

Научно-исследовательский технологический университет МИСиС

На правах рукописи
УДК 622.647:621.867.2:681.57

Бухаров Роман Алексеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПУСКО-ТОРМОЗНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ЛЕНТОЧНОГО
КОНВЕЙЕРА, НЕ ДОПУСКАЮЩЕЙ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ЛЕНТЫ**

Специальность 05.13.06 —
«Автоматизация и управление технологическими процессами (промышленность)»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доцент, кандидат технических наук
Дмитриева В. В.

Москва – 2015

Содержание

Введение	5
1 Обзор научно-исследовательских работ, посвященных исследованиям повышения эффективности эксплуатации ленточных конвейеров	8
1.1 Обзор научно-исследовательских работ	8
1.2 Постановка задач	16
2 Исследование пуско-тормозных режимов работы ленточного конвейера	17
2.1 Математическая модель одноприводного двухбарабанного ленточного конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части	18
2.2 Модификация исходной модели конвейера для возможности управления натяжным устройством	21
2.2.1 Модель движения ленты	21
2.2.2 Модель натяжного устройства	22
2.3 Модификация модели конвейера для исследования процессов торможения	24
2.4 Вычисление натяжений ленты конвейера и тягового фактора	26
2.5 Моделирование различных режимов работы ленточного конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части	30
2.5.1 Пуск конвейера и переключение с меньшей скорости на большую	34
2.5.2 Останов конвейера без использования торможения (свободный выбег)	38
2.5.3 Останов конвейера с использованием торможения приводного барабана	41
2.5.4 Торможение хвостового барабана конвейера	45
2.6 Выводы по главе 2	48
3 Разработка алгоритма управления процессами останова и пуска конвейера	50
3.1 Исследование изменения натяжений ленты конвейера при торможении хвостового барабана	51
3.1.1 Общее описание процесса торможения	51
3.1.2 Определение зависимости между динамическими натяжениями ленты и силой трения, возникающей при торможении хвостового барабана	52
3.1.3 Моделирование процесса торможения хвостового барабана с предварительно рассчитанной величиной тормозного момента	55
3.1.4 Моделирование процесса останова конвейера посредством свободного выбега с предварительным торможением хвостового барабана	55
3.2 Исследование изменения натяжений ленты конвейера после останова привода	58
3.3 Моделирование торможения ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова	60
3.4 Исследование режима пуска конвейера после его останова с предварительным торможением хвостового барабана	63

3.4.1	Исследование отключения тормозных устройств на остановленном конвейере	64
3.4.2	Исследование пуска конвейера с одновременным отключением тормозных устройств	66
3.5	Описание общей методики расчета параметров для работы алгоритма останова конвейера с предварительным торможением хвостового барабана	67
3.6	Исследования работы алгоритма предварительного управляемого торможения конвейера в зависимости от загруженности конвейера	69
3.7	Выводы по главе 3	72
4	Разработка комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой	73
4.1	Структура комплексной автоматизированной системы управления конвейерной установкой	73
4.2	Выбор управляющего программного и аппаратного обеспечения для технической реализации комплексной автоматизированной системы управления конвейерной установкой	80
4.2.1	Выбор программируемого контроллера и среды разработки алгоритмов	80
4.2.2	Выбор коммуникационных модулей	83
4.2.3	Выбор источников питания	85
4.2.4	Выбор первичных преобразователей (датчиков)	86
4.2.5	Выбор языка программирования для реализации алгоритмов управления	86
4.3	Программирование алгоритмов управления	86
4.3.1	Об особенностях разработки программного обеспечения для ПЛК Simatic S7-300	87
4.3.2	Функциональный блок расчета параметров управляющих алгоритмов	87
4.3.3	Функциональный блок расчета текущего значения тягового фактора	87
4.3.4	Функциональный блок реализации алгоритма предварительного торможения конвейера	88
4.3.5	Функциональный блок реализации регулятора натяжения ленты конвейера	89
4.3.6	Функциональный блок реализации оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера	90
4.3.7	Основная управляющая программа	91
4.4	Особенности реализации и отладки комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой	91
4.5	Выводы по главе 4	94
	Заключение	95
	Список рисунков	99
	Список таблиц	100
	Литература	101
A	Программа расчета параметров математическо модели ленточного конвейера	106
B	Числовые значения матриц	109
B.1	Числовые значения матриц системы уравнений, описывающей исходную математическую модель ленточного конвейера	109
B.2	Числовые значения матриц исходной внутренней модели ленточного конвейера	110

В.3	Числовые значения матриц системы уравнений, описывающей движение ленты конвейера отдельно от натяжного устройства	111
В.4	Числовые значения матриц внутренней модели движения ленты конвейера отдельно от натяжного устройства	111
В.5	Числовые значения матрицы управления модифицированной модели движения ленты конвейера	112
С	Исходный код программы вычисления зависимостей натяжений в ленте от ее деформаций	113
Д	Исходные коды программ реализации алгоритмов управления	114
D.1	Исходный код расчета параметров управляющих алгоритмов	114
D.2	Исходный код функционального блока вычисления текущего значения тягового фактора	115
D.3	Исходный код функционального блока реализации алгоритма предварительного торможения конвейера	116
D.4	Исходный код функционального блока реализации регулятора натяжения ленты конвейера	117
D.5	Исходный код функционального блока реализации интегратора	118
D.6	Исходный код функционального блока реализации оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера	120
D.7	Список переменных программы управляющего контроллера	122
D.8	Исходный код основной управляющей программы	124

Введение

Актуальность работы. Ленточные конвейеры являются неотъемлемой составляющей транспортных систем горных предприятий в России и за рубежом.

Технические сложности и особенности работы ленточных конвейеров, такие как проскальзывание ленты, ударные нагрузки в приводе, повышенный износ оборудования, значительный расход электроэнергии при неполной загрузке и работе вхолостую, приводят к поиску решения задач оптимизации и автоматизации процессов работы конвейерных установок, то есть к повышению общей эффективности их эксплуатации. В настоящее время системы управления работой ленточных конвейеров на горных предприятиях решают ограниченный круг задач повышения эффективности работы и увеличения срока службы оборудования, и в большинстве своем реализуют такие функции, как оперативно-диспетчерское управление (пуск, останов, переключение скорости движения ленты), поддержание определенного уровня производительности, сигнализацию и контроль состояния оборудования.

Причинами этого является сложность и особенности технологического процесса (колебания ленты, возникающие при переключении скорости, пуске и останове, возможность проскальзывания ленты при определенных условиях и т. д.), грузопоток, величина которого обычно носит случайный характер, зависимость эффективности работы конвейерной установки от сторонних факторов, например, от погодных условий, а также тяжелые условия работы оборудования автоматизации. Таким образом, разработка и техническая реализация новых решений в области автоматизации и управления конвейерными установками горных предприятий с целью повышения эффективности их эксплуатации является в настоящее время актуальной задачей.

Целью работы является разработка новых решений в области автоматизации и управления для повышения эффективности эксплуатации конвейерного транспорта горных предприятий. В работе получен новый алгоритм останова конвейера, а также разработана структура и вариант реализации комплексной автоматизированной системы управления магистральным ленточным конвейером, реализующей алгоритмы, которые позволяют оптимизировать исследуемые процессы пуска, останова и изменения скорости движения ленты конвейеров с целью повышения эффективности эксплуатации конвейерного транспорта горных предприятий.

Задачи исследования. Указанная цель определила следующие задачи исследования:

- доработка реализованной ранее математической модели ленточного конвейера для возможности исследования процессов торможения;
- исследование режимов торможения и пуска ленточного конвейера определенного типа;
- разработка алгоритмов управления исследуемыми режимами работы конвейера;
- разработка структуры комплексной системы автоматизированного управления, реализующей разработанные алгоритмы;
- предложение варианта технической реализации комплексной системы автоматизированного управления ленточным конвейером.

Идея работы состоит в исследовании процессов останова ленточного конвейера и разработке комплексной системы автоматизированного управления ленточным конвейером для повышения эффективности его эксплуатации.

Предмет защиты. На защиту выносятся следующие новые и содержащие элементы новизны основные положения и результаты:

1. доработанная математическая модель ленточного конвейера, позволяющая исследовать процессы торможения;
2. разработан алгоритм управления остановом конвейера, основанный на предварительном управляемом торможении хвостового барабана, обеспечивающий устранение проскальзывания ленты и повышающий эффективность эксплуатации конвейера;
3. предложены методические подходы к выбору и расчету параметров алгоритма управления остановом конвейера, позволяющие использовать разработанный алгоритм для конвейеров различных модификаций;
4. разработана структура комплексной автоматизированной системы управления конвейерной установкой, реализующей несколько алгоритмов управления;
5. предложен вариант реализации комплексной автоматизированной системы управления конвейерной установкой и разработанных алгоритмов управления с применением современных аппаратных и программных средств.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Доработана математическая модель конвейера, которая позволяет моделировать и исследовать процессы торможения;
2. Разработаны и реализованы алгоритмы управления, которые позволяют оптимизировать переходные процессы пуска и торможения ленточного конвейера, включающие в себя контроль натяжений ленты конвейера посредством предварительного управляемого торможения барабанов конвейера;
3. Разработана методика расчета параметров алгоритмов управления, позволяющая применять их для конвейеров различных типов;
4. Разработана структура комплексной системы управления конвейерной установкой, осуществляющая управление различными процессами, в том числе процессами пуска и торможения конвейера;
5. Разработано программное обеспечение и подобрано аппаратное обеспечение комплексной системы управления конвейерной установкой.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории волновых процессов в упругих средах, теоретической механики, классической теории автоматического управления, методы статистического анализа и математического моделирования. Применено современное программное обеспечение Matlab R2012b (8.0.0.783), SIMATIC Step 7, PLCSIM v.5.4 для построения моделей, обработки данных и подтверждения результатов.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается результатами модельных исследований, корректным применением известных методов математического анализа,

теории волновых процессов в упругих средах, теоретической механики, теории автоматического управления, теории регулируемого электропривода и достаточной близостью результатов модельных исследований результатам работы реального технологического процесса, взятым с осциллограмм натурных испытаний и работы в производственных условиях.

Практическая значимость. Разработанные в диссертации методы и алгоритмы управления реализованы на современном промышленном аппаратном обеспечении и могут быть использованы при проектировании новых и совершенствовании действующих систем управления процессами транспортировки грузов на ленточных конвейерах, а также для обучения студентов, повышения квалификации персонала по автоматизации технологических процессов и в научных исследованиях в области автоматизации и управления. Использование реализованных алгоритмов управления в промышленности позволит снизить износ ленты конвейеров, уменьшить расходы электроэнергии, а также минимизировать динамические усилия в ленте, что снизит коэффициент запаса по прочности ленты, позволяя использовать менее дорогие типы ленты и продлить срок ее службы.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и формулировке задач исследований, доработке существующих математических моделей исследуемого объекта, проведении экспериментов с математическими моделями исследуемого объекта, исследовании и моделировании методов управления процессами пуска и торможения конвейера в различных условиях, разработке и отладке алгоритмов управления исследуемыми процессами, разработке методики расчета и выбора параметров алгоритмов управления, проведении модельных исследований разработанных алгоритмов управления и анализе их работы, реализации разработанных алгоритмов управления на современном промышленном оборудовании для автоматизации.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научной секции XIV Международной студенческой олимпиады по автоматическому управлению ВОАС'2011 (НИУ ИТМО, 2011 г.), на ежегодном научном симпозиуме «Неделя горняка» (МГГУ, 2012, 2014 г.), на Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (НМСУ «Горный», 2014 г.), на научных семинарах кафедры «Автоматика и управление в технических системах» (МГГУ, 2012 – 2014 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ в периодических изданиях и в сборниках научных трудов [10–13, 23–26], в том числе 5 работы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации составляет 126 страниц с 58 иллюстрациями и 9 таблицами. Список литературы содержит 81 наименование.

Работа выполнена на кафедре «Автоматики и управления в технических системах» Горного института (МГИ) Национального Исследовательского Технологического университета МИСиС.

Глава 1

Обзор научно-исследовательских работ, посвященных исследованиям повышения эффективности эксплуатации ленточных конвейеров

1.1 Обзор научно-исследовательских работ

Применение транспортных машин непрерывного действия, в частности ленточных конвейеров, характеризуется низкой эффективностью. Регулирование скорости движения ленты, оптимизация пусковых и тормозных процессов, а также контроль проскальзывания ленты позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации транспортных машин. Лента является основным и наименее долговечным элементом ленточного конвейера. Ее стоимость может составлять около половины общей стоимости конвейера, а высокие амортизационные затраты на обслуживание ленты – немаловажный фактор при определении области применения и экономической эффективности конвейерного транспорта. Поэтому оптимизация режимов работы конвейерной установки, направленная на увеличение срока службы ленты, оказывает существенное влияние на общую эффективность эксплуатации конвейерных установок.

Проблемам разработки алгоритмов оптимизации работы конвейеров, синтеза регуляторов и систем управления, проведению модельных и натурных исследований посвящено множество научных работ, разработаны различные структурные схемы систем и алгоритмов регулирования, в том числе оптимальных. Ниже рассмотрены работы следующих авторов: Дмитриевой В. В., Мамалыги В. М., Петкова О. Н., Сухарева И. А., Сокотнюка Ю. А., Гершуна С. В., Серикова С. А., Черемушкиной М. С., Мартынова В. В., Городецкого А. В., Кангина В. В. Симонса А..

Основные факторы, которые отрицательно сказываются на сроке службы конвейерной ленты – это динамические нагрузки при переключении скорости ее движения, а также проскальзывание ленты в различных режимах работы конвейера. Проскальзывание ленты на приводном барабане может возникать при разгоне или торможении конвейера, и это отрицательно влияет не только на срок службы ленты, но и на срок службы привода конвейера. Этот фактор можно исключить или свести к минимуму, применяя различные способы управления, которые основаны на своевременном изменении натяжений в ветвях конвейера таким образом, чтобы соблюдалось условие Эйлера [66], что в свою очередь гарантирует отсутствие проскальзывания ленты. В режимах пуска конвейера и его номинальной работы целесообразно изменять натяжения в ветвях конвейера посредством изменения силы тяжести натяжного устройства.

В работе **Дмитриевой В. В.** «Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера» [27] представлена структура системы автоматического управления и алгоритмов регулирования скоростью движения конвейерной ленты, которые позволяют обеспечить рациональную нагрузку конвейера сыпным грузом при условии обеспечения беспробуксовочной работы главного привода при любом изменении скорости движения ленты. Разработана математическая модель сложной многомерной системы управления движением ленты, динамики натяжного устройства, частотно-управляемого асинхронного привода магистрального конвейера, позволяющая исследовать конвейерную установку как единый объект управления, моделировать технологический процесс транспортирования случайного грузопотока и искать решение задачи стабилизации погонной нагрузки конвейера в классе линейных оптимальных регуляторов. Разработана структура многоконтурной автоматической системы регулирования погонной нагрузки конвейера, стабилизации тяговой способности привода, которая позволяет реализовать алгоритм оптимальной нагрузки конвейера. Разработан алгоритм управления движением ленты, который обеспечивает плавное изменение скорости, соответствующее случайному входному грузопотоку, снижение динамических нагрузок в ленте, уменьшение количества пуско-тормозных режимов, уменьшение холостого пробега ленты.

В работе рассматриваются расчетные схемы для конвейеров с однодвигательным приводом. Разработана комплексная модель стабилизации погонной нагрузки конвейера, включающая подсистемы:

- модель движения ленточного конвейера и натяжного устройства;
- модель асинхронного частотно-управляемого короткозамкнутого привода;
- модель регулятора натяжения;
- модель регулятора скорости движения ленты, включающая в себя модель шахтного случайного грузопотока, модель задатчика скорости, собственно регулятор и модель устройства, позволяющего определить величину ошибки регулирования.

В работе **Мамалыги В. М.** «Взаимосвязанная система управления многодвигательными ленточными конвейерами» [43] предложен способ построения системы автоматического распределения нагрузок в n -двигательном ленточном конвейере с целью их равномерного распределения между приводами, независимо от их расположения и количества, при любой скорости движения конвейера. При выполнении этого условия возможно снизить статический запас прочности ленты и уменьшить стоимость ленты.

В диссертации разработана структурная схема взаимосвязной системы автоматического управления многобарабанным ленточным конвейером. Особое внимание уделено оптимизации динамических режимов работы конвейера. Рассмотрено ограничение динамических нагрузок при пуске – рывок и ускорение, это ограничение позволяет снизить износ ленты, уменьшить ее прочность и стоимость, также рассмотрено обеспечение высокой точности регулирования скорости при работе конвейера с постоянной скоростью, что позволяет уменьшить износ и пробег ленты. Автором введен критерий оптимальности динамических режимов конвейера в виде функционала, в котором учитываются как точность отработки сигнала задания по скорости, так и ограничения на величины динамического усилия и ускорения. Функционал минимизируется с использованием интегрального уравнения Винера-Хопфа.

