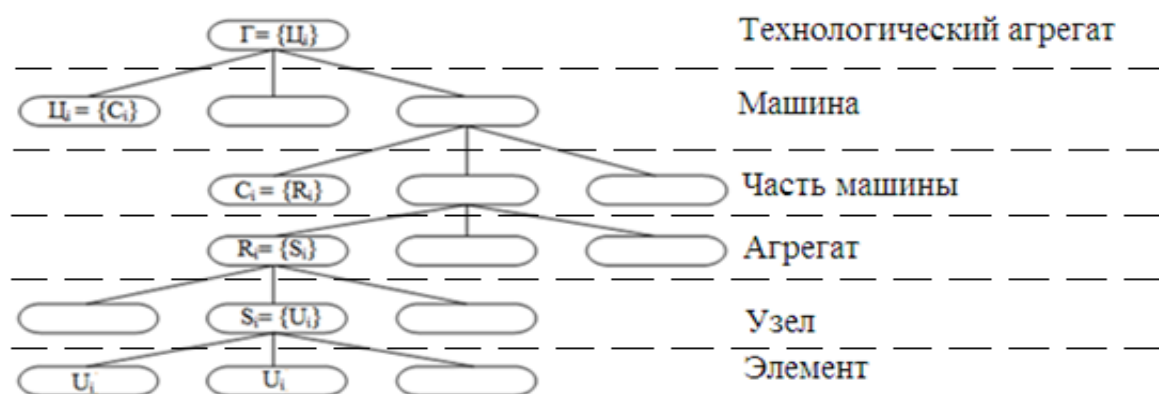


Рисунок 1.10–Структурная схема технологического объекта.

На рисунке 1.10 использованы следующие обозначения: Γ – объект в целом (ценоз), состоит из трех групп элементов (цепочка транспортировки) Π_i ; Π_i – конкретный ценоз в виде машины технологического агрегата (механизм ленточного конвейера); C_i , $C_i = \{R_{ij}\}$ – семейство агрегатов машины (конвейерный став, редуктор, асинхронный электродвигатель); R_i – агрегат машины (редукторные шестерни, набор роликовых опор с роликами). $R_i = \{S_{ij}\}$ – род узлов агрегата машины; S_i – вид элементов узлов агрегата машины; $S_i = \{U_{ij}\}$, U_i – элемент узла агрегата машины (валы, подшипники и т.д.) [46]

При работе ленточного конвейера часть энергии, передаваемой от электродвигателя к рабочему органу, расходуется на различные виды потерь: трение, излучение в виде вибрации, тепла, звукового и других видов излучения [46, 118].

Для осуществления функционального диагностирования механизма ленточного конвейера существующими на сегодняшний день методами необходимо обеспечить контроль всех или большинства составных частей системы. Если объем рассеянной энергии в силу постепенного выхода из строя какого-либо элемента машины увеличивается или уменьшается, это приводит к изменению потока энергии от электродвигателя. Данный факт может быть использован для оценки работоспособности элементов механизма [46].

С энергетической точки зрения работа электродвигателя сопровождается непрерывным процессом преобразования электрической энергии в механическую, которая затрачивается на совершение полезной работы и преодоление потерь в механических передачах [46, 49]. Известно, что механическую мощность, преобразованную машиной из электрической, согласно закону сохранения энергии, можно выразить через мгновенную электрическую мощность p_k [46, 50, 51]:

Электромагнитный момент M может быть выражен через мгновенную механическую мощность $p_{\text{мех}}$ как:

$$M = \frac{p_{\text{мех}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s i_k \sum_{n=1}^s i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}, \quad (1.1)$$

где i_k и i_n – токи k -го, n -го контуров; L_{kn} – взаимная индуктивность k -ой обмотки, где n принимает любые значения; от $n=1$ до $n=s$, кроме $n=k$; Ω – заданная угловая скорость ротора; $i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}$ – ЭДС вращения, связанная с изменением взаимной индуктивности в n -м контуре (при $n \neq k$) или с изменением индуктивности k -го контура (при $n=k$) [46].

Согласно (1.1), любое изменение величины момента, передаваемого от электродвигателя к рабочему органу, сопровождается изменением электрических величин электродвигателя. Таким образом, мониторинг и анализ в режиме реального времени темпов нарастания, времени изменения (увеличения, снижения), профиля изменения, периодичность появления изменений электрических величин электродвигателя позволяет получать информацию о техническом состоянии механизма в текущий момент времени.

В качестве объекта рассмотрим ленточный конвейер, имеющий в своей механической структуре значительное количество отдельных узлов, объединенных упругими связями [52]. В качестве приводного двигателя используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором [118]. В такой электромеханической системе при преобразовании энергии присутствуют различного рода потери, показанные на рисунке 1.11.

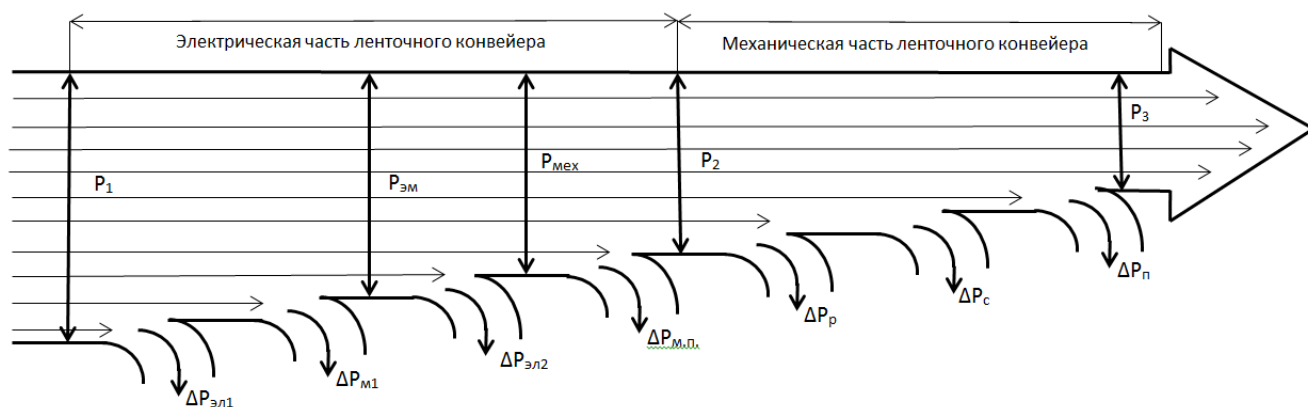


Рисунок 1.11– Диаграмма электрического баланса системы асинхронный двигатель – механическая часть машины – исполнительный механизм

На рисунке 1.11 приняты следующие обозначения: P_1 – мощность потребляемая из сети; $\Delta P_{эл1}$ – потери мощности на нагрев обмотки статора; $\Delta P_{м1}$ – потери в стали статора; $\Delta P_{эл2}$ – потери мощности на нагрев обмотки ротора; $P_{м.п.}$ – механические потери мощности в электродвигателе; P_2 – мощность на валу электродвигателя; ΔP_p – потери мощности в редукторе; ΔP_c – потери мощности в ставе ленточного конвейера; ΔP_{π} – потери мощности на преодоление сил сопротивления при транспортировке груза; P_3 – энергия, которая реализуется машиной в полезную технологическую работу..

Процесс преобразования электрической энергии в механическую в асинхронном двигателе может быть описан уравнением баланса активной мощности [24]:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{м1} + \Delta P_{мех} + \Delta P_d. \quad (1.2)$$

При использовании метода двухфазной обобщенной электрической машины и системы неподвижных координат $\alpha\beta$ уравнения, описывающие электромеханическое преобразование энергии в машине примут вид [50, 51, 53-55]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{S\alpha} = r i_{S\alpha} + L_s \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{1}{L_R} L_m^2 \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R \omega_m \psi_{R\beta}, \\ u_{S\beta} = r i_{S\alpha} + L_s \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{1}{L_R} L_m^2 \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ 0 = -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{\psi_{R\alpha}}{T_R} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + \omega_m \psi_{R\beta}, \\ 0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{\psi_{R\beta}}{T_R} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} - \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} p k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_H), \end{array} \right. \quad (1.3)$$

где $r = (R_s + k_R^2 R_R)$, $k_R = L_m / L_R$, $T_r = L_R / R_R$, $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ – проекции изображающего вектора напряжения на статоре на оси α и β соответственно; L_s, L_r – собственные

индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; s – скольжение; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – проекции изображающего вектора тока статора на оси α и β соответственно; R_R – активное сопротивление ротора; R_S – активное сопротивление статора; $\Psi_{R\alpha}, \Psi_{R\beta}$ – проекции вектора потокосцепления ротора на оси α и β соответственно; p – число пар полюсов; ω_m – угловая скорость вращения вала двигателя; J – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции привода; M – электромагнитный момент двигателя; M_n – момент нагрузки (исполнительного механизма).

Активная мощность в цепи ротора согласно [46, 54, 55] определяется как:

$$P_2 = \frac{13,32 f \Phi w_1 k_1 \omega_2}{\omega_1} \left(\frac{U_1}{U} I_1 \cos \varphi_1 - \frac{I_1^2 R_1}{U_1} - I_0 \sin \alpha \right), \quad (1.4)$$

Согласно [46, 53, 54, 55] выражение для мощности на валу электродвигателя будет иметь следующий вид:

$$\Delta P_3 = \frac{13,32 f \Phi w_1 k_1 \omega_2}{\omega_1} \left(\frac{U_1}{U} I_1 \cos \varphi_1 - \frac{I_1^2 R_1}{U_1} - I_0 \sin \alpha \right) - P_3, \quad (1.5)$$

где w_1 – количество витков статора; k_1 – обмоточный коэффициент статора; $I_0 \sin \alpha$ – произведение тока ветви намагничивания и синуса угла магнитных потерь; φ_1 – фазовый сдвиг в цепи статора; R_1 – активное сопротивление цепи статора; I_1 – действующее значение тока в цепи статора; U_1 – фазное напряжение на статоре; Φ – величина магнитного потока в воздушном зазоре (основной поток машины); f – частота напряжения на статоре; ω_1 – циклическая (угловая) частота поля статора; ω_2 – механическая угловая скорость вращения ротора; P_3 – мощность, передаваемая машиной исполнительному механизму.

Таким образом, при известных постоянных значениях $R_1, w_1, k_1, \Phi, \omega_1$, практически не меняющемся значении $I_0 \sin \alpha$ и медленно меняющейся (не более 10 раз в смену в рамках технологического процесса) величине P_3 изменение ΔP_3 можно контролировать путем измерения величин U_1, I_1 и $\cos \varphi_1$.

Возникающие неисправности и аварии механической части ленточных конвейеров приводят к отклонению величины моментов на валу головного барабана и электродвигателя от нормальных для данного режима работы

конвейера значений. В свою очередь изменение момента на валу электродвигателя приводит к изменению тока статора. Данное обстоятельство может быть использовано для построения систем диагностики механической части ленточного конвейера и защиты его от неисправностей и аварий.

Определение влияния возникающих неисправностей и аварийных ситуаций на поведение величин токов обмоток электродвигателя требует проведения исследований.

1.5 Выводы

1. Ленточный конвейер является сложной электромеханической системой, требующей комплексного рассмотрения с детальным представлением каждого узла и элемента.

2. Анализ существующих устройств защиты и методов диагностики показывает некоторые недостатки: регистрация аварийного состояния постфактум либо последствий аварийных процессов, конструктивные недостатки элементной базы, техническая сложность и значительная стоимость комплексов.

3. Статистическая обработка данных, полученных с ряда предприятий горной и металлургической промышленности, показала, что наиболее часто возникающими и наименее распознаваемыми штатными устройствами защиты аварийными ситуациями являются заклинивание роликов холостой и грузонесущей ветвей, заштыбовка приемных бункеров, поломка чистителей барабанов, заклинивание редукторов.

4. Для диагностики состояния механизма ленточных конвейеров в режиме реального времени возможно использование контроля электрических величин приводного двигателя.

1.6 Постановка задач исследования

На основании проведенных в главе 1 исследований, можно поставить следующие задачи диссертационной работы:

1. Разработать модель ленточного конвейера как единого электромеханического комплекса.
2. Исследовать разработанную модель с получением критериев и признаков аварийных событий.
3. Выполнить натурные исследования предлагаемого способа функциональной диагностики на реальном объекте для определения адекватности моделирования.
4. Разработать алгоритм функциональной диагностики ленточного конвейера с учетом проведенных модельных и натурных исследований.
5. Разработать устройство, необходимое для реализации предложенного способа функциональной диагностики ленточного конвейера.
6. Выполнить промышленную апробацию способа функциональной диагностики ленточного конвейера.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА КАК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1. Составление модели ленточного конвейера

Для исследования электромеханического комплекса механизма ленточного конвейера составлена совместная модель объекта как электромеханического комплекса, содержащая описание механической и электрической ее частей [63].

При этом используется принцип декомпозиции сложного электромеханического объекта на составные части: электрическую (асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором) и механическую (узлы, агрегаты, входящие в механизм ленточного конвейера) [64, 65].

2.1.1. Математическое описание приводного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Электромеханическая модель ленточного конвейера должна предусматривать наличие блока описания электромеханического преобразователя, в рассматриваемом случае – асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Возможные варианты математического описания такого электродвигателя изложены в [58-62, 66-70].

Для рассматриваемого механизма ленточного конвейера выберем модель асинхронного электродвигателя в неподвижной комплексной системе координат ($\omega_k=0$), где вещественная ось обозначается α , а мнимая β [70, 76]. Выбор этой модели обусловлен наличием в модели фактической угловой скорости вращения, а также равенством значения тока по оси α мгновенному значению фазного тока статора. При этом существует возможность получения реальных значений тока статора и угловой скорости непосредственно из модели.

Система уравнений, описывающая асинхронный электродвигатель в неподвижных координатах имеет вид [50, 51, 53-55]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{S\alpha} = r i_{S\alpha} + L_s \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{1}{L_R} L_m^2 \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R \omega_m \psi_{R\beta}, \\ u_{S\beta} = r i_{S\alpha} + L_s \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{1}{L_R} L_m^2 \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ 0 = -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{\psi_{R\alpha}}{T_R} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + \omega_m \psi_{R\beta}, \\ 0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{\psi_{R\beta}}{T_R} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} - \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} p k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_H), \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где $r = (R_S + k_R^2 R_R)$, $k_R = L_m / L_R$, $T_r = L_R / R_R$, $u_{S\alpha}$, $u_{S\beta}$ – проекции изображающего вектора напряжения на статоре на оси α и β соответственно; L_s, L_r – собственные индуктивности цепей статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность статора и ротора (индуктивность воздушного зазора); s – скольжение; $i_{S\alpha}$, $i_{S\beta}$ – проекции вектора тока статора на оси α и β соответственно; R_R – активное сопротивление цепи ротора; R_S – активное сопротивление цепи статора; $\psi_{R\alpha}$ – проекция вектора потокосцепления на вещественную ось α ; $\psi_{R\beta}$ – проекция вектора потокосцепления на мнимую ось β ; p – число пар полюсов; ω_m – угловая скорость вала электродвигателя; J – момент инерции на валу электродвигателя; M – момент создаваемый электродвигателем; M_H – момент сопротивления исполнительного механизма.

В соответствии с (2.1) модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором будет иметь вид, представленный на рисунке 2.1 [70, 73-74].

Входными величинами электрической модели являются проекции напряжения на статоре машины по осям U_α и U_β , а выходной момент на валу двигателя M и угловая скорость ω_m .

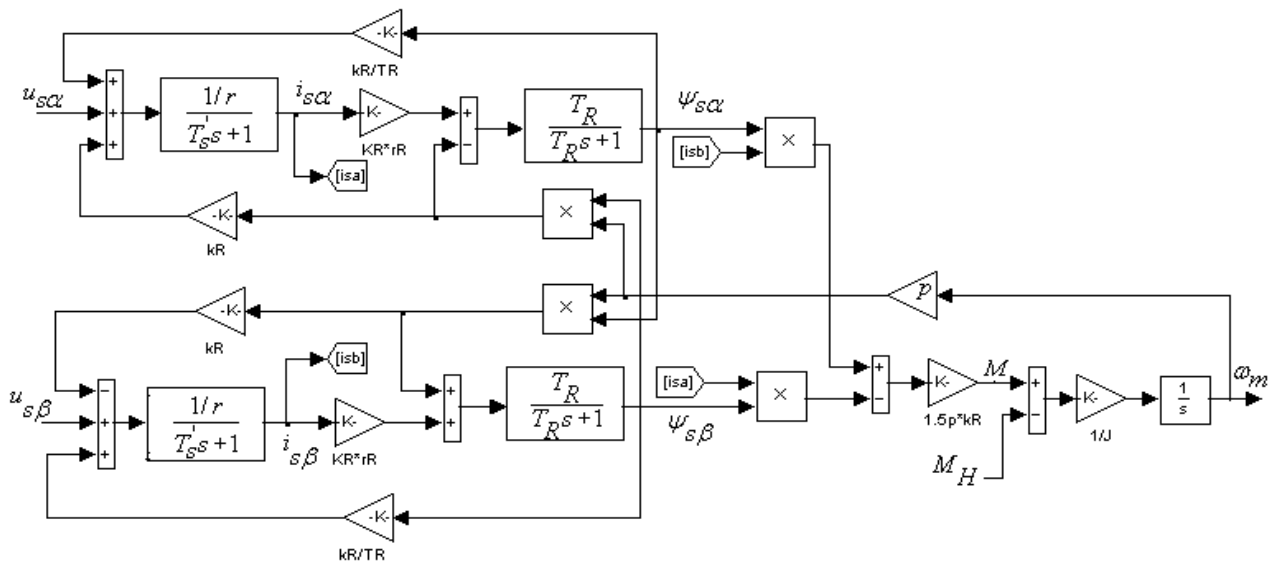


Рисунок 2.1 – Модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат

2.1.2 Математическое описание механической части ленточного конвейера

Механическая часть рассматриваемого технологического комплекса представляет собой многомассовую систему, состоящую из инерционных тел, соединенными гибкими связями. Для ленточного конвейера в качестве отдельных инерционных тел выступают соединительная муфта, составные части редуктора, головной барабан, промежуточные грузонесущие ролики, хвостовой барабан, «холостые» роlikоопоры [63]. Связь между элементами осуществляется упругим звеном – ленточным полотном. На рисунке 2.2 приведена кинематическая схема механической части ленточного конвейера в обобщенной форме [77-80].

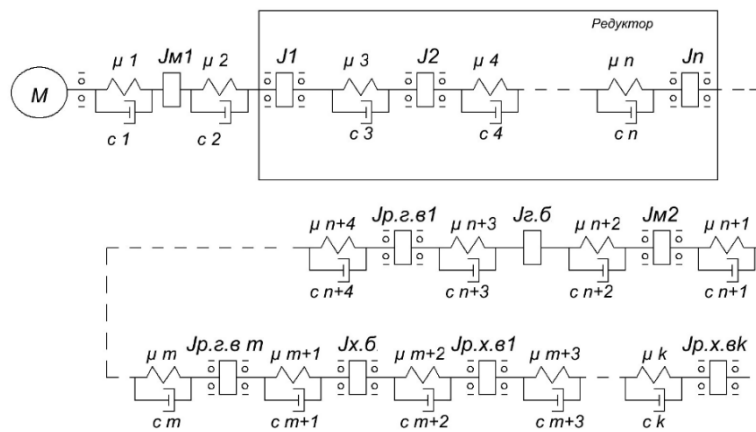


Рисунок 2.2 – Модель механической части ленточного конвейера

На рисунке 2.2 приняты следующие обозначения: $J_1, \dots, J_n$ – момент инерции шестерней редуктора; J_{M1}, J_{M2} – моменты инерции муфт; $J_{гол.б.}, J_{хв.б.}$ – моменты инерции головного и хвостового барабанов; $J_{рол1}, \dots, J_{ролm}$ – моменты инерции грузонесущих роликов; $J_{хол.p1}, \dots, J_{хол.p. h}$ – моменты инерции холостых роликов; $C_1, \dots, C_8, C_{л1}, \dots, C_{л7}$ – жесткости связей в редукторе и между роликоопорами; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \mu_m, \mu_k$ – коэффициенты демпфирования, $\varphi_{M1}, \varphi_{M2}$ – углы поворота муфт; $\varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{хол.б.}, \varphi_{гол.б.}, \varphi_{рол1}, \dots, \varphi_{ролm}$ – углы поворота шестерней редуктора и роликов грузонесущей и холостой ветви конвейера; $M_{дв}$ – момент, создаваемый электродвигателем; M_{M1}, M_{M2} – моменты на соединительных муфтах; $M_2, \dots, M_n$ – моменты шестерней редуктора; $M_{гол.б.}, M_{хв.б.}$ – моменты головного и хвостового барабанов; $M_{рол1}, \dots, M_{ролn}$ – моменты на грузонесущих роликах; $M_{хол.p1}, \dots, M_{хол.pn}$ – моменты на холостых роликах.

Система уравнений для механической части ленточного конвейера в обобщенной форме имеет вид (2.2).

$$\begin{aligned}
& J \frac{d\omega}{dt} + \mu(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_{M1}) + C_1(\varphi - \varphi_{M1}) = M_{o\delta}, \\
& J_{M1} \frac{d\omega_{M1}}{dt} + \mu_2(\dot{\varphi}_{M1} - \dot{\varphi}_1) - \mu_3(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_{M1}) - C_1(\varphi - \varphi_{M1}) + C_2(\varphi_{M1} - \varphi) = -M_{M1}, \\
& J_1 \frac{d\omega_2}{dt} + \mu_3(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_n) - \mu_4(\dot{\varphi}_n - \dot{\varphi}_2) - C_2(\varphi_{M1} - \varphi_1) + C_3(\varphi_1 - \varphi_2) = -M_2, \\
& \dots\dots\dots \\
& J_n \frac{d\omega_n}{dt} + \mu_{n+2}(\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_{c\delta}) - \mu_{n+3}(\dot{\varphi}_{c\delta} - \dot{\varphi}_{M2}) - C_{n+1}(\varphi_{n-1} - \varphi_n) + C_{n+2}(\varphi_n - \varphi_{M2}) = -M_n, \\
& J_{M2} \frac{d\omega_{M2}}{dt} + \mu_{n+2}(\dot{\varphi}_{c\delta} - \dot{\varphi}_{p\delta 1}) - \mu_{n+3}(\dot{\varphi}_{p\delta 1} - \dot{\varphi}_{c\delta}) - C_{n+2}(\varphi_{n-1} - \varphi_{M2}) + C_{n+3}(\varphi_{M2} - \varphi_{\omega 1, \delta}) = -M_{M2}, \\
& J_{\omega 1, \delta} \frac{d\omega_{\omega 1, \delta}}{dt} + \mu_{n+3}(\dot{\varphi}_{p\delta 1} - \dot{\varphi}_{p\delta m}) - \mu_{n+4}(\dot{\varphi}_{p\delta m} - \dot{\varphi}_{p\delta 1}) - C_{n+3}(\varphi_{\omega 1, \delta} - \varphi_{p\delta 1}) + C_{n+4}(\varphi_{p\delta 1} - \varphi_{p\delta m}) = -M_{\omega 1, \delta}, \\
& J_{p\delta 1} \frac{d\omega_{p\delta 1}}{dt} + \mu_{n+4}(\dot{\varphi}_{p\delta m} - \dot{\varphi}_{x\delta}) - \mu_m(\dot{\varphi}_{x\delta} - \dot{\varphi}_{p\delta m}) - C_{n+4}(\varphi_{p\delta 1} - \varphi_{p\delta m}) + C_m(\varphi_{p\delta m} - \varphi_{p\delta 2}) = -M_{p\delta 1}, \\
& \dots\dots\dots \\
& J_{p\omega 1, m} \frac{d\omega_{p\omega 1, m}}{dt} + \mu_{m+1}(\dot{\varphi}_{x\delta} - \dot{\varphi}_{px\delta 1}) - \mu_{m+2}(\dot{\varphi}_{px\delta 1} - \dot{\varphi}_{x\delta}) - C_{m+1}(\varphi_{p\delta m} - \varphi_{x\delta}) + C_{m+2}(\varphi_{x\delta} - \varphi_{p\delta 1}) = -M_{p\omega 1, m}, \\
& J_{x\delta, \delta} \frac{d\omega_{x\delta, \delta}}{dt} + \mu_{m+2}(\dot{\varphi}_{px\delta 1} - \dot{\varphi}_{px\delta k}) - \mu_{m+3}(\dot{\varphi}_{px\delta k} - \dot{\varphi}_{px\delta 1}) - C_{m+2}(\varphi_{x\delta} - \varphi_{px\delta 1}) + C_{m+3}(\varphi_{px\delta 1} - \varphi_{px\delta 2}) = -M_{x\delta, \delta}, \\
& J_{px\delta 1} \frac{d\omega_{px\delta 1}}{dt} + \mu_{m+3}(\dot{\varphi}_{px\delta k} - \dot{\varphi}_{px\delta k+1}) - \mu_k(\dot{\varphi}_{px\delta k+1} - \dot{\varphi}_{px\delta k}) - C_{m+3}(\varphi_{px\delta 1} - \varphi_{px\delta 2}) + C_k(\varphi_{px\delta 2} - \varphi_{px\delta k}) = -M_{x\omega 1, p1}, \\
& J_{px\delta k} \frac{d\omega_{px\delta k}}{dt} - C_k(\varphi_{px\delta k} - \varphi_{px\delta k+1}) = -M_{px\delta k}.
\end{aligned} \tag{2.2}$$

На рисунке 2.3 приведена расчетная схема динамической модели ленточного конвейера, построенная с учетом следующих допущений: система конвейера состоит из соединенных друг с другом упруго-вязкими связями дискретных масс; провисание ленты под действием груза и ее поперечные колебания не учитываются, в связи с тем, что время распространения бегущей волны в ленточном полотне и затухание волновых процессов в результате вязкого трения в ленте на 3-4 порядка больше времени переходных процессов в электрических цепях привода механизма; грузонесущая ветвь ленточного конвейера разбивается на n участков: в пределах одного участка определяется сумма моментов инерции и жесткостей связи; сама гибкая связь считается присоединенной к началу следующего элемента и концу предыдущего; холостой участок ленты представляется одним приведенным моментом инерции и одной упругой связью; проскальзывание тяговой ленты по поверхностям поддерживающих роликов и отклоняющих барабанов отсутствует; перемещение частиц сыпного груза относительно ленты и внутреннее взаимодействие между частицами не учитывается.

Уравнения движения отдельных приведенных масс могут быть составлены при помощи уравнения Лагранжа второго рода. При этом предполагается, что движение механизма исследуется в системе обобщенных координат, в качестве которых приняты независимые координаты, определяющие положение механизма. К ним относятся углы поворота вращающихся вокруг неподвижных осей дискретных инерционных элементов или их линейные перемещения [77].

В составленной модели не учтены силы вязкого трения в ленточном полотне. Согласно [85, 86, 88], дифференциальное уравнение волновых процессов в ленте имеет вид:

$$a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \bar{\eta} a^2 \frac{\partial^2}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (2.3)$$

где $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения волны при отсутствии затухания; $\bar{\eta}$ – коэффициент, учитывающий внутреннее трение.

В результате преобразований и учета только прямой волны, а также учитывая, что η достаточно мало, скорость распространения прямой волны определится как:

$$u = A \cdot e^{\frac{-r_1 \omega}{2a} x} \cos \left(\omega t - \frac{\omega}{a} x \right). \quad (2.4)$$

В общем виде закон затухания колебаний имеет вид:

$$u = A \cdot e^{\frac{p}{a} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{1+\eta^2} + \frac{1}{\sqrt{1+\eta^2}}} x - at \right)} \times \cos \frac{\eta p x}{a \sqrt{2} \sqrt{1+\eta^2 + (1+\eta^2)^{3/2}}}. \quad (2.5)$$

При уменьшении величины показателя экспоненты в (2.5) коэффициент, определяющий затухание для данной координаты x , увеличивается и при $p \rightarrow 0$ приближается к единице. Таким образом, при перемещении конца ленты скачком от нуля до какой-то величины вдоль ленты будет распространяться волна деформации с постоянной скоростью.

Рассмотрим кинематическую схему реального ленточного конвейера, показанную на рисунке 2.3.

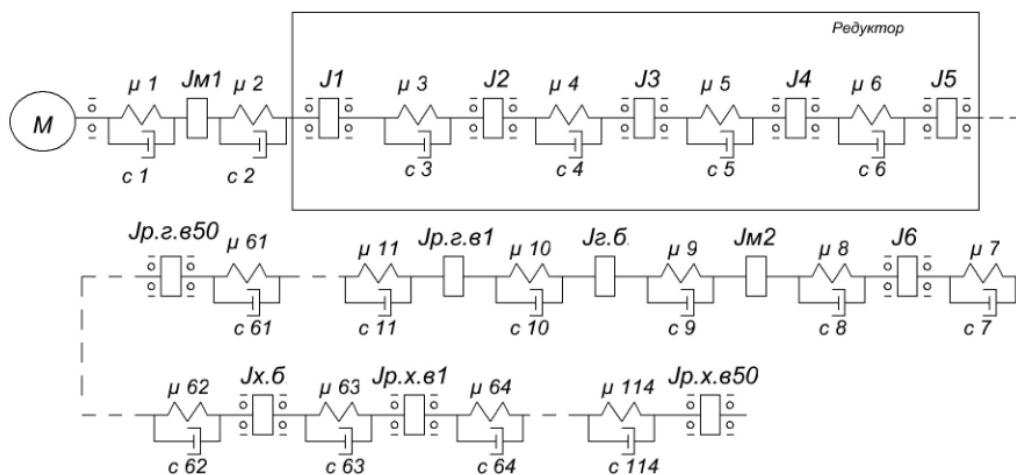


Рисунок 2.3 – Схема совмещенной модели электромеханического преобразователя механической системы ленточного конвейера (протяженностью 43,5 м).