В работе **О. Н. Петкова** «Разработка и исследование системы автоматического управления скоростью ленточного конвейера по входному грузопотоку» [52] исследованы карьерные угольные грузопотоки (карьер “Трояново-3”, Болгария) и определены их вероятностные характеристики: корреляционная функция определена в виде:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau,$$

что соответствует спектральной плотности вида

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sigma^2 \alpha \left[\frac{1}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2} \right],$$

где σ^2 – дисперсия случайного процесса, α – параметр затухания, ω_0 – резонансная частота.

В работе установлено, что законы распределения длительностей поступления и отсутствия грузопотока имеют экспоненциальный характер. Для системы регулирования скорости ленточного конвейера с целью стабилизации погонной нагрузки разработаны модели конвейера и привода с асинхронным электродвигателем с фазным ротором. Эти объекты представлены простейшими типовыми моделями первого и второго порядка. Для них рассчитаны коэффициенты передачи, постоянные времени и постоянные запаздывания. В работе рассмотрены различные варианты регулирования при помощи типовых П-, ПД- и ПИД-регуляторов, настройки которых получены с использованием программы оптимизации, входящей в состав вычислительных средств “МАСС”. Разработанный алгоритм управления скоростью движения конвейера позволяет определять значение необходимой скорости движения, осуществлять формирование управляющего сигнала в зависимости от прогнозируемых характеристик случайного грузопотока, от отклонения реальной скорости от заданной и от текущей погонной нагрузки.

Существенным недостатком этой работы является то, что модели элементов автоматической системы излишне упрощены, синтез проведен также самыми упрощенными способами, а настройки регуляторов получены для конкретного грузопотока, ленточного конвейера и привода, что не позволяет применять эту систему управления для грузопотоков других шахт и карьеров.

В работе **Сухарева И. А.** «Управление конвейерными линиями на базе асинхронного электропривода в рамках АСУ ТП» [62] показано, что эффективность работы конвейерного транспорта существенно повышается с применением асинхронного электропривода, который позволяет обеспечить высокий уровень качества работы и надежность всей системы. Сделанный анализ исполнительных элементов показал целесообразность использования асинхронного двигателя с фазным ротором, включенного по схеме асинхронно-вентильного каскада. Автором получена математическая модель асинхронного двигателя в виде нелинейной системы дифференциальных уравнений первого порядка, описывающая разомкнутую систему электропривода, выбран способ регулирования скорости асинхронного двигателя, базирующегося на импульсном управлении. В работе предложен модифицированный алгоритм синтеза системы управления многодвигательным приводом, которая должна обеспечить компенсацию механических колебаний, вызванных упругостью ленты и синхронизацию работы исполнительных элементов. Система синхронизации реализуется по принципу дистанционного электрического вала с одним ведущим исполнительным элементом и $n - 1$ ведомыми. Для оптимальной стабилизации возмущающих воздействий на привод со стороны ленты конвейера выбран интегральный критерий

$$\int_0^{\infty} [M(t) - M_{BH}(t)]^2 dt,$$

где $M(t)$ – момент, развиваемый приводом в каждом канале управления, $M_{BH}(t)$ – внешний момент сопротивления конвейера движению. Скачкообразное изменение внешнего момента соответствует переводу конвейера на другую скорость. Недостатком работы является то, что автором не рассматривается задача загрузки конвейера, который в данной работе рассматривается как возмущающее воздействие.

Целью работы **Сокотнюка Ю.А.** «Система автоматического управления наклонным ленточным конвейером» [60] являлась разработка системы автоматического управления наклонным

ленточным конвейером с регулируемым электроприводом, обеспечивающим ограничение динамических нагрузок привода. Это достигается введением обратной связи по разности скоростей ленты на приводном и хвостовом барабанах, использовании общего регулятора скорости вращения и тяговой способности второго барабана, зависящей от режима работы первого барабана, что приводит к выравниванию тяговой способности обоих барабанов.

Автором рассмотрены технологические схемы ленточных конвейеров с одним и двумя приводами и их различным расположением (на головном и хвостовом барабане, на порожней ветви, второй привод у головного барабана), получены структурные схемы этих конвейеров и получены их модели в виде передаточных функций второго порядка:

$$W(p) = \frac{V(p)}{M_d(p)} = \frac{T_1^2 p + T_2 p + 1}{T_m p (T_3^2 p + T_4 p + 1)}.$$

Автор предложил повысить демпфирующие способности электропривода путем введения на вход регулятора скорости дополнительной отрицательной обратной связи по разности скоростей движения ленты на приводном и хвостовом барабанах. Разработан вариант системы автоматического управления с коррекцией по величине проскальзывания ленты на приводном барабане ленточного конвейера, в которой величина максимального движущего момента, развиваемого приводом, уменьшается в зависимости от величины проскальзывания, обеспечивая таким образом тяговую способность привода.

Недостатком такой схемы управления является то, что для стабилизации тяговой способности привода автор предлагает изменять скорость вращения привода, тем самым усложняя закон регулирования, включая в него излишние пуско-тормозные режимы, а не использовать при решении данной задачи натяжное устройство конвейера.

Автором предложена схема системы автоматического управления с тиристорным электроприводом, которая может обеспечить управление скоростью ленточного конвейера в зависимости от уровня загрузки. Использование такой схемы регулирования возможно только при расположении привода в хвостовой части конвейера, так как в любом другом случае конвейер, являясь инерционным звеном, существенно задержит отработку сигнала задания, что приведет к ссыпанию груза с ленты. Кроме того, для этой системы не разработаны ни алгоритмы управления, ни структура регулирующего устройства, что делает затруднительным ее использование.

В работе **Гершуна С. В.** «Система автоматической стабилизации тягового фактора магистрального ленточного конвейера с двухдвигательным приводом» [18] разработана модель системы стабилизации тягового фактора магистрального ленточного конвейера с двухдвигательным приводом. Это обеспечивает беспробуксовочную работу привода конвейера, что, в свою очередь, уменьшает динамические усилия в ленте и снижает коэффициент запаса по прочности конвейерной ленты, позволяя выбирать для конвейера менее дорогие типы ленты. В диссертации разработаны модели конвейера с двухдвигательным приводом и натяжным устройством, расположенным в хвостовой части, и короткозамкнутых частотно-управляемых приводов. Модели представлены в виде системы дифференциальных уравнений и реализованы в приложении Simulink пакета MatLab.

Также в работе были реализованы:

- модель частотно-векторной системы управления электроприводом, изначально предложенной фирмой Siemens. Система построена в виде двух каналов: канала стабилизации потока сцепления ротора и канала управления скоростью вращения ротора, каждый из которых в свою очередь является системой подчиненного регулирования;
- регулятор натяжения. Была найдена зависимость величины тягового фактора веса натяжного устройства. Также была найдена зависимость перемещения натяжного устройства

от веса его грузов. В регуляторе натяжения сравнивается вес натяжных грузов, соответствующий текущей величине тягового фактора и заданной. Их разница подается на вход ПИ-регулятора и преобразуется в соответствующее значение добавочного перемещения каретки натяжного устройства.

В итоге была получена математическая модель, которую можно использовать для дальнейшего изучения двухдвигательного конвейера, его моделирования при различных условиях, а также разработки систем управления. Рассчитаны мощности двигателей электропривода для конвейера с заданными параметрами. Двигатели промоделированы на основе характеристик существующих двигателей с аналогичными мощностями. Получена модель автоматической стабилизации величины тягового фактора магистрального конвейера с двухдвигательным приводом. Автоматическая стабилизация осуществляется регулированием положения каретки натяжного устройства, что обеспечивает приемлемое соотношение натяжений в грузовой и порожней ветвях ленты конвейера.

В работе **Серикова С. А.** «*Оптимальная адаптивная система управления электроприводами подвесных конвейеров*» [57] разработана оптимальная адаптивная система автоматического управления электроприводами подвесных конвейеров с целью минимизации колебаний грузов относительно положения равновесия независимо от характера их нестационарности и воздействия внешних возмущающих факторов.

В работе решены следующие задачи:

- разработана математическая модель электромеханической системы конвейера с приводом переменного и постоянного тока, учитывающая распределено-упругий характер параметров механической части;
- разработан алгоритм адаптивной идентификации динамических объектов;
- проведены исследования математической модели электромеханической системы приводов конвейера, подтверждающие высокую скорость сходимости и точность полученных оценок разработанного алгоритма адаптивной идентификации динамических объектов;
- разработано программное обеспечение, позволяющее идентифицировать параметры динамических объектов для получения их математических моделей;
- разработана структура аппаратной части и алгоритмы функционирования адаптивной системы автоматического управления приводами подвесных конвейеров;
- проведены исследования полученных математических моделей.

В работе **Черемушковой М. С.** «*Синтез алгоритмов управления многодвигательным электроприводом конвейерного транспорта с использованием полупроводниковых преобразователей*» [73] создан алгоритм управления с коррекцией сигналов задания в системе управления многодвигательным частотно-регулируемым приводом конвейера, учитывающим случайный характер грузопотока. Установлены зависимости изменения электромагнитного момента двигателя от динамических нагрузок на валу привода конвейера в режиме пуска и в рабочих режимах при различных алгоритмах управления, позволяющие обеспечить необходимый алгоритм функционирования системы управления многодвигательным частотно-регулируемым приводом конвейера, что обеспечивает энергетически эффективный режим работы транспортной установки. В работе рассмотрены возможности построения микропроцессорной системы управления комплексом конвейерных линий. Приводятся технические требования к аппаратным средствам и организации связи системы верхнего уровня и локальных систем управления. Также рассмотрена организация и структура системы контроля и диагностики комплекса приводов конвейерной линии.

Целью работы являлось повышение энерго- и ресурсосбережения конвейерного транспорта путем реализации разработки алгоритмов управления частотно-регулируемыми приводами конвейера.

В работе решены следующие задачи:

- разработана математическая модель системы Привод – Конвейер и поточно-транспортной системы из нескольких параллельно и последовательно включенных конвейеров;
- разработаны алгоритмы управления частотно-регулируемым приводом конвейерного транспорта, позволяющие обеспечить равномерность натяжения ленты по ее длине и автоматическое регулирование отдельных двигателей с целью равномерного распределения нагрузки между ними;
- проведено определение эффективности применения разработанных алгоритмов управления.

В диссертации на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная практическая задача повышения энерго- и ресурсосбережения конвейерного транспорта путем реализации разработанных алгоритмов и системы управления асинхронным частотно-регулируемым многодвигательным электроприводом конвейерного транспорта. Разработанная математическая модель электромеханической системы конвейер – многодвигательный асинхронный частотно-регулируемый электропривод с реализацией в среде Simulink пакета программ MatLab позволяет выполнить исследования режимов работы электропривода конвейера с учетом специфики работы механизма при различных алгоритмах управления электроприводом.

Также в работе показана целесообразность использования локального цифрового управления моментом асинхронного двигателя с разработанным алгоритмом корректировки сигналов задания, обеспечивающего повышение равномерности распределения нагрузки между приводными двигателями и ограничение динамических нагрузок на ленту.

В работе **Мартынова В. В.** «Разработка алгоритмов и устройств автоматического контроля количества сыпучих материалов на ленте конвейера на основе деформации электрополей» [44] разработан метод автоматического оперативного контроля количества сыпучего материала на ленте конвейера, помещенного в однородное электрическое поле, математическая модель и алгоритмы определения параметров искажения электрического поля, созданы технические средства контроля на этой основе.

Лента конвейера с транспортируемым материалом пропускается сквозь полость измерительного конденсатора, одна из пластин которого секционирована с целью создания в исследуемом пространстве квазистационарного однородного электрического поля. Изменения характеристик этого поля, порождаемые транспортируемым материалом, с высокой точностью измеряются, что позволяет вычислить необходимые параметры грузопотока.

Основные научные положения работы состоят в следующем:

- разработанный способ формирования квазистационарного однородного электрического поля позволяет оценивать параметры, приводящие к его возмущению;
- найдена математическая модель оценки параметров электрического поля, позволяющая создать методику оперативного измерения параметров грузопотока на ленте конвейера;
- предложенная концепция построения преобразователя позволяет формировать схемы различных измерителей параметров грузопотока на ленте конвейера.

Работа **Городецкого А. В.** «Исследование влияния пускового режима на выбор параметров линейной части ленточного конвейера» [19] посвящена исследованию режима пуска ленточного

конвейера на ходовых опорах с целью разработки методики расчета параметров его линейной части, что обеспечивает его надежную работу во всех режимах транспортировки грузов.

В работе исследованы методы, которые путем установления рациональных параметров линейной части конвейера обеспечивают режим пуска, при котором натяжения в ленте не превышают допустимых. Автором разработаны следующие научные положения:

- установлены зависимости для определения предварительного натяжения цепного контура горизонтального ленточного конвейера, отличающиеся тем, что они учитывают падение натяжения цепей у головной звездочки при пуске конвейера за счет сил трения упругого скольжения ленты по траверсам ходовых опор;
- разработаны методики тягового расчета и расчета основных параметров линейной части ленточного конвейера, позволяющие на стадии проектирования выбирать ширину ленты, определять предварительное натяжение цепей с учетом падения натяжения у головной звездочки при пуске конвейера, длину цепного контура по допустимому уровню натяжений в цепях с учетом сил, возникающих при пуске конвейера.

В работе **Авдиенко И. Н.** *«Автоматизированное управление многоярусной конвейерной системой с композиционными полимерными лентами»* [1] представлен аналитический обзор конвейерных систем, в котором описаны особенности конвейеров, различающихся по областям применения, по назначению и другим факторам. Описаны основные направления развития конвейерных систем. Особое внимание в обзоре уделено ленточным конвейерам, техническим особенностям их узлов, в частности, особенностям ленты.

В работе проведено моделирование процесса деформации композитной полимерной ленты, в ходе которого рассмотрены физико-механические особенности ленты такого типа, определен вид основных зависимостей, определяющих деформационные свойства ленты. Также разработана программная реализация математической модели деформации ленты, позволяющая получить описание статических и динамических свойств ленты.

В продолжение исследований было проведено моделирование конвейерной системы с композитными полимерными лентами. В ходе моделирования проведен анализ приводов, используемых в конвейерных системах, разработана математическая модель системы, состоящая из двух модулей формирования грузового и тягово-несущего потоков. Модель учитывает весь комплекс особенностей конвейерной системы, включая зависимость силы сопротивления движению от деформирования транспортируемого груза.

На основе модели конвейерной системы разработана методика тягового расчета, позволяющая выбрать величину начального усилия натяжения ленты с учетом ее деформируемости.

В заключение рассмотрены способы автоматизированного управления конвейерными системами, при этом были выбраны критерии управления многоярусными конвейерными системами, обоснована необходимость адаптации математической модели конвейерной системы в условиях дрейфа параметра ленты, обусловленного процессами старения. Разработан алгоритм адаптации математической модели. Сформулирована задача системы управления производительностью конвейерной системы. Разработана схема и алгоритм адаптивного управления конвейерной системой на основе разработанной математической модели и принципа управления по возмущению.

В работе **Кангина В. В.** *«Повышение эффективности систем управления распределительными конвейерами и автоматизированными складами на основе структурного моделирования процессов и объектов»* [38] рассмотрены различные типы конвейерных установок и систем, показаны примеры, методы управления, рассмотрены основные проблемы при организации работы конвейеров. Рассмотрены три способа реализации систем управления конвейерными системами – аппаратный, программный и программно-аппаратный. Указаны достоинства и недостатки каждого из способов. В частности сказано, что аппаратный способ построения конвейерных систем

нашел применение только при автоматизации простейших конвейерных установок с жестким циклом, постоянными маршрутами изделий и небольшим числом адресатов.

Большое внимание уделено программным методам реализации автоматизированных систем, построению с их помощью как простых, так и иерархических систем автоматизации.

В работе дана научно обоснованная методология построения иерархических систем управления, используемых в системах автоматизации транспортных и складских комплексов, а также конвейерных линий. Эта методология включает в себя такие аспекты как декомпозиция технологического процесса на подпроцессы, построение и исследование терминальных моделей объектов, формулирование задач, решаемых на различных уровнях систем управления, синтез структуры элементов нижнего уровня, определение числа уровней в системе. Построены терминальные модели таких объектов автоматизации как распределительный конвейер, конвейерная система модульного типа, исследование которых позволило сформулировать алгоритмы функционирования элементов нижнего уровня систем управления.

Предложен новый подход к построению систем управления иерархического типа, позволяющий отобразить свойства объекта управления в оптимальную структуру системы управления, характеризующуюся максимальным быстродействием, простыми алгоритмами управления, минимальными аппаратными затратами.

Результаты проведенных в работе исследований могут быть использованы в качестве методологической основы для научно-обоснованного проектирования эффективных систем управления не только распределительными конвейерами и складскими комплексами, но и другими типами систем управления. Результаты могут быть использованы для разработки систем управления промышленными объектами различного технологического назначения.