В результате декомпозиции модели механической части ленточного конвейера и упрощений с суммированием малых масс получаем итоговую восьмимассовую модель. Математическое описание механической восьмимассовой системы ленточного конвейера будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 & J \frac{d\omega}{dt} + \mu_1 (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_{M1}) + C_1 (\varphi - \varphi_{M1}) = M_{\partial\partial}, \\
 & J_{M1} \frac{d\omega_{M1}}{dt} + \mu_2 (\dot{\varphi}_{M1} - \dot{\varphi}_1) - \mu_3 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - C_1 (\varphi - \varphi_{M1}) + C_2 (\varphi_{M1} - \varphi_1) = -M_{M1}, \\
 & J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \mu_3 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - \mu_4 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - C_2 (\varphi_{M1} - \varphi_1) + C_3 (\varphi_1 - \varphi_2) = -M_1, \\
 & J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + \mu_4 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - \mu_5 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - C_3 (\varphi_1 - \varphi_2) + C_4 (\varphi_2 - \varphi_3) = -M_2, \\
 & J_3 \frac{d\omega_3}{dt} + \mu_5 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - \mu_6 (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5) - C_4 (\varphi_2 - \varphi_3) + C_5 (\varphi_3 - \varphi_4) = -M_3, \\
 & J_4 \frac{d\omega_4}{dt} + \mu_6 (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5) - \mu_7 (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) - C_5 (\varphi_3 - \varphi_4) + C_6 (\varphi_4 - \varphi_5) = -M_4, \\
 & J_5 \frac{d\omega_5}{dt} + \mu_7 (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) - \mu_8 (\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_{M2}) - C_6 (\varphi_4 - \varphi_5) + C_7 (\varphi_5 - \varphi_6) = -M_5, \\
 & J_6 \frac{d\omega_6}{dt} + \mu_8 (\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_{M2}) - \mu_9 (\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_{\partial\partial}) - C_7 (\varphi_5 - \varphi_6) + C_8 (\varphi_6 - \varphi_{M2}) = -M_6, \\
 & J_{M2} \frac{d\omega_{M2}}{dt} + \mu_9 (\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_{\partial\partial}) - \mu_{10} (\dot{\varphi}_{\partial\partial} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 1}) - C_8 (\varphi_6 - \varphi_{M2}) + C_9 (\varphi_{M2} - \varphi_{\partial\partial}) = -M_{M2}, \\
 & J_{\partial\partial} \frac{d\omega_{\partial\partial}}{dt} + \mu_{10} (\dot{\varphi}_{\partial\partial} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 1}) - \mu_{11} (\dot{\varphi}_{p\partial\partial 1} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 2}) - C_9 (\varphi_{M2} - \varphi_{\partial\partial}) + C_{10} (\varphi_{\partial\partial} - \varphi_{p\partial\partial 1}) = -M_{\partial\partial}, \\
 & J_{p\partial\partial 1} \frac{d\omega_{p\partial\partial 1}}{dt} + \mu_{11} (\dot{\varphi}_{p\partial\partial 1} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 2}) - \mu_{12} (\dot{\varphi}_{p\partial\partial 2} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 3}) - C_{10} (\varphi_{\partial\partial} - \varphi_{p\partial\partial 1}) + C_{11} (\varphi_{p\partial\partial 1} - \varphi_{p\partial\partial 2}) = -M_{p\partial\partial 1}, \\
 & \dots\dots\dots \\
 & J_{p\partial\partial 50} \frac{d\omega_{p\partial\partial 50}}{dt} + \mu_{62} (\dot{\varphi}_{p\partial\partial 50} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 51}) - \mu_{63} (\dot{\varphi}_{p\partial\partial 51} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 52}) - C_{61} (\varphi_{p\partial\partial 49} - \varphi_{p\partial\partial 50}) + C_{62} (\varphi_{p\partial\partial 50} - \varphi_{p\partial\partial 51}) = -M_{p\partial\partial 50}, \\
 & J_{x\partial} \frac{d\omega_{x\partial}}{dt} + \mu_{63} (\dot{\varphi}_{p\partial\partial 51} - \dot{\varphi}_{p\partial\partial 52}) - \mu_{64} (\dot{\varphi}_{px\partial 1} - \dot{\varphi}_{px\partial 2}) - C_{62} (\varphi_{p\partial\partial 50} - \varphi_{p\partial\partial 51}) + C_{63} (\varphi_{p\partial\partial 51} - \varphi_{p\partial\partial 52}) = -M_{x\partial}, \\
 & J_{px\partial 1} \frac{d\omega_{px\partial 1}}{dt} + \mu_{64} (\dot{\varphi}_{px\partial 1} - \dot{\varphi}_{px\partial 2}) - \mu_{65} (\dot{\varphi}_{px\partial 2} - \dot{\varphi}_{px\partial 3}) - C_{63} (\varphi_{p\partial\partial 51} - \varphi_{p\partial\partial 52}) + C_{64} (\varphi_{p\partial\partial 52} - \varphi_{p\partial\partial 53}) = -M_{px\partial 1}, \\
 & \dots\dots\dots \\
 & J_{px\partial 50} \frac{d\omega_{x\partial p}}{dt} - C_{114} (\varphi_{px\partial 45} - \varphi_{px\partial 50}) = -M_{px\partial 50}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \mu_1 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_{M1}) + C_1 (\varphi_1 - \varphi_{M1}) = M_{ог}, \\
 J_{M1} \frac{d\omega_{M1}}{dt} + \mu_2 (\dot{\varphi}_{M1} - \dot{\varphi}_p) - \mu_3 (\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{M2}) - C_1 (\varphi_1 - \varphi_{M1}) + C_2 (\varphi_{M1} - \varphi_p) = -M_{M1}, \\
 J_p \frac{d\omega_p}{dt} + \mu_3 (\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{M2}) - \mu_4 (\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_2) - C_2 (\varphi_{M1} - \varphi_p) + C_3 (\varphi_p - \varphi_{M2}) = -M_p, \\
 J_{M2} \frac{d\omega_{M2}}{dt} + \mu_4 (\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_2) - \mu_5 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - C_3 (\varphi_p - \varphi_{M2}) + C_4 (\varphi_{M2} - \varphi_2) = -M_{M2}, \\
 J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + \mu_5 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \mu_6 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - C_4 (\varphi_{M2} - \varphi_2) + C_5 (\varphi_2 - \varphi_3) = -M_2, \\
 J_3 \frac{d\omega_3}{dt} + \mu_6 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - \mu_7 (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_{хол.p}) - C_5 (\varphi_2 - \varphi_3) + C_6 (\varphi_3 - \varphi_4) = -M_3, \\
 J_4 \frac{d\omega_4}{dt} + \mu_7 (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_{хол.p}) - C_6 (\varphi_3 - \varphi_4) + C_7 (\varphi_4 - \varphi_{хол.p}) = -M_4, \\
 J_{хол.p} \frac{d\omega_{хол.p}}{dt} - C_7 (\varphi_4 - \varphi_{хол.p}) = -M_{хол.p}.
 \end{array} \right. \quad (2.7)$$

2.1.3 Математическое описание совместной электромеханической модели механизма ленточного конвейера

Построение модели механизма ленточного конвейера как единого электромеханического комплекса выполнится путем совмещения систем уравнений (6) и (11). Связь электродвигателя привода конвейера и механической части конвейера при этом выполняется через развиваемый двигателем момент – его величина является выходным параметром для электрической части модели и входным параметром для механической части. В этом случае система уравнений электромеханической модели ленточного конвейера будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{m\phi} \sin(\omega_0 t), \\
L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = U_{m\phi} \cos(\omega_0 t), \\
L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} - \omega_1 (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}) = 0, \\
L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} + \omega_1 (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}) = 0, \\
J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \mu_1 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_{M1}) + C_1 (\varphi_1 - \varphi_{M1}) = \frac{3}{2} L_m p_0 (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) = M_{\partial\theta}, \\
J_{M1} \frac{d\omega_{M1}}{dt} + \mu_2 (\dot{\varphi}_{M1} - \dot{\varphi}_p) - \mu_3 (\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{M2}) - C_1 (\varphi_1 - \varphi_{M1}) + C_2 (\varphi_{M1} - \varphi_p) = -M_{M1}, \\
J_p \frac{d\omega_p}{dt} + \mu_3 (\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{M2}) - \mu_4 (\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_2) - C_2 (\varphi_{M1} - \varphi_p) + C_3 (\varphi_p - \varphi_{M2}) = -M_p, \\
J_{M2} \frac{d\omega_{M2}}{dt} + \mu_4 (\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_2) - \mu_5 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - C_3 (\varphi_p - \varphi_{M2}) + C_4 (\varphi_{M2} - \varphi_2) = -M_{M2}, \\
J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + \mu_5 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \mu_6 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - C_4 (\varphi_{M2} - \varphi_2) + C_5 (\varphi_2 - \varphi_3) = -M_2, \\
J_3 \frac{d\omega_3}{dt} + \mu_6 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - \mu_7 (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_{хол.p}) - C_5 (\varphi_2 - \varphi_3) + C_6 (\varphi_3 - \varphi_4) = -M_3, \\
J_4 \frac{d\omega_4}{dt} + \mu_7 (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_{хол.p}) - C_6 (\varphi_3 - \varphi_4) + C_7 (\varphi_4 - \varphi_{хол.p}) = -M_4, \\
J_{хол.p} \frac{d\omega_{хол.p}}{dt} - C_{л7} (\varphi_4 - \varphi_{хол.p}) = -M_{хол.p}.
\end{array} \right. \quad (2.8)$$

Имитация аварийных режимов в модели (2.7) выполняется путем приложения аварийных моментов в различных точках модели механической части конвейера. В системе уравнений (2.9) восьмимассовой системы показаны точки приложения аварийного момента в механической части ленточного конвейера (ΔM_{c1} – ΔM_{cn}). Знак и величина прилагаемого момента $\pm(\Delta M_{c1}, \Delta M_{c2}, \Delta M_{c3})$, будет зависеть от типа моделируемой неисправности:

$$\left\{ \begin{array}{l}
L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{m\phi} \sin(\omega_0 t), \\
L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = U_{m\phi} \cos(\omega_0 t), \\
L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} - \omega_1 (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}) = 0, \\
L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} + \omega_1 (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}) = 0, \\
J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \mu_1 (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_{m1}) + C_1 (\phi_1 - \phi_{M1}) = \frac{3}{2} L_m p_0 (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}), \\
J_{M1} \frac{d\omega_{M1}}{dt} + \mu_2 (\dot{\phi}_{m1} - \dot{\phi}_p) - \mu_3 (\dot{\phi}_p - \dot{\phi}_{m2}) - C_1 (\phi_1 - \phi_{M1}) + C_2 (\phi_{M1} - \phi_p) = -M_{M1}, \\
J_p \frac{d\omega_p}{dt} + \mu_3 (\dot{\phi}_p - \dot{\phi}_{m2}) - \mu_4 (\dot{\phi}_{m2} - \dot{\phi}_2) - C_2 (\phi_{M1} - \phi_p) + C_3 (\phi_p - \phi_{M2}) = -M_p, \\
J_{M2} \frac{d\omega_{M2}}{dt} + \mu_4 (\dot{\phi}_{m2} - \dot{\phi}_2) - \mu_5 (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3) - C_3 (\phi_p - \phi_{M2}) + C_4 (\phi_{M2} - \phi_2) = -M_{M2}, \\
J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + \mu_5 (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3) - \mu_6 (\dot{\phi}_3 - \dot{\phi}_4) - C_4 (\phi_{M2} - \phi_2) + C_5 (\phi_2 - \phi_3) \pm \Delta M_{c1} = -M_2, \\
J_3 \frac{d\omega_3}{dt} + \mu_6 (\dot{\phi}_3 - \dot{\phi}_4) - \mu_7 (\dot{\phi}_4 - \dot{\phi}_{хол.p}) - C_5 (\phi_2 - \phi_3) + C_6 (\phi_3 - \phi_4) \pm \Delta M_{c2} = -M_3, \\
J_4 \frac{d\omega_4}{dt} + \mu_7 (\dot{\phi}_4 - \dot{\phi}_{хол.p}) - C_6 (\phi_3 - \phi_4) + C_7 (\phi_4 - \phi_{хол.p}) \pm \Delta M_{c3} = -M_4, \\
J_{хол.p} \frac{d\omega_{хол.p}}{dt} - C_{л7} (\phi_4 - \phi_{хол.p}) = -M_{хол.p}.
\end{array} \right. \quad (2.9)$$

Полученная система уравнений (2.9) позволяет определить изменения механических и электрических величин электромеханического комплекса конвейера при возникновении неисправностей и аварийных ситуаций в механической части привода. Подтверждение адекватности используемой модели будет выполнено посредством сравнения результатов полученных путем моделирования в 2.2.2 и результатов полученных при проведении натурного исследования объекта в 3.1.

2.2 Использование разработанной модели для определения величины изменений токов обмоток электродвигателя при возникновении аварий в механической части механизма ленточного конвейера

Для определения изменения механических и электрических величин электромеханического комплекса при возникновении неисправностей и аварийных ситуаций механической части ленточного конвейера с использованием предложенной совместной модели в 2.1.3 объекта было проведено исследование для ленточных конвейеров на предприятии ОФ «Черниговская-Коксовая» [46]. Общее количество ленточных конвейеров на рассматриваемом предприятии составляет 48 единиц. Из них 16 ленточных конвейеров с мощностью приводного электродвигателя 22 кВт, что составляет 33% от общего количества. В связи с этим, первоначально был выбран ленточный конвейер типа НЕ-К.

2.2.1 Определение численных значений для составления расчетной модели выбранного ленточного конвейера типа НЕ-К

Выбор механизма ленточного конвейера данного типа и исполнения для определения численных значений параметров был обусловлен рядом причин: наибольшая распространенность по протяженности, наличие отягчающих факторов окружающей среды на механизм, возможность контроля технологической нагрузки в режиме реального времени.

Рассматриваемый ленточный конвейер расположен в технологической цепочке транспортировки угольного концентрата по верху укрытого склада на предприятии Обогажительная фабрика «Черниговская-Коксовая» ЗАО «Черниговец». Таким образом, присутствуют отягчающие эксплуатационные факторы, которые уменьшают эксплуатационный срок узлов и агрегатов механизма [56].

Ленточный конвейер типа НЕ-К предназначен для транспортирования сыпучих материалов различных фракций [57]. Приводной барабан,

контактирующий с рабочей поверхностью ленточного полотна, покрыт резино-керамическим фрикционным слоем толщиной 15 мм.

Для проведения исследований на модели асинхронного электродвигателя произведен расчет асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по методике, описанной в работах [75, 76].

Параметры применяемого в механизме ленточного полотна (1200 EP 400/4): ширина 1200 мм; четыре резинотканевых слоя с EP - прокладками, которые обеспечивают малое растяжение при высокой прочности на пробой и оптимальную адгезию между прокладками; диаметр приводных барабанов 400 мм.

В структуру исследуемого механизма входят элементы, технические характеристики которых представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики элементов механизма ленточного конвейера

Наименование элемента	Характеристики	Особенности конструктива
Коническо-цилиндрический мотор-редуктор типа SK	$i=29$	Укомплектован тихоходной муфтой типа RFK
Приводные барабаны	Ø504/534 и 604/634 мм	Покрытые керамическим фрикционным слоем типа СК-Х
Отклоняющие барабаны	Ø 404/424 мм	с гуммированным слоем толщиной 10 мм
Несущие верхние ролики	Ø 108 и 133 мм	Амортизационные ролики с 15-тью резиновыми кольцами Ø 63,5/108 или 108/133 мм
Предварительный очиститель ленты	-	Имеет полиуретановую накладку
Ручная натяжная лебедка	-	Фрикционного типа с демпферной пружиной

В качестве базовых параметров были приняты представленные в таблице 2.2 параметры асинхронного электродвигателя, установленного на исследуемом механизме.

Таблица 2.2 – Параметры приводного асинхронного электродвигателя

Тип двигателя: SK 180LX/4 TF				
для 50 Гц	Номинальное напряжение и схема соединения: 400/690 В (Δ/Y)		для 60 Гц	Номинальное напряжение и схема соединения: 460 В Δ
Номинальный ток: 42.6/24.6 А		Номинальная мощность: 22.0 кВт	Номинальный ток: 41.7 А Номинальная мощность: 25.3 кВт	
Cosφ=0.82		Номинальная скорость: 1460 об/мин	Cosφ=0.83 Номинальная скорость: 1760 об/мин	

Общий расчет представлен в Приложении А. В результате были получены необходимые величины (токи ветви намагничивания, активное сопротивление фазы обмотки ротора, индуктивное сопротивление фазы обмотки статора и т.д.).

Для составления динамической модели привода конвейера был использован подход, описанный в [81]. Согласно этому подходу, все механические детали привода, включая и транспортную ленту, разделены на простые геометрические элементы [82]. Для каждого из элементов определен момент инерции и податливость [82]. Одновременно все участки деталей приведены к валу двигателя [82, 83]. По результатам исследования в механической части привода конвейера выделено 36 сравнительно простых элементов, которые представлены в таблице 2.3. Из этих элементов составляется первоначальная динамическая модель.

Таблица 2.3 – Параметры элементов, входящих в механизм ленточного конвейера

Деталь	Код	DL	D1	D2	D3	D4	Z1	Z2	Z3
Вал двигателя	2	0	120	30	1	1	0	0	0
Шпоночное соединение	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Вал первой передачи	1	150	30	1	1	0	0	0	0
Первая шестерня	10	80	77	38,5	$6 \cdot 10^{11}$	1	1	1	0
Основание первой шестерни	9	80	110	200	1	1	0	0	0
Подшипник на валу первой передачи	22	23	30	90	1	1	0	0	0
Вторая шестерня	10	80	77	38,5	$6 \cdot 10^{11}$	1	1	1	0
Основание второй шестерни	9	80	110	200	1	1	0	0	0
Вал 2-3 шестерни	1	50	30	1	1	0	0	0	0
Подшипник на валу 2-3 передачи	22	23	30	90	1	1	0	0	0
Третья шестерня	10	80	150	75	$6 \cdot 10^{11}$	1	1	1	0
Основание третьей шестерни	7	80	30	150	1	1	0	0	0
Четвертая шестерня	10	80	250	125	$6 \cdot 10^{11}$	1	1	1	0
Основание четвертой шестерни	7	80	30	250	1	1	0	0	0

Продолжение таблицы 2.3

Деталь	Код	DL	D1	D2	D3	D4	Z1	Z2	Z3
Вал 4-5 шестерни	1	50	30	1	1	0	0	0	0
Подшипник на валу 4-5 передачи	22	23	30	90	1	1	0	0	0
Пятая шестерня	10	80	150	75	6·1011	1	1	1	0
Основание пятой шестерни	7	80	30	150	1	1	0	0	0
Шестая шестерня	10	80	250	125	6·1011	1	1	1	0
Основание шестой шестерни	7	80	30	250	1	1	0	0	0
Вал 6 шестерни и муфты	1	250	30	1	1	0	0	0	0
Подшипник на валу 6 и муфты передачи	22	23	30	90	1	1	0	0	0
Переход от вала шестой к муфте	2	0	139.5	30	1	1	0	0	0
Муфта RFK	8	100	139.5	400	350	20	8	1	1
Деталь	Код	DL	D1	D2	D3	D4	Z1	Z2	Z3
Вал муфта-головной барабан	1	65	400	1	1	0	0	0	0
Подшипник головного барабана	12	90	140	149	165	210	1	1	0
Головной барабан	3	1500	210	634	1	1	0	0	0
Лента	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Роликоопоры(3 шт.) на первой связке (50)	3	400	52	133	1	1	0	0	0
Подшипники роликоопор бшт на одной связке	12	15	25	34	47	52	1	1	0
Лента	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Подшипники на хвостовом барабане	12	90	140	149	165	210	1	1	0
Хвостовой барабан	3	1500	210	534	1	1	0	0	0
Лента	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Подшипники роликов холостой ветви	12	15	25	34	47	52	1	1	0
Роликоопоры холостой ветви	3	1500	52	108	1	1	0	0	0

После получения необходимых геометрических параметров элементов механизма ленточного конвейера производится ввод полученных значений в программу для вычисления искомых моментов инерции и жесткостей элементов системы. [81]. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Моменты инерции и податливости

Момент инерции, кг·м ²	Податливость, рад/(кг·м)	Жесткость, кг/с ²
20,0000000000*10	5,7645693326*10 ⁻⁷	1,7347349686*10 ⁶
19,3040229932*10 ⁻⁵	2,3287417371*10 ⁻⁵	4,2941644584*10 ⁴
102,1535124395*10 ⁻³	5,7301787727*10 ⁴	1,7451462505*10 ⁻⁵
93,5359920241*10 ⁻²	2,3336406678*10 ⁻⁸	4,2851498682*10 ⁷
102,1535124395*10 ⁻³	5,7301787727*10 ⁴	1,7451462505*10 ⁻⁵
93,5359920241*10 ⁻²	2,3336406678*10 ⁻⁸	4,2851498682*10 ⁷

Продолжение таблицы 2.4

Момент инерции, кг•м ²	Податливость, рад/(кг•м)	Жесткость, кг/с ²
13,1013409977*10 ⁻⁵	7,7624724568*10 ⁻⁶	1,2882493375*10 ⁵
103,1013409977*10 ⁻²	1,5099657753*10 ³	6,6226666616*10 ⁻⁴
73,0963788521*10 ⁻²	1,9903775530*10 ⁻⁸	5,0241724163*10 ⁷
102,3930100291*10 ⁻¹	5,4358767909*10 ³	1,8396296282*10 ⁻⁴
72,3925138146*10 ⁻¹	2,5759362080*10 ⁻⁹	3,8820837135*10 ⁸
13,1013409977*10 ⁻⁵	7,7624724568*10 ⁻⁶	1,2882493375*10 ⁵
103,1013409977*10 ⁻²	1,5099657752*10 ⁴	6,6226666617*10 ⁻⁵
73,0963788521*10 ⁻²	1,9903775530*10 ⁻⁸	5,0241724163*10 ⁷
102,3930100291*10 ⁻¹	5,4358767909*10 ³	1,8396296282*10 ⁻⁴
72,3925138146*10 ⁻¹	2,5759362080*10 ⁻⁹	3,8820837135*10 ⁸
11,5506704989*10 ⁻⁴	3,8812362284*10 ⁻⁵	2,5764986750*10 ⁴
20,0000000000*10	5,7639511544*10 ⁻⁷	1,7349210172*10 ⁶
83,8627085226*10	6,4159211122*10 ⁻⁸	1,5586226553*10 ⁷
11,2742299803*10	3,1929232410*10 ⁻¹⁰	3,1319262147*10 ⁹
31,8558496428*10 ²	4,5212851045*10 ⁻⁹	2,2117605435*10 ⁸
39,5843144124*10 ⁻²	3,7911813959*10 ⁻⁷	2,6377002194*10 ⁶
39,5843144124*10 ⁻²	3,7911813959*10 ⁻⁷	2,6377002194*10 ⁶
39,5843144124*10 ⁻²	3,7911813959*10 ⁻⁷	2,6377002194*10 ⁶
39,3400840466*10	5,6332266973*10 ⁻⁹	1,7751815323*10 ⁸
31,5627185884*10 ⁻¹	1,5980428430*10 ⁻⁶	6,2576545078*10 ⁵
31,5627185884*10 ⁻¹	1,5980428430*10 ⁻⁶	6,2576545078*10 ⁵
31,5627185884*10 ⁻¹	1,5980428430*10 ⁻⁶	6,2576545078*10 ⁵

Путем постепенного выделения элементов с наименьшим моментом инерции и распределения момента инерции этих элементов и податливостей между соседними элементами многомассовая модель была приведена к восьмимассовой [82].

Расчет сопротивления движению производится на всех участках ленточного конвейера. Для определения статических моментов M_2 и M_3 была применена методика, изложенная в работах [46, 82, 84-90]. Исходные данные для расчета конвейера, транспортирующего насыпной груз, приняты согласно паспортным данным исследуемого механизма:

- производительность $\Pi=250$ т/ч = 65 кг/с;
- плотность груза: $\gamma_p=0,85$ т/м³;
- трасса конвейера: длина $L=5$ м, длина участков $L_1=5$ м, $L_2=15$ м, $L_3=1$ м, $L_4=29$ м;
- угол наклона конвейера $\beta=20^\circ$.

Общий вид конвейера с делением по зонам представлен на рисунке 2.4.

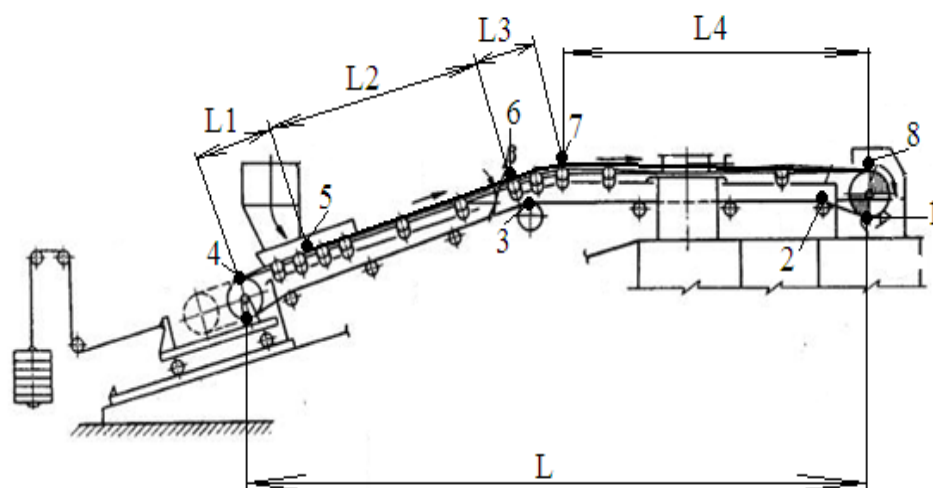


Рисунок 2.4 – Общий вид конвейера

Для определения натяжений в ленте применим метод тягового расчета по контуру, полный расчет представлен в Приложении Б. По вычисленным значениям была построена диаграмма натяжения в ленте, представленная на рисунке 2.5.

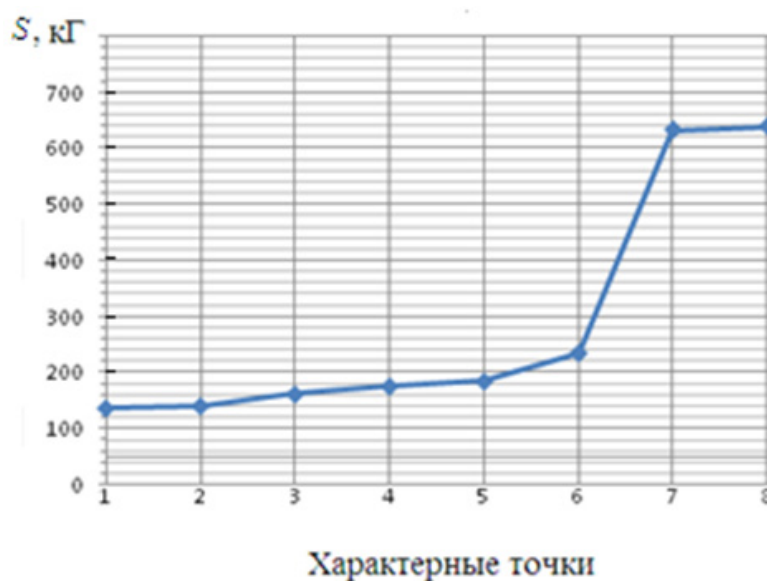


Рисунок 2.5 – Диаграмма натяжения в ленте

Перед проведением моделирования аварийных режимов на предложенной электромеханической модели был выделен ряд моделируемых режимов согласно

статистическим данным, приведенным в главе 1. К таким режимам относятся: заклинивание опорных грузонесущих роликов, заштыбовка приемного бункера, глухое заклинивание редуктора, срезание «пальцев» соединительной муфты, поломка чистителя, нарушение соосности передач редуктора. Выбранный перечень моделируемых режимов отвечает следующим требованиям:

1. Частое появление в процессе эксплуатации.
2. Значительное время устранения после локализации.
3. Отсутствие возможности постоянного визуального контроля диагностируемых узлов и агрегатов.

Для моделирования перечисленных режимов работы ленточных конвейеров был выполнен расчет и оценены величины аварийных моментов.

1. Заклинивание опорных грузонесущих роликов.

Величина прилагаемого момента рассчитывается следующим образом:

– Масса груза и ленты на одной роликоопоре (3 ролика):

$$m = m_{гр.} + m_{л} = 55,5 + 14 = 69,5 \text{ кг},$$

где $m_{гр.}$ – масса транспортируемого груза; $m_{л}$ – масса ленты.

– Сила трения при остановившемся одном ролике:

$$F_{тр} = \mu \cdot \frac{m \cdot g}{3} = 0,6 \cdot \frac{69,5 \cdot 9,8}{3} = 136 \text{ Н},$$

где μ – коэффициент трения, соответствующий трению резины о металл; m – масса ленты и груза; g – ускорение свободного падения.

– Момент, характерный для заклинивания одного опорного ролика:

$$M_{12} = \frac{F_{тр} \cdot R_{бар}}{i} = \frac{136 \cdot 0,318}{29} = 1,5 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $R_{бар}$ – радиус барабана; i – передаточное число редуктора.

2. Заштыбовка приемного бункера.

Процесс возникновения аварийного режима связан с застреванием негабаритной горной массы в приемной точке ленточного конвейера. Так же возможен вариант замедления выхода нагрузки из приемного короба, что в свою очередь способствует переполнению бункера.

Рост нагрузочного момента происходит равномерно и совпадает с производительностью конвейера. Дальнейшее развитие аварийной ситуации вызывает задавливание ленточного полотна до полной остановки. Расчет моделируемого аварийного момента выполняется с учетом следующих величин: объем приемного бункера составляет 1-1,5 м³, горная масса накапливаемая в бункере при фракции от 50 до 150 мм составит 950-1250 кг. Из данных следует, что максимальная масса груза, которая способна скопиться в приемном бункере составит 1650 кг. Исходя из этого, при ширине ленты 1200 мм, а так же площади контакта ленточного полотна с опорными роликами приемного стола ленточного конвейера величина момента составит 89 Н*м.

3. Глухое заклинивание редуктора.

Технически сложно прогнозируемый аварийный режим, так как редуктор является многоэлементной механической системой, которая в свою очередь состоит из шестерней, валов, подшипников и шпонок. Одной из основных причин возникновения данного аварийного режима является попадание твердых частиц в область механического зацепления шестерней.

Изменение величины нагрузочного момента, согласно полученным данным будет происходить в виде мгновенного нарастания момента до критических значений.

В связи с невозможностью получения величины аварийного момента экспериментально и расчетно, величина моделируемого нагрузочного момента принята равной величине момента срезания шпонки, фиксирующей шестерню на валу, с 10% запасом. Согласно полученным данным с завода изготовителя редукторов NORD величина момента срезания шпонки составляет 156 Н*м. Для опережения срабатывания защиты значение величины прилагаемого момента принято с учетом 10% запаса и составляет 140 Н*м.