В работе **Симонса А.** «Разработка и научное обоснование параметров тормозного устройства мощных наклонных ленточных конвейеров» [59] рассмотрены различные виды тормозных устройств, применяемых в транспортных системах горной промышленности. В работе установлены закономерности формирования тормозного момента для тормоза с осевым нажатием, размещаемого на валу приводного барабана ленточного конвейера, разработаны методы расчета и выбора параметров тормозного устройства. В частности, разработана принципиальная схема тормоза с осевым нажатием и увеличенным тормозным моментом, установлены закономерности формирования тормозного усилия в тормозах с осевым нажатием и разработана математическая модель тормозного устройства. В соответствии с разработанной моделью требуемое тормозное усилие на ободе приводного барабана может быть найдено из дифференциального уравнения:

$$\left(m_k + \frac{2cJ_1 i_p^2 \eta}{D^2}\right) \frac{dV}{dt} + \Sigma W + W_T = 0,$$

где m_k – приведенная масса поступательно движущихся элементов конвейера, кг; c – коэффициент учета моментов инерций остальных вращающихся элементов привода, кроме вала привода конвейера; J_1 – момент инерции вращающихся масс вала привода конвейера; i_p – передаточное отношение редуктора привода конвейера; η – КПД передаточного механизма привода; D – диаметр приводного барабана, м; $\frac{dV}{dt}$ – производная скорости при замедлении ленты в процессе торможения; ΣW – суммарные статические сопротивления движению ленты; W_T – требуемое тормозное усилие. Из этого уравнения следует, что требуемый тормозной момент на валу приводного барабана для торможения конвейера равен:

$$M_T = \left(m_k + \frac{2cJ_1 i_p^2 \eta}{D^2}\right) \frac{V}{t} - \Sigma W \frac{D}{2},$$

где V – начальная скорость движения ленты, м/с; t – время торможения, с.

1.2 Постановка задач

Анализ рассмотренных в обзоре работ показывает, что проблема снижения износа ленты при останове ленточного конвейера не имеет окончательного решения. В настоящее время в связи с развитием промышленной микропроцессорной управляющей техники появилась возможность решения этой проблемы современными методами. Это позволяет сформулировать следующие задачи исследования в области автоматизации и управления конвейерными установками:

- Исследование существующей математической модели ленточного конвейера, описанной в [28], и ее доработка для последующих исследований эксплуатации конвейерной установки в режимах пуска и торможения;
- Исследование переходных процессов пуска и торможения конвейера и поиск способов управления этими процессами с целью оптимизации и повышения эффективности работы конвейера;
- Разработка и исследование алгоритмов управления, оптимизирующих переходные процессы пуска и торможения конвейера. Эти алгоритмы управления должны обеспечивать номинальные значения натяжений в грузовой и порожней ветвях конвейера для исключения проскальзывания ленты на приводном барабане при торможении или свободном выбеге конвейера, а после его останова исключать провисание ленты между роlikоопорами. Это позволит уменьшить износ ленты, что, в свою очередь, позволит сократить расходы на обслуживание и ремонт, продлит срок службы конвейерной установки;
- Разработка структуры и варианта реализации комплексной системы автоматического управления ленточным конвейером, в которой реализуются алгоритмы управления процессами пуска и торможения конвейера, а также алгоритмы управления, описанные в работе [27]. Эта задача также включает в себя разработку программного обеспечения и подбор аппаратного обеспечения для построения комплексной системы автоматического управления.

Глава 2

Исследование пуско-тормозных режимов работы ленточного конвейера

В данной главе рассматривается выбор и описание математической модели ленточного конвейера, ее доработки, требуемые для дальнейших исследований, а также анализ переходных процессов, возникающих при пуске, изменении скорости и торможении ленточного конвейера с одним приводом и натяжным устройством, расположенном в хвостовой части. В частности, в главе представлен анализ переходных процессов, возникающих при переключении скорости ленты конвейера, анализ переходных процессов, возникающих при торможении как приводного, так и хвостового барабанов конвейера, анализ переходных процессов, возникающих при останове (свободном выбеге) конвейера.

Для исследования выберем подземный ленточный конвейер **1Л-100К** с тканевой лентой, предназначенный для использования в выработках с углами наклона от -3° до $+18^\circ$. Приемная способность этого конвейера составляет $11\text{ м}^3/\text{мин}$, ширина ленты 1000 мм , скорость движения ленты $1,6\text{ м/с}$, диаметр приводного барабана 800 мм , производительность 420 т/час . В соответствии с графиками применимости [32] длина конвейерной установки при угле наклона выработки 0° составляет 1000 м . Конвейер имеет однобарабанный привод с тяговым фактором $e^{\mu\alpha} = 2,5$. Подробные технологические параметры рассматриваемого ленточного конвейера указаны в таблице 2.1.

В работе [27] описано построение математической модели двухбарабанного конвейера. При построении модели процессы, происходящие в ленте конвейера, рассматриваются с точки зрения распространения волн напряжения и деформаций. Для решения волнового уравнения при исследовании переходных режимов конвейера в работе использован известный метод линейно-кусочной аппроксимации, который был предложен для решения подобной задачи О.А. Залесовым и использованный И. В. Запениным [33], [34]. Этот метод позволил достаточно точно описать движение системы с распределенными параметрами, описываемой дифференциальными уравнениями в частных производных, системой с сосредоточенными параметрами, движение которой описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями.

При использовании этой математической модели конвейера принимаются следующие допущения:

- трасса конвейера прямолинейна и имеет постоянный угол наклона;
- трансмиссионные валы и муфты абсолютно жесткие. В этом случае приводное устройство может быть представлено в виде одной сосредоточенной массы;
- масса ленты и вращающихся частей роlikоопор равномерно распределена;
- проскальзывание ленты на роlikоопорах отсутствует;

- лента представляется упруго-вязким стержнем;
- силы внутреннего трения пропорциональны скорости деформации;
- масса хвостового барабана пренебрежимо мала по сравнению с распределенной массой ленты и груза;
- коэффициенты сопротивления движению на грузовой и порожней ветвях ленты постоянны;
- скорости ленты в точках набегания и сбегания на приводном барабане равны.

Таблица 2.1: Параметры магистрального ленточного конвейера 1Л-100К

Длина ленты l , м	1000
Ширина ленты k , м	1
Скорость движения ленты v , м/с	1,6 - 2,5
Погонный вес движущихся частей на грузовой ветви q_g , Н/м	1045
Погонный вес движущихся частей на порожней ветви q_p , Н/м	250
Вес груза натяжного устройства $G_{ну}$, Н	80000
Масса участка грузовой ветви m_g , кг	870,8
Масса участка порожней ветви m_p , кг	208,3
Масса привода $m_{пр}$, кг	1850
Радиус приводного барабана R_6 , мм	400
Коэффициент сопротивления движению w	0,03
Коэффициент сопротивления движению натяжных грузов f	0,3
Вязкость ленты с грузом η , Н/м	1100
Жесткость ленты C , Н/м	1000
Жесткость канатов натяжного устройства C_k , Н/м	5×10^5

2.1 Математическая модель одноприводного двухбарабанного ленточного конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части

Расчетная схема для конвейера с однобарабанным головным приводом и натяжным устройством, расположенным в хвостовой части конвейера, представлена на рис. 2.1. При построении математической модели распределенная масса ленты с грузом представлена тремя массами на грузовой ветви и одной массой на порожней ветви. В качестве обобщенных переменных приняты координаты положения четырех сосредоточенных масс m_1, m_2, m_3, m_4 , их скорости $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4$, перемещения x_1, x_2, x_3, x_4 , а так же положение и скорость перемещения натяжного устройства $\delta, \dot{\delta}$. Конечномерная математическая модель движения конвейера с грузом [28], [29] описана десятью координатами состояния $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \delta, \dot{\delta})^T$.

Подробный расчет модели приведен в работе [28]. Ниже приведена результирующая система дифференциальных уравнений, описывающих совместное движение равномерно загруженной ленты конвейера:

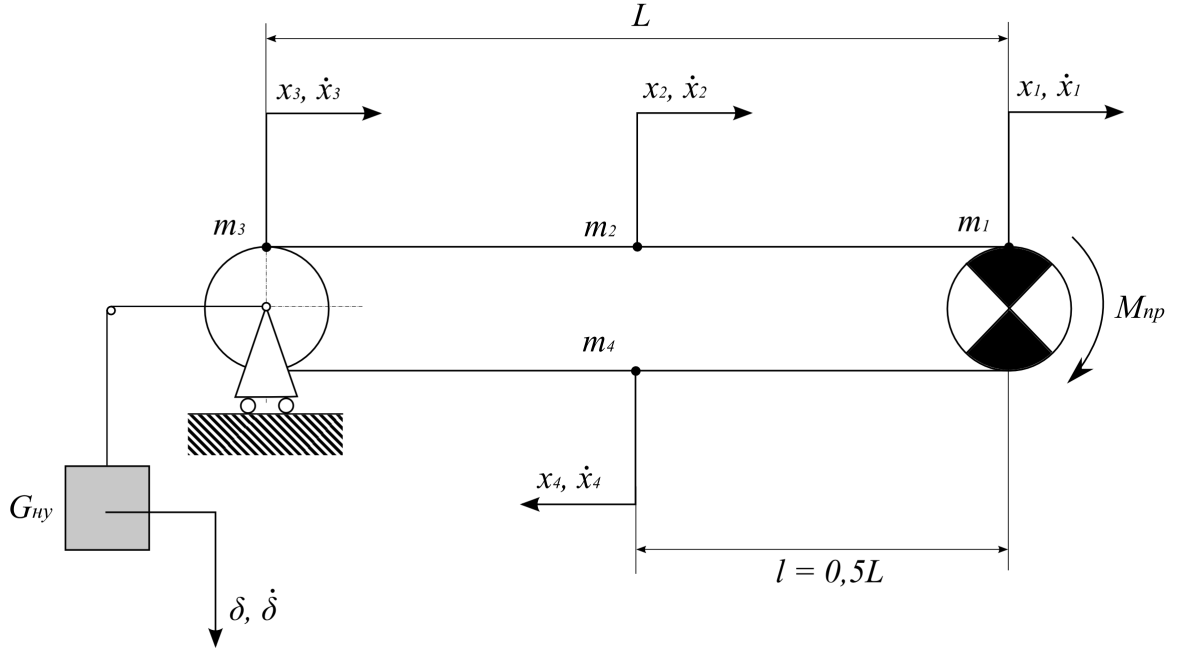


Рисунок 2.1: Расчетная схема конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части конвейера.

$$(2m_{\Gamma} + 2m_{\Pi} + m_{\Pi\Pi})\ddot{x}_1 + m_{\Gamma}\ddot{x}_2 + m_{\Pi}\ddot{x}_4 + 2Cx_1 - Cx_2 - Cx_4 + (0.5G_{\Pi}lw + 0.5G_{\Gamma}lw)\operatorname{sgn}\dot{x}_1 + \\ + 2\eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_4 = \frac{M_{\Pi\Pi}}{R_6}\operatorname{sgn}(\dot{x}_c - \dot{x}_1),$$

$$m_{\Gamma}\ddot{x}_1 + 4m_{\Gamma}\ddot{x}_2 + m_{\Gamma}\ddot{x}_3 - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_{\Gamma})lw\operatorname{sgn}\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 = 0,$$

$$m_{\Gamma}\ddot{x}_2 + (2m_{\Gamma} + m_{\Pi})\ddot{x}_3 + m_{\Pi}\ddot{x}_4 - Cx_2 + (2C + 0,25C_K)x_3 - (C + 0,25C_K)x_4 - \\ - 0,5C_K\delta - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 + (0.5G_{\Gamma}lw + 0,5G_{\Pi})lw)\operatorname{sgn}\dot{x}_3 = 0,$$

$$m_{\Pi}\ddot{x}_1 + m_{\Pi}\ddot{x}_3 + 4m_{\Pi}\ddot{x}_4 - Cx_1 - (2C + 0,25C_K)x_3 + (C + 0,25C_K)x_4 + 0,5C_K\delta - \\ - \eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_3 + 2\eta\dot{x}_4G_{\Pi})lw\operatorname{sgn}\dot{x}_4 = 0,$$

$$\frac{G_{\Pi\Pi}}{g}\ddot{\delta} - 0,5C_Kx_3 + 0,5C_Kx_4 + C_K\delta + G_{\Pi\Pi} + G_{\Pi\Pi}f\operatorname{sgn}\dot{\delta} = 0,$$

где $m_{\Gamma} = \frac{G_{\Gamma}l}{6g}$, $m_{\Pi} = \frac{G_{\Pi}l}{6g}$, G_{Γ} – погонный вес грузовой ветви, G_{Π} – погонный вес порожней ветви, $l = 0,5L$, L – длина конвейера. C – коэффициент жесткости ленты, w – коэффициент сопротивления движению ленты, η – приведенный коэффициент вязкости ленты, C_K – коэффициент жесткости каната натяжного устройства, $G_{\Pi\Pi}$ – вес натяжного устройства, f – приведенный коэффициент сопротивления движению натяжных грузов, $M_{\Pi\Pi}$ – момент двигателя, приведенный к валу приводного барабана, R_6 – радиус барабана.

Для лаконичного представления системы уравнений она записана в матричном виде относительно вектора состояния $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, \delta)^T$:

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + CX + S\text{sgn}\dot{X} + G = P\text{sgn}(\dot{X}_c - \dot{X}_1)M_{\text{пр}},$$

где:

$$M = \begin{bmatrix} 2m_{\Gamma} + 2m_{\Pi} + m_{\text{пр}} & m_{\Gamma} & 0 & m_{\Pi} & 0 \\ m_{\Gamma} & 4m_{\Gamma} & m_{\Gamma} & 0 & 0 \\ 0 & m_{\Gamma} & 2m_{\Gamma} + 2m_{\Pi} & m_{\Pi} & 0 \\ m_{\Pi} & 0 & m_{\Pi} & 4m_{\Pi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{\text{н}}g^{-1} \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 2\eta & -\eta & 0 & -\eta & 0 \\ -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 \\ 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 \\ -\eta & 0 & -\eta & 2\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} R_6^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_{\text{н}} \end{bmatrix},$$

$$S = \text{diag}[0, 5G_{\Gamma}lw + 0, 5G_{\Pi}lw \quad G_{\Gamma}lw \quad 0, 5G_{\Gamma}lw + 0, 5G_{\Pi}lw \quad G_{\Pi}lw \quad G_{\text{н}}f],$$

$$C = \begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & -C & 0 \\ -C & 2C & -C & 0 & 0 \\ 0 & -C & 2C + 0,25C_K & -C - 0,25C_K & -0,5C_K \\ -C & 0 & -C - 0,25C_K & 2C + 0,25C_K & 0,5C_K \\ 0 & 0 & -0,5C_K & 0,5C_K & C_K \end{bmatrix}.$$

Для получения канонического представления этой модели все члены уравнения умножены на матрицу M^{-1} :

$$\ddot{X} + M^{-1}N\dot{X} + M^{-1}CX + M^{-1}S\text{sgn}\dot{X} + M^{-1}G = M^{-1}P\text{sgn}(\dot{X}_c - \dot{X}_1)M_{\text{пр}}.$$

Числовые значения матриц M, N, C, P, G приведены в приложении В.1.

Координаты состояния $X = (x_1, x_2, \dots, x_10)^T$ введены по каноническому правилу О. Коши:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1, & \dot{x}_1 &= x_6, \\ x_2 &= x_2, & \dot{x}_2 &= x_7, \\ x_3 &= x_3, & \dot{x}_3 &= x_8, \\ x_4 &= x_4, & \dot{x}_4 &= x_9, \\ x_5 &= \delta, & \dot{x}_5 &= \dot{\delta}. \end{aligned}$$

В этом случае модель движения ленты конвейера в пространстве состояний будет представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{X} = \tilde{A}X + \tilde{B}_1U_1 + \tilde{B}_2U_2 + \tilde{B}_3U_3,$$

где $U_1 = M_{\text{пр}}$ – момент, создаваемый приводом (первое управляющее воздействие), $U_2 = \text{sgn}X$ – силы сопротивления движению сосредоточенных масс ленты (второе управляющее воздействие), $U_3 = G_{\text{н}}$ – вес натяжного устройства (третье управляющее воздействие). \tilde{A} – матрица состояний системы, представляет собой блочную матрицу, включающую в себя матрицы $M^{-1}N$ и $M^{-1}C$, $\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3$ – матрицы управления. Матрица \tilde{B}_1 включает в себя $M^{-1}P$, \tilde{B}_2 включает в себя $M^{-1}S$, \tilde{B}_3 включает в себя $M^{-1}G$:

Числовые значения матриц $\tilde{A}, \tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3$ приведены в приложении В.2.

2.2 Модификация исходной модели конвейера для возможности управления натяжным устройством

Натяжные устройства сообщают ленте конвейера характерное натяжение, которого хватает для организации передачи на устройстве тяговой силы трением при стабильном движении и запуске самого конвейера, они ограничивают провисание ленты между роlikоопорами, компенсируют удлинение ленты в результате ее вытягивания в процессе работы и сохраняют некоторый запас ленты, необходимый для ее перестановки при повреждениях. В настоящее время натяжные механизмы подразделяются на механические, пневматические, гидравлические, а также грузовые. Модель конвейера, описанная в разделе 2.1, не позволяет осуществлять управление натяжным устройством.