4. Поломка чистителя головного барабана.

Причинами возникновения данного аварийного режима работы ленточного конвейера служат критический износ чистителя или износ узла крепления полотна чистителя к опорным стойкам ленточного конвейера.

Поломка чистителя ленточного полотна является одной из критических аварийных ситуаций, так как возможны появления тяжелых последствий, таких как продольный или поперечный порезы ленточного полотна и заштыбовка приемного бункера в результате расклинивания в пространстве бункера механических элементов конструкции чистителя.

Изменение величины нагрузочного момента, согласно полученным данным, будет происходить в виде непрерывного и продолжительного роста. Наиболее вероятная причина появления аварийного режима – попадание неразрушимого элемента в технологический зазор между головным барабаном и полотном чистителя произойдет непрерывный рост нагрузочного момента до определенной величины, причем рост будет сопровождаться колебаниями момента в связи с подклиниванием ленточного полотна.

Для рассматриваемого случая поломки чистителя головного барабана величина момента была получена экспериментально, путем принудительной поломки чистителя. Процесс поломки происходил при помощи ручной лебедки с установленным динамометром. Полученное значение аварийного момента составило 78 Н*м. Для опережения срабатывания защиты значение величины прилагаемого момента было принято с учетом 10% запаса и составило 71 Н*м.

5. Нарушение соосности передач редуктора.

Возникновение такого рода неисправности вызвано рядом причин: износ опорных подшипников, износ посадочных мест шестерней, неравномерный износ шестерней. Эти факторы приводят к смещению оси центровки шестерней, в результате чего происходит закусывание зубьев друг относительно друга. Величина момента нагрузки может быть различной по амплитудному и временному значению. На ранней стадии возникновения аварийного режима

происходят малые колебания нагрузочного момента в короткие промежутки времени. Согласно полученным с завода-изготовителя редукторов NORD данным, величина момента срезания шпонки составляет 156 Н*м. Для опережения срабатывания защиты значение величины прикладываемого момента было принято с учетом 40% запасом и составило 66 Н*м.

Произведенные расчеты параметров и величин элементов совместной электромеханической модели позволят выполнить численное построение в среде Matlab и получить диагностические критерии.

2.2.2 Исследование модели ленточного конвейера как электромеханического комплекса в среде Matlab Simulink

На основе полученных выше уравнений была составлена модель электромеханической системы электропривода конвейера в среде моделирования MATLAB Simulink [82, 115-117].

Схема модели (рисунок 2.6) составлена на базе стандартных блоков среды моделирования [82, 84, 91].

Блок виртуального осциллоскопа Scope1 предназначен для получения графика изменения питающего двигателя напряжения, блок Scope2 осуществляет визуализацию тока статора, блок Scope3 визуализирует изменение электромагнитного момента двигателя и момента нагрузки. Имитация аварийного режима работы реализуется блоками Scope4-9, каждый из которых подключен к одной из движущихся масс восьмимассовой модели [118].

В соответствии с выбранными для исследования в п. 2.2.1 аварийными ситуациями выполнялось моделирование следующих режимов: работа электропривода конвейера с номинальной нагрузкой с последующим поочередным заклиниванием одного, двух и трех роликов грузонесущей части; заштыбовка приемного бункера; глухое заклинивание редуктора; срезание «пальцев» соединительной муфты; поломка чистителя; нарушение соосности передач редуктора [118].

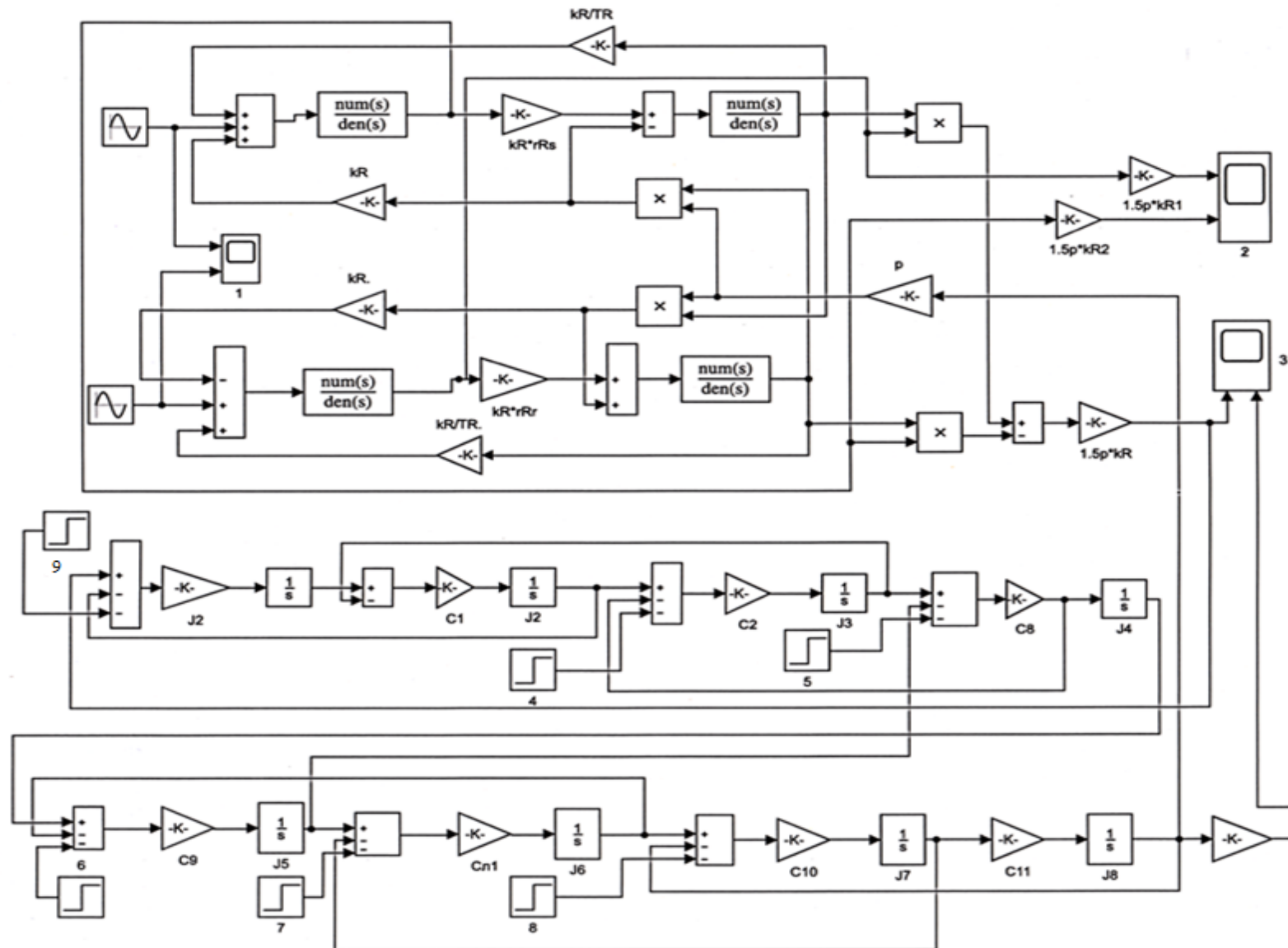


Рисунок 2.6 Блок-схема модели электромеханической системы ленточного конвейера

При моделировании были получены следующие результаты:

1. Номинальный режим работы привода с последующим поочередным заклиниванием одного, двух и трех опорных роликов.

Моделирование заклинивания одного ролика реализуется путем скачкообразного приложения добавочного момента с помощью блока St*10p 4. На рисунке 2.7 показана зависимость тока статора двигателя от времени, на рисунке 2.8 приведены графики для угловой скорости ротора и момента двигателя.

Расчетная величина момента при заклинивании одного ролика составляет $M_{12}=1,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рисунок 2.7, 2.8).

Режимы с заклиниванием двух и трех опорных роликов в целом аналогичны режиму с заклиниванием одного ролика. Приложение аварийных моментов производилось на четвертой и шестой секундах работы механизма. Однако, установлено, что величина характерного момента после заклинивания для этих режимов больше, чем в случае заклинивания одного ролика. Значение M_{12} , составляет 3 Н·м и 4,5 Н·м соответственно для ситуаций заклинивания двух и трех роликов.

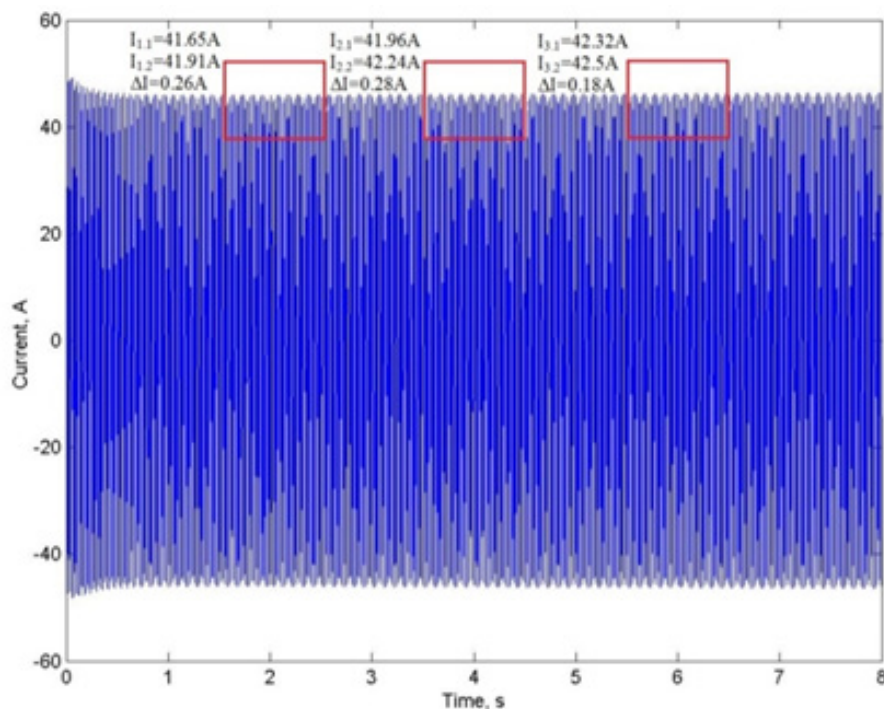


Рисунок 2.7– Значение тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink ($I_{1.1}$, $I_{2.1}$, $I_{3.1}$ –ток статора до приложения аварийного момента; $I_{1.2}$, $I_{2.2}$, $I_{3.2}$ – ток статора после приложения аварийного момента)

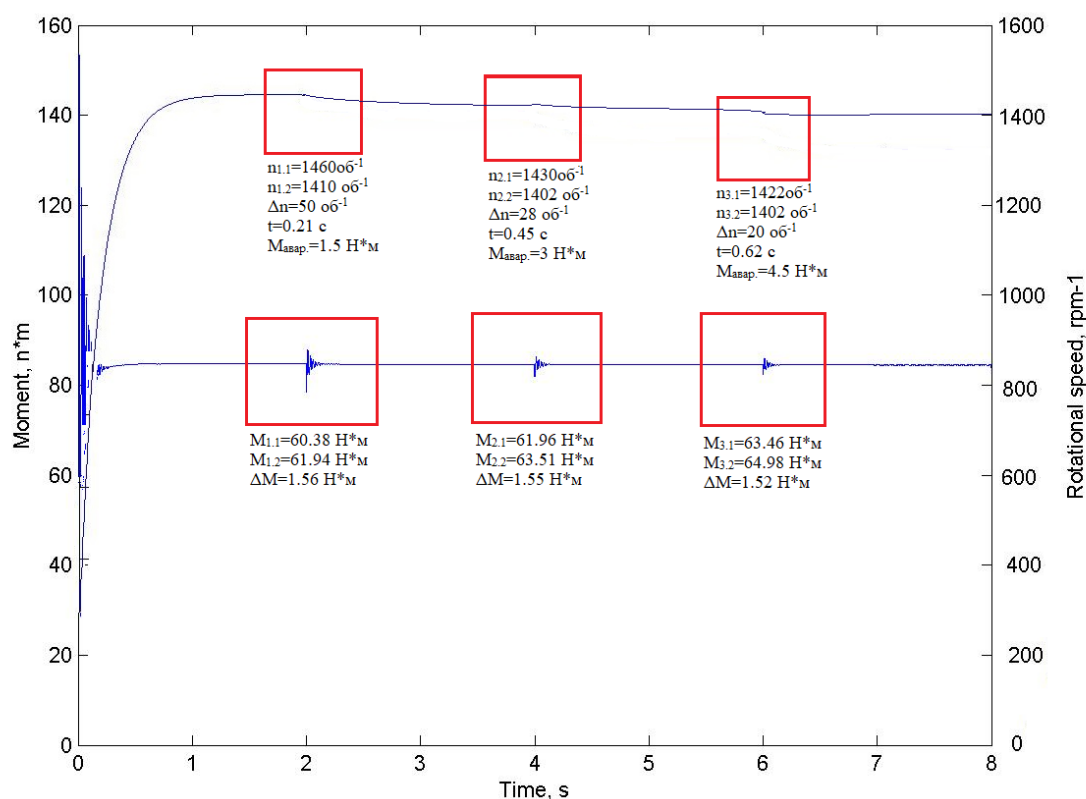


Рисунок 2.8 – Значение момента и угловой скорости асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink (t – время переходного процесса; $M_{авар.}$ – величина прилагаемого аварийного момента; $n_{1,1}$, $n_{2,1}$, $n_{3,1}$ – скорость ротора до приложения аварийного момента; $n_{1,2}$, $n_{2,2}$, $n_{3,2}$ – скорость ротора после приложения аварийного момента $M_{1,1}$, $M_{2,1}$, $M_{3,1}$ – крутящий момент электродвигателя до приложения аварийного момента; $M_{1,2}$, $M_{2,2}$, $M_{3,2}$ – крутящий момент электродвигателя после приложения аварийного момента)

Из графиков, показанных на рисунках 2.7, 2.8, видно, что заклинивание грузонесущих роликов сопровождается изменением величины тока статора. При заклинивании одного опорного ролика грузонесущей части ток увеличивается на 0,26 А, при заклинивании двух опорных – на 0,28 А, при заклинивании трех – на 0,18 А. При этом происходит уменьшение угловой скорости: для случая с заклиниванием одного опорного ролика на 50 об/мин, двух – на 28 об/мин и трех – на 20 об/мин. Время переходного режима составляет 0,21 с для первого моделируемого режима, 0,45 с во втором случае и 0,62 с при трех заклиненных роликах.

2. Заштыбовка приемного бункера. Процесс сопровождается накоплением транспортируемого материала в приемном бункере с его

последующим переполнением. График на рисунке 2.9 показывает изменение тока статора; кривые на рисунке 2.10 показывают изменение угловой скорости и момента. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели – блок St*10р 8. Величина прилагаемого момента по предварительной оценке принята 89 Н*м .

Из графиков, представленных на рисунках 2.9, 2.10, видно, что протекание при заштыбовке приемного бункера происходит скачок тока статора на $1,8 \text{ А}$. При этом происходит снижение угловой скорости на 928 об/мин . Время переходного режима составляет $1,86 \text{ с}$.

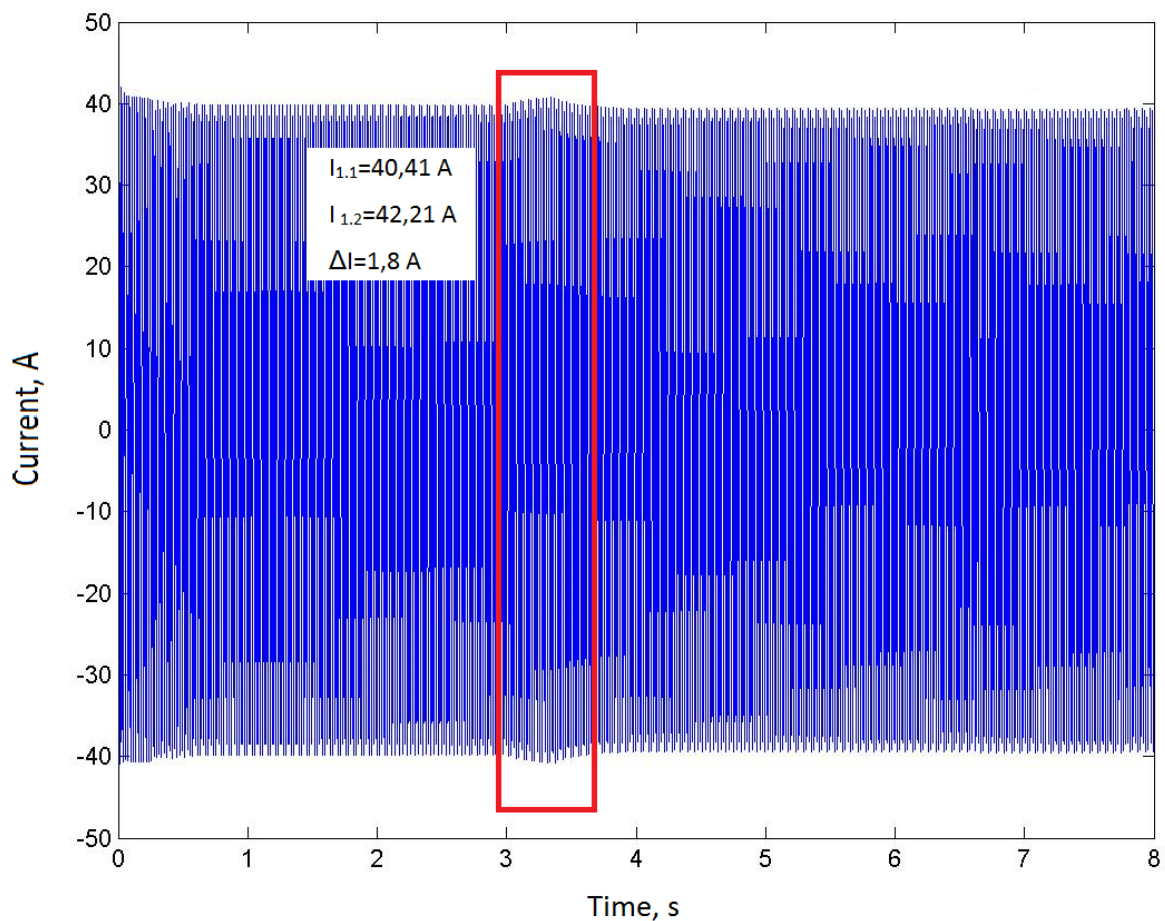


Рисунок 2.9– Значение тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при заштыбовке приемного бункера момента

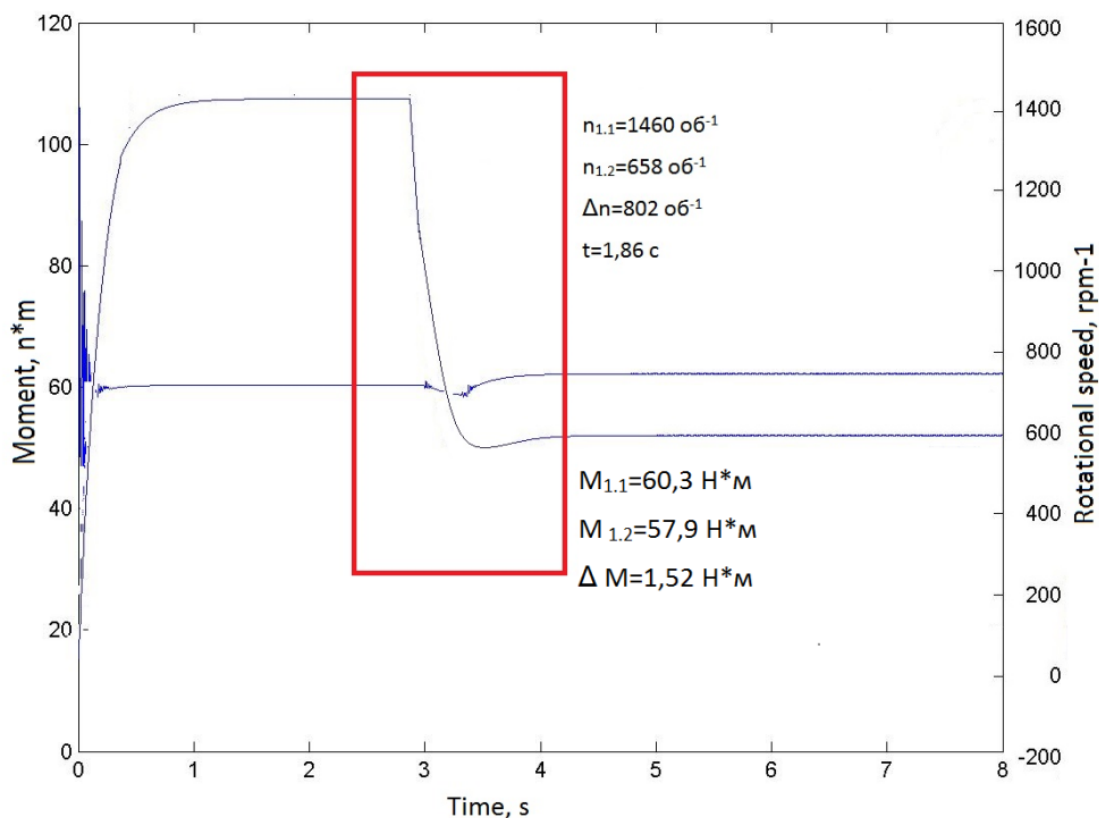


Рисунок 2.10 – Значение момента и угловой скорости асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при заштыбовке приемного бункера момента

3. Глухое заклинивание редуктора. Такое заклинивание обычно вызывается попаданием инородных тел между зубцами передач, критичное нарушение соосности, выкрашивание зубьев шестерней. Результаты исследования данного режима на модели представлены на рисунках 2.11 и 2.12. График на рисунке 2.11 показывает изменение тока статора; кривые на рисунке 2.12 показывают изменение угловой скорости и момента. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели – блок St*10p 9. Величина прилагаемого момента оценена как $140 \text{ Н}^*\text{м}$.

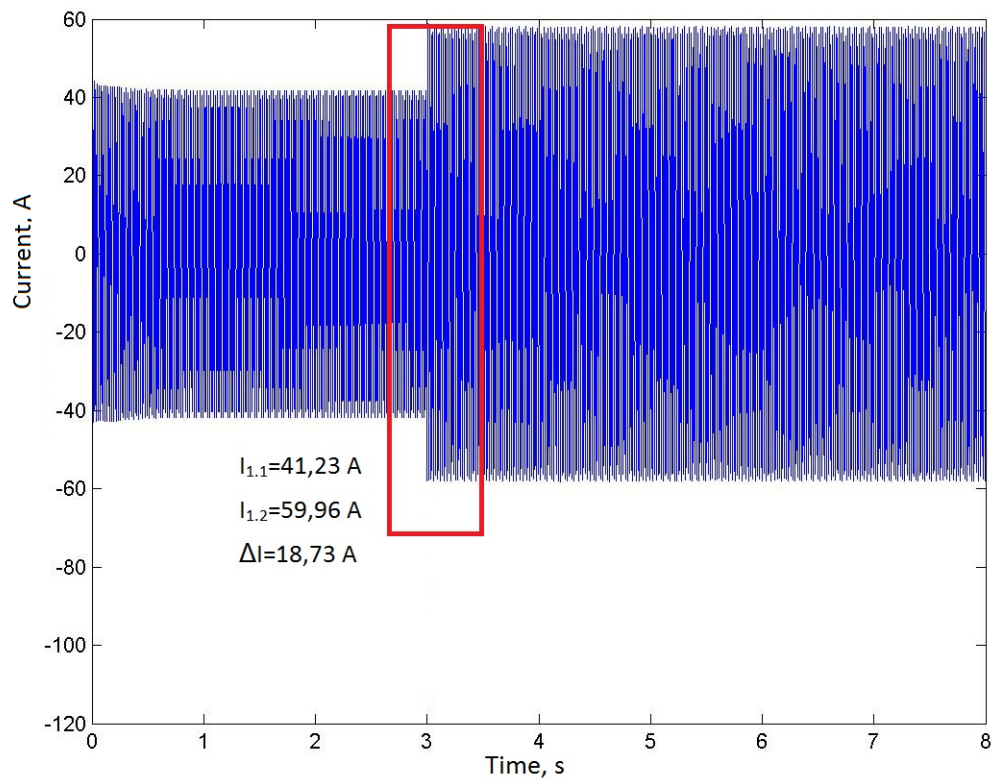


Рисунок 2.11– Значение тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink режима глухого заклинивания редуктора

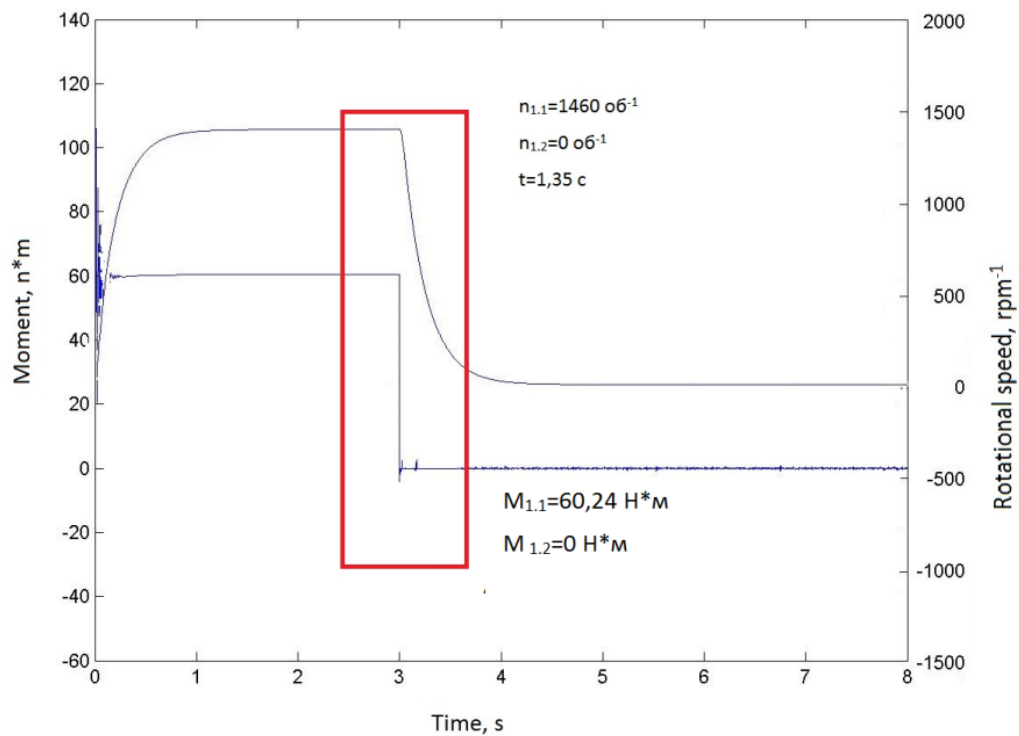


Рисунок 2.12 – Значение момента и угловой скорости асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при глухом заклинивании редуктора

Из графиков, представленных на рисунках 2.11, 2.12, видно, что глухое заклинивание редуктора сопровождается ростом тока статора на 19 А. При этом происходит снижение угловой скорости до отрицательных значений. Время переходного режима составляет 1,35 с.

4. Поломка чистителя возникает вследствие неправильной установки чистителя, значительного его износа, а также налипания на него транспортируемого материала в зимние периоды эксплуатации. Полученные результаты моделирования для данного режима представлены на рисунках 2.13 и 2.14. График на рисунке 2.13 показывает изменение тока статора; кривые на рисунке 2.14 показывают изменение угловой скорости и момента. Место приложение добавочного момента в рассматриваемой модели соответствует блоку St*10p 9. Величина прилагаемого момента оценена как 71 Н*м.