Под управлением натяжным устройством понимается изменение его веса либо положения каретки для компенсации изменения натяжений грузовой и порожней ветвей. Для того чтобы иметь возможность изменять эти параметры, разделим полученную модель конвейера на две связанных между собой модели – модель, описывающую движение ленты, и модель, описывающую движение натяжного устройства.

2.2.1 Модель движения ленты

В модели движения ленты переменными являются перемещения x_1, x_2, x_3, x_4 , скорости $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4$ и ускорения $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \ddot{x}_4$ четырех сосредоточенных масс. Положение и скорость натяжного устройства δ и $\dot{\delta}$ считаются внешними воздействиями U_1 и U_2 :

$$(2m_r + 2m_n + m_{np})\ddot{x}_1 + m_r\ddot{x}_2 + m_n\ddot{x}_4 + 2Cx_1 - Cx_2 - Cx_4 + (0.5G_nlw + 0.5G_rlw)\text{sgn}\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_4 = \frac{M_{np}}{R_6}\text{sgn}(\dot{x}_c - \dot{x}_1),$$

$$m_r\ddot{x}_1 + 4m_r\ddot{x}_2 + m_r\ddot{x}_3 - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_r)lw\text{sgn}\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 = 0,$$

$$m_r\ddot{x}_2 + (2m_r + m_n)\ddot{x}_3 + m_n\ddot{x}_4 - Cx_2 + (2C + 0,25C_K)x_3 - (C + 0,25C_K)x_4 - 0,5C_KU_1 - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 + (0.5G_rlw + 0,5G_n)lw\text{sgn}\dot{x}_3 = 0,$$

$$m_n\ddot{x}_1 + m_n\ddot{x}_3 + 4m_n\ddot{x}_4 - Cx_1 - (2C + 0,25C_K)x_3 + (C + 0,25C_K)x_4 + 0,5C_KU_1 - \eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_3 + 2\eta\dot{x}_4G_n)lw\text{sgn}\dot{x}_4 = 0,$$

В матричном виде система уравнений имеет следующий вид:

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + CX + S\text{sgn}\dot{X} + B_1U_1 = P\text{sgn}(\dot{X}_c - \dot{X}_1)M_{np},$$

где:

$$M = \begin{bmatrix} 2m_r + 2m_n + m_{np} & m_r & 0 & m_n \\ m_r & 4m_r & m_r & 0 \\ 0 & m_r & 2m_r + 2m_n & m_n \\ m_n & 0 & m_n & 4m_n \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 2\eta & -\eta & 0 & -\eta \\ -\eta & 2\eta & -\eta & 0 \\ 0 & -\eta & 2\eta & -\eta \\ -\eta & 0 & -\eta & 2\eta \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} R_6^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.5C_K \\ 0.5C_K \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & -C \\ -C & 2C & -C & 0 \\ 0 & -C & 2C + 0,25C_K & -C - 0,25C_K \\ -C & 0 & -C - 0,25C_K & 2C + 0,25C_K \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0,5G_{\Gamma}lw + 0,5G_{\Pi}lw & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{\Gamma}lw & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5G_{\Gamma}lw + 0,5G_{\Pi}lw & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{\Pi}lw \end{bmatrix}.$$

Числовые значения матриц приведены в приложении В.3.

Введем координаты состояния системы, используя каноническое правило О. Коши: $X = (x_1, x_2, \dots, x_8)^T$. Система уравнений, описывающих движение ленты конвейера, принимает вид:

$$\dot{X} = AX + B_{\text{пр}}U + B_{\text{н}}U_{\text{н}} + B_sU_s,$$

где $U = M_{\text{пр}}$ – момент, создаваемый приводом конвейера (первое управляющее воздействие), управляющее воздействие $U_{\text{н}}$ – второе управляющее воздействие, связанное с перемещением натяжного устройства, U_s – сопротивление движению сосредоточенных масс (третье управляющее воздействие).

Матрица состояния системы A представляет собой блочную матрицу, включающую в себя матрицы $M^{-1}N$ и $M^{-1}C$:

$$A_{[8 \times 8]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 4]} & E_{[4 \times 4]} \\ M^{-1}C_{[4 \times 4]} & M^{-1}N_{[4 \times 4]} \end{bmatrix}.$$

Матрицы управления также блочные:

$$B_{\text{пр}[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 1]} \\ M^{-1}P_{[4 \times 4]} \end{bmatrix}, B_{s[8 \times 8]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 4]} & 0_{[4 \times 4]} \\ 0_{[4 \times 4]} & M^{-1}S_{[4 \times 4]} \end{bmatrix}, B_{\text{н}[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 1]} \\ M^{-1}B_{[4 \times 1]} \end{bmatrix}.$$

Числовые значения матриц приведены в приложении В.4.

2.2.2 Модель натяжного устройства

Для модели натяжного устройства переменными являются перемещение груза δ , скорость его перемещения $\dot{\delta}$ и ускорение $\ddot{\delta}$. Уравнение, описывающее модель движения натяжного устройства, имеет следующий вид:

$$\frac{G_{\text{н}}}{g} \ddot{\delta} - 0.5C_K x_3 + 0,5C_K x_4 + C_K \delta + G_{\text{н}} + G_{\text{н}} f \text{sgn} \dot{\delta} = 0.$$

Перемещения сосредоточенных масс x_3 и x_4 будем считать внешними управляющими воздействиями U_3 и U_4 , тогда уравнение модели движения натяжного устройства принимает вид:

$$\frac{G_{\text{н}}}{g} \ddot{\delta} - 0.5C_K U_3 + 0,5C_K U_4 + C_K \delta + G_{\text{н}} + G_{\text{н}} f \text{sgn} \dot{\delta} = 0.$$

Введем координаты состояния системы, используя каноническое правило О. Коши: $Z = (z_1, z_2)^T$: $z_1 = \delta$, $\dot{z}_1 = z_2 = \dot{\delta}$ и запишем систему уравнений, описывающих движение натяжного устройства:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= -\frac{C_K g}{G_{\text{ны}}} z_1 + 0.5 \frac{C_K g}{G_{\text{ны}}} U_3 - 0.5 \frac{C_K g}{G_{\text{ны}}} U_4 - g - \frac{f}{g} z_2. \end{aligned} \quad (2.1)$$

где U_3 - перемещение сосредоточенной массы, расположенной на приводном барабане, U_4 - перемещение сосредоточенной массы, расположенной на хвостовом барабане.

Связь между моделями замкнутого контура ленты и натяжного устройства представлена в виде структурной схемы на рис. 2.2.

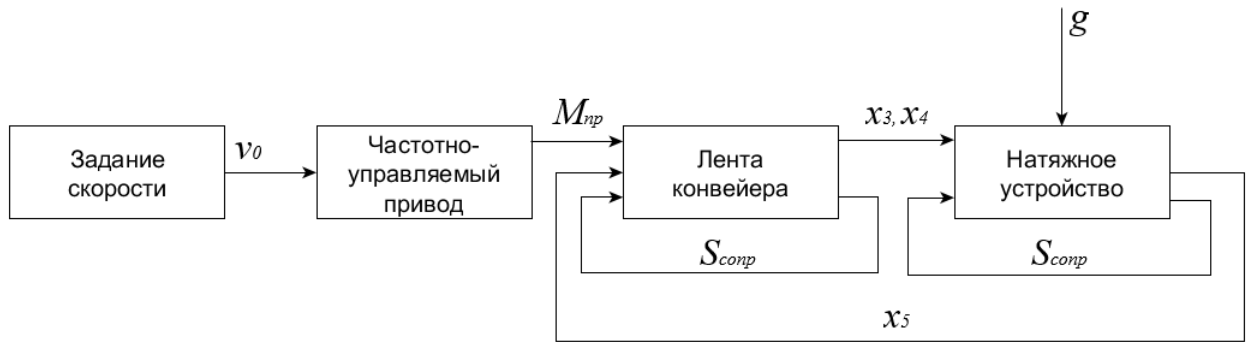


Рисунок 2.2: Структурная схема связи моделей ленты и натяжного устройства, которая обеспечивает возможность управления натяжным устройством

В схеме моделирования, реализованной в Simulink, лента конвейера представлена своей внутренней моделью состояний, параметрами которой являются матрицы A и B , натяжное устройство представлено своей внешней моделью, реализованной на основе системы уравнений 2.1:

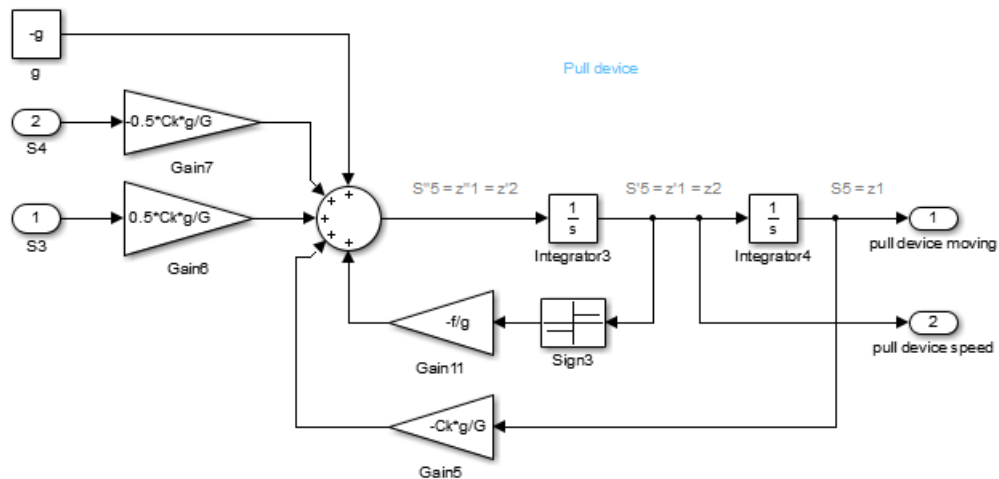


Рисунок 2.3: Структурная схема модели натяжного устройства

2.3 Модификация модели конвейера для исследования процессов торможения

Останов конвейера может осуществляться как простым отключением привода (свободный выбег), так и с одновременным торможением одного или нескольких барабанов конвейера с помощью тормозных устройств. Второй способ обычно применяется для экстренного торможения конвейера, либо в случае, если свободный выбег занимает значительное время.

При задействовании тормозного устройства на валу барабана, торможение которого производится, возникает дополнительный (тормозной) момент M_T , направленный противоположно направлению движения барабана конвейера. В случае двухбарабанного конвейера имеется возможность прикладывать тормозное усилие как к приводному барабану, так и к хвостовому барабану, поэтому следует рассматривать два тормозных момента $M_{Tпр}$ и $M_{Tхв}$ соответственно.

В общей модели конвейера тормозные моменты можно рассматривать как дополнительные управляющие воздействия для модели движения ленты. Для учета этих управляющих воздействий модель, полученную в п. 2.2, необходимо модифицировать.

Введем два дополнительных управляющих воздействия. Система дифференциальных уравнений модифицированной модели конвейера с учетом этого записывается следующим образом:

$$\dot{X} = \tilde{A}X + \tilde{B}_{пр}U + \tilde{B}_{хв}U_{хв} + \tilde{B}_s U_s + \tilde{B}_{Tпр}U_{Tпр} + \tilde{B}_{Tхв}U_{Tхв},$$

где $U_{Tпр} = M_{Tпр}$ – тормозной момент на приводном барабане, $U_{Tхв} = M_{Tхв}$ – тормозной момент на хвостовом барабане.

Запишем тормозной момент на приводном барабане в матричной форме. Он вычисляется следующим образом $M_{Tпр} = M^{-1}P_{Tпр}$. Так как этот момент направлен противоположно направлению движения приводного барабана конвейера, то матрица $P_{Tпр} = -P$.

$$M_{Tпр} = M^{-1}P_{Tпр} = M^{-1} \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_6} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Здесь R_6 – расстояние от оси вала приводного барабана конвейера до точки приложения тормозного усилия (плечо). Примем его равным радиусу приводного барабана для упрощения вычислений. В общем случае оно будет отличаться от радиуса приводного барабана и будет равно радиусу тормозного диска (в случае использования дискового тормозного устройства) или радиусу тормозного барабана (в случае использования барабанного тормозного устройства).

Аналогично вычисляется второй тормозной момент с учетом его приложения к хвостовому барабану:

$$M_{Tхв} = M^{-1}P_{Tхв} = M^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{R_6} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Рассчитаем матрицу управления модифицированной системы:

$$\tilde{B}_{пр[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 1]} \\ M^{-1}P_{[4 \times 1]} \end{bmatrix}, \tilde{B}_{хв[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 1]} & 0_{[4 \times 1]} \\ 0_{[4 \times 1]} & M^{-1}S_{[4 \times 1]} \end{bmatrix}, \tilde{B}_s[8 \times 1] = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 1]} \\ M^{-1}G_{[4 \times 1]} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B}_{Tпр[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 1]} \\ M^{-1}P_{T1} \end{bmatrix}_{[4 \times 1]}, \tilde{B}_{Tхв[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0_{[4 \times 1]} \\ M^{-1}P_{T2} \end{bmatrix}_{[4 \times 1]}.$$

Общая матрица управления является конкатенацией описанных выше матриц и имеет размерность 8×12 :

$$B_{[8 \times 12]} = [\tilde{B}_{\text{пр}} : \tilde{B}_{\text{нп}} : \tilde{B}_s : \tilde{B}_{T\text{пр}} : \tilde{B}_{T\text{хв}}].$$

Размерность вектора управления $U - 12 \times 1$.

Числовые значения матрицы управления модифицированной системы приведены в приложении В.5. Программа расчета числовых значений матриц приведена в приложении А.

Так как при исследовании процессов торможения может возникнуть необходимость формировать различные законы изменения тормозных моментов, то целесообразно реализовать модель формирования каждого тормозного момента как отдельную подсистему. Кроме того, необходимо обеспечить правильное направление тормозного момента во всех случаях – тормозной момент всегда должен быть направлен противоположно направлению движения барабана конвейера. Приведенная на рис. 2.4 структурная схема удовлетворяет указанным выше требованиям.

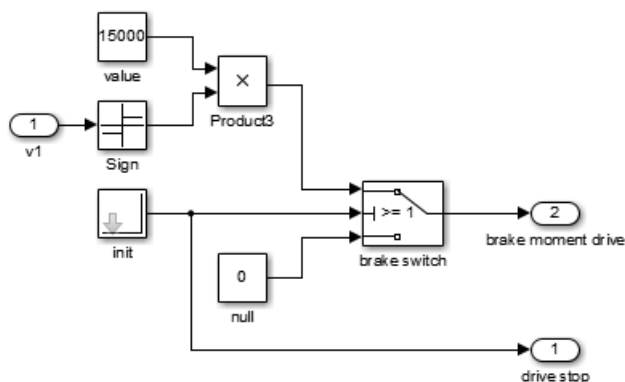


Рисунок 2.4: Структурная схема модели формирования тормозного момента.

На этой схеме блок *init* определяет моменты времени для включения и отключения тормозного устройства, блок *brake switch* обеспечивает изменение значения соответствующего управляющего воздействия для модели движения ленты (выход *brake moment drive*) с нулевого на значение, меняющееся по предварительно заданному закону. В данном случае это скачкообразное изменение значения тормозного момента до $15000H$. На вход *v1* подается текущее значение скорости барабана конвейера, а блок *sign* на выходе формирует значение 1, если скорость положительна, и значение -1 , если скорость отрицательна. Блок *drive stop* служит для формирования управляющего воздействия для отключения привода конвейера.

Таким образом уточненная модель конвейера отличается наличием двух дополнительных управляющих воздействий – тормозных моментов, наличием подсистем формирования тормозных моментов и возможностью отключения привода конвейера. В дальнейшем будем моделировать процессы торможения конвейера посредством задания законов изменения значений тормозных моментов в функции времени.

2.4 Вычисление натяжений ленты конвейера и тягового фактора

Одним из требуемых условий нормальной работы конвейерной установки является условие отсутствия проскальзывания ленты на барабанах во всех режимах работы. Это условие определяется уравнением Эйлера, которое записывается в следующем виде.

Для случаев пуска конвейера и переключения с меньшей скорости на большую:

$$\frac{S_{\text{наб}}}{S_{\text{сб}}} \leq e^{\mu\alpha},$$

Для случаев торможения конвейера и переключения с большей скорости на меньшую:

$$\frac{S_{\text{сб}}}{S_{\text{наб}}} \leq \frac{1}{e^{\mu\alpha}},$$

где $e^{\mu\alpha}$ – тяговый фактор ленточного конвейера, $S_{\text{наб}}$ – натяжение в точке набегания ленты на барабан, H , $S_{\text{сб}}$ – натяжение в точке сбегания ленты с барабана, H .