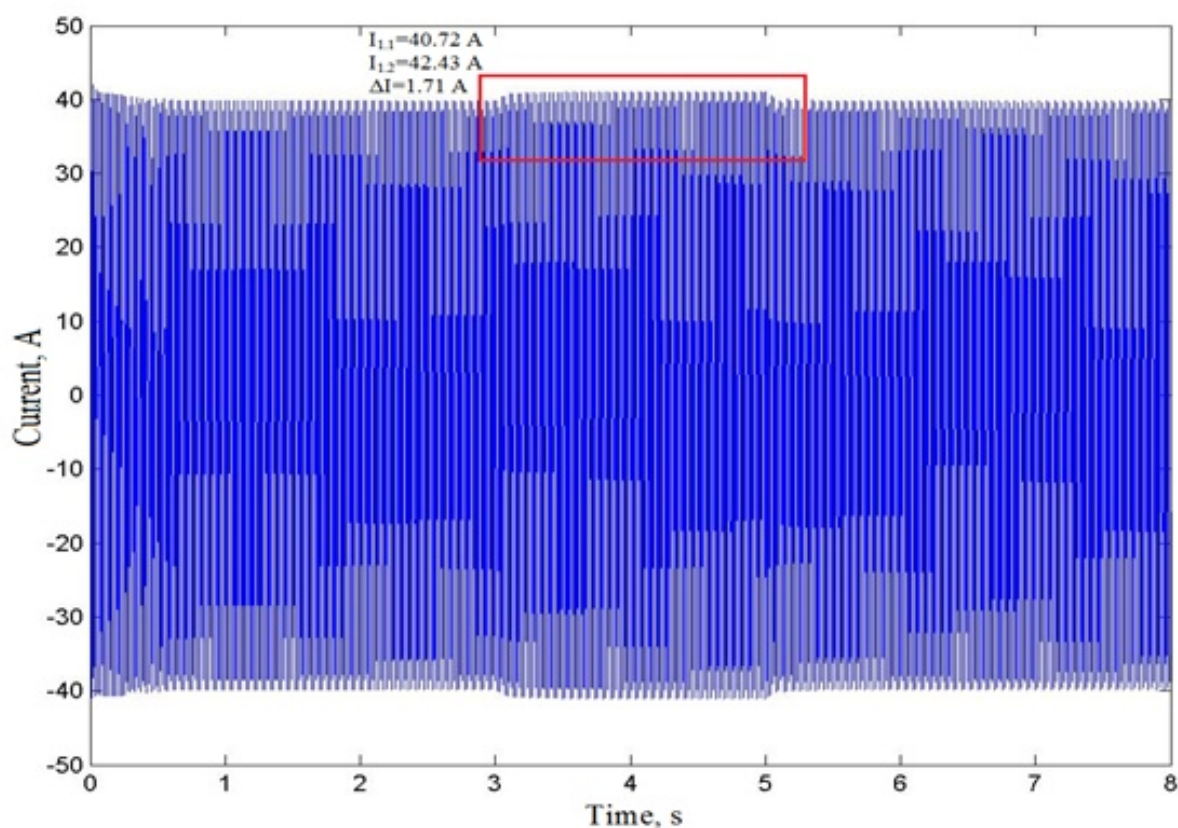


Рисунок 2.13– Значение тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при поломке чистителя

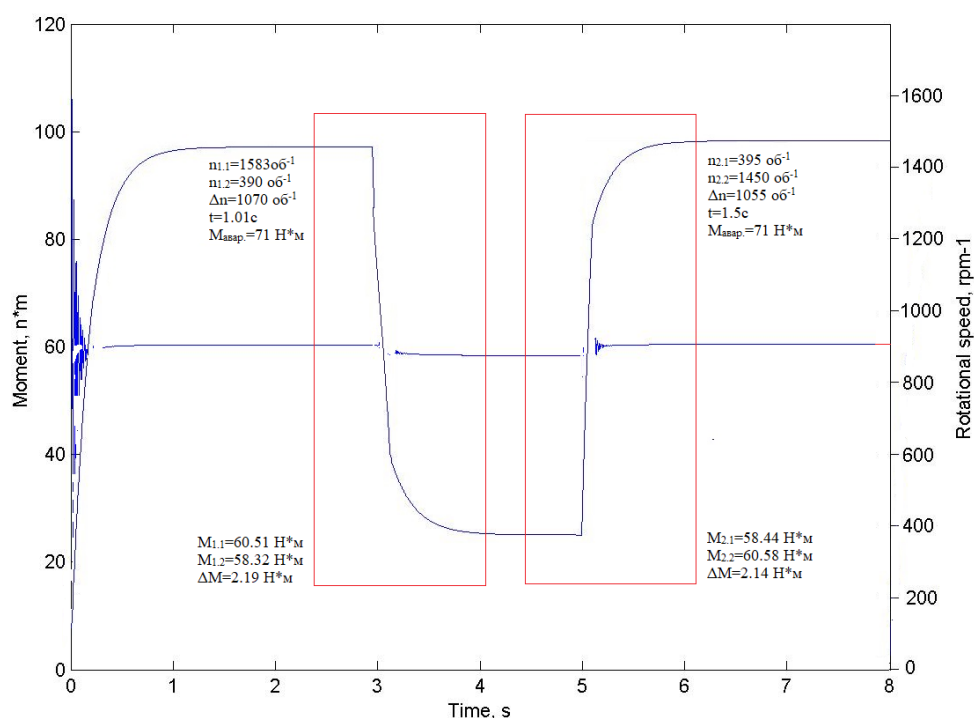


Рисунок 2.14 – Значение момента и угловой скорости асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при поломке чистителя

По результатам моделирования режима поломки чистителя рост тока статора составил 1,71 А. Одновременно с ростом тока происходит снижение угловой скорости на 1070 об/мин. Время переходного процесса составляет 1,01 с. Далее следует возврат нормального режима работы приводного двигателя без нагрузки с пятой секунды моделирования. Время переходного режима составляет 1,5 с.

5. Нарушение соосности передач редуктора обычно вызвано износом опорных подшипников передач редуктора, а также неправильной центровкой в момент сборки агрегата на заводе-изготовителе. Результаты моделирования данного режима представлены в виде графиков на рисунках 2.15, 2.16. На рисунке 2.15 показано изменение тока статора при поломке чистителя; кривые на рисунке 2.16 показывают изменение угловой скорости и момента. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели соответствует блоку St*10p 9. Величина прилагаемого момента оценена как 66 Н*м.

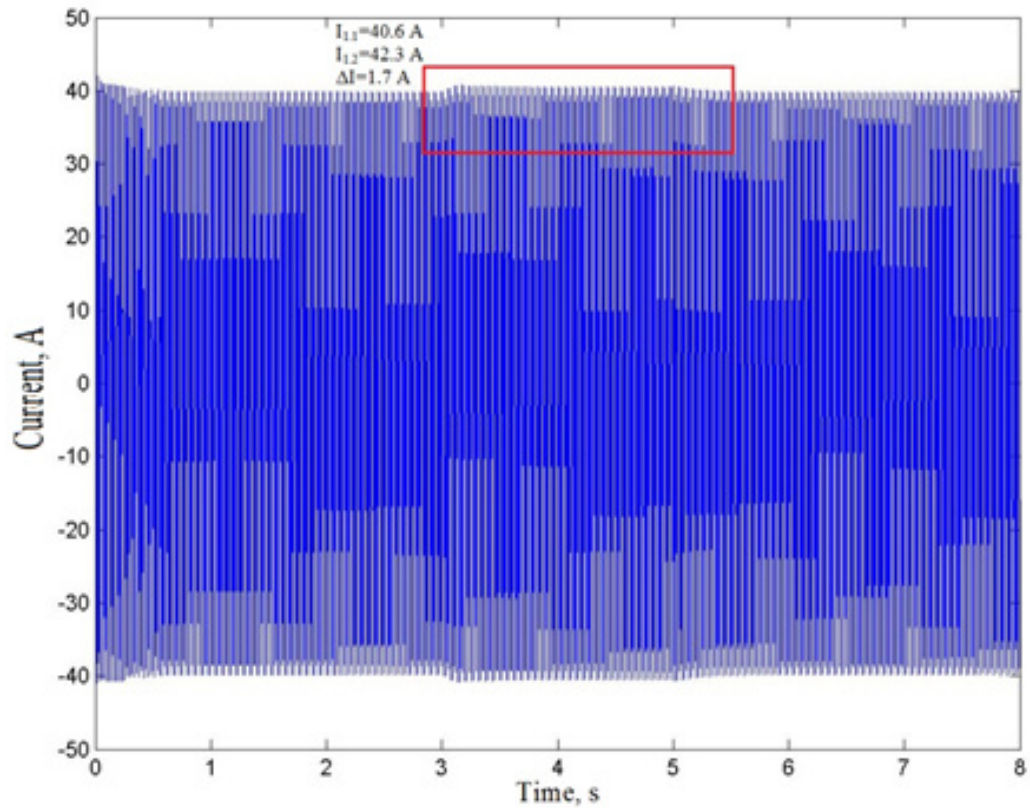


Рисунок 2.15– Значение тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при нарушении соосности передач редуктора

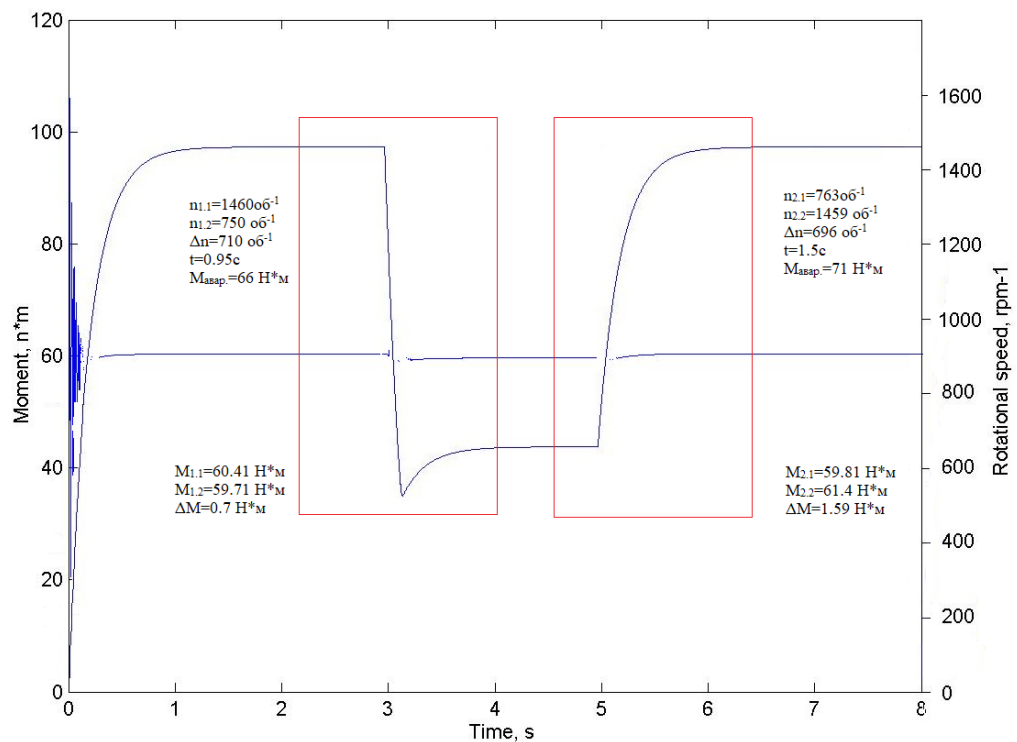


Рисунок 2.16 – Значение момента и угловой скорости асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при нарушении соосности передач редуктора

При моделировании режима нарушения соосности передач редуктора рост тока статора составил 1,7 А. При этом происходит снижение угловой скорости на 710 об⁻¹. Время переходного режима составляет 0,95 с. Далее следует возврат нормального режима работы асинхронного электродвигателя без нагрузки с 5 с моделирования. Время переходного режима составляет 1,5 с.

Таким образом, исходя из результатов модельного исследования можно сделать вывод о том, что ток статора АД характерным образом изменяется при возникновении аварийных ситуаций и, следовательно, отслеживание его изменения может быть использовано для выявления этих ситуаций. При этом период, частота и форма колебаний тока зависят от конкретного вида неисправности, произошедшего в механической части ленточного конвейера. В связи с тем, что колебательный процесс протекает с определенной частотой и амплитудой, полученный объем данных требует дополнительного частотно-временного анализа диагностического сигнала. Для этого выберем метод оконного преобразования Фурье и вейвлет-анализ.

2.2.3 Частотный анализ токового сигнала с помощью вейвлет-анализа

Переходные процессы тока статора асинхронного электродвигателя при возникновении аварийных режимов имеют сложную форму, при этом выделение диагностических критериев и признаков при малых амплитудах и периодах гармонических составляющих является сложной технической задачей. Однако современные системы автоматизации, применяемые на предприятиях, позволяют организовать анализ контролируемого токового сигнала посредством вейвлет-анализа.

Необходимо учитывать, что, для достоверного воспроизведения нестационарных сигналов требуется бесконечное количество гармоник. При анализе типового сигнала типа «меандр» эффект Гиббса не уменьшается с

увеличением числа гармоник, но колебания становятся более высокочастотными [92].

Как было указано выше, для анализа нестационарных сигналов существует несколько методов, наиболее распространенными из которых являются метод оконного преобразования Фурье и метод вейвлет-анализа. Результаты применения первого метода обычно содержат существенные по величине погрешности, так как невозможно получить одновременное хорошее разрешение по времени и частоте, и улучшение одного из параметров приводит к ухудшению другого [93]. По этой причине наиболее подходящим методом в рассматриваемом случае будет непрерывное прямое вейвлет-преобразование, в котором функция сигнала $s(t)$ перемножается на базис, и преобразование выполняется для каждого участка времени. При выделении в сигналах хорошо локализованных разномасштабных процессов можно рассматривать те масштабные уровни разложения, которые представляют интерес.

Непрерывное прямое вейвлет-преобразование производится на основе следующего выражения:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \alpha^{-1/2} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt, \quad (2.10)$$

где $C(a,b)$ – вейвлет-коэффициенты; a – параметр масштаба; b – параметр времени; $\psi_{a,b}$ – базисная функция.

Большие значения a соответствуют низким частотам, а меньшие значения b – высоким [93]. Существует также обратное вейвлет-преобразование, которое позволяет обеспечить точную или грубую реконструкцию сигнала на заданном промежутке времени, и определяемое как:

$$s(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} C(a,b) \psi(a,b,t) da db, \quad (2.11)$$

где C_ψ – константа, определяемая функцией ψ .

Условие конечности ограничивает набор функций, которые можно использовать в качестве вейвлетов:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} (|\psi(\omega)|^2 / \omega) d\omega \quad (2.12)$$

В связи с вышеизложенным, можно прийти к выводу о том, что анализ сигнала тока статора приводного асинхронного электродвигателя с использованием непрерывного вейвлет-преобразования может дать необходимый объем информации для выявления диагностического критерия.

Как было указано выше, моделирование аварийных режимов в механопроводе ленточного конвейера выполнены в среде Matlab Simulink. Этот программный продукт имеет в своем составе программный пакет Wav*10l*10t Toolbox. Указанный пакет позволяет выполнять вейвлет-преобразование как в командном режиме, так и в диалоговом режиме по интерфейсу GUI (редактор Wav*10l*10t)

Таким образом, вейвлет-преобразование позволяет производить частотно-временной анализ нестационарных процессов результирующего вектора токов статора. Полученные сигналы токов статора были подвергнуты разложению с помощью стандартных методов вейвлет-анализа, представленных в Wav*10l*10t Toolbox: вейвлеты Хаара, симлеты, биортогональные вейвлеты и т.д. Наиболее детальное разложение токового сигнала было получено в результате применения метода Мейера.

Результаты разложения сигналов обобщенного вектора тока статора приведены на рисунке 2.17.

Анализ поведения отдельных составляющих сигнала обобщенного вектора тока статора при заклинивании разного количества опорных роликов ленточного конвейера на графиках с разным детализирующим коэффициентом показал, что при возникновении аварийной ситуации в случае последовательного заклинивания одного, двух и трех опорных роликов грузонесущей части ленточного конвейера в сигнале тока появляется колебательный процесс контролируемой величины. При этом основными отличительными признаками сигналов тока статора на всех кривых с различными детализирующими коэффициентами (d1- d5), является амплитуда и период колебаний. При этом для

кривых ($d1$, $d2$) значение амплитуды больше, чем для кривых ($d4$, $d5$). Период колебаний исследуемого сигнала больше для кривых ($d4$, $d5$). Очевидно, что сигнал на уровнях ($d4$, $d5$) более информативен, а, следовательно, возможно получение более детальной информации о возникшей неисправности. При этом сигналы тока на уровнях $d3$ и s дают представление о диагностическом признаке.

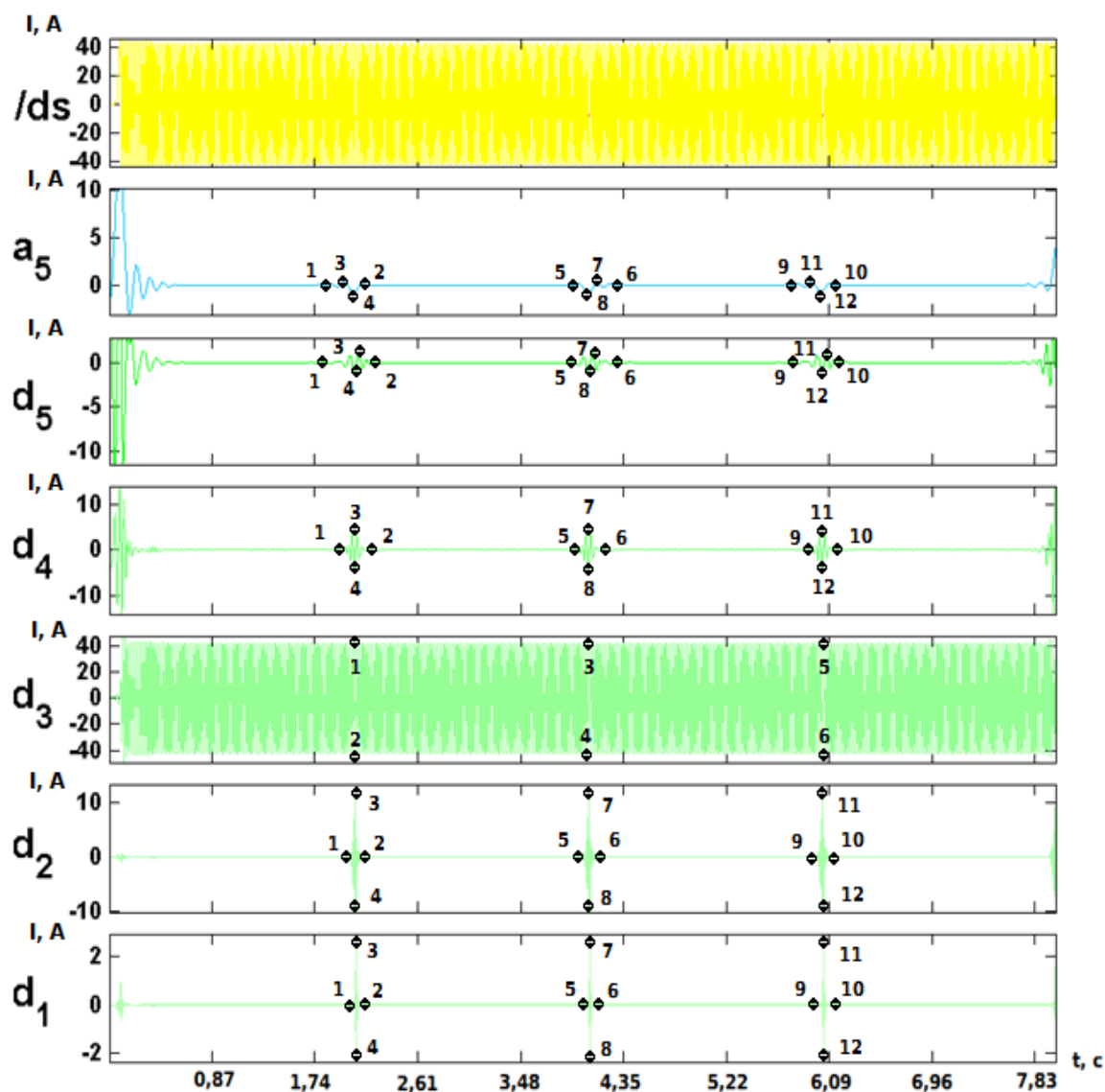


Рисунок 2.17 – Осциллограмма тока статора при заклинивании опорных роликов в модели ленточного конвейера и разложение ее на составляющие ($a5$ – тренд токового сигнала; ds – исходный токовый сигнал; $d1$ – токовый сигнал с коэффициентом детализации 2300; $d2$ – токовый сигнал с коэффициентом детализации 1195; $d3$ – токовый сигнал с коэффициентом детализации 628; $d4$ – токовый сигнал с коэффициентом детализации 344)

Конкретные значения составляющих при моделировании аварийных режимов представлены в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Значения составляющих сигнала в характерных точках при моделировании заклинивания роликов грузонесущей части ленточного конвейера

		Составляющие вектора тока					
		a5	d5	d4	d3	d2	d1
Точки на осциллограмме модуля тока статора в моменты заклинивания роликов грузонесущей ветви ленточного конвейера	t, с	1.06	1.06	1.94	2.06	2	2.05
	I, A	0	0	0	44.28	0	0
	t, с	2.49	2.49	2.31	2.07	2.15	2.12
	I, A	0	0	0	-46.88	0	0
	t, с	1.98	2.12	2.06	4.04	2.08	2.09
	I, A	0.27	0.99	3.98	44.28	13.17	2.93
	t, с	2.06	2.08	2.08	4.02	2.08	2.08
	I, A	-0.86	-1.06	-4.48	-46.54	-9.94	-2.31
	t, с	3.78	3.78	3.9	6.03	3.98	4
	I, A	0	0	0	44.28	0	0
	t, с	4.62	4.62	4.28	6.02	4.13	4.1
	I, A	0	0	0	-46.88	0	0
	t, с	4.12	4.09	4.02	-	4.05	4.07
	I, A	0.32	1.17	3.84	-	13.38	2.94
	t, с	4.05	4.05	4.04	-	4.05	4.05
	I, A	-0.83	-0.98	-4.44	-	-10.02	-2.36
	t, с	5.51	5.51	5.86	-	5.97	5.99
	I, A	0	0	0	-	0	0
	t, с	6.41	6.41	6.23	-	6.11	6.08
	I, A	0	0	0	-	0	0
	t, с	5.94	6.06	6.02	-	6.03	6.03
	I, A	0.32	1.02	3.84	-	13.38	2.94
	t, с	6.03	6.03	6.05	-	6.03	6.03
	I, A	-0.86	-1.03	-4.39	-	-10.06	-2.36

На рисунке 2.19 изображены графики составляющих сигнала, восстановленных из коэффициентов декомпозиции уровней d1-d5, а также исходный сигнал ds и тренд сигнала a5, полученный вычитанием из исходного сигнала составляющих, восстановленных по коэффициентам разложения (d1=2330; d2=1195; d3=628; d4= 344; d5=202; a5=202; s=4901).

Полученные графики на всех уровнях имеют колебательный характер с последующим затуханием и переходом к нормальному режиму. Это связано с тем,

что маховая масса заклиненного ролика несоизмеримо мала по сравнению с маховой массой всей механической системы ленточного конвейера. По этой причине мгновенное заклинивание ролика дает локальный всплеск, который в дальнейшем демпфируется инерционными элементами, в частности приводным электродвигателем. Демпфирование будет происходить, пока суммарное значение нагрузочного момента заклинивания ролика не превысит примерно 20% от величины момента, создаваемого приводным электродвигателем.

Данные о реально возникающих ситуациях заклинивания опорных роликов дают основания для получения диагностических признаков путем вейвлет-разложения токового сигнала для других аварийных режимов работы ленточного конвейера. Для получения данных о поведении сигнала тока было выполнено разложение для следующих аварийных ситуациях: нарушение соосности передачи редуктора, поломка чистителя, срезание пальцев соединительной муфты, глухое заклинивание редуктора, заштыбовка приемного бункера. Осциллограммы вейвлет-разложения для указанных случаев показаны на рисунках 2.20–2.24. Детализация участков аварийных режимов по амплитуде и периоду колебаний представлена в таблице 2.6.

Расчет периода колебаний при возникновении аварийного режима выполнен на основе составляющей вектора тока d_5 . Определение амплитудных значений составляющих сигнала тока выполнено на основе составляющей вектора тока d_2 . С использованием данных обеих осциллограмм возможно определить начальный момент возникновения аварийного режима и момент достижения максимального амплитудного значения тока. Выделение указанного признака позволяет организовать предиктивную систему диагностирования и использовать указанный признак в алгоритмах функциональной диагностики состояния механической части ленточного конвейера.

Для оптимизации способа функциональной диагностики механической части ленточного конвейера формируется библиотека из полученных результатов (таблица 2.6), где каждому признаку соответствует определенная неисправность.

Таблица 2.6 – Диагностические критерии аварийных режимов работы механической части ленточного конвейера

Моделируемый режим работы	Коэф. детализации	Значения			Примечание
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	
Заштыбовка приемного бункера (рисунок 2.20)	d2	[10,2; -10,4]	[9,84;-9,91]	[11,64;-11,32]	Приложение моделируемого значения осуществлялся с учетом периодической протяжки транспортируемого материала ленточным конвейером
	d5 (сек.)	[2,81–3,15]	[3,91–4,26]	[6,46–7,15]	
Нарушение соосности передач редуктора или биение в опорных подшипниках шестерней (рисунок 2.21)	d2	[11,54;-12,36]	-	-	Приложение моделируемого значения осуществлялся с учетом возможного биения в шестернях или опорных подшипниках
	d5 (сек.)	[4,81–5,31]	-	-	
Поломка чистителя (рисунок 2.22)	d2	[9,48;-10,12]	[10,48;-12,36]	-	Процесс поломки прогнозировался с возможным попаданием чистителя между опорными конструкциями конвейера и ленточным полотном
	d5 (сек.)	[2,74–3,12]	[4,78–5,22]	-	
Глухое заклинивание редуктора (рисунок 2.24)	d2	[10,34;-10,01]	-	-	Колебательный процесс на всех коэффициентах детализации продолжается до момента остановки
	d5 (сек.)	[2,72]	-	-	

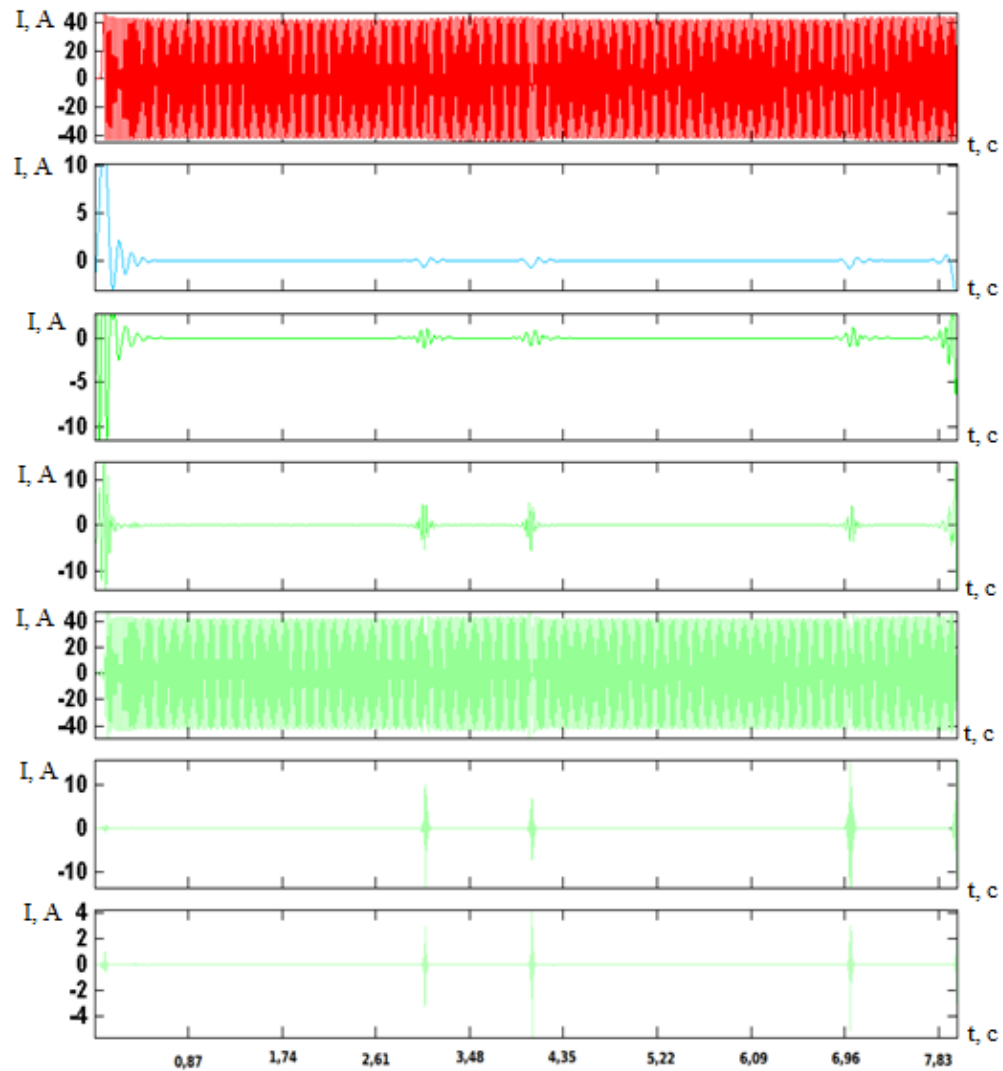


Рисунок 2.18 – Модельная осциллограмма тока статора при заштыбовке приемного бункера ленточного конвейера и разложение ее на составляющие

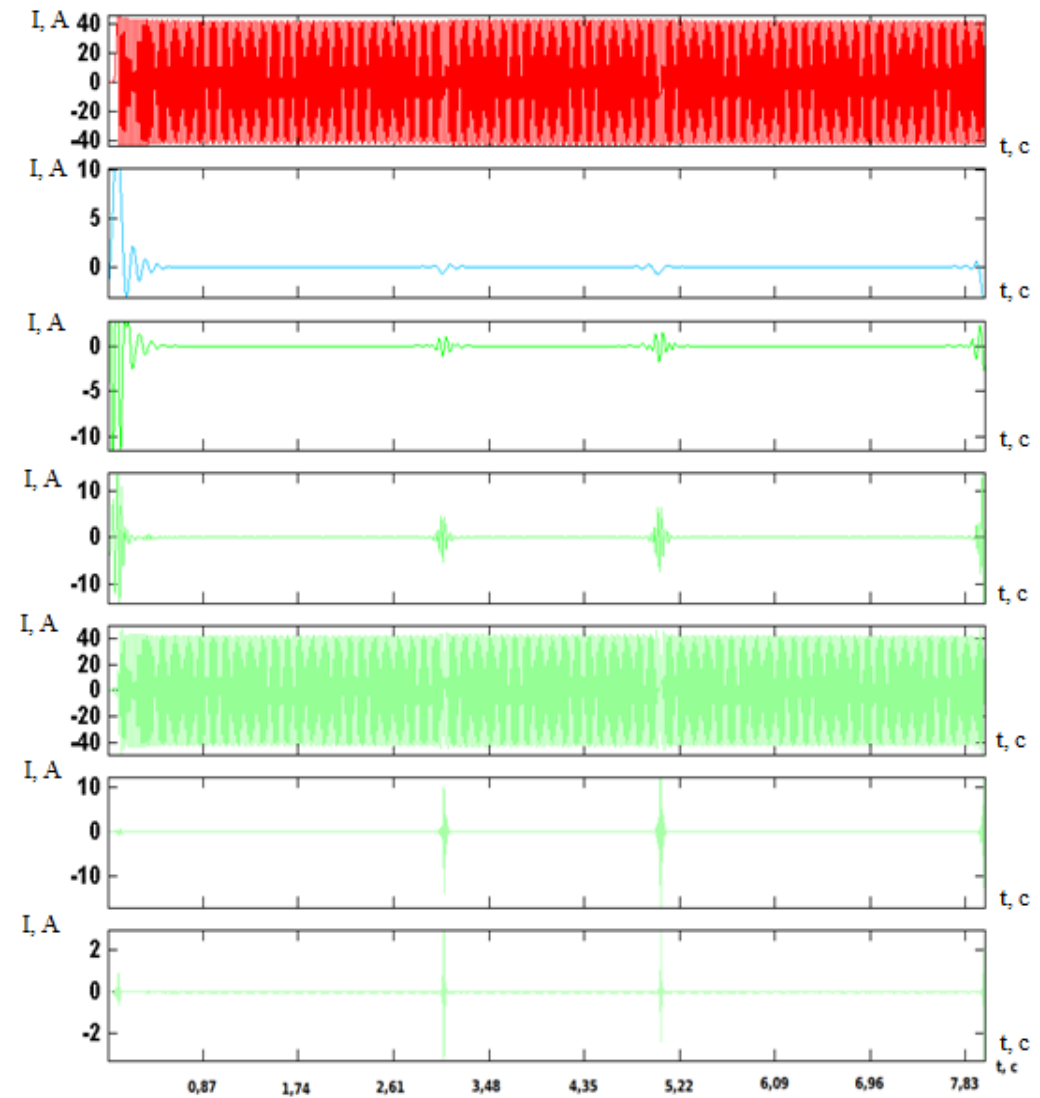


Рисунок 2.19 – Модельная осциллограмма тока статора при нарушении соосности передач редуктора и разложение ее на составляющие

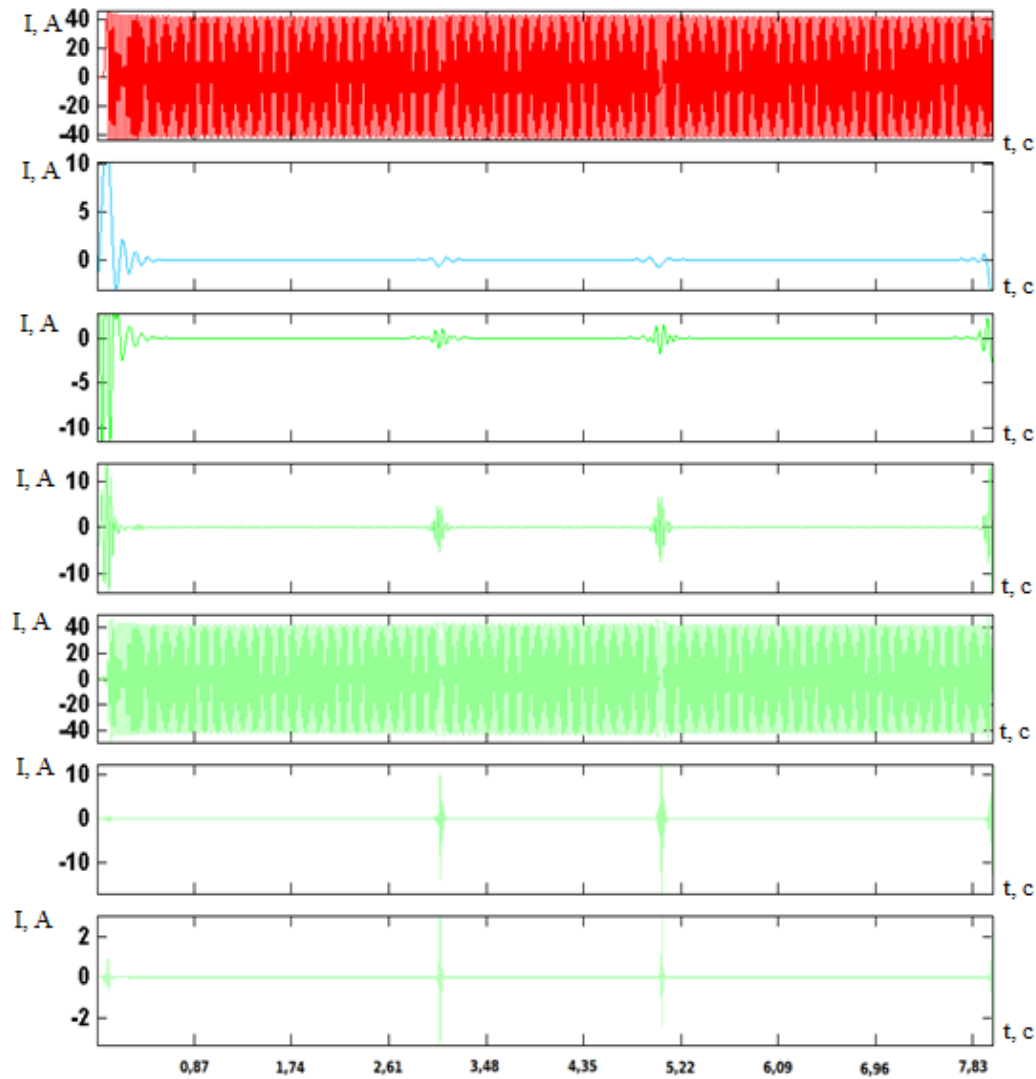


Рисунок 2.20 – Модельная осциллограмма тока статора при поломки чистителя и разложение ее на составляющие

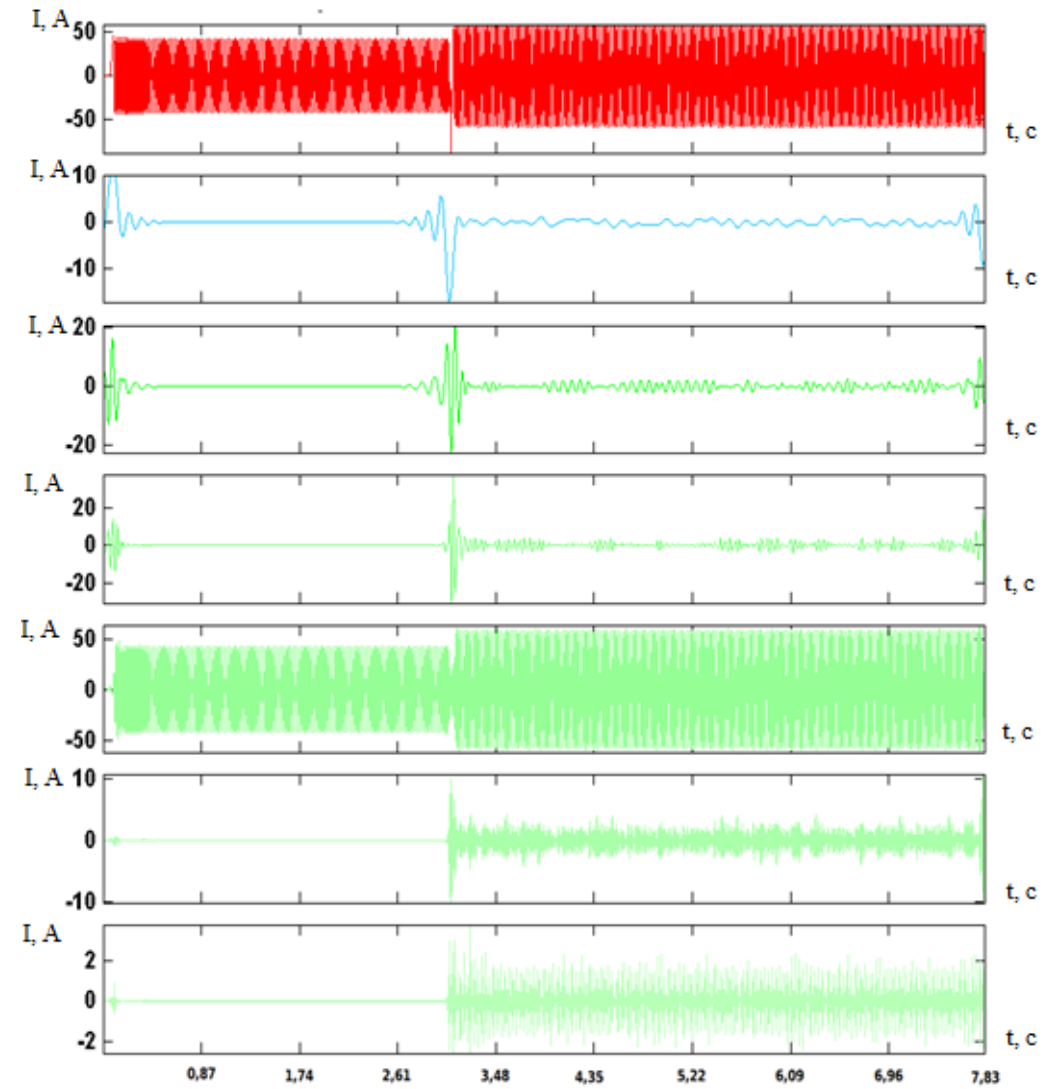


Рисунок 2.21 – Модельная осциллограмма тока статора при заклинивании редуктора и разложение ее на составляющие

2.3 Результаты исследования изменений величины тока статора приводного электродвигателя при моделирование аварийных ситуаций ленточных конвейеров Обоганительной фабрики «Черниговская- Коксовая» ЗАО «Черниговец» с использованием совместной модели электромеханического комплекса

В технологической цепочке обогащения на предприятии ОФ «Черниговская –Коксовая» задействовано 27 ленточных конвейеров различной длины и мощности приводного электродвигателя. Сведения о ленточных конвейерах представлены в таблице 2.7 и показаны на рисунке 2.22.

Таблица 2.7 – Сведения о ленточных конвейерах на предприятии ОФ «Черниговская–Коксовая»

		Мощность приводного электродвигателя, кВт				
		4	22	45	132	200
Длина ленточного полотна, м	5	1	-	-	-	-
	10	1	1	-	-	-
	20	2	4	-	-	-
	30	-	1	-	-	-
	50	-	2	-	-	-
	70	-	-	2	2	-
	80	-	3	-	-	-
	90	-	-	4	-	-
	300	-	-	-	1	2
	500	-	-	-	1	-

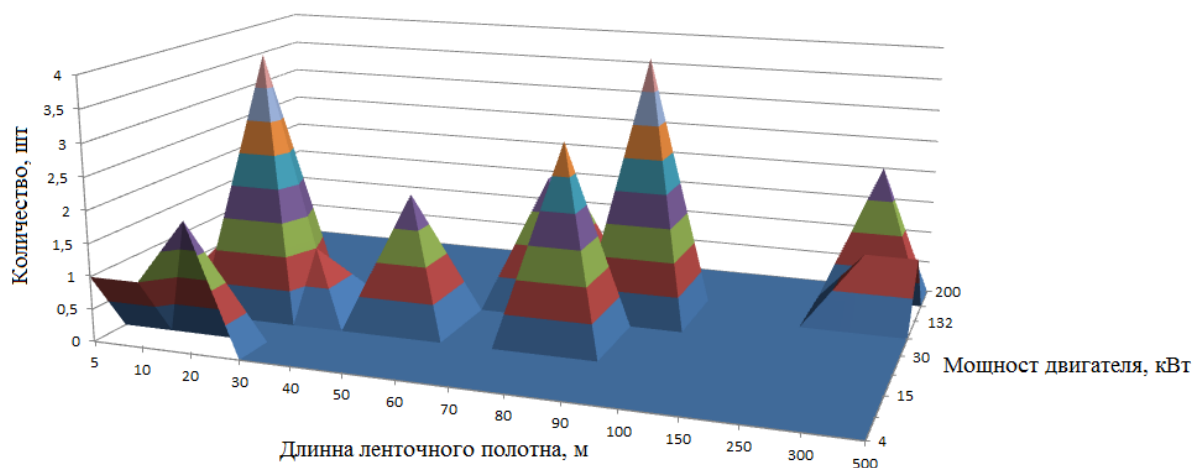


Рисунок 2.22 - Сведения о ленточных конвейерах на предприятии ОФ «Черниговская-Коксовая»

С использованием предложенной электромеханической модели ленточного конвейера было выполнено моделирование ситуаций заклинивания грузонесущих роликов. Моделирование произведено для выборки конвейеров, представленной в таблице 2.8. В таблице 2.9 представлены параметры двигателей конвейеров, использованные при моделировании.

Таблица 2.8 – Технические параметры ленточных конвейеров ОФ «Черниговская-Коксовая», для которых выполнено моделирование аварийных ситуаций

Техн. позиция	Длина ленточного полотна (м)	Мощность и тока электродвигателя (кВт/А)	Ширина ленточного полотна (мм)
20	280	132/264	1400
901	80	22/44	1200
51	68	45/90	1200
52	68	45/90	1200
134	17	22/44	1200
136/2	17	4/8	1400
243	11	4/8	1400
851	74	132/264	1400

Таблица 2.9 – Параметры приводных двигателей исследованных конвейеров

Техн. позиция	ΔI (А)	t (с)	ΔI (%)	ΔI (А)	t (с)	ΔI (%)	ΔI (А)	t (с)	ΔI (%)
20	0,15	0,11	0,05	0,18	0,11	0,07	0,2	0,12	0,08
901	0,26	0,2	0,59	0,27	0,44	0,61	0,18	0,52	0,41
51	0,21	0,19	0,23	0,18	0,19	0,20	0,25	0,19	0,28
52	0,19	0,18	0,21	0,21	0,16	0,23	0,21	0,23	0,23
134	0,23	0,21	0,52	0,25	0,3	0,57	0,23	0,38	0,52
136/2	0,16	0,31	2	0,13	0,32	1,63	0,14	0,32	1,75
243	0,15	0,31	1,87	0,12	0,32	1,50	0,13	0,33	1,63
851	0,16	0,12	0,06	0,19	0,10	0,07	0,2	0,12	0,08

В представленной выборке из 8-ми ленточных конвейеров прослеживается увеличение контролируемого параметра тока статора. Увеличение амплитудных значений тока статора по отношению к номинальному значению составило 0,05%-1,87%.

Минимальное значение отклонение тока статора составило 0,12А, максимальное значение отклонения составило 0,27А для ленточного конвейера с мощностью приводного электродвигателя 44А. Среднее значение отклонения

значений тока статора для одного заклиненного ролика составило 0,18А и, соответственно, период изменения 0,2 с для двух заклиненных роликов 0,19А и период 0,24; для трех заклиненных роликов 0,19А и период 0,27 с.

Выборка охватывает большинство ленточных конвейеров, эксплуатируемых на крупных предприятиях. Объем результатов, представленных в таблицах 2.7 и 2.9, позволяет определить статические зависимости между величинами мощности приводного электродвигателя, протяженностью ленточного конвейера и отклонением контролируемой величины тока статора.

Диаграмма рассеяния для данных, представленных в таблице 2.7 в соотношении к длине ленточного конвейера и мощности приводного электродвигателя, представлена на рисунке 2.23.

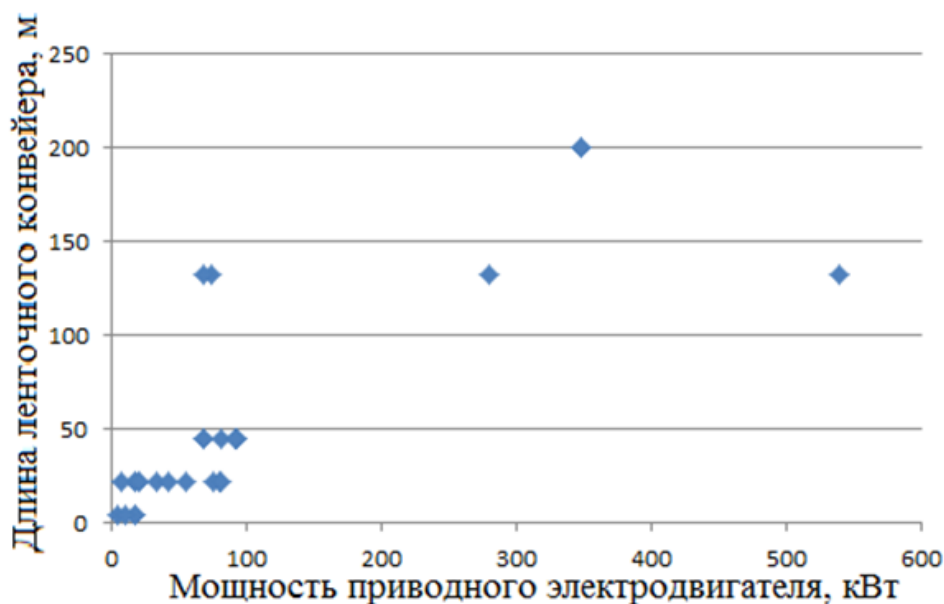


Рисунок 2.23 – Диаграмма рассеяния для таблицы 2.7

По расположению точек на диаграмме возможно предположить наличие линейной зависимости между мощностью приводного электродвигателя и длиной ленточного конвейера.

Опытные распределения случаев возникновения аварийных ситуаций для значений мощности приводного электродвигателя и длины ленточного конвейера представлены в таблицах 2.10 и 2.11.

Таблица 2.10 – Распределение количества возникающих аварийных ситуаций в зависимости от значений мощности приводного электродвигателя

Параметр	Значение				
P, кВт (х)	4	22	45	132	200
n _i	4	11	6	4	2

Таблица 2.11 – Распределение количества возникающих аварийных ситуаций в зависимости от длины ленточного конвейера

Параметр	Значение									
L, м (у)	5	10	20	30	50	70	80	90	300	500
n _i	1	2	6	1	2	4	3	4	3	1

Количественные характеристики распределения величин мощности приводного электродвигателя и длины ленточного конвейера приведены в таблице 2.12 [78].

Таблица 2.12 – Количественные характеристики распределения величин мощности приводного электродвигателя и длины ленточного конвейера

Наименование	Выражение	Значение для P	Значение для L
Статистическое среднее значение	$\bar{x} = \frac{\sum (n_i \cdot x_i)}{\sum n_i}; \bar{y} = \frac{\sum (n_i \cdot y_i)}{\sum n_i}$	53,95	94,63
Дисперсия	$D_x = \frac{\sum n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}{\sum n_i}; D_y = \frac{\sum n_i \cdot (y_i - \bar{y})^2}{\sum n_i}$	3285,85	13257,21
Среднеквадратичное отклонение	$\sigma_x = \sqrt{D_x}; \sigma_y = \sqrt{D_y}$	57,32	115,14
Корреляционный момент	$K_{xy} = \frac{\sum n_{ij} \cdot x_i \cdot y_j}{\sum n_{ij}} - \bar{x} \cdot \bar{y}$	5153,3	
Коэффициент линейной корреляции	$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$	0,78	
Коэффициент детерминации	$R^2 = \left(\frac{K_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \right)^2$	0,61	

Наличие связей между величиной мощности приводного электродвигателя и длиной ленточного полотна можно оценить по шкале Чеддока. Согласно шкале,

связь между мощностью приводного электродвигателя и длиной ленточного конвейера высокая.

Уравнение линейной регрессии имеет вид [78]:

$$y = r_{xy} \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}) + \bar{y}, \quad (2.13)$$

или, с учетом численных значений, $y = 1,567x + 10,11$.

Таким образом, при увеличении мощности на 1 кВт транспортирующая способность повышается на 1,56 м. График на диаграмме рассеяния имеет вид, представленный на рисунке 2.24.

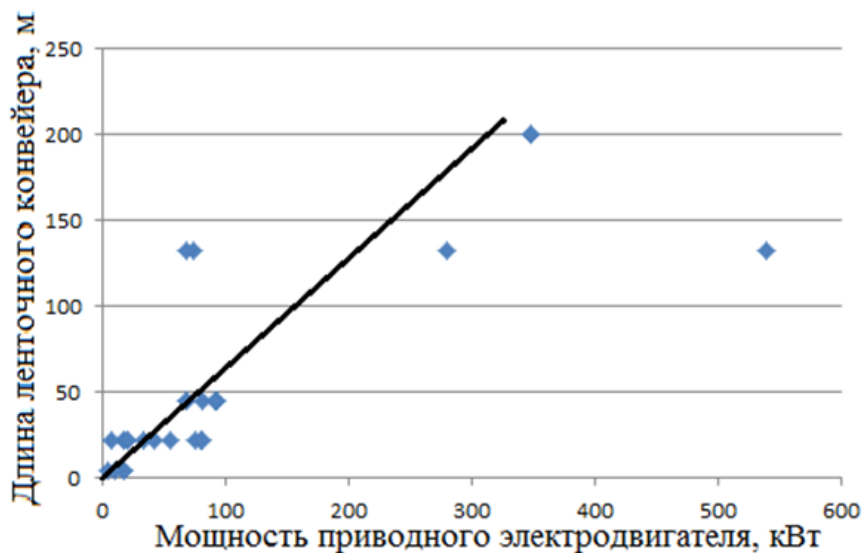


Рисунок 2.24 – Диаграмма рассеяния и график регрессии

Исследуем статистическую зависимость между мощностью приводного электродвигателя и увеличением тока статора электродвигателя при появлении одного заклиненного ролика грузонесущей части.

Проверим зависимость указанных факторов с помощью корреляционного момента $K_{XY} = M(XY) - M(X)M(Y)$ [78]. Значение статистических средних, дисперсий и среднеквадратичных отклонений для мощности приводного электродвигателя и тока статора приводного электродвигателя при появлении одного заклиненного ролика грузонесущей части представлены (таблица 2.12). Значение выборочных характеристик приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Числовые характеристики распределений величин мощности приводного электродвигателя и увеличение тока статора при появлении одного заклиненного ролика грузонесущей части

Наименование	Выражение	Значение для Р для 1-го заклиненного ролика	Значение для Р для 2-го заклиненного ролика	Значение для Р для 3-го заклиненного ролика
Статистическое среднее значение	$\bar{x} = \frac{\sum (n_i \cdot x_i)}{\sum n_i};$	33,86	35,99	37,14
Выборочные корреляционные моменты	$K_x = \frac{\sum n_{ij} \cdot x_i}{\sum n_{ij}} - \bar{x}$	13,11	15,52	17,14
Коэффициент линейной корреляции	$r_x = \frac{K_x}{\sigma_x}$	0,27	0,31	0,33

Согласно шкале Чеддока, связь между мощностью приводного электродвигателя и увеличением тока статора весьма умеренная.

Полученные коэффициенты корреляции в таблице 2.13 позволяют прогнозировать увеличение действующего значения тока статора приводного асинхронного электродвигателя при заклинивании одного, двух и трех роликов грузонесущей части. При последовательном заклинивании роликов грузонесущей части виден рост связи между мощностью электродвигателя и током статора, от слабой к умеренной. Из данных видно, что связь станет заметной при появлении 14 заклиненных роликов, это составляет <10% от общего количества роликов грузонесущей части для рассматриваемого случая.

2.4 Выводы

1. При моделировании следует рассматривать механическую часть ленточного конвейера и приводной асинхронный электродвигатель как единую электромеханическую систему.

2. Несмотря на то что, линейная система сколь угодно высокого порядка ведет себя в переходном процессе в основном так же, как и система второго или третьего порядка, представление механической системы в виде восьмимассовой модели обусловлено необходимостью реализации приложения аварийного момента в требуемых точках системы, соответствующего конкретному аварийному режиму работы ленточного конвейера. Использование описания электрической части в α - β координатах связано с возможностью наиболее простой идентификации действующего значения тока статора.
3. Изменения момента нагрузки в системе электропривода, вызванные возникшими аварийными ситуациями, приводят к характерному изменению электрических величин в системе электропривода, в частности, тока статора машины, что может быть использовано в качестве диагностического критерия.
4. Данные, полученные в ходе модельных исследований, свидетельствуют о возможности распознавания аварийных режимов по изменению тока статора, для конкретизации аварийного режима получены диагностические признаки. Для определения предаварийных режимов работы механизма ленточного конвейера с низкими отклонениями контролируемой величины возможно применение вейвлет-анализа.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Целью экспериментальных исследований является проверка диагностических признаков возникновения аварийных ситуаций в механической части ленточных конвейеров, полученных в ходе модельных исследований с использованием модели конвейера как единого электромеханического комплекса.

3.1 Моделирование аварийных режимов работы механизма ленточного конвейера на действующем предприятии

Для исследования был выбран ленточный конвейер типа НЕ-К, для которого в главе 2 было выполнено моделирование аварийных ситуаций. Конвейер используется для транспортировки угольного концентрата на обогатительной фабрике «Черниговская-Коксовая» ЗАО «Черниговец».

В электроприводе данного конвейера использован преобразователь частоты типа Altivar 71. В нем реализованы необходимые защиты двигателя и блокировки, алгоритмы регулирования и т.д., а также возможность измерения и передачи по промышленной сети основных параметров двигателя.

Функциональная схема фиксации регистрируемых параметров с помощью преобразователя частоты и ПЛК представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Функциональная схема фиксации регистрируемых параметров

Так как работа ленточного конвейера связана с транспортировкой угольного концентрата, то масса груза на ленте может изменяться во времени. Для учета колебаний нагрузки конвейера используются поточно-транспортные весы (Milltronics MMI, класс точности 0,5, предельно допустимая погрешность от измеряемой величины $\pm 0,25\%$). В период моделирования аварийных режимов работы нагрузка конвейера изменялась в пределах $\pm 1,5$ кг/м.

Перед определением необходимой частоты фиксации контролируемых значений были определены технические условия и временные промежутки, характерные для электромеханической системы ленточного конвейера. Процесс фиксации можно разделить на три временных промежутка (рисунок 3.2).

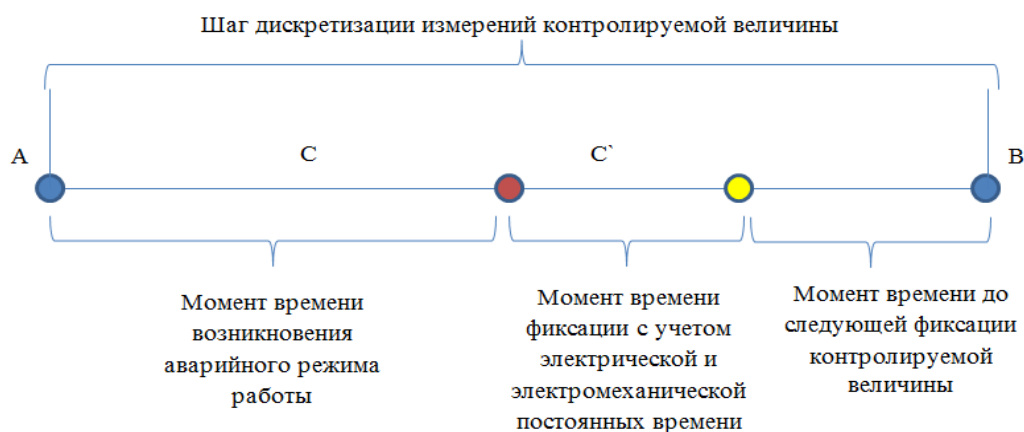


Рисунок 3.2 – Процесс фиксации аварийного режима при заданном шаге дискретизации 1с

Процесс фиксации контролируемой величины тока статора зависит от нескольких временных промежутков: электрическая составляющая (время за которое фиксируется отклонение контролируемой величины по измерительным цепям) и составляет около 0,05с, механическая составляющая (которая учитывает прохождения колебания аварийного момента по механическим связям ленточного конвейера) и составляет около 0,7 с. Суммарное время от момента возникновения аварийного режима работы до момента регистрации средствами измерения, таким образом, составляет около 0,75 с. Для натурного эксперимента были приняты

интервалы дискретизации 0,5 с и 1 с с параллельной фиксацией. В первом случае при шаге 0,5 с ограничение сервера по объему сохраненных данных на единицу оборудования произошло через 48 часов; во втором, соответственно через 96 часов, при этом было диагностировано одинаковое количество событий. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что система фиксации с шагом дискретизации в 1 с достаточна для применения на реальных объектах.

Предварительно перед началом натурных экспериментов была определена величина момента холостого хода ленточного конвейера [94-98]. Для этого до начала экспериментов были проведены измерения собственных моментов вращения на холостом ходу отдельных элементов (роликов, барабанов) ленточного конвейера. Каждый эксперимент проводился с повторением в двадцать измерений. Измерения производились согласно схеме, представленной на рисунке 3.3.

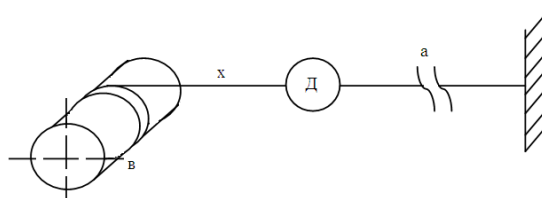


Рисунок 3.3 – Схема измерения моментов вращения роликов и барабанов: а - место приложения усилия, в – элемент с определяемым моментом вращения ролик, момент которого замеряется, х – трос (6*7+FC) диаметр 3 мм, Д- динамометр (ДМУ-Н/Т-КМГ4)

Были выполнены следующие эксперименты: измерение момента холостого хода головного барабана; измерение холостого хода хвостового барабана; измерение момента холостого хода грузонесущего ролика (ε_x – относительная погрешность; α – абсолютная погрешность). Результаты экспериментов приведены ниже.

1. Результаты измерения момента холостого хода головного барабана:

$$M = (60,002 \pm 0,35) \text{ Н} \cdot \text{м}; \varepsilon_x = 0,59; \alpha = 0,11.$$

2. Результаты измерения холостого хода хвостового барабана:

$$M = (60,003 \pm 0,47) \text{ Н} \cdot \text{м}; \varepsilon_x = 0,77; \alpha = 0,33.$$

3. Результаты измерения момента холостого хода грузонесущего ролика:

$$M = (29,003 \pm 0,37) \text{ Н} \cdot \text{м}; \varepsilon_x = 1,27; \alpha = 0,16.$$

После определения собственных моментов инерции отдельных элементов был рассчитан момент холостого хода ленточного конвейера при приведении к валу электродвигателя. При общем количестве роликов грузовой и холостой ветвей 150 и 20 штук соответственно полный момент холостого хода конвейера с учетом передаточного числа и КПД редуктора составляет 6,94 Н·м при приведении к валу приводного электродвигателя.

Величина момента холостого хода механизма ленточного конвейера была подтверждена опытным путем. Схема измерения показана на рисунке 3.4.