Здесь e – основание натурального логарифма; μ – коэффициент трения скольжения между лентой и барабаном; α – угол обхвата барабана лентой, рад.

Коэффициент трения скольжения между лентой и барабаном определяется по технологическим таблицам [68] и зависит от поверхности приводного барабана, состояния соприкасающихся поверхностей, атмосферных условий. Для конвейера с одним приводом, с футеровкой барабана резиной, при влажной погоде и загрязнении поверхностей ленты и барабана углем, песком и глиной коэффициент сцепления $\mu = 0,25$. Для конвейера с одним приводом угол обхвата барабана лентой примем $\alpha = \pi$. При этих условиях величина тягового фактора при пуске конвейера и при переключении с меньшей скорости на большую не должна превышать $e_0^{\mu\alpha} = 2,5$, при торможении конвейера величина тягового фактора не должна превышать $\frac{1}{e_0^{\mu\alpha}} = 0,4$.

Ниже описано измерение возникающих натяжений в любой точке расчетной схемы, показанной на рис. 2.1. На основе данных измерений можно вычислять текущее значение тягового фактора для определения наличия проскальзывания ленты конвейера.

Натяжения в характерных точках расчетной схемы будем определять на основании измерения деформаций различных участков конвейерной ленты, которые вызваны усилиями в ленте. Сначала составим структурную схему вычисления натяжений в точке набегания ленты на приводной барабан и в точке сбегания ленты с приводного барабана. Для этого необходимо определить связь между деформацией и натяжением в характерных точках 1 и 4 посредством "тарирования" ленты конвейера. Рассчитаем натяжения S_1, S_2, S_3, S_4 (рис. 2.5) при весе груза натяжного устройства (или натяжении в канате натяжной каретки автоматического натяжного устройства), равного $G_{\text{н}}.$

В модели конвейера меняем вес груза и, фиксируя возникающие деформации, ставим им в соответствие рассчитанные натяжения S_1 и S_4 .

В работе [27] отмечено, что груз натяжного устройства своим весом $G_{\text{н}}$ создает в точках 2 и 3 натяжения S_2 и S_3 , приблизительно равные $0,5G_{\text{н}}$.

Тогда натяжения S_1 и S_4 соответственно равны:

$$\begin{aligned} S_1 &= 0,5G_{\text{н}} + W_{\text{гр}}, \\ S_4 &= 0,5G_{\text{н}} - W_{\text{п}}, \end{aligned}$$

где $W_{\text{гр}}$ и $W_{\text{п}}$ сопротивления движению грузовой и порожней ветвей соответственно, которые равны:

$$W_{\text{гр}} = q_{\text{гр}\Sigma}lw, \quad (2.2)$$

$$W_{\Pi} = q_{\Pi\Sigma}lw. \quad (2.3)$$

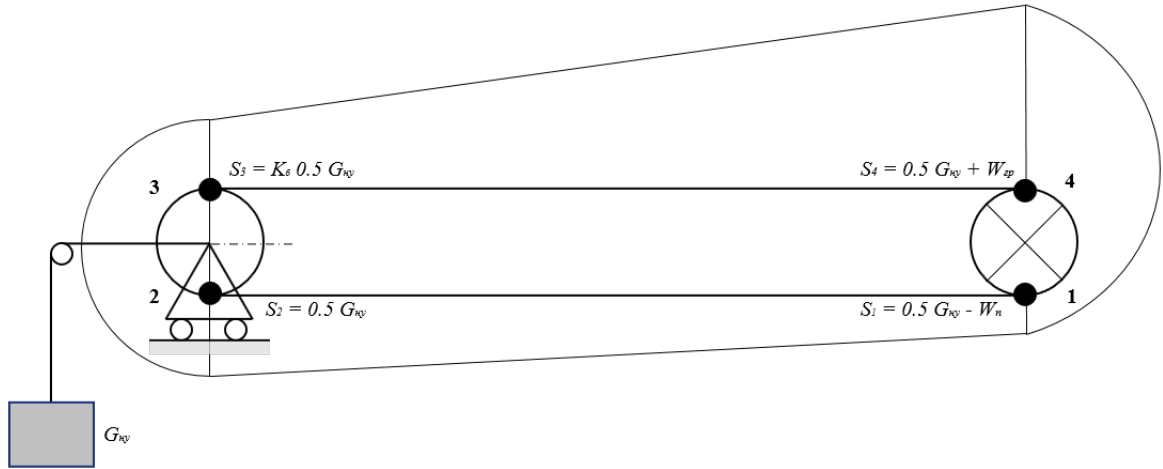


Рисунок 2.5: Определение натяжений в конвейерной ленте.

Здесь l – длина конвейера, $q_{гр\Sigma} = q_l + q_p + q_{гр} = 1040 \text{ Н/м}$ – суммарный погонный вес грузовой ветви, равный сумме веса отрезка ленты грузовой ветви, веса роlikоопор грузовой ветви и веса груза на ленте, $q_{п\Sigma} = q_l + q'_p = 250 \text{ Н/м}$ – суммарный погонный вес порожней ветви, равный сумме веса отрезка ленты порожней ветви и веса роlikоопор порожней ветви, w – коэффициент сопротивления движению ленты, который определяется по технологическим таблицам [34, 71]. Для хорошего состояния конвейера, для стационарных или полустационарных установок, при небольшом загрязнении ленты $w = 0.03$. Тогда сопротивление движению грузовой ветви равно

$$W_{гр} = 1040 \cdot 1000 \cdot 0,03 = 31215 \text{ Н}.$$

Сопротивление движению порожней ветви равно

$$W_{\Pi} = 250 \cdot 1000 \cdot 0,03 = 7500 \text{ Н}.$$

Рассчитаем натяжения S_1 и S_4 , возникающие в точках набегания и сбегания ленты конвейера на приводной барабан, при различном весе груза натяжного устройства G_{ny} . Этим натяжениям соответствуют деформации $x_1 - x_2$ и $x_4 - x_1$, которые измеряются в модели.

Результаты вычисления величин натяжений, а также результаты измерения натяжений представлены в табл. 2.2.

На основе данных табл. 2.2 определим зависимость между деформацией δ_1 участка $x_1 - x_2$ и натяжением S_1 , возникающем в точке набегания ленты на приводной барабан:

$$S_1 = f(\delta_1) = 4006,9\delta_1 + 24130,5. \quad (2.4)$$

Зависимость между деформацией δ_4 участка $x_4 - x_1$ и натяжением S_4 , возникающем в точке сбегания ленты с приводного барабана:

$$S_4 = g(\delta_4) = 4005,6\delta_4 - 2904,7. \quad (2.5)$$

Графики зависимостей представлены на рис. 2.6 (а, б). Определение зависимостей производилось в программном комплексе Matlab с использованием метода наименьших квадратов. Исходный код расчета представлен в приложении С.

Таблица 2.2: Результаты расчета натяжений ленты при различных значениях веса натяжного устройства и соответствующие им деформации.

Вес груза натяжного устройства $G_{\text{ну}}, H$	$x_1 - x_2$	$x_2 - x_3$	$x_3 - x_4$	$x_4 - x_1$	S_4, H	S_1, H	Тяговый фактор S_1/S_4
20000	4,25	2,69	-8,28	1,34	2500	41200	16,48
30000	5,50	3,94	-12,03	2,59	7500	46200	6,16
40000	6,76	5,19	-15,80	3,85	12500	51200	4,10
50000	8,01	6,44	-19,55	5,10	17500	56200	3,21
55000	8,64	7,07	-21,43	5,72	20000	58700	2,94
60000	9,26	7,69	-23,30	6,35	22500	61200	2,72
65000	9,88	8,31	-25,16	6,99	25000	63700	2,55
70000	10,50	8,94	-27,03	7,59	27500	66200	2,41
75000	11,12	9,56	-28,89	8,21	30000	68700	2,29
80000	11,74	10,18	-30,75	8,83	32500	71200	2,19
85000	12,36	10,80	-32,61	9,45	35000	73700	2,11

Располагая зависимостями $f(\delta_1)$ и $g(\delta_4)$, становится возможным при изменяющихся деформациях δ_1 и δ_4 непрерывно вычислять натяжения S_1 и S_4 и значения тягового фактора.

Величина тягового фактора при разгоне конвейера и при переключении с меньшей скорости на большую:

$$E^{\mu\alpha}(t) = \frac{S_1(t)}{S_4(t)}$$

Величина тягового фактора при торможении конвейера и при переключении с большей скорости на меньшую:

$$\frac{1}{E^{\mu\alpha}(t)} = \frac{S_4(t)}{S_1(t)}$$

Структурная схема определения деформаций ленты, вычисления величин натяжений и тягового фактора представлена на рис. 2.14.

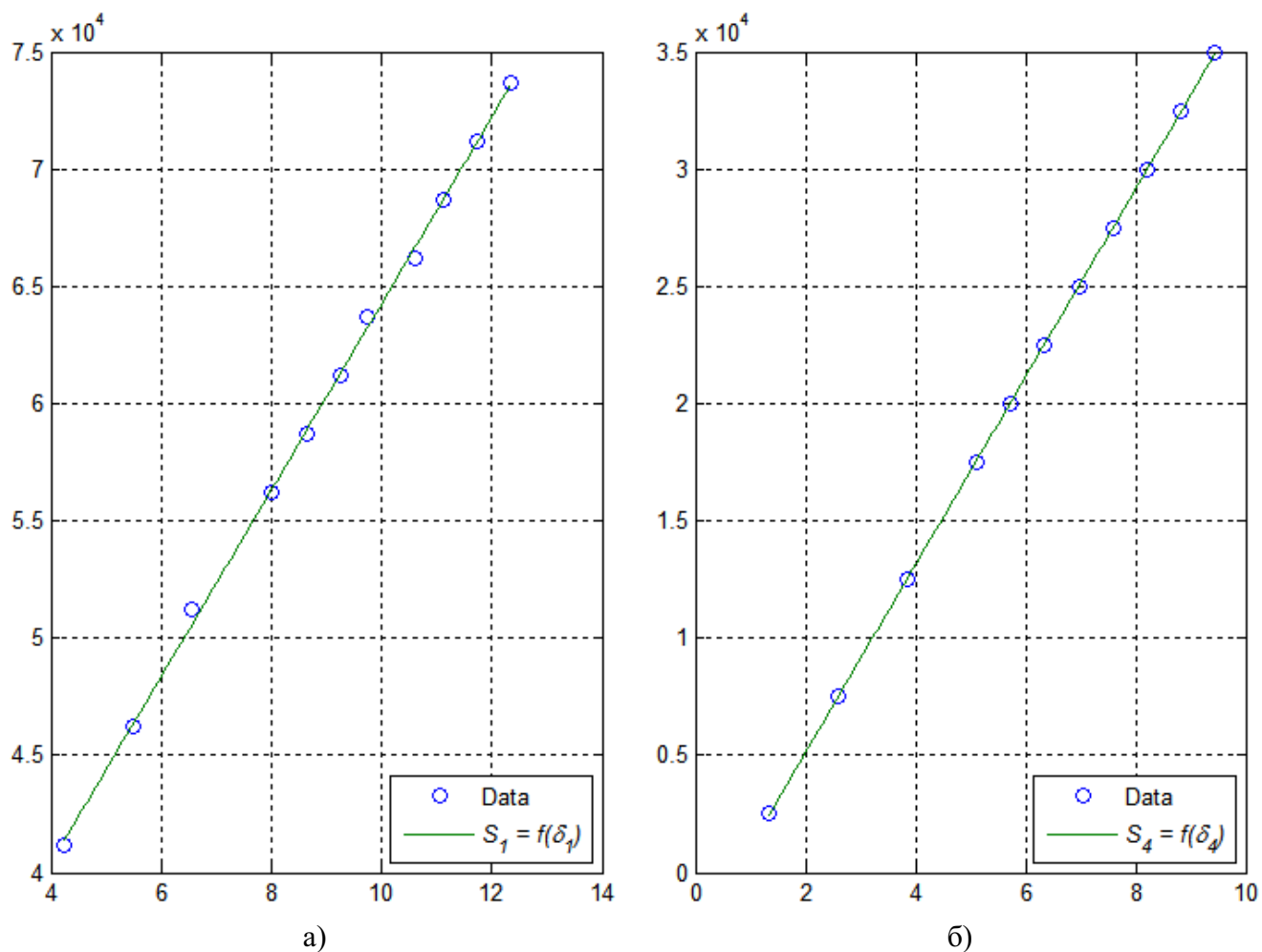


Рисунок 2.6: Графики зависимости натяжений в ветвях конвейера от деформации участков

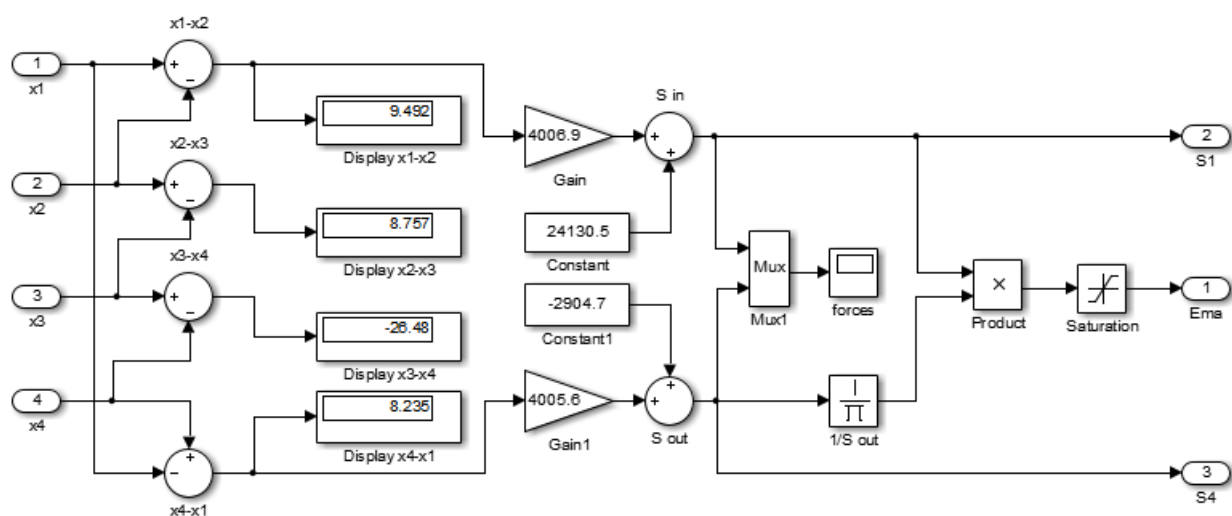


Рисунок 2.7: Структурная схема определения деформаций ленты, вычисления величин натяжений и тягового фактора

2.5 Моделирование различных режимов работы ленточного конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части

Компьютерное моделирование производилось в системе SIMULINK, входящей в пакет прикладных программ MATLAB. Этот программный продукт позволяет выполнять моделирование динамических систем, описываемых обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями. Структурная схема системы, включающей в себя контур ленты конвейера и натяжное устройство, была реализована с использованием типовых блоков SIMULINK.

Математической моделью ленточного конвейера как технологического объекта является объединение модели ленты с восемью координатами состояния, характеризующими кинематику перемещения четырех сосредоточенных масс, модели натяжного устройства и модели управляемого асинхронного электропривода.

Схема общей модели конвейера представлена на рис. 2.8. Модель системы разбита на подсистемы, каждая из которых представляет собой определенный узел конвейерной установки: модель ленты конвейера, модель натяжного устройства, модель асинхронного короткозамкнутого привода, модель задатчика скорости, модели задатчиков тормозных моментов. На данном этапе моделирование производится без каких-либо регулирующих воздействий. Целью моделирования является получение переходных процессов сосредоточенных масс ленты конвейера при пуске, переключении скоростей, свободном выбеге и торможении.

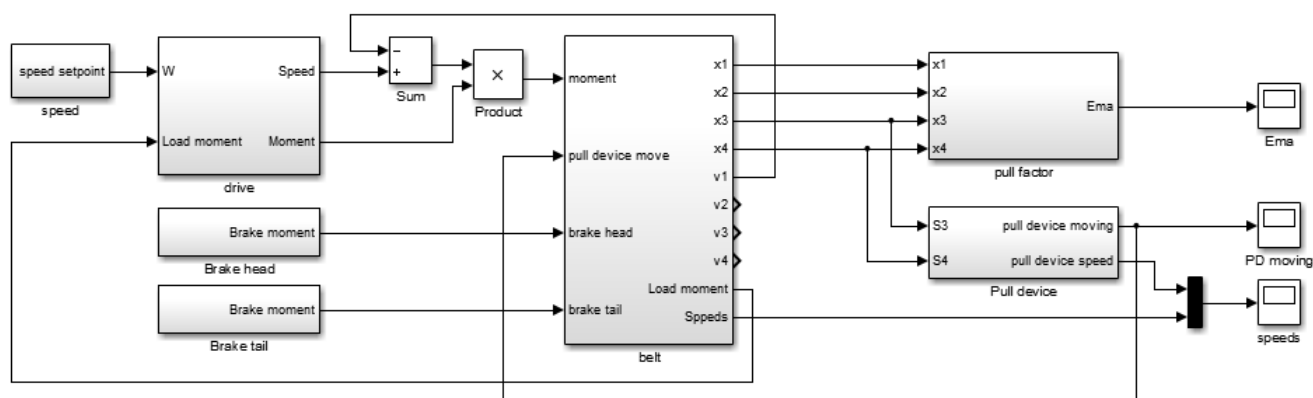


Рисунок 2.8: Общая схема моделирования конвейерной установки.

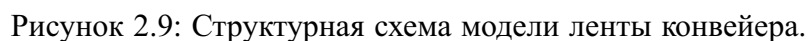
Здесь блок *Drive* – асинхронный короткозамкнутый привод, Блок *Speed* – задатчик скорости привода, блоки *Brake head* и *Brake tail* – формирователи тормозных моментов для головного и хвостового барабанов соответственно, блок *Pull factor* – вычисление величины тягового фактора, блок *Pull device* – модель натяжного устройства, структурная схема которой представлена на рис. 3.6, блок *Belt* – модель ленты конвейера, которая представлена своей внутренней моделью:

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$y = Cx + Du.$$

Структурная схема модели ленты представлена на рис. 2.9.

Для реализации управления пять внешних воздействий – момент, создаваемый приводом, силы сопротивления движению сосредоточенных масс ленты, усилие, создаваемое весом натяжного устройства и два тормозных момента объединены в один вектор U , размерность которого



Модель привода представляет собой модель электрической асинхронной машины со своей собственной системой управления, описанной в [27].

- вычислить момент нагрузки M_H , приведенный к валу двигателя, который определяется силами сопротивления движению конвейерной ленты. Для технологической схемы с натяжным устройством, расположенным в хвосте конвейера, расчет производится следующим образом:

- в модели привода выполнить переход от моделирования в условном времени к моделированию в реальном времени для согласования параметров моделирования двух подсистем;
- в качестве управляющего сигнала в модель ленты подается движущий момент привода M , а в качестве задающего сигнала - скорость вращения ротора ω ;
- так как моделирование привода проводится в нормированных единицах, необходимо умножить сигнал момента на коэффициент, равный номинальному моменту выбранного привода $M_{\text{ном}}$.

Результатами моделирования являются:

- 31

- переходные процессы по скоростям обобщенных координат ленты, представленные на рис. 2.11;
- переходные процессы по скорости натяжного устройства, представленные на рис. 2.18;
- переходные процессы по перемещению каретки натяжного устройства, представленные на рис. 2.13;
- переходные процессы по изменению величины тягового фактора, представленные на рис. 2.14.

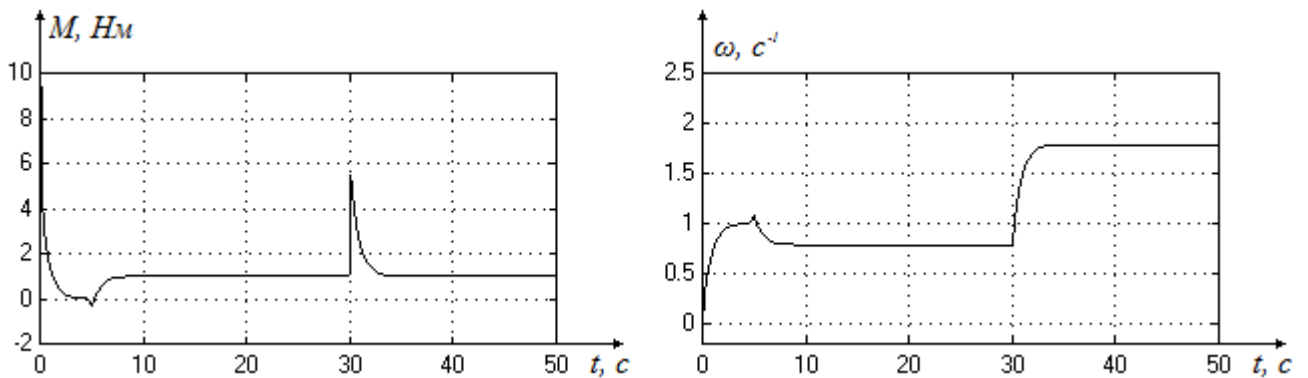


Рисунок 2.10: Изменение момента, развиваемого двигателем и частоты вращения ротора.

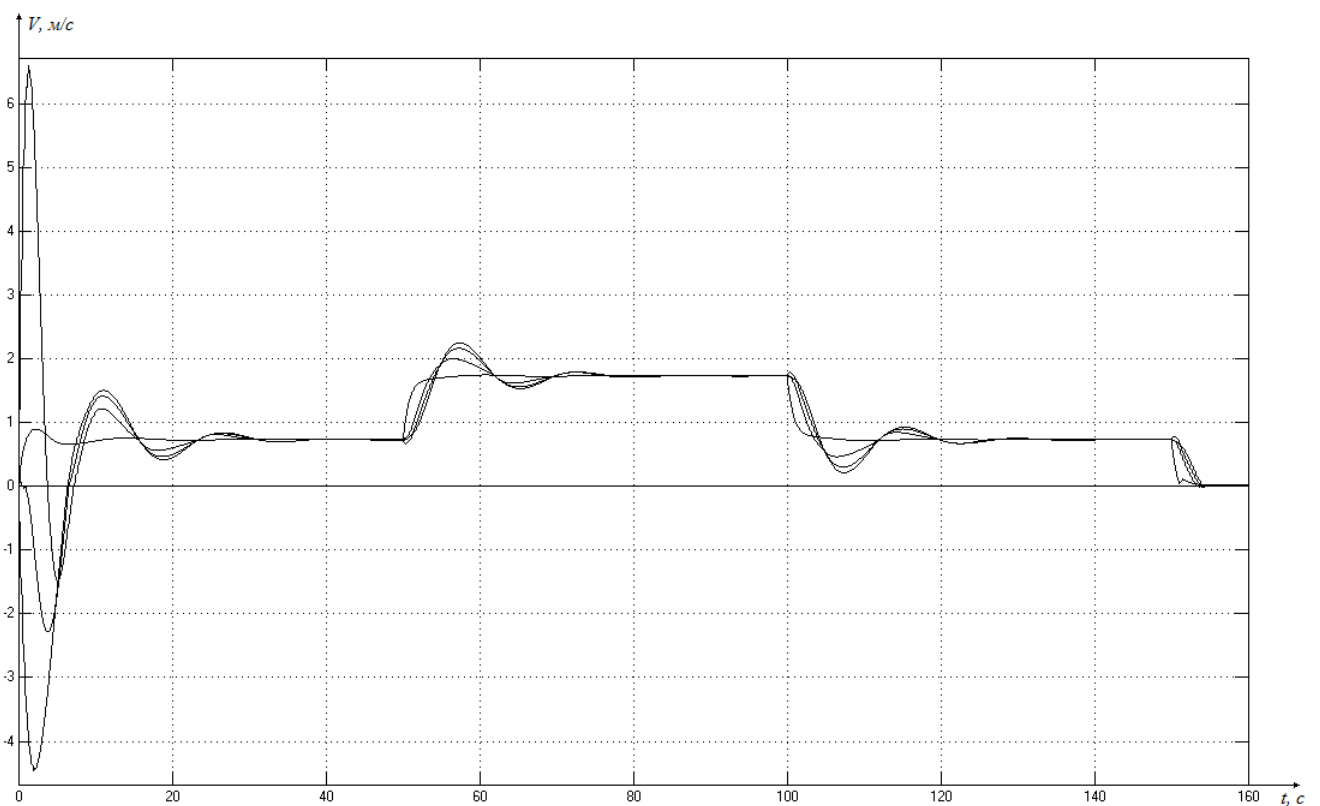


Рисунок 2.11: Переходные процессы по скоростям обобщенных координат ленты конвейера.

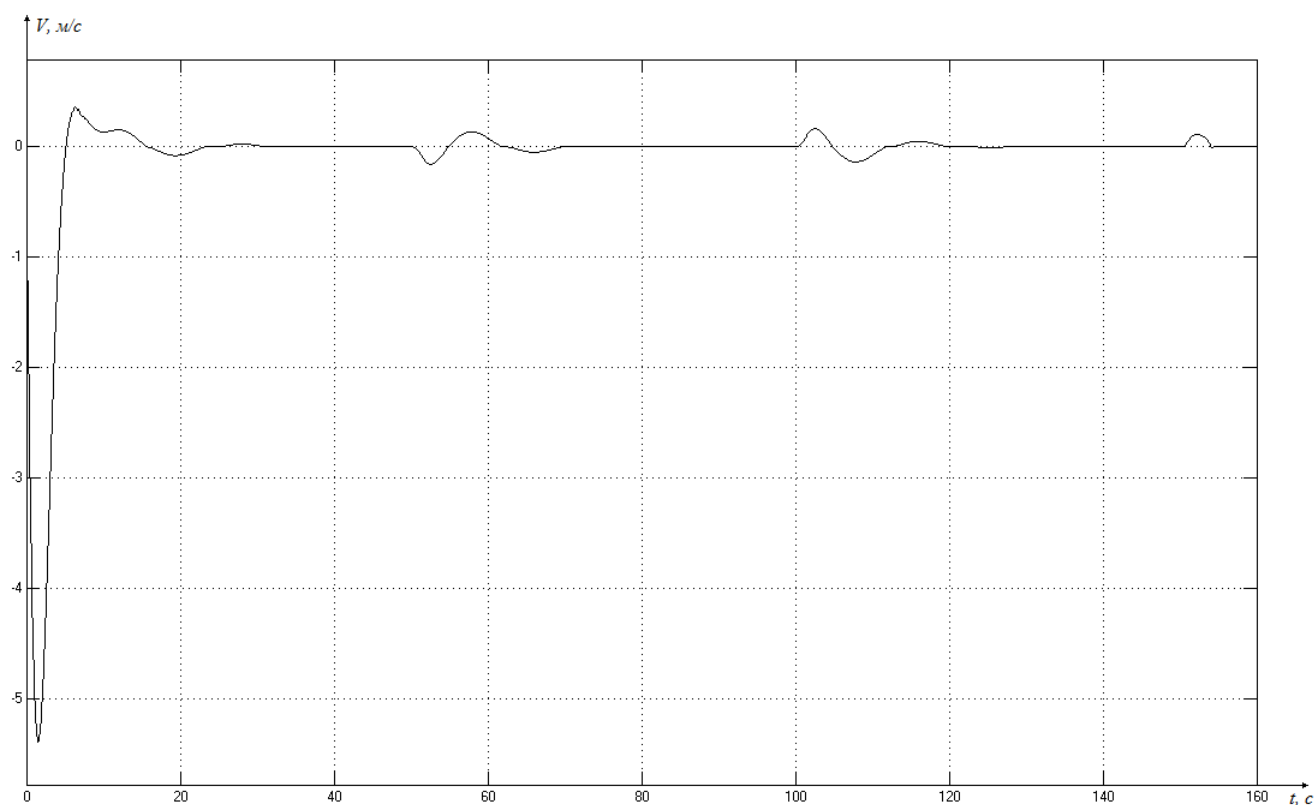


Рисунок 2.12: Переходной процесс по скорости перемещения каретки натяжного устройства конвейера.

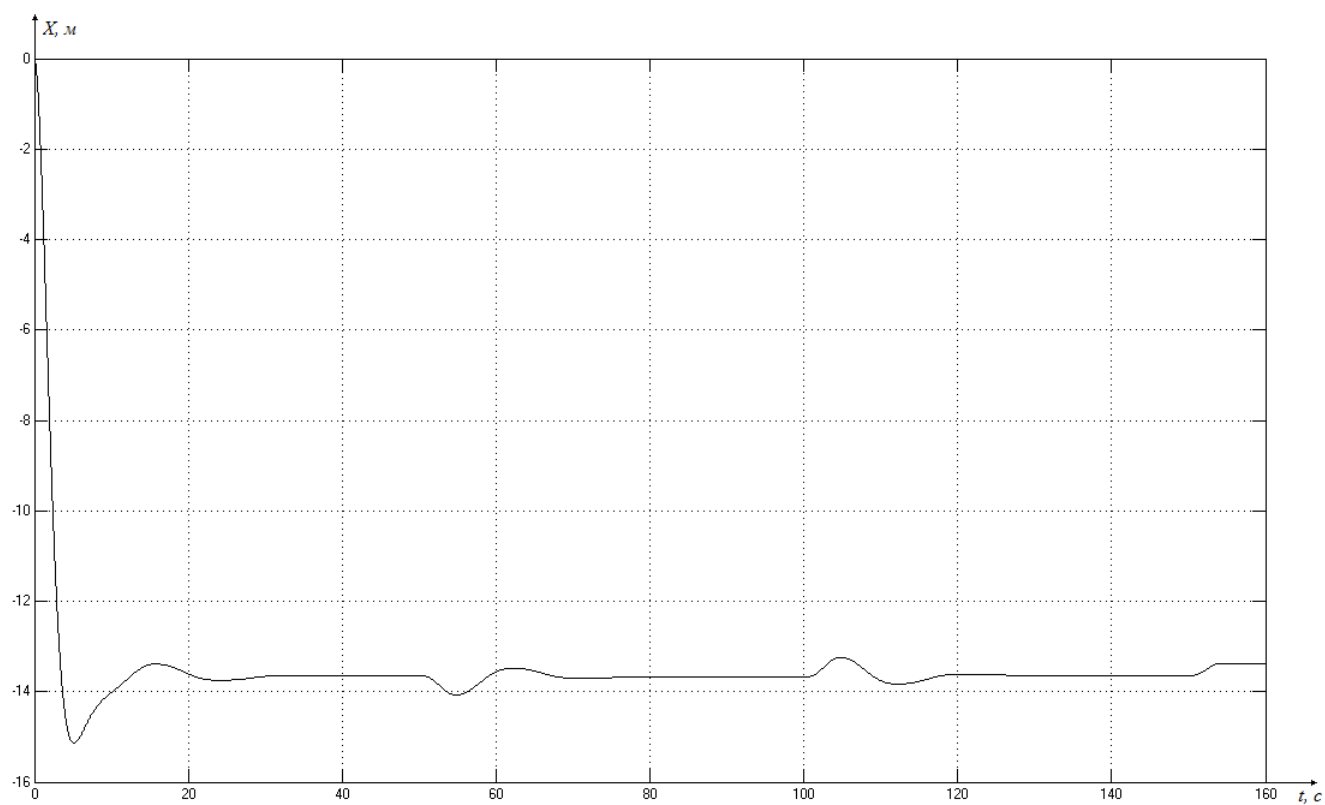


Рисунок 2.13: Переходной процесс по перемещению каретки натяжного устройства конвейера.

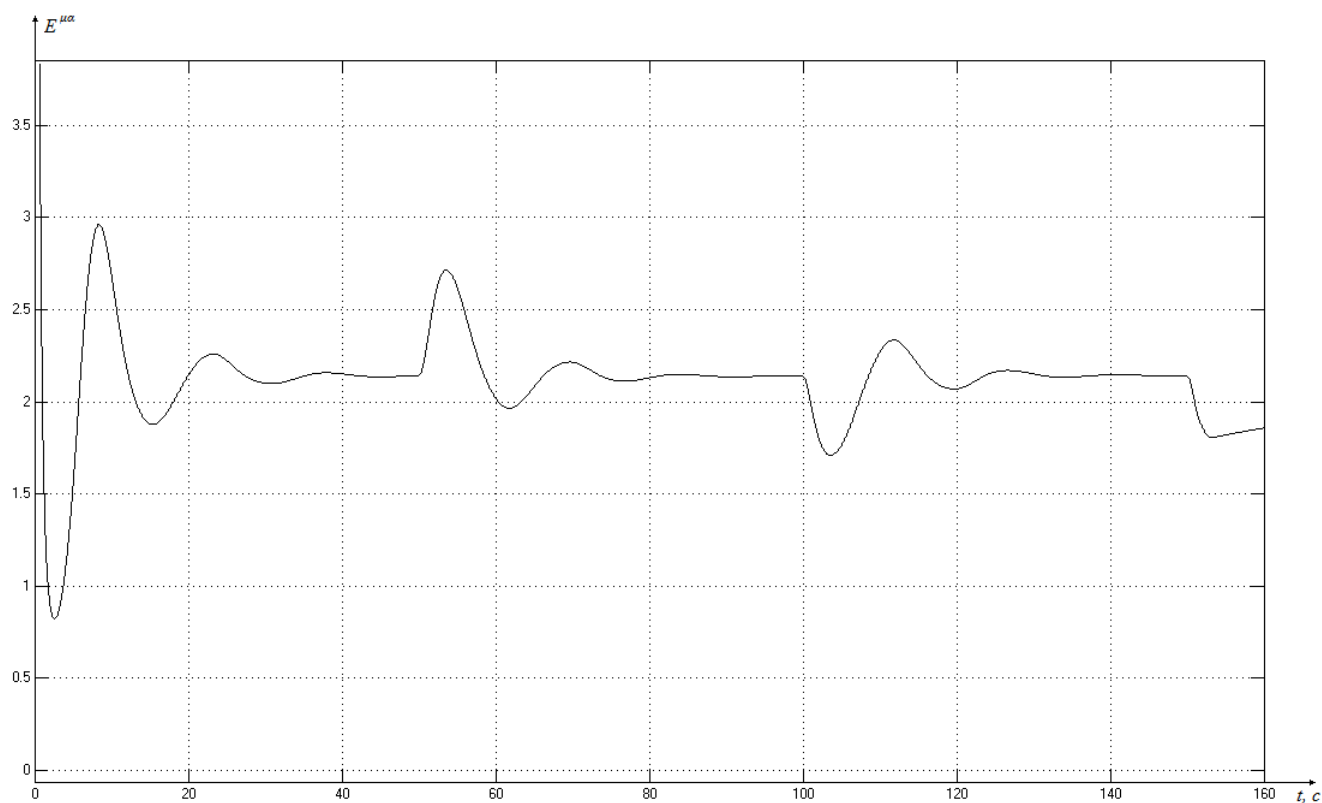


Рисунок 2.14: Изменение величины тягового фактора.