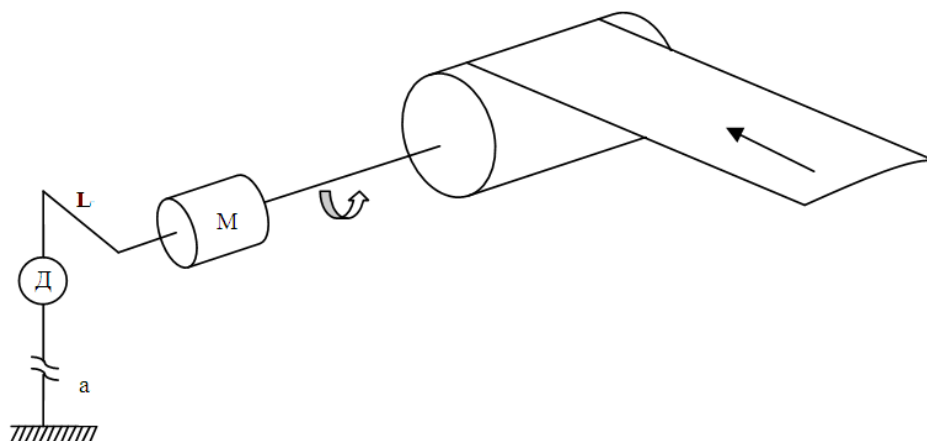


Рисунок 3.4 – Схема измерения моментов вращения механизма ленточного конвейера: а – место приложения усилия, L – длина рычага (0,6 м), М – электродвигатель, Д – динамометр ДПУ-0,1-2

Для этого был произведен демонтаж крыльчатки вентилятора охлаждения двигателя. Вращение вала двигателя со стороны крыльчатки проводилось при помощи рычага длиной 0,6 м. Использовался динамометр ДПУ-0,1-2. Также была выполнена серия из двадцати замеров. Результаты эксперимента (момент вращения механизма ленточного конвейера):

$$M = (6,917 \pm 0,14) \text{ Н} \cdot \text{м}; \varepsilon_x = 2,12; \alpha = 0,061.$$

Величина момента холостого хода составила 6,48 Н·м.

Некоторые аварийные ситуации невозможно воспроизвести на реальном объекте. К ним относятся следующие режимы: глухое заклинивание редуктора, заштыбовка приемного бункера и обрыв ленточного полотна.

В ходе натурных экспериментов на реальном объекте воспроизводились следующие режимы:

1. Номинальный режим работы ленточного конвейера при полной загрузке. Режим работы сопровождается транспортировкой расчетного объема транспортируемого материала. Дефекты в узлах и агрегатах механизма отсутствуют.

2. Работа ленточного конвейера при 100 %-ой загрузке концентратом и последовательное заклинивание одного, двух, трех опорных роликов грузонесущей части конвейерного става. Регистрация контролируемых параметров приводного электродвигателя производилась после принудительной остановки одного, двух и трех роликов.

3. Сход ленты в процессе работы с номинальной загрузкой и задевание защитного желоба разгрузочной телеги. Уход ленты со штатной траектории воспроизводился путем изменения положения вертикального направляющего ролика.

4. Заклинивание одного опорного ролика грузонесущей ветви и ослабление натяжения ленточного полотна. Ослабление натяжения ленты достигалось за счет ослабления усилия фрикционного натяжителя.

В ходе экспериментов при помощи преобразователя частоты Altivar 71 фиксировались следующие величины: действующее значение тока статора двигателя, частота и напряжение питающей сети, выходные частота и напряжение преобразователя. В качестве регистрирующих элементов в преобразователе используются датчики тока (ЛАН 100-Р) с точностью измерения $\pm 0,25\%$. Замер контролируемых величин реализуется преобразователем с частотой один раз в секунду.

На рисунке 3.5 приведена схема исследуемого ленточного конвейера с указанием мест локализации воспроизводимых аварийных ситуаций.

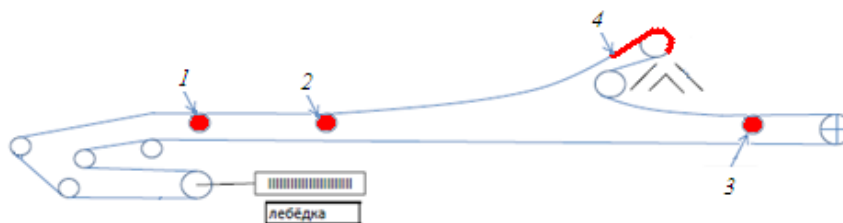


Рисунок 3.5– Схема ленточного конвейера

1 точка – заклинивание одного опорного ролика; 2 точка – заклинивание второго опорного ролика; 3 точка – заклинивание третьего опорного ролика; 4 точка – задевание ленточного полотна о кожух разгрузочной телеги

1. Предварительное исследование номинального режима работы ленточного конвейера при 100%-ой загрузке.

На рисунке 3.6 показано действующее значение тока статора при работе ленточного конвейера при номинальной 100% загрузке. Замеры величины тока статора производился один раз в секунду.

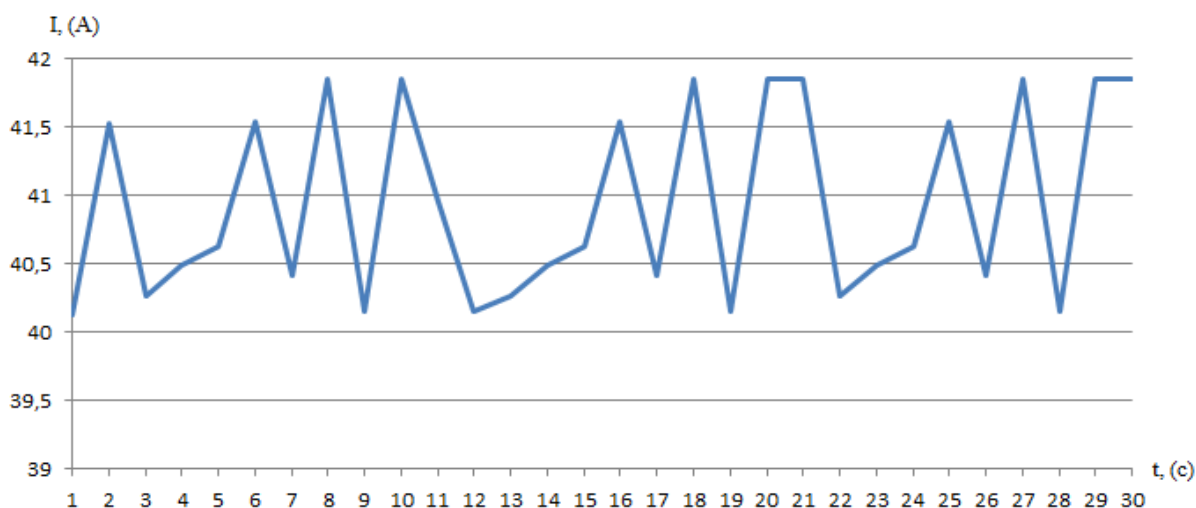


Рисунок 3.6 – Изменение тока статора при работе ленточного конвейера при номинальной 100% загрузке

Колебания тока статора вызваны следующими причинами:

- колебание толщины слоя транспортируемого насыпного груза на ленте. Согласно данным поточно-транспортных весов, колебания массы груза на ленте в процессе работы составляют $\pm 1,5$ кг/м;
- налипание транспортируемого груза на роlikоопорах;
- отклонение ленточного полотна в процессе движения от продольной оси конвейера.

2. Моделирование режимов заклинивания одного, двух и трех роликов грузонесущей части конвейерного става при 100%-ой загрузке ленточного конвейера.

Фиксируемые частотным преобразователем значения фазного тока статора с момента пуска в нормальном режиме работ со 100% нагрузкой и далее, при последовательном заклинивании одного, двух и трех опорных роликов показаны на рисунке 3.7. Отдельно на рисунке 3.7 выделен интервал времени после заклинивания первого опорного ролика. Заклинивание первого опорного ролика происходит в момент времени 37 с на рисунке 3.7. В момент времени 56 с происходит заклинивание второго опорного ролика. В момент времени 78 с происходит заклинивание третьего опорного ролика. На рисунке 3.8 приведены значения тока статора электродвигателя на интервалах движения после заклинивания первого, второго и третьего опорных роликов. Изменение величины действующего значения тока статора составило порядка $\approx 0,2$ А при заклинивании одного опорного ролика. При заклинивании двух и трех опорных роликов увеличение значение тока статора ставило $\approx 0,4$ А и $\approx 0,6$ А соответственно. Время протекания переходного процесса изменения контролируемой величины тока статора после заклинивания опорных роликов составляет $\approx 3 \div 4$ с при установленной частоте замера тока один раз в секунду.

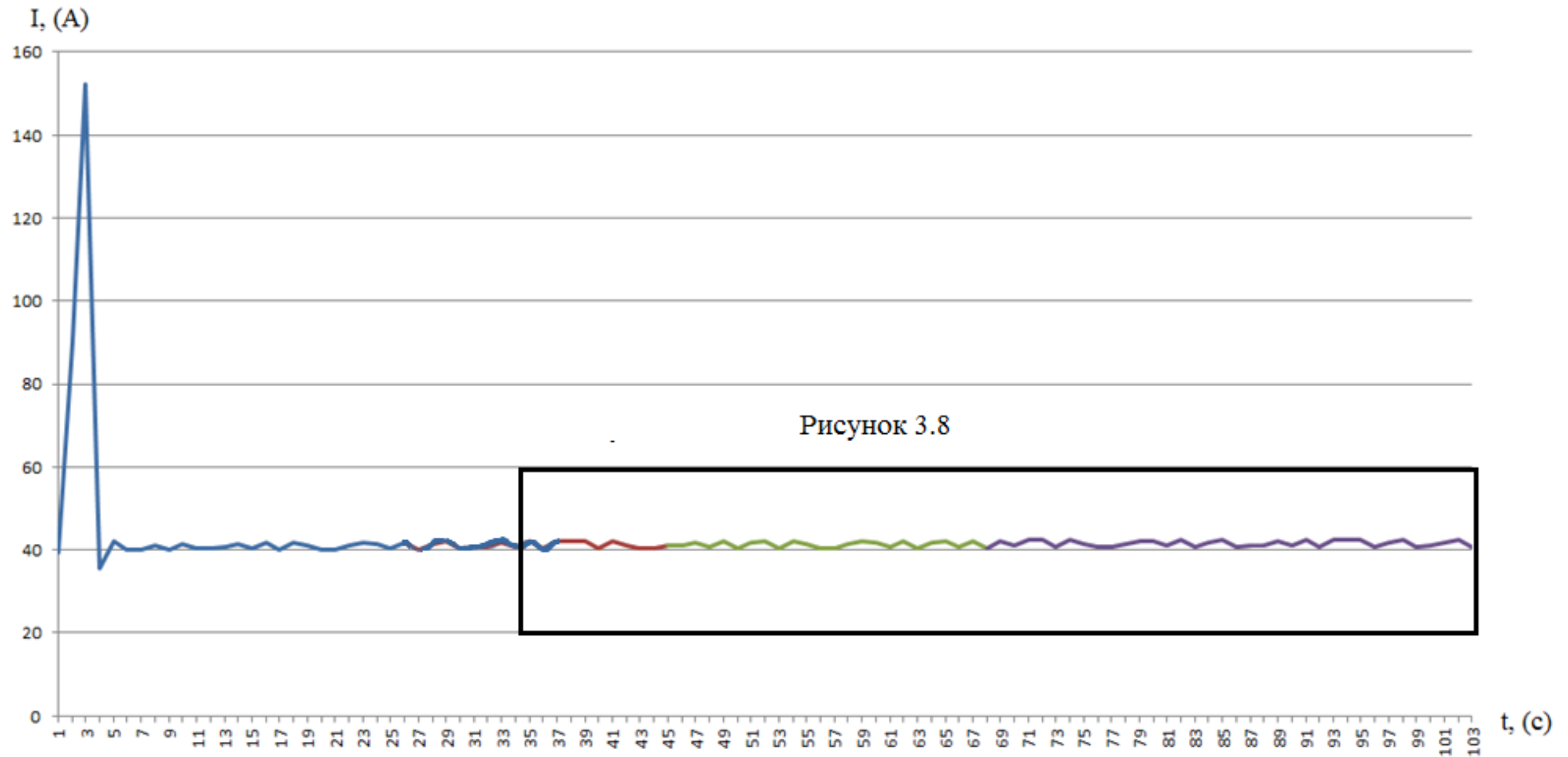


Рисунок 3.7– Изменение тока статора асинхронного двигателя при воспроизведения аварийного режима заклинивания одного, двух и трех опорных роликов

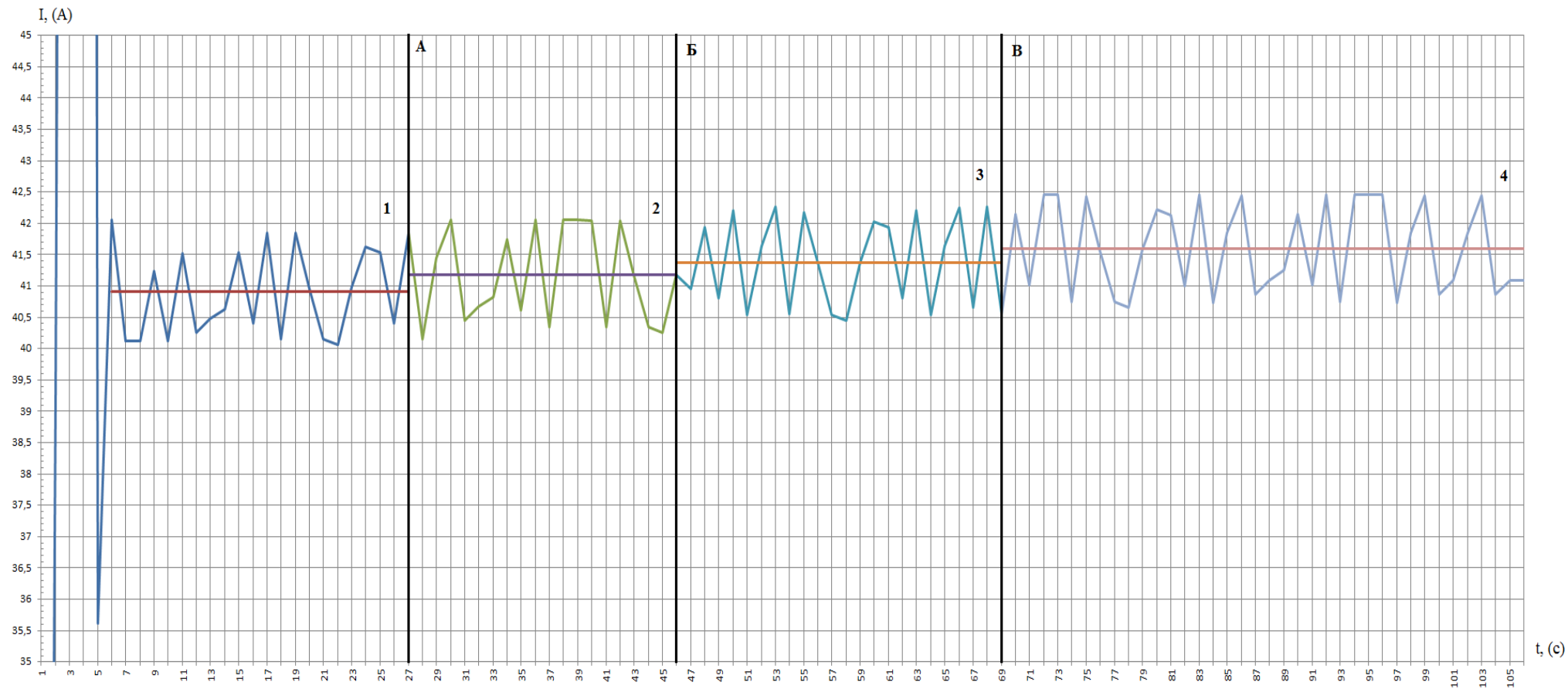


Рисунок 3.8– Изменение тока статора асинхронного двигателя

1 – при отсутствии неисправностей при 100% загрузке; 2 – заклинивание одного опорного ролика; 3 – заклинивание двух опорных роликов; 4 – заклинивание одновременно третьего опорного ролика; А – время заклинивания первого опорного ролика (37 с); Б – время заклинивания второго опорного ролика (56 с); В – время принудительного заклинивания третьего опорного ролика (78 с)

3. Сход ленты в процессе работы с номинальной загрузкой и задевание защитного желоба разгрузочной телеги.

График изменения тока статора показан на рисунке 3.9. Задевание ленточным полотном разгрузочного желоба происходит в момент времени 8 с. Отклонение ленточного полотна от прямолинейной траектории достигается кратковременным изменением положения направляющей системы роликов в течение 5 с. Такое отклонение приводит к изменению траектории движения ленты и ее касания разгрузочного желоба. Процесс характеризуется возрастанием отклонения и последующим возвратом к прямолинейному движению ленточного полотна. Задевание ленточным полотном разгрузочного желоба в опыте длится 10 с.



Рисунок 3.9 – График изменения тока статора при сходе ленты в процессе работы в номинальных условиях и задевании защитного желоба разгрузочной телеги

В процессе схода ленты и задевания лентой защитного желоба разгрузочной телеги происходит изменение нагрузочного момента и соответствующее ему увеличение тока статора машины на 2,5 А.

Видно, что при возникновении аварийной ситуации ток статора увеличивается по мере увеличения отклонения ленточного полотна от прямолинейной траектории и увеличения усилия соприкосновения ленты с

желобом. При возврате ленты к прямолинейному движению значение тока статора возвращаются к номинальным.

4. Заклинивание одного грузонесущего ролика с сопутствующим ослаблением натяжения ленты.

Процесс воспроизведения аварийного режима ослабления ленточного полотна и последующего заклинивания одного опорного ролика выполнен посредством ослабления натяжения ленты натяжительной станцией. Номинальное усилие натяжения ленточного полотна составляет 7161 Н. В процессе воспроизведения аварийной ситуации натяжение ленточного полотна снижалось до значений (6250-6439 Н). Контроль осуществлялся динамометром (ДМУ-Н/Т-КМГ4).

Графики изменения тока статора при моделировании аварийной ситуации приведены на рисунках 3.10, 3.11. Из графиков изменения тока статора (рисунки 3.10, 3.11) следует, что воспроизводимый аварийный режим сопровождается значительными колебаниями контролируемой величины тока по причине возникновения провиса ленты между роlikоопорами. Колебания в ленточном полотне появляются в результате выбирания провиса ленточного полотна между роlikоопорами, что приводит к колебанию момента на валу электродвигателя.

На интервале времени воспроизведения ослабления натяжения ленточного полотна колебания тока характеризуется следующими величинами: период одного полного колебания 10-12с; максимальное отклонение от номинального значения составляет 2,2 А.

На интервале времени воспроизведения ослабления натяжения ленточного и одновременное заклинивание одного опорного ролика увеличивается среднее значение тока статора на 0,28 А. Колебания тока характеризуется следующими величинами: период одного полного колебания 9-11с; максимальное отклонение от номинального значения составляет 1,85 А.

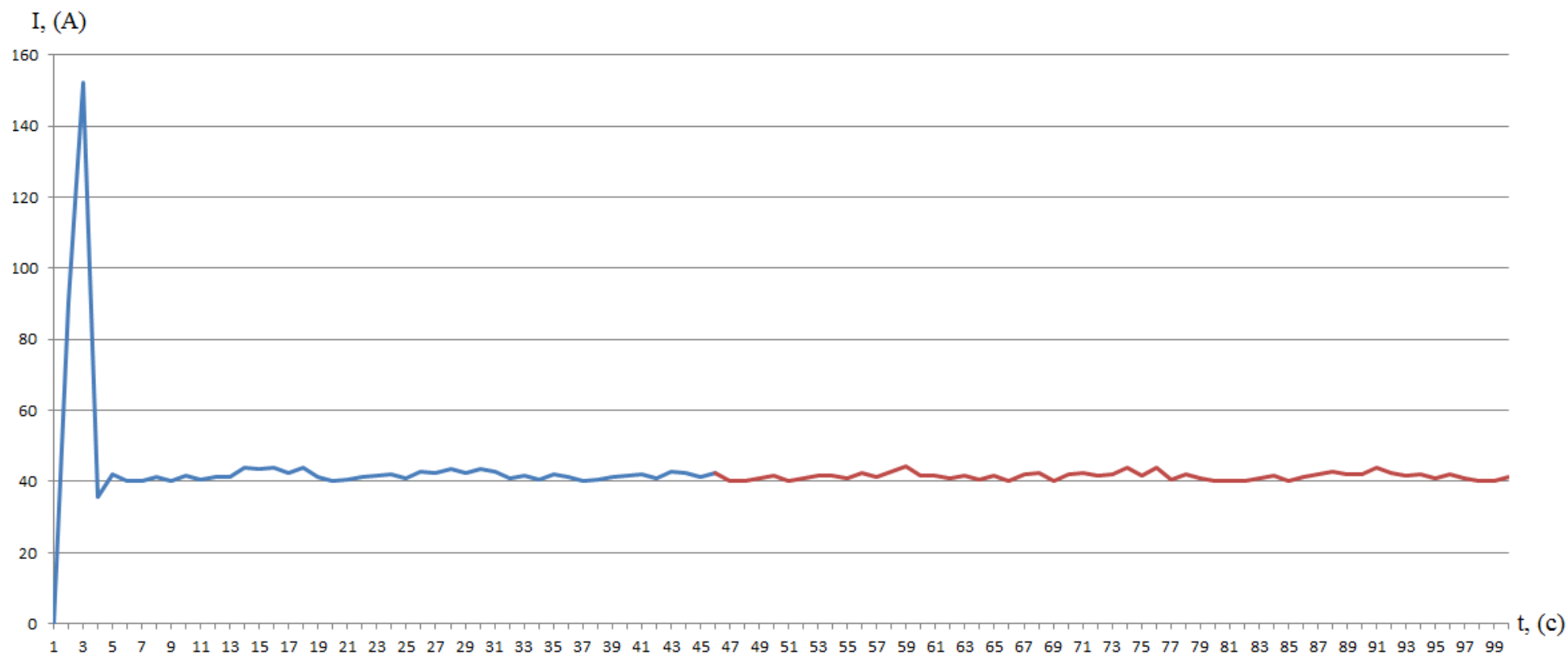


Рисунок 3.10 – График изменения тока статора асинхронного двигателя при ослаблении натяжения ленточного полотна на 10-12%.

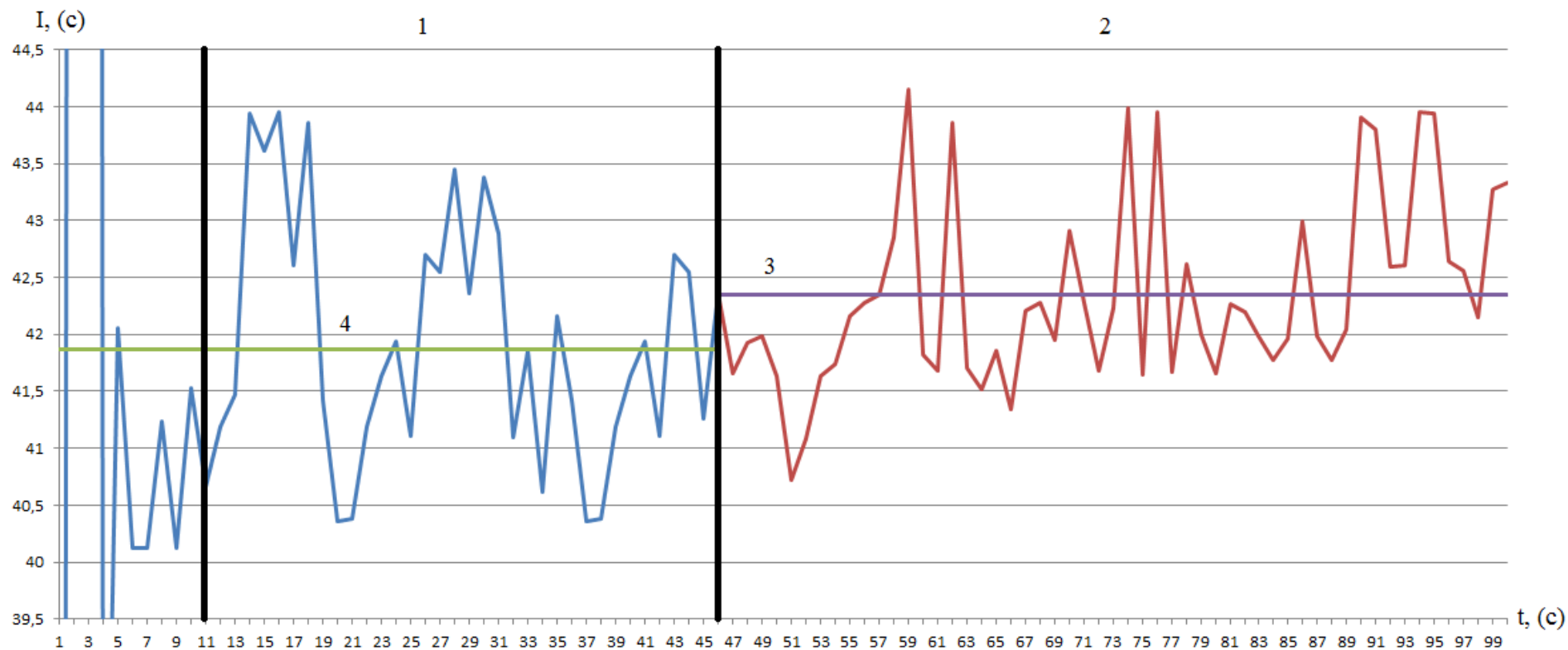


Рисунок 3.11 – График изменения тока статора асинхронного двигателя при ослаблении натяжения ленточного полотна на 10-12%

1 – интервал времени ослабления ленточного полотна; 2 – интервал времени ослабления ленточного полотна и заклинивание одного опорного ролика; 3 – среднее значение тока статора при ослаблении ленточного полотна и заклинивание одного опорного ролика; 4 – среднее значение тока статора при ослаблении ленточного полотна

3.2 Обработка экспериментальных данных

Для оценки погрешности методики измерения были обработаны данные измерений тока статора приводного двигателя при заклинивании одного опорного ролика. Обработка полученных результатов проводилась согласно [91, 97-102].

1. Расчет среднеарифметического исправленного результата наблюдения ($\bar{x}$):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.1)$$

2. Определение абсолютной погрешности каждого из n измерений:

$$\Delta_i = x_i - \bar{x}. \quad (3.2)$$

3. Расчет среднеквадратичного отклонения $\bar{\sigma}$ величины $\bar{x}$, при количестве измерений $n > 20$:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)}. \quad (3.3)$$

4. Степень разброса измеренных значений $\bar{x}$ по отношению к истинному значению $x_{\text{и}}$ для различных n :

$$\bar{\sigma}_x = S_x(\bar{A}) = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (3.4)$$

5. Наличие грубых погрешностей и промахов:

$$\beta_1 = \frac{|x_1 - \bar{x}|}{\bar{\sigma}}; \beta_n = \frac{|x_n - \bar{x}|}{\bar{\sigma}}. \quad (3.5)$$

Если $\beta_1 > \beta_{\Gamma}$ и $\beta_n > \beta_{\Gamma}$, где $\beta_{\Gamma} = \frac{\max |x_n - \bar{x}|}{\bar{\sigma}}$, то x_1 и x_n относятся к промахам и исключаются из полученных результатов.

6. Доверительные границы случайной погрешности ε при доверительной вероятности 0,9:

$$\varepsilon = t_e \cdot \bar{\sigma}_x. \quad (3.6)$$

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Результаты обработки экспериментальных данных

№	Замеры при заклинивании 1-го ролика	$\bar{x}$	Δ_i	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}_x$	ε	Относите льная ошибка δ
1	41,012	41,307	-0,2947	0,3841	0,03841	0,061	0,0014
2	41,791		0,485				
3	41,813		0,5065				
4	41,773		0,4665				
5	40,901		-0,4054				
6	41,865		0,5583				
7	40,702		-0,6048				
8	41,228		-0,0788				
9	41,342		0,0357				
10	41,977		0,6702				
-	-		-				
89	41,766		0,4592				
90	41,065		-0,2413				
91	41,116		-0,1907				
92	41,966		-0,2156				
93	41,091		-0,2776				
94	41,029		0,0929				
95	41,399		-0,2227				
96	41,084		-0,3029				
97	41,004		0,5407				
98	41,847		-0,2576				
99	41,049		0,6480				
100	41,954		0,6597				

Доверительная граница случайной погрешности при 100 кратном повторений измерений рассматриваемой системы составляет ± 6.1 %, такая погрешность позволяет определять состояние диагностируемого оборудования на уровне изменения контролируемой величины в диапазоне $\pm 2,52$ А от медианного значения.

Диапазон контролируемой величины корректируется в зависимости от количества измерений, а именно при 1000-кратном измерении доверительная граница случайной погрешности будет равна 1,9 %, что соответствует $\pm 0,78$ А диапазону контролируемой величины. При 5000 кратном измерении доверительная граница случайной погрешности будет равна 0,8 %, что соответствует $\pm 0,33$ А диапазону контролируемой величины. Из этого можно сделать вывод о том, что рассматриваемая система может быть использована для

диагностики различного рода аварийных режимов работы механизма ленточного конвейера.

3.3 Выводы

1. В связи с невозможностью реализации некоторых аварийных режимов работы, которые повлекут за собой непоправимые последствия для оборудования, для натурного исследования был выбран режим заклинивания роликов грузонесущей части конвейерного става. Дополнительно также получены диагностические признаки таких режимов как сход ленточного полотна, задевание защитного желоба и заклинивание одного опорного ролика с сопутствующим ослаблением ленточного полотна.

2. В ходе экспериментальных исследований на действующем электроприводе конвейера получены следующие результаты: при заклинивании одного опорного ролика при пустой ленте ток статора возрастает на 0,26 А, при заклинивании двух – на 0,28 А, при заклинивании трех – на 0,18 А. В эксперименте моделировался режим заклинивания грузонесущих роликов при условии постоянной нагрузки в виде транспортируемого материала, были получены следующие данные: величина действующего значения тока статора составила порядка 0,2 А при заклинивании одного ролика; при заклинивании двух и трех роликов увеличение токовой нагрузки составило порядка 0,4 и 0,6А соответственно. Период протекания изменения контролируемой величины тока статора находится в промежутке 3÷6 с. Сравнение полученных данных путем моделирования и эксперимента показывает, что величина тока статора, полученная экспериментально, сопоставима с прогнозируемой величиной, полученной путем компьютерного моделирования.

3. Выполнена обработка экспериментальных данных и проведен расчет погрешности метода фиксации тока статора путем стандартных средств автоматизации технологического процесса. Полученная погрешность метода измерения составила 6,1 %.

ГЛАВА 4. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА И УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ МЕХАНИЗМА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Как было установлено в результате математического моделирования с использованием и подтверждено в ходе натурных экспериментов в предыдущих главах, возникающие неисправности и аварийные ситуации в механической части ленточных конвейеров приводят к отклонениям тока статора приводных электродвигателей от нормальных для данных режимов работы значений.