Ниже представлен более подробный анализ следующих переходных процессов и описаны особенности каждого из них:

- пуск конвейера;
- переключение на большую скорость движения ленты;
- переключение на меньшую скорость движения ленты;
- останов конвейера без торможения (свободный выбег);
- останов конвейера с торможением приводного барабана;
- торможение приводного и натяжного барабанов в произвольные моменты времени.

2.5.1 Пуск конвейера и переключение с меньшей скорости на большую

Пуск конвейера характеризуется появлением динамических натяжений в ленте, которые, алгебраически суммируясь со статическими натяжениями, изменяют результирующие натяжения ленты и усилия в элементах конвейера. Эти изменения могут привести к неустойчивой работе приводного барабана – к частичному или полному проскальзыванию. Проскальзывание недопустимо по нескольким причинам – изнашивание футеровки барабана становится более интенсивным, происходит нагрев барабана, снижение коэффициента сцепления. Анализ процесса пуска конвейера позволяет оценить параметры переходных процессов, определить экстремальные значения натяжений, оценить влияние на них параметров конвейера, а также определить алгоритмы управления и методы, необходимые для оптимизации переходных процессов.

Пуск конвейера обычно осуществляется в три этапа. Первый этап – вывод на ползучую скорость (0, 2 м/с); второй этап – движение ленты на ползучей скорости и ожидание завершения

переходных процессов, являющихся следствием упругих деформаций в ленте; третий этап – вывод на рабочую скорость.

Ниже представлены графики переходных процессов по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства (рис. 2.15), изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана (рис. 2.16), а также изменение величины тягового фактора рис. 2.14 и перемещение натяжного устройства (рис. 2.12) при пуске конвейера с выводом на ползучую скорость 0,2 м/с и переключением на рабочую скорость 1,2 м/с через 40 секунд.

Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс конвейера отличаются довольно высокой колебательностью и длительным временем регулирования порядка 30 сек при выводе на ползучую скорость и порядка 20 сек при выводе на номинальную скорость. В движении массы m_2 , расположенной в центре грузовой ветви, и массы m_3 , расположенной на хвостовом барабане, в момент пуска конвейера и в момент переключения скорости наблюдается перемещение в сторону, противоположную основному движению конвейера, что связано с перемещением натяжного устройства под действием силы тяжести, отводящего хвостовой барабан назад вследствие уменьшения натяжения ленты на порожней ветви.

Колебательные переходные процессы негативно влияют на срок службы ленты, увеличивают ее износ. По этой причине при расчете и проектировании конвейера приходится выбирать более дорогие ленты с увеличенным запасом прочности, что экономически невыгодно.

Изменение натяжений также носит колебательный характер, а величина тягового фактора в определенные моменты времени превышает значение 2,5. Это означает, что при пуске конвейера и при переключении скорости условие Эйлера не выполняется и возникает проскальзывание ленты на приводном барабане. На основании рис. 2.14 можно видеть, что проскальзывание возникает в следующие моменты времени:

- через 6,6 сек после пуска конвейера продолжительностью 4 сек;
- через 1,5 сек после переключения на повышенную скорость продолжительностью 4,4 сек.

Задача стабилизации тягового фактора при пуске конвейера и при переключении скорости движения ленты с меньшей на большую успешно решена в работах [27] и [18]. В работе [18] была получена модель автоматической стабилизации величины тягового фактора магистрального конвейера с двухдвигательным приводом. Автоматическая стабилизация осуществляется регулированием положения каретки натяжного устройства. В работе [27] получена аналогичная модель автоматической системы стабилизации тягового фактора для двух типов однодвигательных конвейеров — с натяжным устройством, расположенным в головной части и с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части. В обеих работах рассматривались только случаи переключения скорости движения ленты с меньшей на большую и не рассматривались процессы останова и торможения конвейера.

Полученные в работах [27] и [18] модели автоматических систем используются в технической реализации комплексной системы автоматического управления, описываемой в настоящей работе.

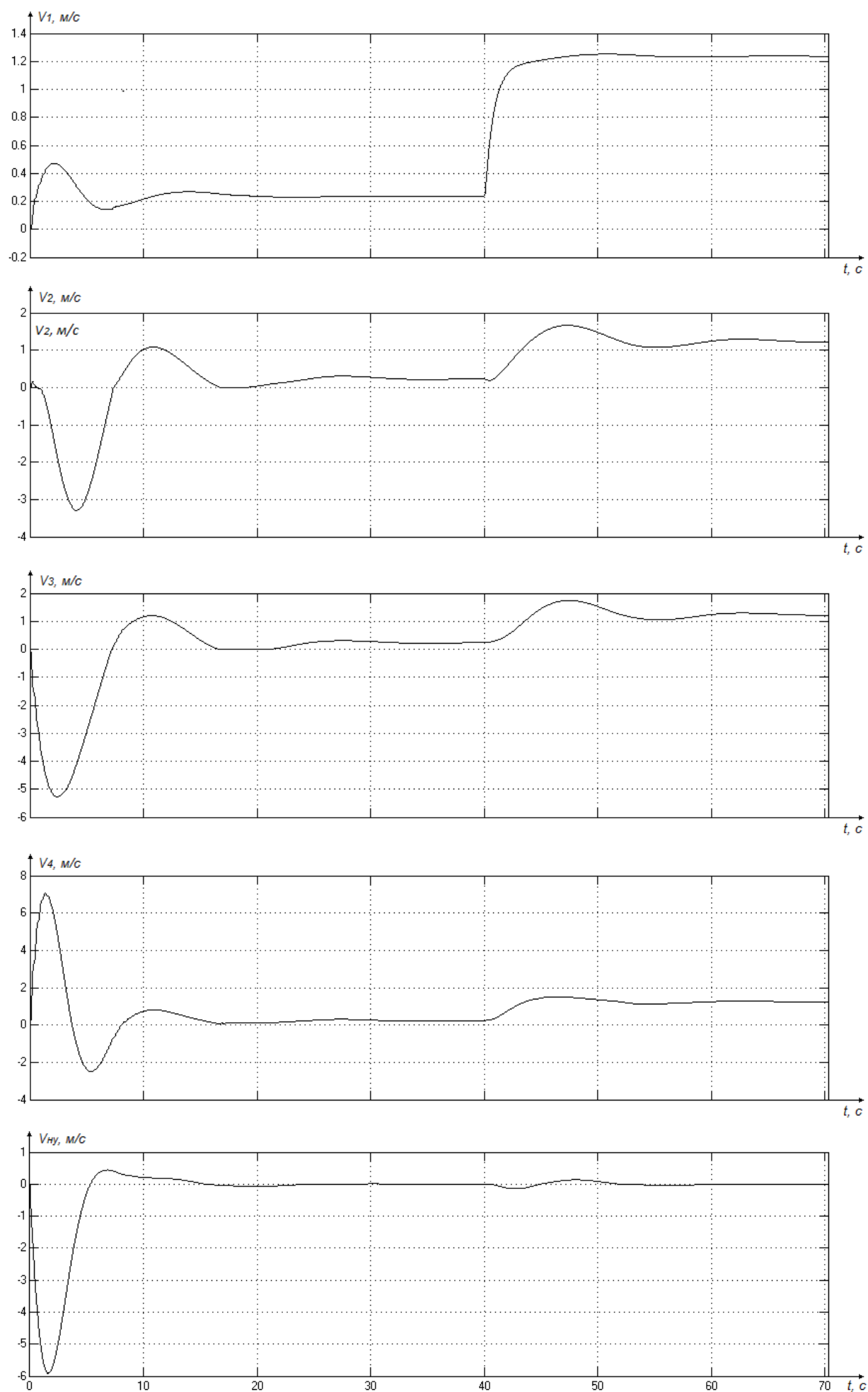


Рисунок 2.15: Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при пуске конвейера

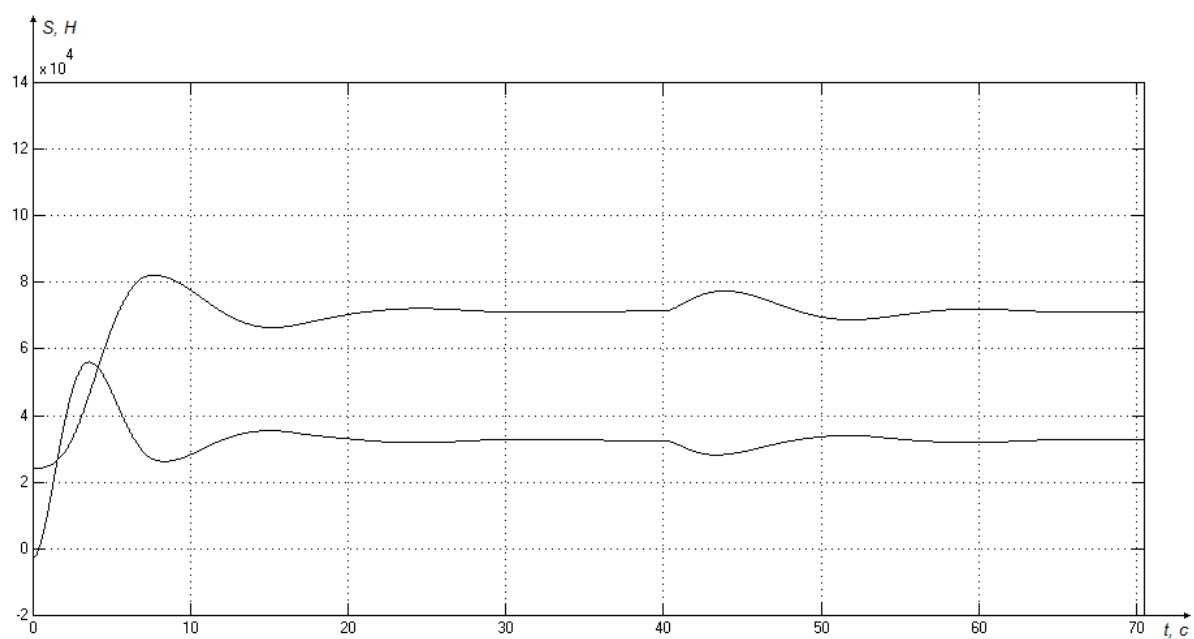


Рисунок 2.16: Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана

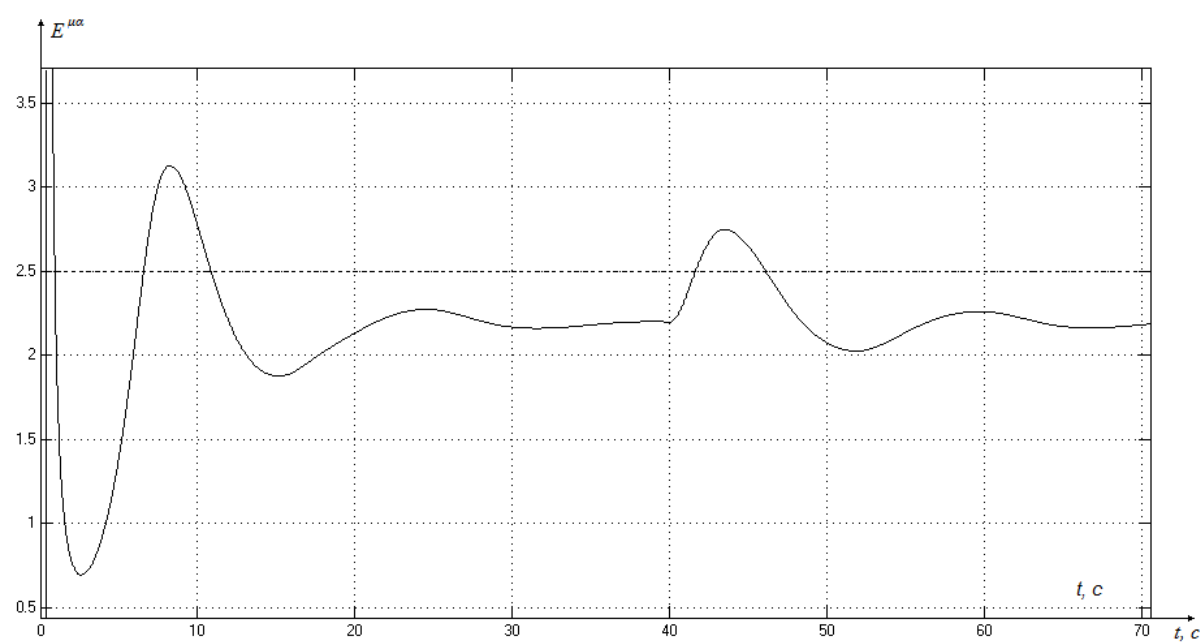


Рисунок 2.17: Изменение величины тягового фактора

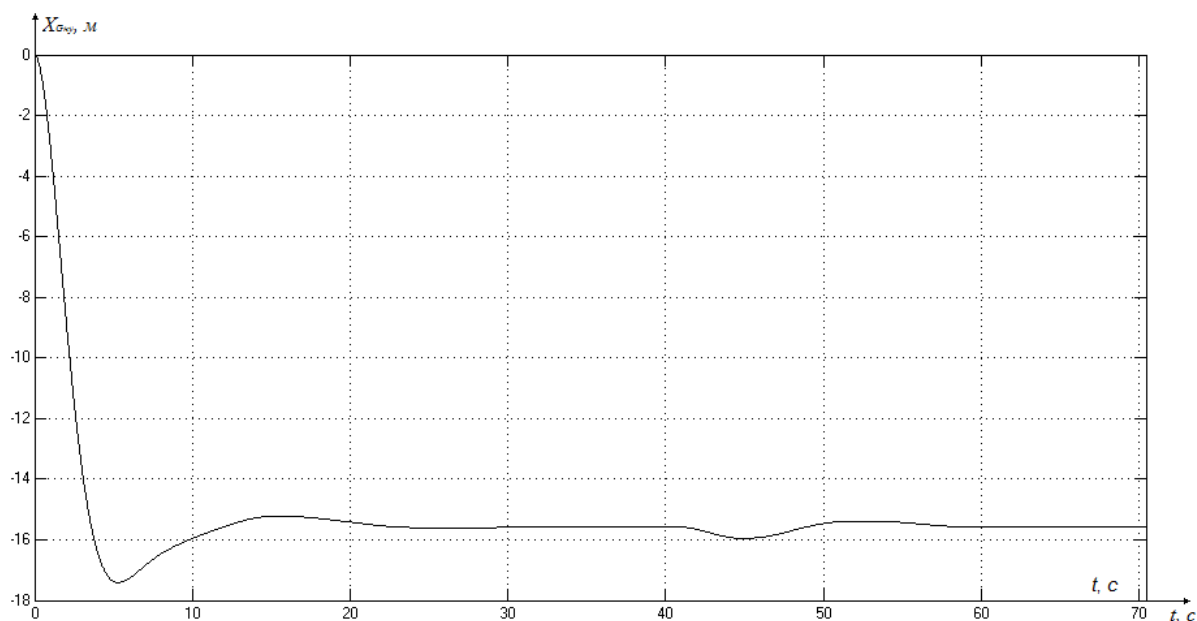


Рисунок 2.18: Перемещение натяжного устройства

2.5.2 Останов конвейера без использования торможения (свободный выбег)

При останове и торможении конвейера также возникают дополнительные динамические натяжения, которые приводят к неустойчивой работе установки во время торможения. При отключении привода также может возникать проскальзывание ленты конвейера. Анализ процесса останова конвейера позволяет оценить параметры переходных процессов, определить максимально допустимые усилия тормозных устройств, обеспечивающих экстренное торможение, определить натяжение грузовой ветви, при котором не происходит потеря ее поперечной устойчивости, определить требования к алгоритмам и методам управления, необходимым для оптимизации переходных процессов останова и торможения.