В работе этот факт предлагается использовать для контроля неисправностей и аварийных ситуаций механической части ленточных конвейеров.

Устройство защиты должно решать в режиме реального времени следующие задачи:

- определение нормальных для данного режима работы значений тока статора приводного электродвигателя;
- замер текущих значений тока статора;
- сравнение текущих значений с нормальными для данного режима, определение отклонения, идентификация аварийных режимов.

При определении нормальных для данного режима работ значений момента и тока статора электродвигателя следует использовать основные составляющие нагрузки, которые в сумме определяют нормальную диаграмму тока электропривода:

- составляющую момента на валу и тока статора двигателя, обусловленную действием веса полезного груза на ленте конвейера;
- изменения момента и тока статора, возникающие в динамических режимах работы;
- постоянные составляющие момента на валу и тока от действия сил трения в узлах и агрегатах ленточного конвейера.

Совместное действие перечисленных факторов, оказывающих влияние на момент на валу, приводит к сложной аддитивной картине изменения тока статора даже в нормальных режимах работ. Для объективного и детального контроля предполагается использование пускорегулирующей аппаратуры (частотных преобразователей) со встроенными функциями цифровой обработки сигналов, с использованием которых в работе были реализованы функции диагностики и защиты механической части ленточных конвейеров.

В результате мониторинга пускорегулирующего оборудования ленточных конвейеров, использующегося на действующих предприятиях горно-металлургической промышленности, установлено, что доля современной аппаратуры управления и контроля состояния электропривода (частотные преобразователи, устройства плавного пуска и т.д.) составляет порядка 40 % от общего количества. Остальные 60% относятся к релейно-контакторным схемам. Поэтому важным является не только разработка специализированного устройства, но и алгоритма работы для возможного программного внедрения на предприятиях, оснащенных современными программируемыми логическими контролерами и современными пускорегулирующими устройствами.

4.1 Разработка алгоритма функциональной диагностики состояния механизма ленточного конвейера

Алгоритм работы способа контроля включает в себя обработку измеряемых и заданных сигналов [102-105]. Измеряемыми сигналами является номинальный ток статора в условиях отсутствия аварий (фиксация данного значения) и действующий ток статора. Заданным априорным сигналом является временная задержка начала работы алгоритма, необходимая для исключения ложных срабатываний при пуске конвейера, а также величина колебания тока статора, обусловленная появлением аварийного или предаварийного режима работы [46,

82, 84-86, 106]. Структурная схема предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 4.1

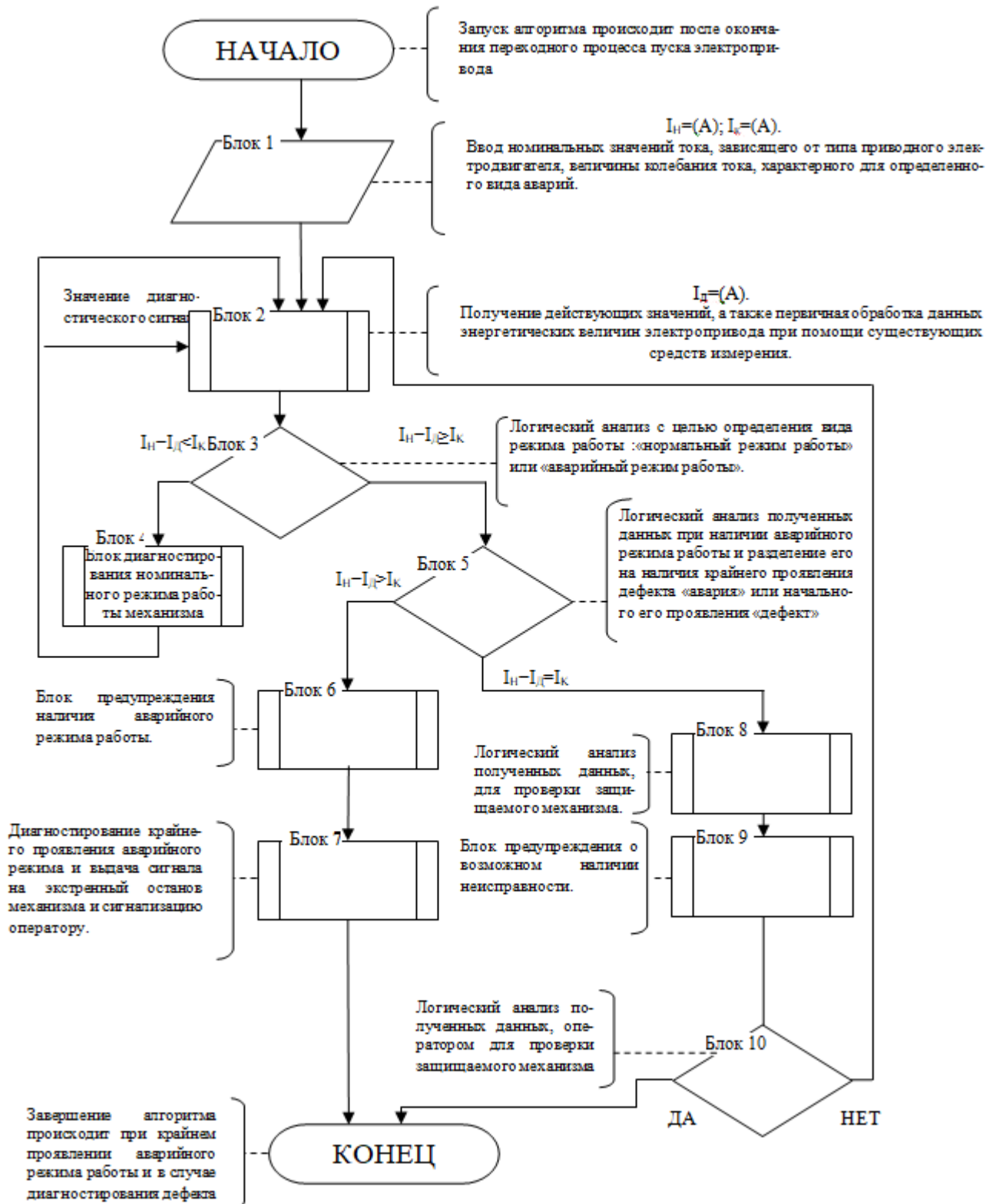


Рисунок 4.1 – Структурная схема алгоритма работы функциональной диагностики

Основные этапы алгоритма:

1. Пуск электропривода с выдержкой времени. Выдержка времени до начала работы алгоритма контроля необходима для предотвращения ложных срабатываний из-за перерегулирований, возникающих в ходе переходных процессов.
2. Начало работы алгоритма функциональной диагностики после истечения временной задержки.
3. Сравнение фактического и установленного значений тока статора приводного двигателя. В случае выявления условия наличия аварийного или предаварийного режима работы производится уточняющее сравнение.
4. Вывод на панель визуализации сигнала оператору о развитии или наличии аварийного режима работы.
5. Индикация аварийного режима с последующим отключением привода с запретом повторного включения.

Предлагаемый алгоритм имеет упрощенный вид с общим отображением логических блокировок для аварийных режимов работы. Основное тело алгоритма направлено на формирование предупреждения для диспетчера в начальный момент развития неисправности. Также при необходимости возможна установка аварийного уровня сигнала, после достижения которого выполняется остановка защищаемого ленточного конвейера с параллельным формированием сообщения с расшифровкой причин остановки. Реализация предлагаемого алгоритма возможна на современных программируемых логических контроллерах, при этом быстродействие алгоритма будет ограничено скоростью передачи данных в используемой локальной сети.

Реализация предлагаемого алгоритма функциональной диагностики ленточного конвейера с дополнительной обработкой токового сигнала при помощи вейвлет-анализа через математический аппарат на базе современных ПЛК возможна несколькими способами:

1. Реализация на стандартном языке программирования ST. Преимуществом языка является возможность реализации сложных алгоритмов,

написания больших программ, работы с аналоговыми сигналами и числами с плавающей точкой.

2. Реализация для ПЛК, соответствующих спецификации унифицированной архитектуры OPC (OPC-UA). В таких ПЛК OPC-сервер является встроенным с реализацией различных протоколов связи и способов резервирования. Это позволяет организовать контроль токового сигнала с оптимальным для используемого сетевого оборудования шагом дискретизации. Анализ токового сигнала производится по значениям периода и амплитуды, что позволяет при сопоставлении сигнала действующего значения и полученного результата по средствам вейвлет-преобразования представить детальную картину состояния механизма ленточного конвейера, особенно для мелких неисправностей механической части.

4.2 Разработка устройства защиты ленточного конвейера от аварийных режимов работы

Общим принципом действия устройств защиты механизма ленточного конвейера является регистрация отклонений тока статора от нормальных значений и использование этой информации для защиты ленточного конвейера [86]. Для получения информационного сигнала выполняется обработка сигналов от датчиков и выдача аварийного сигнала с использованием логической схемы. Реализация такого принципа разработана автором диссертационного исследования и запатентована [107].

На рисунке 4.2 приведена функциональная схема предлагаемого устройства защиты ленточного конвейера, на рисунке 4.3 – временные циклограммы работы блоков, входящих в устройство. Устройство защиты конвейера содержит первый блок задержки (1), второй блок задержки (2), датчик тока, выполненный на базе установленных в питающую цепь статора двигателя измерительных трансформаторов тока по одному на каждую фазу (3), первый ключ (4), блок

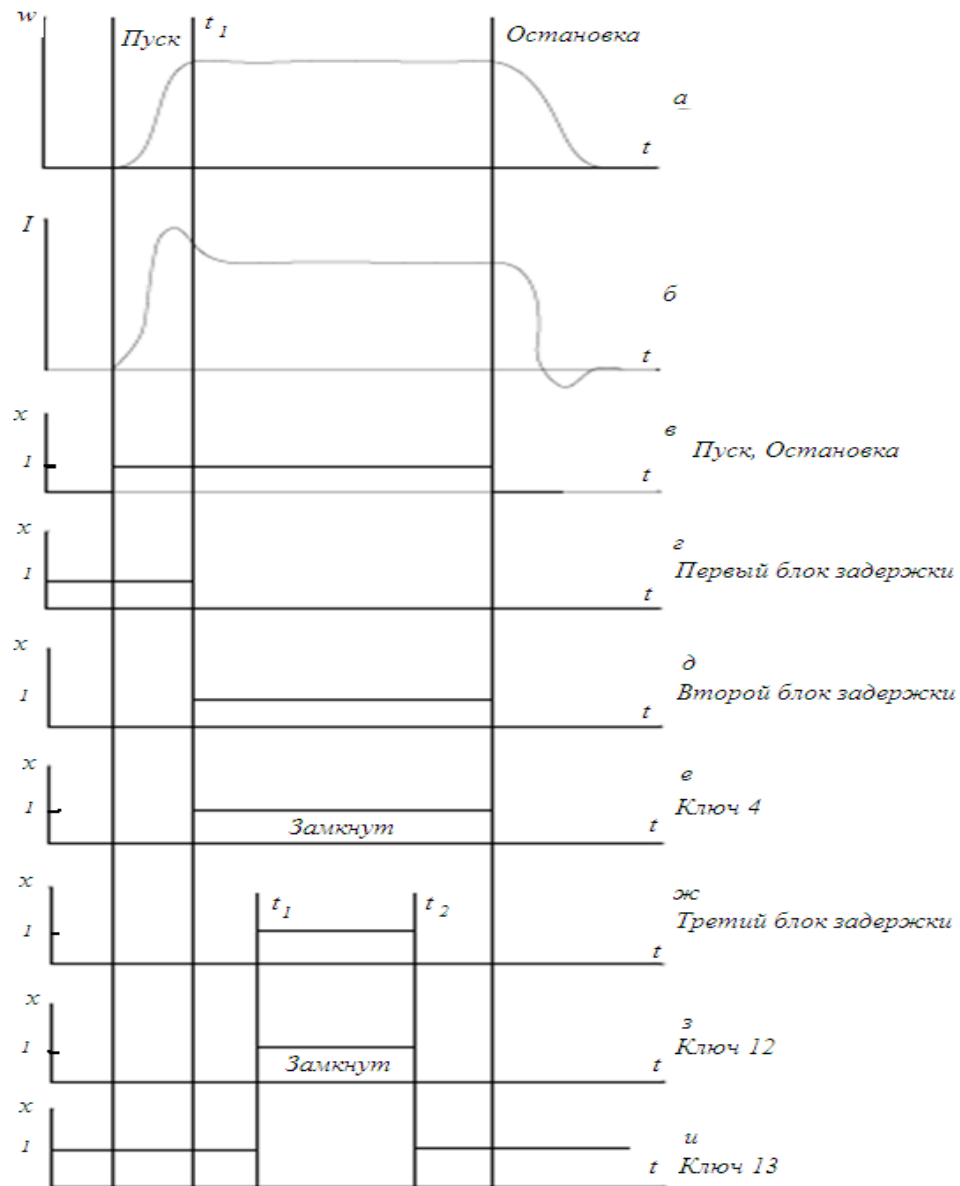


Рисунок 4.3– Временные циклограммы работы блоков, входящих в устройство:

а – угловая скорость вращения двигателя конвейера.

б – ток двигателя в цепи двигателя конвейера и пропорциональное ему напряжение; в – исходный сигнал управления двигателем конвейера, имеющий два состояния («Пуск конвейера», «Остановка конвейера»); г – выход первого блока задержки 1; д – выход второго блока задержки 2; е – состояние первого ключа 4; ж – выход третьего блока задержки 14; з – состояние второго ключа 12; и – состояние третьего ключа 13

Напряжение U , снимаемое датчиком тока 3, пропорционально току двигателя I_d :

$$U=I_{\text{д}} \cdot K_{\text{т.т}} \cdot K_{\text{д.т.}}, \quad (4.1)$$

где $K_{\text{т.т}}$ – коэффициент трансформатора тока; $K_{\text{д.т.}}$ – коэффициент схемы датчика тока.

Выход датчика тока 3 является информационным входом устройства. Управляющий вход устройства подключен одновременно к входам первого блока задержки 1 и второго блока задержки 2. В первом и втором блоках задержки реализуется передаточная функция чистого временного запаздывания $\cdot 10^{-\text{pt}}$. При этом первый блок задержки 1 находится в замкнутом положении, а второй блок задержки – в разомкнутом (на рисунках 4.3г, д приведены выходные сигналы блоков задержки). По достижению момента времени τ_1 сигнал на выходе первого блока задержки изменяется с высокого на низкий и поступает на второй управляющий вход первого ключа 4. На выходе второго блока задержки 2 изменение сигнала происходит с максимального, а по достижению времени τ_1 снижается до минимального.

Процесс, проходящий в третьем блоке задержки 14, идентичен второму блоку задержки за исключением того, что он замыкается только при подаче на второй вход сигнала со второго выхода второго блока задержки 2 (на рисунке 4.3 ж, приведен выходной сигнал третьего блока задержки 14). Продолжительность его открытого состояния длится с момента времени τ_2 до момента времени τ_3 . При этом происходит замыкание ключей: первого ключа 4 в момент времени t_1 , а второго ключа 12 в момент времени t_2 по сигналам второго блока задержки 2 и третьего блоков задержки 14. Блок 5 снятия значения предназначен для демонстрации персоналу текущих значений тока статора. Выходной сигнал блока снятия значения 5 поступает на первый вход третьего ключа 13 и первый вход третьего блока задержки 14.

Таким образом, на входе второго блока сравнения 6 формируется сигнал, пропорциональный току статора. С выхода второго блока сравнения 6 сигнал поступает на вход первого блока сравнения 15. В момент времени t_2 начинается снятие значения тока статора, длящееся до момента времени t_3 . На выходе третьего блока задержки 14 (рисунок 4.3 ж) сигнал изменяется с низкого уровня

на высокий в момент времени t_2 и поступает на информационный вход второго ключа 12, а также на управляющий вход блока памяти 7 и на вход первого блока сравнения 15. В блоке памяти 7 производится запоминание значения тока статора, поданного на его информационный вход.

На процесс запоминания информации в блоке памяти 7 отводится интервал времени $(t_2 - t_3)$. В момент времени t_3 сигнал на выходе третьего блока задержки 14 изменяется с высокого на низкий. В результате выходные сигналы блока памяти 7 и второго блока сравнения 6 поступают на второй и первый входы первого блока сравнения 15. Во втором блоке сравнения 6 определяется разность текущего значения тока статора и значения тока, хранящегося в блоке памяти 7. С выхода первого блока сравнения 15 полученный сигнал разности поступает на вход блока индикации и вход блока отключения 11, который состоит из промежуточного реле и силового контактора. На первый вход второго блока сравнения 6 поступает сигнал с третьего ключа 13, а на второй вход поступает сигнал с блока задания уставки 9. Во втором блоке сравнения 6 реализуется следующая логическая функция:

$$x(\tau) = \begin{cases} \text{Откл.}, & \text{если } \Delta_2 > \Delta_3; \\ \text{Раб.}, & \text{если } \Delta_2 \leq \Delta_3, \end{cases} \quad (4.2)$$

где $x(\tau)$ – выходной сигнал второго блока сравнения, имеющий два уровня «Откл.» и «Раб»; Δ_2 – выходной сигнал третьего ключа 13; Δ_3 – выходной сигнал блока задания уставки 9.

Если сигнал Δ_2 с третьего ключа 13 будет больше, чем сигнал Δ_3 из блока 9 задания уставки (критическое значение тока статора для асинхронного электродвигателя), то есть больше величины допустимого тока, то сигнал с выхода второго блока сравнения 6 поступает на вход блока отключения 11, двигатель конвейера останавливается. Данная логическая функция выполняет защиту электрической части механизма.

На третий вход первого блока сравнения 15 поступает сигнал с блока задания величины скачка 16.

В первом блоке сравнения 15 реализуется следующая логическая функция:

$$y(\tau) = \begin{cases} \text{Откл.}, & \text{если } \Delta_1 - \Delta > \Delta^*; \\ \text{Раб.}, & \text{если } \Delta_1 - \Delta < \Delta^*, \end{cases} \quad (4.3)$$

где $y(\tau)$ – выходной сигнал второго блока сравнения, имеющий два уровня «Откл.» и «Раб.»; Δ_1 – выходной сигнал блока задатчика величины скачка тока 16; Δ – выходной сигнал второго блока сравнения 6; Δ^* – выходной сигнал блока памяти 7.

Если сумма величин $\Delta_1 - \Delta$ будет больше Δ^* , то со второго выхода первого блока сравнения 15 на вход блока отключения 11 поступает сигнал отключения. Сигнал со второго выхода блока сравнения 15 приходит на вход блока индикации 10. А в случае, когда сумма величин $\Delta_1 - \Delta$ будет меньше Δ^* , сигнал считается не аварийным, конвейер продолжает работать.

Со второго выхода второго блока сравнения 6 сигнал поступает на вход блока регистрации 8, в памяти которого записываются значения токограммы привода конвейера [107].

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет распознать аварийную ситуацию и обеспечить быстрое срабатывание защит. Представленный способ защиты исполнительного механизма путем контроля энергетических параметров приводного асинхронного электродвигателя также была адаптирован для ряда механизмов и запатентован [106, 108].

При конструировании устройств защиты ленточного конвейера применяемые элементы должны удовлетворять следующим требованиям: должны обеспечивать возможность формирования отдельных блоков, которые выполняют функции, определяемые блок-схемами системы защит; должны обладать необходимой чувствительностью и точностью, стабильно сохраняемыми в процессе работы; должны быть простыми и надежными в эксплуатации; должны быть ремонтно-пригодными в условиях действующего производства. При конструировании за основу были взяты элементы, описанные в работе [107]. Описание используемых элементов схемы представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Реализация блоков предлагаемого устройства

Блок	Название блока	Примечание
1	Первый блок задержки.	См. [109], стр. 49. Подбор R и C позволяет менять время задержки информации.
2	Второй блок задержки.	См. [109], стр. 49. Подбор R и C позволяет менять время задержки информации.
3	Датчик тока.	На базе измерительных трансформаторов тока.
4,12	Ключи.	Первый ключ построен на базе одного электронного ключа, второй ключ на базе двух последовательно соединенных замыкающих ключей. (см. [109], стр. 114).
5	Блок снятия значения.	Выполнен с использованием цифрового амперметра ЭА 2700.
6	Второй блок сравнения.	Блок реализован на базе суммирующего усилителя (см. [109], стр. 8 и 9).
7	Блок памяти.	Реализован в соответствии с [109], стр. 124. Ключ блока памяти реализован в соответствии с [109], стр. 114, на базе размыкающего ключа.
8	Блок регистрации.	Служит для регистрации действующего значения тока статора электродвигателя. Выполнен с использованием устройства Ф1771-АД «Регистратор электронный многоканальный».
9	Блок задания уставки.	Регулируемый источник напряжения.
10	Блок индикации.	Выполнен с использованием светодиодных индикаторов, указывающих состояние конвейера («Работа», «Авария», «Обрыв ленты»).
11	Блок отключения.	Состоит из электромагнитного пускателя, промежуточного реле (220В) и выключателя путевого.
13	Третий ключ	Ключ построен на базе двух последовательно соединенных замыкающих ключей. (см. [109], стр. 114).
14	Третий блок задержки.	См. [109], стр. 49. Подбор R и C позволяет менять время задержки информации.
15,16	Первый блок сравнения и блоком задания величины скачка.	Схема сравнения построена на основе операционного усилителя, у которого в цепи обратной связи включена схема ограничения (См. [109] стр. 114).

Запатентованное устройство реализовано на базе микропроцессорной техники, служит для защиты ленточных конвейеров, не оснащенных современной пускорегулирующей аппаратурой. Подстройка и регулировка устройства

выполняется под определенный ленточный конвейер с учетом диагностических критериев полученных в главе 2 и 3. Быстродействие устройства ограничивается временем срабатывания релейной контакторной схемы управления.

4.3 Оценка эффективности предлагаемого алгоритма функциональной диагностики механической части ленточного конвейера

С целью проверки эффективности предлагаемого способа функциональной диагностики в 2015-2021 гг. были проведены промышленные испытания на следующих предприятиях: обогатительная фабрика «Энергетическая» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»» (г. Калтан) и Бачатский угольный разрез, (Приложения 3, 4).

К внедрению был предложен способ функциональной диагностики ленточных конвейеров по разработанному алгоритму (рисунок 4.1). Измерение и фиксация тока статора электродвигателя осуществлялись частотным преобразователем Altivar 71 фирмы Schneider Electric. Замеры проводились непрерывно в течение 20 месяцев [121]. Полученные результаты представлены в таблице 4.2.

Стоит отметить, что предложенный способ функциональной диагностики способен выявить семь возможных аварийных режимов, и в трех случаях отработал с эффективностью 100%. В остальных случаях наблюдается накопительный эффект: чем больше аварий, тем меньше эффективность способа. Данный эффект связан с наличием помех в контролируемом сигнале. Этого возможно избежать, реализуя ряд мероприятий: уменьшение длины линии передачи информации, применение приборов с меньшей погрешностью, уменьшение шага дискретизации для контролируемого сигнала и т.д.

Таблица 4.2 – Результаты срабатывания защиты
на действующем оборудовании [121]

Вид аварийного режима работы	Наличие аварийного режима работы	Аварийный режим, распознанный с помощью предлагаемого алгоритма	Ложное срабатывание предлагаемого алгоритма	Эффективность предлагаемого алгоритма
Заклинивание редуктора	1	1	0	1
Заклинивание подшипников в отклоняющих барабанах	65	60	12	0,9
Заклинивание роликов холостой и грузонесущей ветви	129	113	21	0,96
Поломка чистителей ленты и барабанов	10	9	3	0,9
Расцентровка соединительной муфты	1	1	0	1
Заштыбовка конвейера	40	37	10	0,97

Промышленные испытания предлагаемого способа функциональной диагностики происходило следующим образом: критерии определения наличия аварийного режима были получены путем модельных и экспериментальных исследований, при появлении аварийного режима работы на механизме ленточного конвейера происходило оповещение диспетчера путем появления индикации на мониторе. Далее происходила сверка наличия фактического присутствия аварии с пометкой в журнале. По окончании смены происходил анализ зарегистрированного количества аварий в журнале диспетчера и сохраненных данных об авариях на сервере. Оценка эффективности производилась с учетом фактического количества аварий и количества аварий, распознанных предлагаемым методом, учет ложного срабатывания в данном эксперименте не объективен, в связи с тем что существует множество факторов: опробование метода только на 1 механизме в технологическом комплексе, при

этом не учитывается состояние смежных агрегатов и режимов их работы, человеческий фактор обследования механизма после появления индикации о наличии аварийного режима, возможность случайного появления аварийного режима с последующим самоустранением (например, подклинивание ролика может происходить не обязательно до полного заклинивания; при заштыбовке конвейера может происходить выход подвисшего материала самостоятельно и т.д.) Поэтому, ложные срабатывания при анализе результата не учитывались.

4.4 Расчет экономического эффекта по результатам внедрения способа функциональной диагностики механической части ленточного конвейера

Общими направлениями достижения экономической эффективности от внедрения любого мероприятия является получение прибыли. Размер прибыли зависит от увеличения объемов производства с сохранением или улучшением качества выпускаемой продукции на тех же мощностях [111-114].

В рассматриваемом случае выпускаемой продукцией обогатительной фабрики является угольный концентрат. Итоги апробации предлагаемого алгоритма способа функциональной диагностики за период 2015-2021 гг. представлены в таблице 4.3. Также в таблице 4.3 для сравнения представлены статистические данные за 2014г., когда предлагаемый алгоритм еще не был внедрен.

Таблица 4.3 –Экономическая эффективность применения алгоритма функциональной диагностики ленточного конвейера

Предприятие	Поз. ленточного конвейера	Время не запланированных остановок в 2014 г. (ч)	Проектная производительность (мл.т в год)	Экономический эффект 2015-2021 г.г. (т.р.)
УГМК, обогатительная фабрика «Энергетическая» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»»	309	28,4	7	985 000,00
	308	27,9		

Продолжение таблицы 4.3

Предприятие	Поз. ленточного конвейера	Время не запланированных остановок в 2014 г. (ч)	Проектная производительность (мл.т в год)	Экономический эффект 2015-2021 г.г. (т.р.)
Установка для извлечения угля из разубоженной горной массы» «Бачатский угольный разрез»	42.1	30,5	6,2	1 065 00,00
	43	30,1		

После внедрения разработанного способа функционального диагностирования состояния механической части ленточных конвейеров на предприятиях, получены следующие результаты:

1. «Кузбассразрезуголь»: ОФ «Энергетическая», экономическая эффективность за период 2015-2021 г. составила 985 000 руб. (Приложение В).
2. Установка для извлечения угля из разубоженной горной массы, «Бачатский угольный разрез», экономическая эффективность за период 2015-2021 г. составила 1 065 000 руб. (Приложение Г).

4.5 Выводы

1. Выполнена техническая реализация способа функциональной диагностики устройством на базе микропроцессорной техники. Для оборудования, оснащенного ПЛК, составлен алгоритм диагностирования.

2. Алгоритм способа функциональной диагностики реализован на следующих предприятиях: УГМК, ОФ «Энергетическая» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»» (г. Калтан) и «Бачатский угольный разрез». По полученным результатам промышленных испытаний получены следующие показатели минимальной эффективности предложенного способа: по заклиниванию подшипников отклоняющих барабанов и поломке чистителя ленты и барабана – 0,9; по заклиниванию редуктора, срезанию пальцев соединительной муфты, расцентровке соединительной муфты – 1,0.

3. Оценка экономической эффективности предлагаемого способа функциональной диагностики рассчитывалась с учетом экономии, вызванной снижением количества незапланированных простоев за счет раннего диагностирования аварийных режимов и конкретизации места локализации по диагностическим признакам. Итоговая экономическая эффективность за период 2015-2021 г. по предприятиям составила: «Кузбассразрезуголь», ОФ «Энергетическая» – 985.000 руб. (Приложение В); Установка для извлечения угля из разубоженной горной массы, «Бачатский угольный разрез» – 1 065.000 руб. (Приложение Г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по исследованию работоспособности и разработке способа функциональной диагностики электротехнического комплекса механизма ленточного конвейера, имеющая важное практическое значение для повышения надежности функционирования механизмов ленточных конвейеров.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие основные результаты и выводы:

1. Предложена математическая модель ленточного конвейера как электромеханической системы, объединяющая в себя восьмимассовую механическую систему и двухфазную модель асинхронного электродвигателя, описанного в системе координат α - β .

2. Получены критерии возникновения аварийных событий в механической части ленточного конвейера, таких как заштыбовка приемного бункера, нарушение соосности передач редуктора или биение в опорных подшипниках шестерней, поломка чистителя, срезание «пальцев» соединительной муфты, глухое заклинивание редуктора, заклинивание роликов грузонесущей части, на основе динамики отклонений электрических величин приводного асинхронного электродвигателя от номинальных значений.

3. Разработан способ функциональной диагностики состояния механической части ленточных конвейеров, который позволяет реализовать алгоритм функциональной диагностики состояния ленточного конвейера с дополнительной обработкой токового сигнала при помощи вейвлет-анализа на базе современных программируемых логических контроллеров (ПЛК).

4. Разработан алгоритм функциональной диагностики механизма ленточного конвейера, ориентированный на формирование предупреждения диспетчера в начальный момент развития неисправности. Реализация предлагаемого алгоритма возможна на современных ПЛК различных производителей.

5. Разработано устройство защиты ленточного конвейера от аварийных режимов работы, принцип работы которого основан на регистрации отклонения тока статора от значений, характерных для нормальных режимов работы механизма, и использовании этой информации для индикации предупреждения для оператора или автоматического отключения ленточного конвейера.

6. Выполнена промышленная апробация разработанного способа функционального диагностирования состояния механической части ленточных конвейеров на предприятиях. Итоговая экономическая эффективность за период 2015-2021 г. по предприятиям составила: «Кузбассразрезуголь», ОФ «Энергетическая» – 985.000 руб.; Установка для извлечения угля из разубоженной горной массы, «Бачатский угольный разрез» – 1 065.000 руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подэрни, Р. Ю. Механическое оборудование карьеров / Р. Ю. Подэрни. – М. : Майнинг Медиа Групп, 2011. – 639 с.
2. Лагунова, Ю. А. Проектирование обогатительных машин / Ю. А. Лагунова. – Екатеринбург : УГГУ, 2009. – 378 с.
3. Басов, А. И. Механическое оборудование обогатительных фабрик и заводов тяжелых цветных металлов / А. И. Басов. – М. : Metallurgy, 1984. – 351 с.
4. Епифанцев, Ю. А. Механическое оборудование для обогащения руд / Ю. А. Епифанцев. – Кемерово : КузПИ, 1978. – 52 с.
5. ГОСТ 20-2018. Ленты конвейерные резиноканевые. Технические условия. / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М. : Стандартинформ, 2019. – 37 с.
6. ГОСТ 22644-77 (СТ СЭВ 1333-78). Конвейеры ленточные. Основные параметры и размеры (с Изменениями N 1, 2). – М. : Издательство стандартов, 1988. – 5 с.
7. ГОСТ 25722-83 (СТ СЭВ 1331-78). Конвейеры ленточные. Наименования частей. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 4 с.
8. СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). – Москва : Минрегион России, 2012. – 248 с.
9. Носов, В. В. Диагностика машин и оборудования / В. В. Носов. – СПб : Лань, 2012. – 384 с.
10. Правила устройства электроустановок – 7-е изд. / Министерство энергетики Российской Федерации. – М. : Энергосервис, 2007. – 279 с.
11. Пархоменко, А. И. Взрывозащищенные асинхронные электродвигатели / А. И. Пархоменко, И. Г. Ширнин, А. К. Маслий. – М. : Недра, 1992. – 191 с.
12. Асинхронные двигатели общего назначения / Е. П. Бойко, Ю. В. Гаинцев, Ю. М. Ковалев [и др.] ; под ред. В. М. Петрова, А. Э. Кравчика. – М. : Энергия, 1980. – 488 с.

13. Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors / E. L. Bonaldi, L. E. de Lacerda de Oliveira, J. G. B. da Silva, G. Lambert-Torres [and ets] // Induction Motors – Modeling and Control. – 2012. – Ch. 20. – P. 487–520.
14. Joksimovic, G. M. The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors / G. M. Joksimovic, J. Penman // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 2000. – Vol. 47 (5). – P. 1078 – 1084. – DOI 10.1109/41.873216.
15. Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition / J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55 (2). – P. 633–643. – DOI 10.1109/TIE.2007.911960.
16. Thomson, W. T. Current signature analysis to detect induction motor faults / W. T. Thomson, M. Fenger // IEEE Transaction. On IAS Magazine. – 2001. – Vol 7 (4). – P. 26–34. – DOI 10.1109/2943.930988.
17. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
18. Неразрушающий контроль и диагностика / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
19. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
20. Будников, Г.К. Основы современного электрохимического анализа / Г.К. Будникова, В.М. Майстренко, М.Р. Вяселев. – М. : Мир, 2003. – 592 с.
21. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
22. Тензометрия в машиностроении / Р. А. Макаров, А. Б. Ренский, Г. Х. Боркунский, М. И. Этингоф ; под ред. Р. А. Макарова. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.

23. Дайчик, М. Л. Методы и средства натурной тензометрии / М. Л. Дайчик, Н. И. Пригоровский, Г. Х. Хуршудов. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.
24. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под общ. ред. В. В. Ключева. – М.: – Машиностроение, 2004. – 375 с.
25. Сотников, А. Л. Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / А. Л. Сотников // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 334–338.
26. Герике, Б. Л. Оценка технического состояния бурошнековых машин по параметрам вибрации / Б. Л. Герике, Л. Е. Маметьев, Ю. В. Дрозденко // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 7 (16). – С. 28–32.
27. Большунова, О. М. Диагностика технического состояния асинхронных электродвигателей горных машин / О. М. Большунова // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 1 (119). – С. 35–37.
28. Герике, П.Б. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования / П.Б. Герике, Б.Л. Герике // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. №2 (154). – С. 17-22.
29. Никитин, А. Г. Система аварийного управления дробильного агрегата / А. Г. Никитин, К. В. Тагильцев-Галета // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – Том 58, № 2. – С. 140– 141.
30. Козярук, А. Е. Система обслуживания электромеханического оборудования машин и механизмов по фактическому состоянию / А. Е. Козярук, Ю. Л. Жуковский // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 10 (107). – С. 8–14.
31. Current/Voltage Based Detection of Faultsin Gears Coupled to Electric Motors / S. Rajagopalan, T. G. Habetler, R. G. Harley, T. Sebastian [et al.] // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2006. – Vol. 42. – P. 1412–1420.
32. Singh, S. Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems / S. Singh, A. Kumar, N. Kumar. // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 6. – P. 171–177. – DOI 10.1016/j.mspro.2014.07.021

33. Ещин, Е. К. Моделирование и управление динамическим состоянием скребковых конвейеров / Ещин Е. К. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 2. – С. 118–122.
34. Большаков, В. И. Особенности развития биений в электромеханическом приводе с зазором в упругой связи / В. И. Большаков, В. В. Буцукин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 5. – С. 19–23.
35. Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. – М. : Высшая школа, 1980. – 176 с.
36. Мамедов, В. М. Электродинамическое моделирование электроприводов / В. М. Мамедов. – М. ; Л. : Энергия, 1964. – 88.
37. Петров, А. В. Моделирование процессов и систем / А. В. Петров. – СПб : Лань, 2015. – 287 с.
38. Патент № 107287 Российская Федерация, МПК E21F 13/08 (2006.01). Датчик контроля обрыва конвейерной ленты : № 2011107006/03 : заявлено 24.02.2011 : опубликовано 10.08.2011 / А. В. Ещеркин, В. А. Копытин, Е. Н. Ушаков ; патентообладатели: Патентообладатели: Ещеркин А. В., Копытин В. А. – 5 с.
39. Патент № 2067070 Российская Федерация, МПК B65G 43/06 (1995.01). Способ остановки ленты конвейера в случае ее обрыва и устройство его осуществления : № 94 94018354 : заявлено 19.05.1994 : опубликовано 27.09.1996 / Г. К. Герасимов, А. В. Ещеркин, Р. И. Чернов ; патентообладатель Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. – 5 с.
40. Патент № 2043283 Российская Федерация, МПК B65G 43/06 (1995.01). Устройство улавливания ленты в случае ее обрыва : № 5025442/03 : заявлено 27.12.1991 : опубликовано 10.09.1995 / М. М. Гуревич, Р. И. Чернов ; патентообладатель Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. – 5 с.
41. Авторское свидетельство № 579200 СССР, МПК B65G 43/04 (2000.01). Устройство для контроля нагрева барабана ленточного конвейера : заявлено

- 08.06.1976 : опубликовано 05.11.1977 / К. В. Кузьминов, А. П. Микулевич, А. В. Белозеров ; патентообладатель Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. – 6 с.
42. Патент № 2269767 Российская Федерация, МПК G21N 23/04 (2006.01). Устройство контроля тросовой основы резинотросовых лент конвейеров : № 2004113226/28 : заявлено 28.04.2004 : опубликовано 10.02.2006 / Глебов Н. А., Деев А. И., Духопельников В. Д. , Букин В. А., Масалкин И. М. ; патентообладатели: Глебов Н. А., Деев А. И., Духопельников В. Д. , Букин В. А., Масалкин И. М. – 4 с.
43. Патент № 120954 Российская Федерация, МПК B65G 43/00 (2006.01). Устройство контроля схода ленты конвейера : № 2012124497/11 ; заявлено 2012.06.13 : опубликовано 2012.10.10 / А. П. Семешов, А. Ю. Продан ; патентообладатели: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственная фирма "Автоматика". – 3 с.
44. Авторское свидетельство № 1248906 СССР, МПК B65G 43/04 (2000.01). Устройство контроля пробуксовки ленты конвейера : № 3724607 : заявлено 10.04.1984 ; опубликовано 07.08.1986 / С. Б. Годзданкер. – 3 с.
45. Авторское свидетельство № 685586 СССР, МПК B65G 43/06 (2000.01). Устройство для улавливания ленты конвейера в случае ее обрыва : № 2641403 ; заявлено 29.06.1978 ; опубликовано 15.09.1979 / К. А. Усов, патентообладатели: Предприятие П/Я А-7255 – 3 с.
46. Савельев, А. Н. К обоснованию комплексного метода оценки работоспособности современных технологических объектов / А. Н Савельев, М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 37–41.
47. Савельев, А. Н. Структурные особенности устойчиво функционирующей сложной технической системы объектов / А. Н Савельев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 12. – С. 53–58.
48. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин : справочник / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. :

Машиностроение, 1987.

49. Савельев, А. Н. Распознавание аварийных ситуаций механического оборудования с электроприводом постоянного тока / А. Н. Савельев, М. В. Кипервассер, О. В. Инжелевская // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 42– 45.
50. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 929 с.
51. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
52. Большаков, А. С. Углеобогащительные и брикетные фабрики / А. С. Большаков. – Л. : Углеметтехиздат, 1982. – 240 с.
53. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Академия, 2005. – 544 с.
54. Касаткин, А. С. Электротехника : учебник для неэлектротехнических специальностей высших учебных заведений / А. С. Касаткин, М. А. Перекалин. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1955. – 376 с.
55. Удут, Л. С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод / Л. С. Удут, О. П. Мальцев, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство томского политехнического университета , 2009. – 354 с.
56. Ленточные конвейеры - Техническое обслуживание механизмов и деталей конвейеров : справочник. – Последнее обновление: 03.05.2013 // Машиностроение, механика, металлургия : информационно - тематический портал. – URL: <http://mashmex.ru/podemniki/126-lentochnie-konveeri.html?start=8> (дата обращения: 1.11.2024).
57. Руководство по эксплуатации ленточного конвейера типа НЕ - К. Техническая документация. – ОФ «Черниговская-Коксовая», Россия, 2012.
58. Аниканов, Д. С. Диагностика асинхронного двигателя как электромеханической системы / Д. С. Аниканов, М. В. Кипервассер, О. В. Инжелевская // Научные технологии разработки и использования

- минеральных ресурсов : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 05–06 июня 2012 года / Сибирский государственный индустриальный университет ; под общей ред. В. Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2012. – С. 227–231.
59. Кипервассер, М. В. Диагностика дефектов механической части конвейерного транспорта путем автоматического контроля состояния электропривода / М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов, О. В. Ижелевская // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Пятой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 20–22 ноября 2012 года / Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. В. Ю. Островляничка. – Новокузнецк, 2012. – С. 228–233.
 60. Елисеева, И. И. Статистические методы измерения связей / И. И. Елисеева. – Л. : Изд-во Ленинградского университета, 1982. – 135 с.
 61. Елисеева, И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев ; под ред. И. И. Елисеевой. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 656 с.
 62. Большая советская энциклопедия (БСЭ) // РУБРИКОН / Компания «Русс портал». – Москва : Russ Portal Company Ltd, 2001–2011. – URL: <http://www.rubricon.com/> (дата обращения: 24.03.2022).
 63. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (моделирование и управление) / Е. К. Ещин ; Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 2003. – 247 с.
 64. Курбанов, С. А. Основы электропривода / С. А. Курбанов, Д. С. Магомедов. – СПб. : Лань П, 2016. – 192 с.
 65. Диагностика дефектов механической части конвейерного транспорта путем автоматического контроля состояния электропривода / М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов, О. И. Альмиметова, О. В. Ижелевская // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : труды VIII Всероссийской научно-практической конференции, г. Новокузнецк, 10–12 ноября 2011 г. / Сибирский государственный индустриальный университет.

– Новокузнецк, 2011. – С. 302–306.

66. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода : учебное пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.
67. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
68. Ковчин, С. А. Теория электропривода : учебник для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб. : Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
69. Компоненты приводов мехатронных устройств / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Г. В. Мозгов [и др.]. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2014. – 296 с.
70. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА-принт, 2001. – 320 с.
71. Башарин, А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 392 с.
72. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
73. Рудаков, В. В. Асинхронный электропривод с векторным управлением / В. В. Рудаков, И. М. Столяров, В. А. Дартау. – Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 136 с.
74. Усольцев, А. А. Векторное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев. – СПбГУ ИТМО, 2002. – 43 с.
75. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков [и др.] ; под ред. И. П. Копылова. – М. : Энергия, 1980. – 495 с.
76. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац ; пер. с нем. А. А. Дартау, В. А. Щедровича ; под ред. А. И. Вольдека. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
77. Справочник по автоматизированному электроприводу / В. Г. Алферов, Г. И. Андреев, М. Н. Анисимов [и др.] ; под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

78. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
79. Теория механизмов и машин. Версия 1.0 : УМКД № 363-2007 : электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Теория механизмов и машин» / П. Н.Сильченко, М. А. Мерко, М. В. Меснянкин [и др.] ; рук. творческого коллектива П. Н. Сильченко. – Электрон. дан. (3 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Теория механизмов и машин). – Электрон. опт. диск (DVD). – Системные требования: Intel Pentium.
80. Конвейеры / Р. А. Волков, А. Н. Гнутов, В. К. Дьячков [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Пертена. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. – 367 с.
81. Савельев, А. Н. Теория работоспособности технологических машин / А. Н. Савельев. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2008. – 225 с.
82. Савельев, А. Н. Диагностика аварийных режимов ленточных транспортеров в горной, металлургической промышленности / А. Н. Савельев, М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 906–910.
83. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин / Ф. К. Иванченко, В. С. Бондарев, Н. П. Колесник, В. Я. Барабанов. – Киев : ВШ, 1978. – 574 с.
84. Пугачев, Е. В. Контроль работоспособности конвейерного транспорта посредством регистрации параметров электропривода / Е. В. Пугачев, М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 3 (97). – С. 101–105.
85. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода / А. Н. Савельев, М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов, В. Е. Реморов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 12. – С. 31–33.
86. Кипервассер, М. В. Устройство защиты механизма конвейера при обрыве несущей ленты / М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов // Горная промышленность. – 2014. – № 2 (114). – С. 115–116.

87. Основы расчета деталей и узлов транспортных машин / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, С. Л. Ебский [и др.]. – Волгоград : Изд-во ВОЛГТУ, 2010. – 250 с.
88. Панкратов, С. А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ / С. А. Панкратов. – М. : Машиностроение, 1967. – 450 с.
89. Пустоветов, М. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов / М. Пустоветов, К. Солтус, И. Синявский. – Саарбрюкен : Lambert Academic Publishing, 2013. – 199 с.
90. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в Matlab / Ю. Лазарев. – СПб. ; Киев : БХВ. – 511 с.
91. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М. : МЦНМО, 2000. – 960 с.
92. Залманзон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – М. : Наука, 1989. – 496 с.
93. Дьяконов, В. П. Вейвлеты: От теории к практике / В. П. Дьяконов. – М. : Солон-Р, 2002. – 440 с.
94. Кассандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 104 с.
95. Бурдун, Г. Д. Основы метрологии / Г. Д. Бурдун, Б. Н. Марков. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 312 с.
96. Сергеев, А. Г. Метрология / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М. : Логос, 2001. – 408 с.
97. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация, сертификация / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. – М. : Логос, 2003. – 536 с.
98. Курепин, В. В. Обработка экспериментальных данных / СПбГУНиПТ ; В. В. Курепин, И. В. Баранов. – СПб., 2003. – 57 с.
99. Румшицкий, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшицкий. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
100. Яблонский, О. П. Основы стандартизации, метрологии, сертификации / О. П.

- Яблонский, В. А. Иванова. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 448 с.
101. Сигов, А. С. Метрология, стандартизация и технические измерения / А. С. Сигов, В. И. Нефедов ; под ред. А. С. Сигова. – М. : ВШ, 2008. – 624 с.
 102. Марчук, Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1989. – 608 с.
 103. Алферова, З. В. Теория алгоритмов / З. В. Алферова. – Москва : Статистика, 1973. – 164 с.
 104. Особенности математического моделирования электротехнических комплексов, имеющих в составе технологический агрегат и электрическую машину / Е. В. Пугачев, М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов, Ш. Р. Гуламов / Академические наука – проблемы и достижения : материалы VI международной научно-практической конференции, North Charleston, USA, 25–26 мая 2015 г. – North Charleston, 2015. – Т. 2. – С. 58–61.
 105. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Наука, Физматлит, 1987. – 632 с.
 106. Патент № 2531465 Российская Федерация, МПК F01D 21/04 (2006.01). Устройство защиты турбокомпрессора от осевого сдвига : № 2013130395/06 : заявлено 02.07.2013 : опубликовано 20.10.2014 / Аниканов Д. С., Кипервассер М. В. , Савельев А. Н. ; патентообладатели: Аниканов Д. С., Кипервассер М. В. , Савельев А. Н. – 4 с.
 107. Патент № 2483998 Российская Федерация, МПК B65G 43/06 (2006.01). Устройство защиты конвейера при обрыве ленты : № 2012114883/11 : заявлено 13.04.2012 : опубликовано 10.06.2013 / Кипервассер М. В., Аниканов Д. С. ; патентообладатели: Кипервассер М. В., Аниканов Д. С. – 4 с.
 108. Патент № 2553619 Российская Федерация, МПК B66B 5/02 (2006.01). Устройство защиты шахтных подъемных установок от проскальзывания каната : № 2013154383/11 : заявлено 06.12.2013 : опубликовано 20.06.2015 / Аниканов Д. С., Кипервассер М. В. , Савельев А. Н. ; патентообладатели: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования "Сибирский государственный индустриальный университет" (RU). – 4 с.

109. Тетельбаум, И. М. 400 схем для АВМ / И. М. Тетельбаум. – М. : Энергия, 1978. – 248 с.
110. Зайцев, Н. Л. Экономика промышленного предприятия : учебник / Н. Л. Зайцев. – М. : ИНФРА-М, 2008. – 414 с.
111. Ример, М. И. Экономическая оценка инвестиций / М. И. Ример, А. Д. Касатов, Н. Н. Матиенко. – СПб. : Питер, 2008. – 480 с.
112. СН 509-78. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: Стройиздат, 1979. – 65 с.
113. Ковалев, В. В. Методы оценки инвестиционных проектов / В. В. Ковалев. – М. : Финансы и статистика, 2000. – 144 с.
114. Зайцев, Н. Л. Экономика промышленного предприятия / Н. Л. Зайцев. – М. : Инфра-М, 2004. – 223 с.
115. Терехин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1) / В. Б. Терехин. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
116. Дьяконов, В. П. SIMULINK 4 / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.
117. Дьяконов, В. П. MATLAB 6/5 SP1/7+Simulink 5/6. Основы применения / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
118. Аниканов, Д. С. Предиктивная диагностика ленточных конвейеров на основе контроля электрических параметров приводного электродвигателя / Д. С. Аниканов, М. В. Кипервассер, В. П, Симаков // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов, 2021, №7. – С. 272-277.
119. Причины неисправности оборудования на шахте [Электронный ресурс] : Coalguide. Все про уголь и его добычу. – М. : COALGUIDE.RU, 2023. - Режим доступа: <https://coalguide.ru/> . – 10.10.2024.
120. Аниканов, Д. С. Мониторинг состояния механизма при помощи способа

функциональной диагностики, на примере ленточного конвейера / Д. С. Аниканов, М. В. Кипервассер // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды XII Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) / Сиб. гос. индустр. ун-т; – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019.– С. 173-177.

121. Аниканов, Д. С. Разработка алгоритма функциональной диагностики ленточного конвейера по энергетическим параметрам приводного электродвигателя / Д. С. Аниканов // Современные научные исследования и разработки, 2017, № 2(10).– С. 20-24.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

– Ток ветви намагничивания:

$$I_{\mu} = \frac{pF_{\mu}}{0,9m\omega_1 k_{\phi 1}} = \frac{2 \cdot 1143,06}{0,9 \cdot 3 \cdot 130 \cdot 0,958} = 6,8 \text{ А},$$

где p – число пар полюсов; F_{μ} – магнитное напряжение на пару полюсов; m – коэффициент ($m=3-15$); ω_1 – угловая скорость; $k_{\phi 1}$ – обмоточный коэффициент.

– Активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\phi} a} = \frac{110,24}{5,3 \cdot 41} = 0,51 \text{ Ом},$$

где ρ_{115} – удельное сопротивление меди; L_1 – длина проводников фазы обмотки; q_{ϕ} – площадь сечения эффективного проводника; a – число параллельных ветвей обмотки.

– Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} = 39,1 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,179^2} = 101,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где r_c – сопротивление стержня; $r_{кл}$ – сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соединениями стержня; Δ – коэффициент приведения токов в кольце к току стержня.

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$x_1 = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}'}{pq} (\lambda_{\mu 1} + \lambda_{\mu 1} + \lambda_{\mu 1}) = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{130}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,17}{2 \cdot 4} \cdot (2,56 + 1,23 + 0,66) = 1,25 \text{ Ом},$$

где l_{δ}' – длина радиальных вентиляционных каналов для обмотки статора; q – число укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора; $\lambda_{\mu 1,2}$ – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния; $\lambda_{\mu 1,2}$ – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния; $\lambda_{\mu 1,2}$ – коэффициент

магнитной проводимости рассеяния для обмоток статора и фаз ротора; f – частота питающей сети.

– Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 f l'_\delta (\lambda_{л2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,17(15,44 + 1,13 + 1,1) \cdot 10^{-6} = 1186,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

Потери мощности в стали:

$$P_{\text{ст.очн}} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{да} B_a^2 m_a + k_{дз} B_{z1}^2 m_{z1}) = 2,5 \cdot (1,6 \cdot 1,09^2 \cdot 7,27 + 1,8 \cdot 1,9^2 \cdot 12,1) = 542,63 \text{ Вт},$$

где $p_{1,0/50}$ – удельные потери; $k_{да}$, $k_{дз}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода; B_a и B_{z1} – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора; m_a и m_{z1} – масса стали ярма и зубцов статора; β – показатель степени.

– Относительное значение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора:

$$x_{12} \cong \frac{U_{1H}}{I_\mu} - x_1 = \frac{380}{6,8} - 1,25 = 54,6 \text{ Ом},$$

где U_{1H} – номинальное напряжение фазы; x_1 – индуктивное сопротивление фазы обмотки статора.

– Коэффициент с обратным знаком отношения вектора напряжения фазы к вектору ЭДС при синхронном вращении машины с учетом сдвига фаз этих векторов:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{1,25}{54,6} = 1,023,$$

$$a' = c_1^2 = 1,047 \text{ Ом},$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 0,52 \text{ Ом},$$

$$b = c_1 (x_1 + c_1 x_2') = 1,023(1,25 + 1,023 \cdot 3,15) = 4,58 \text{ Ом}.$$

– Потери, не зависящие от скольжения:

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 1025,9 + 198 = 1223,9 \text{ Вт}.$$

– Момент нагрузки, приведенный к приводному двигателю (при полной загрузке транспортируемым грузом):

$$M_{\text{ст.гр.}} = \frac{FgR_{\text{gap}}}{i} = \frac{539,7 \cdot 9,8 \cdot 0,318}{29} = 63,8 \text{ Нм.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Натяжение в набегающей ветви ленты (точка 9), согласно формуле Эйлера, составит (рисунок 2.5)

$$S_9 = S_1 e^{f\alpha} = 5,34 \cdot S_1.$$

Коэффициент трения ленты по резине при сухой атмосфере $f=0,40$. При $\alpha=240^\circ$ и $f=0,40$, $e^{f\alpha} = 5,34$.

В этом уравнении два неизвестных члена S_9 и S_1 . Для составления второго уравнения необходимо знать тяговый контур от точки 1 до точки 9, при этом выражая натяжение во всех точках через натяжение в точке 1— S_1 .

Для последующего расчета необходимо знать погонные нагрузки:

— от транспортируемого груза:

$$q = \frac{P}{3,6v} = \frac{250}{3,6 \cdot 1,25} = 55,5 \text{ кГ/м};$$

— от веса вращающихся частей роликов:

— рабочей ветви:

$$q'_p = \frac{G'_p}{l'_p} = \frac{2,5}{1,3} = 19,2 \text{ кГ/м};$$

— холостой ветви:

$$q''_p = \frac{G''_p}{l''_p} = \frac{21,5}{3} = 7,2 \text{ кГ/м}.$$

где l'_p — расстояние между роликоопорами на рабочей ветви (принимаем $l'_p = 1300$ мм); l''_p — расстояние между роликоопорами холостой ветви (принимаем $l''_p = 3000$ мм); G'_p и G''_p — масса вращающихся частей роликоопор соответственно для поддержания рабочей и холостой ветви; $G'_p = 25$ кГ — масса вращающихся роликоопор для желобчатой трехроликовой опоры нормального исполнения; $G''_p = 21,5$ кГ — масса вращающихся роликоопор для прямой роликоопоры.

Масса ленты:

$$q_0 = 14 \text{ кГ/м} = 1200 \text{ мм} \cdot 1,2 \text{ м} \cdot 0,01 \text{ м} = 14,4 \text{ кГ/м}.$$

Натяжение в характерных точках тягового контура определяется следующим образом:

$$S_2 = kS_1 = 1,03 \cdot S_1.$$

Так как угол обхвата лентой отклоняющего барабана меньше 90° , то $k = 1,03$.

Соппротивление движению на участке 2-3 определяется как:

$$W_{2-3} = (q_0 + q_p'')L_{2-3}\omega';$$

$$S_3 = 1,03 \cdot S_1 + (q_0 + q_p'')L_{2-3}\omega' = 1,03 \cdot S_1 + (14 + 7,2)28 \cdot 0,035 = 1,03 \cdot S_1 + 20,8.$$

Участок L_{2-3} считаем приближенно равным участку $L_4 = 29 \text{ м}$.

Соппротивление движению на участке 3-4 определяется как:

$$S_4 = S_3 + W_{3-4} = S_3 + q_0 L_{3-4}(\omega' \cos \beta - \sin \beta) + q_p'' L_{3-4} \omega' = 1,03 S_1 + 35,04;$$

$$S_5 = kS_4 = 1,08 S_1 + 36,79.$$

Соппротивление движению ленты на загрузочном участке:

$$W_{5-6} = \frac{c\pi}{3,6g}(\nu - \nu_0 + f_1 \sqrt{2gh'}) = \frac{1,5 \cdot 250}{3,6 \cdot 9,81}(1,25 + 0,8 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1}) = 50,8 \text{ кГ},$$

$$S_6 = S_5 + W_{5-6} = 1,08 S_1 + 87,59,$$

$$S_7 = S_6 + W_{6-7} = S_6 + (q + q_0)L_{6-7}(\omega' \cos \beta - \sin \beta) + q_p'' L_{6-7} \omega' = 1,08 S_1 + 486,5;$$

$$S_8 = S_7 \cdot e^{\omega' \alpha_1} = 1,09 S_1 + 491,9;$$

$$S_9 = S_8 + W_{8-9} = S_8 + (q + q_0 + q_p')L_{8-9}\omega' = 1,09 S_1 + 581,43.$$

Подставив полученные уравнения в систему уравнений, получим:

$$\begin{cases} S_9 = 5,34 S_1; \\ S_9 = 1,09 S_1 + 581,43. \end{cases} \begin{cases} S_9 = 730,5 \text{ кГ}; \\ S_1 = 136,8 \text{ кГ}. \end{cases}$$

Определяем численные значения натяжения ленты в характерных точках:

$$S_1 = 136,8 \text{ кГ};$$

$$S_2 = 140,9 \text{ кГ};$$

$$S_3 = 161,7 \text{ кГ};$$

$$S_4 = 175,9 \text{ кГ};$$

$$S_5 = 184,5 \text{ кГ};$$

$$S_6 = 235,3 \text{ кГ};$$

$$S_7 = 634,2 \text{ кГ};$$

$$S_8 = 640,5 \text{ кГ};$$

$$S_9 = 730,5 \text{ кГ}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)



«КАЛТАНСКИЙ УГОЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ»
ФИЛИАЛ ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА
«УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ»

Акт о внедрении

результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается, что результаты, содержащиеся в диссертационном исследовании Аниканова Дмитрия Сергеевича, использовались на Обоганительной Фабрике «Энергетическая» в филиале ОАО «Калтанский угольный разрез» «УК «Кузбассразрезуголь»». Внедрена на предприятии методика диагностики дефектов механической части ленточного конвейерного транспорта путем контроля электрических параметров приводных электродвигателей. Методика внедрена на **позициях 308, 309** осуществляющих распределение концентрата на укрытом складе товарной продукции.

Технические характеристики оборудования **позиции 308, 309** следующие:

- типоразмер конвейеров: 12063-120;
- производительность: **поз. 308**-400 т/ч, **поз. 309**-100 т/ч;
- общая длина: **поз. 308**-78 м, **поз. 309**-67,6 м;
- высота подъема: **поз.308**- 3,75 м, **поз. 309**-3,75 м;
- приводной электродвигатель: **поз.308**-тип АВ250S6 (P=45кВт), **поз.309**-тип ВА200M6 (P=22кВт);
- редуктор: **поз.308** тип: 1Ц2Н-450-25-12, **поз.309** тип: 1Ц2У-355-31,5-21

Достигнут экономический эффект за счёт сокращения затрат на ремонтные работы и время простоя. Сумма экономического эффекта в период 2015-2021 г. по каждому из механизмов составила 985 тыс. руб.

Гл. инженер

Гл. механик



Винников Д.В.

Куртуков А.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)



« БАЧАТСКИЙ УГОЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ »
филиал открытого акционерного общества
«УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ»

Комсомольская ул., 19 А, г.Белово-9, Кемеровская область, 652642
Тел. (38452) 7-04-20, факс (38452) 7-29-30, e-mail: office@bach.kru.ru
ОКПО 14 78 96 75, ОГРН 103 42 05 04 09 35, ИНН/КПП 4205049090/420202004



Акт о внедрении

результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается, что результаты, содержащиеся в диссертационном исследовании Аниканова Дмитрия Сергеевича, использовались на «Установка для извлечения угля из разубоженной горной массы (РГМ)» филиал ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»» «Бачатский угольный разрез». Внедрена на предприятии методика диагностики дефектов механической части ленточного конвейерного транспорта путем контроля электрических параметров приводных электродвигателей. Методика была внедрена на **позициях 42.1, 43** осуществляющих транспортировку угольного кека.

Технические характеристики оборудования позиций **42.1, 43** следующие:

- приводной электродвигатель: **поз 42.1, 43** - тип АВ250S6 (P=55кВт);
- редуктор: **поз. 42.1, 43** - тип: 1Ц2Н-450;

Достигнут экономический эффект за счёт сокращения затрат на ремонтные работы и время простоя. Сумма ежегодного эффекта в период 2015-2021 г. по каждому из механизмов составила 1 065 тыс. руб.

Гл. инженер

Гл. энергетик



Чирков В.Г.

Монташев С.М.