Рассмотрим останов конвейера без применения торможения (свободный выбег). Технологически эта операция осуществляется отключением привода. После отключения лента некоторое время продолжает движение под действием сил инерции, скорость движения постепенно уменьшается. Проведем моделирование останова конвейера при скорости движения ленты, равной 1,2 м/с. На рис. 2.19 представлены графики переходных процессов по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства в этом случае.

Из рис. 2.19 видно, что скорость первой сосредоточенной массы, находящейся в точке набегания ленты на приводной барабан, падает по экспоненциальному закону. Падение скоростей остальных сосредоточенных масс происходит медленнее за счет наличия упругих деформаций в ленте конвейера. Все переходные процессы завершаются на 5 секунд.

Натяжное устройство в момент отключения привода начинает движение и перемещается примерно на 0,5 м, что объясняется падением натяжений в ленте конвейера.

На рис. 2.20 представлено изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана, на рис. 2.21 представлено изменение величины тягового фактора, вычисленное по формуле () на основе измеренных значений натяжений.

При останове конвейера без применения тормозных устройств в момент отключения привода натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан $S_{наб}$ уменьшается на величину 7060 Н, натяжение в точке сбегания ленты с приводного барабана $S_{сб}$ увеличивается на величину 4540 Н. Результирующее значение тягового фактора для режима торможения, равное $\frac{S_{сб}}{S_{наб}}$, увели-

чивается и превышает значение 0,4, что говорит о наличии проскальзывания ленты конвейера на протяжении всего времени останова.

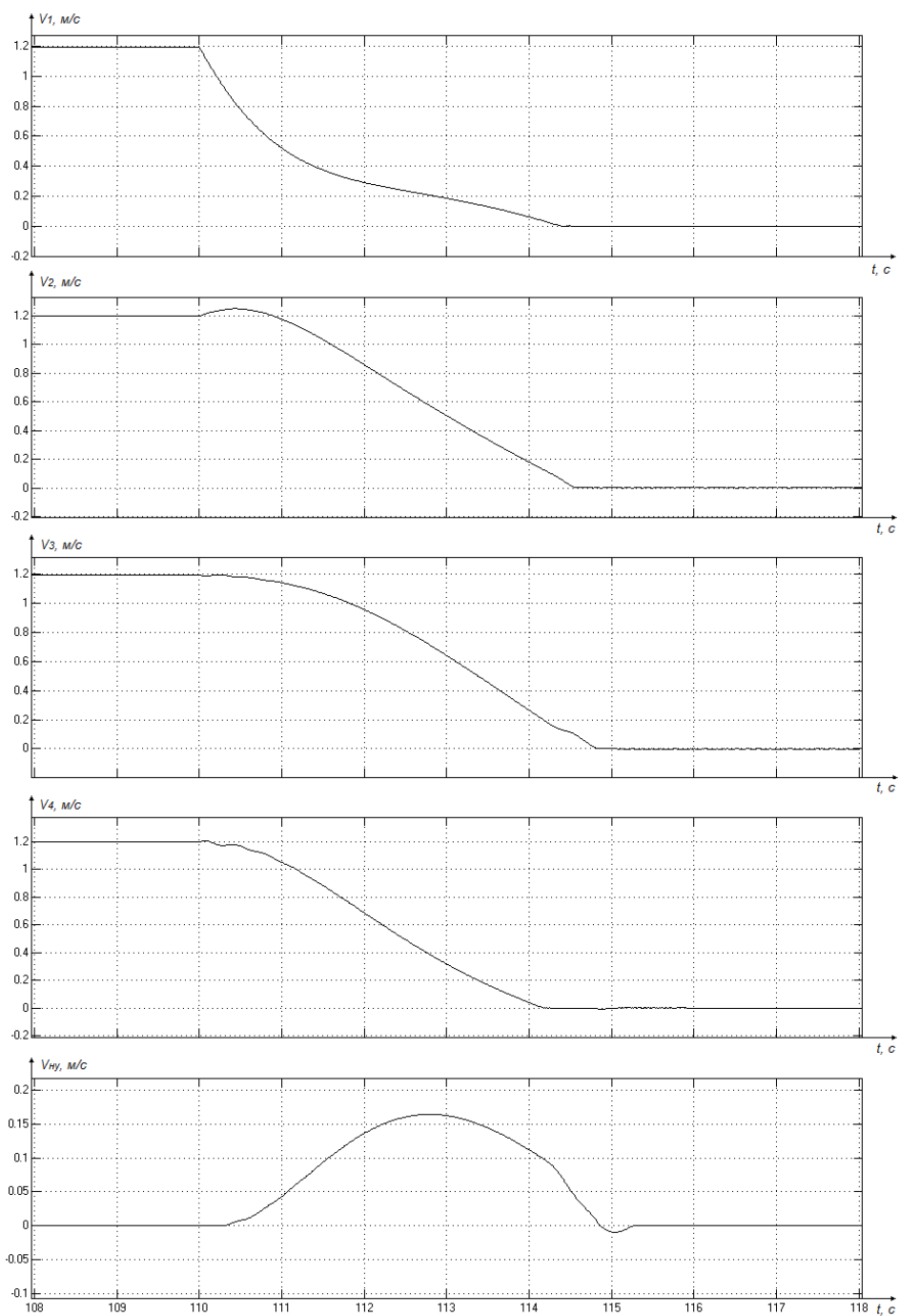


Рисунок 2.19: Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при останове конвейера без применения торможения

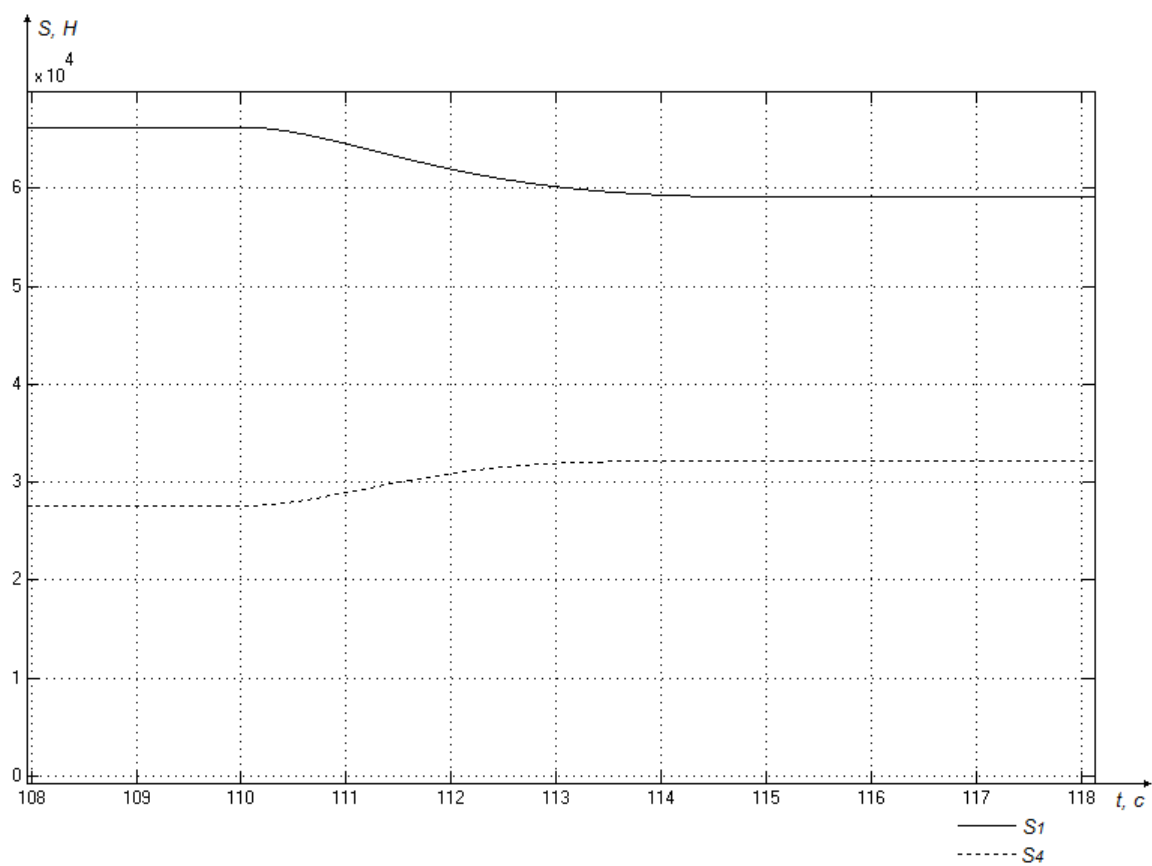


Рисунок 2.20: Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана при останове конвейера без применения торможения

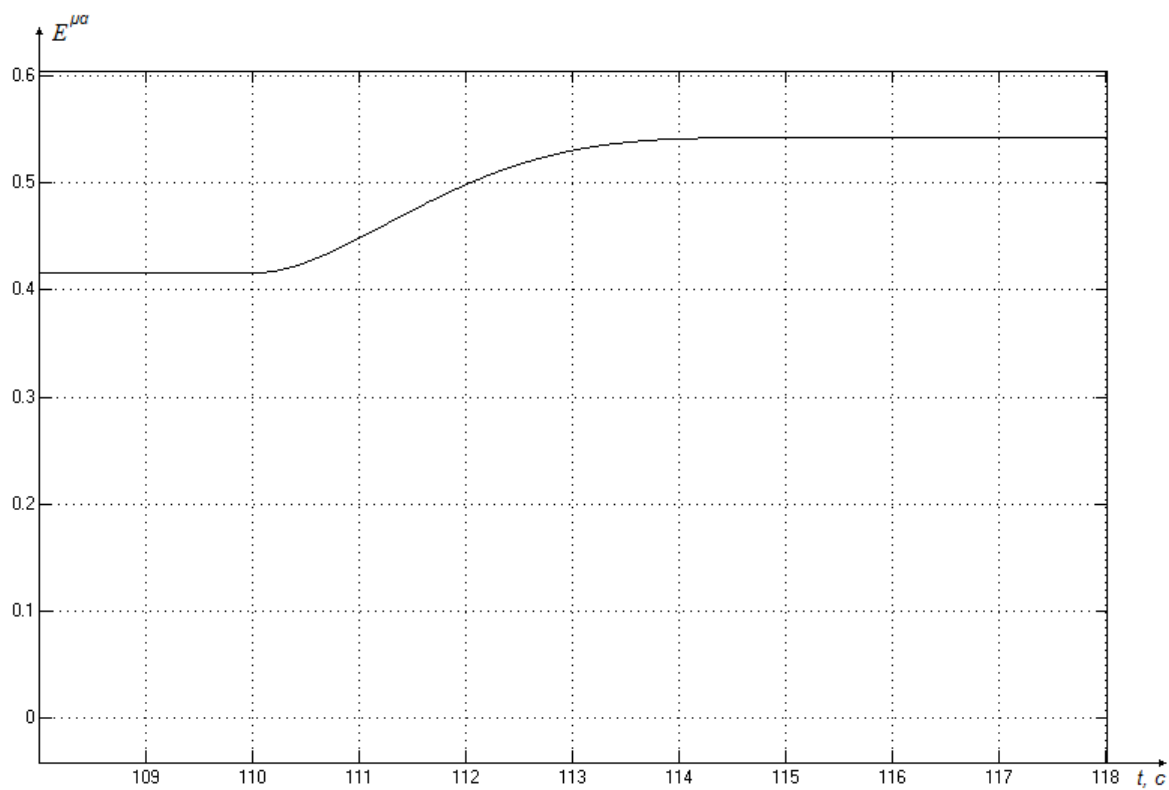


Рисунок 2.21: Изменение величины тягового фактора при останове конвейера без применения торможения

Следует обратить особое внимание на то, что значение тягового фактора для режима торможения превышает значение 0,4 на протяжении всего времени работы конвейера. Это показывает, что останов конвейера в любой момент времени будет сопровождаться проскальзыванием ленты. Одним из вариантов решения проблемы проскальзывания ленты при останове могло бы быть уменьшение значения тягового фактора для режима торможения во время работы конвейера, что может быть достигнуто, например, уменьшением веса натяжного устройства. Однако, связь тягового фактора для режима торможения и тягового фактора для режима пуска и разгона не позволяет уменьшить значение первого параметра без увеличения второго. Это подтверждается экспериментальными данными.

Экспериментально было установлено, что для конвейера с выбранными параметрами вес натяжного устройства, равный $65000H$, обеспечивает поддержание значения тягового фактора для режима торможения на уровне, меньшем чем 0,4 на протяжении всего периода работы конвейера (за исключением моментов пуска и изменения скорости). Однако, при этом значение тягового фактора для режима пуска и разгона превышает значение 2,5 на протяжении всего времени работы конвейера, что говорит о постоянном проскальзывании ленты в этом случае (и слишком малом весе натяжного устройства). Графики изменения значений тягового фактора при весе натяжного устройства равном $65000H$ представлены на рис. 2.22.

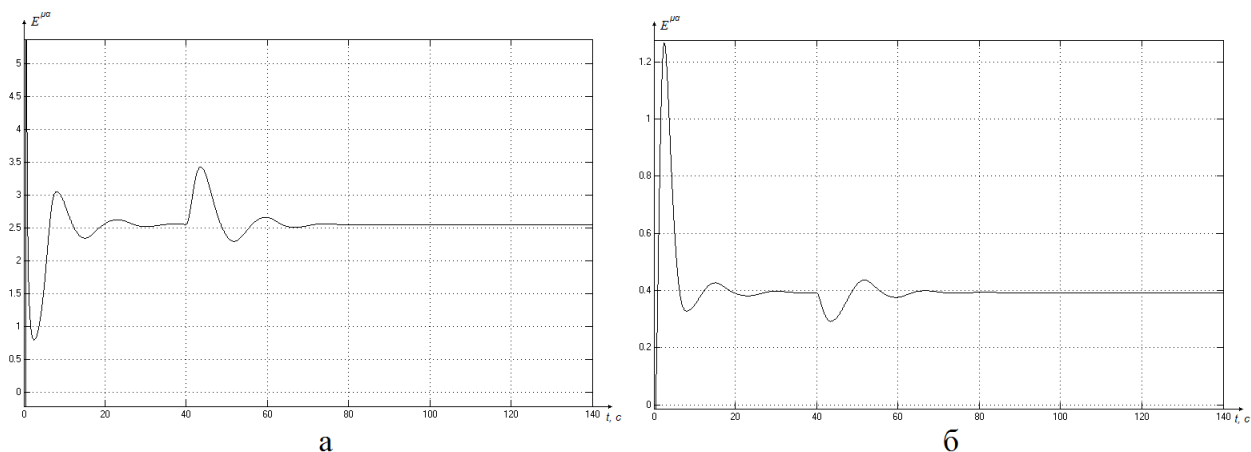


Рисунок 2.22: Изменение значений тягового фактора для режима пуска (а) и тягового фактора для режима торможения (б) при весе натяжного устройства, равном $65000H$

Так как процесс останова конвейера занимает очень малое время по сравнению с временем рабочего режима, то целесообразно выбрать такой вес натяжного устройства, при котором значение тягового фактора для режима пуска и разгона будет удовлетворять условию Эйлера. В этом случае при останове конвейера необходимо решать задачу стабилизации тягового фактора для режима торможения для избежания проскальзывания ленты.

2.5.3 Останов конвейера с использованием торможения приводного барабана

При торможении конвейера, в отличие от свободного выбега, необходимо учитывать создаваемый тормозным устройством тормозной момент M_T , приложенный к приводному или хвостовому барабану и направленный в сторону, противоположную движению барабана. Для исследования режимов торможения используется модифицированная модель ленточного конвейера, которая описана в разделе 2.3.

Рассмотрим останов конвейера с приложением тормозного момента определенной величины (15000Нм) к приводному барабану. Технологически эта операция осуществляется отключением привода и одновременным включением тормозного устройства на приводном барабане. После отключения лента некоторое продолжает движение под действием сил инерции, а за счет наличия тормозного момента это время значительно сокращается. Проведем моделирование торможения конвейера при скорости движения ленты, равной 1,2 м/с. На рис. 2.23 представлены графики переходных процессов по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства.

Из рис. 2.23 видно, что приводной барабан (и точка, соответствующая первой сосредоточенной массе ленты) останавливается значительно быстрее, чем при останове конвейера без применения торможения (рис. 2.19). Останов приводного барабана в данном случае осуществляется за 0,12 сек. Останов остальных сосредоточенных масс ленты происходит за 3 – 4 сек, при этом наблюдается колебательный характер уменьшения скоростей сосредоточенных масс.

На рис. 2.24 представлен график изменения натяжений ленты в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана. В отличие от останова конвейера без применения торможения, в данном случае значения натяжений изменяются с более высокой скоростью, которая, однако, незначительно отличается от скорости изменения натяжений при останове конвейера без применения торможения в следствие упругости ленты.

На рис. 2.25 представлен график изменения величины тягового фактора при останове конвейера с торможением приводного барабана. Этот график показывает, что на протяжении всего времени торможения на приводном барабане присутствует проскальзывание ленты, как и в случае останова конвейера без применения торможения.

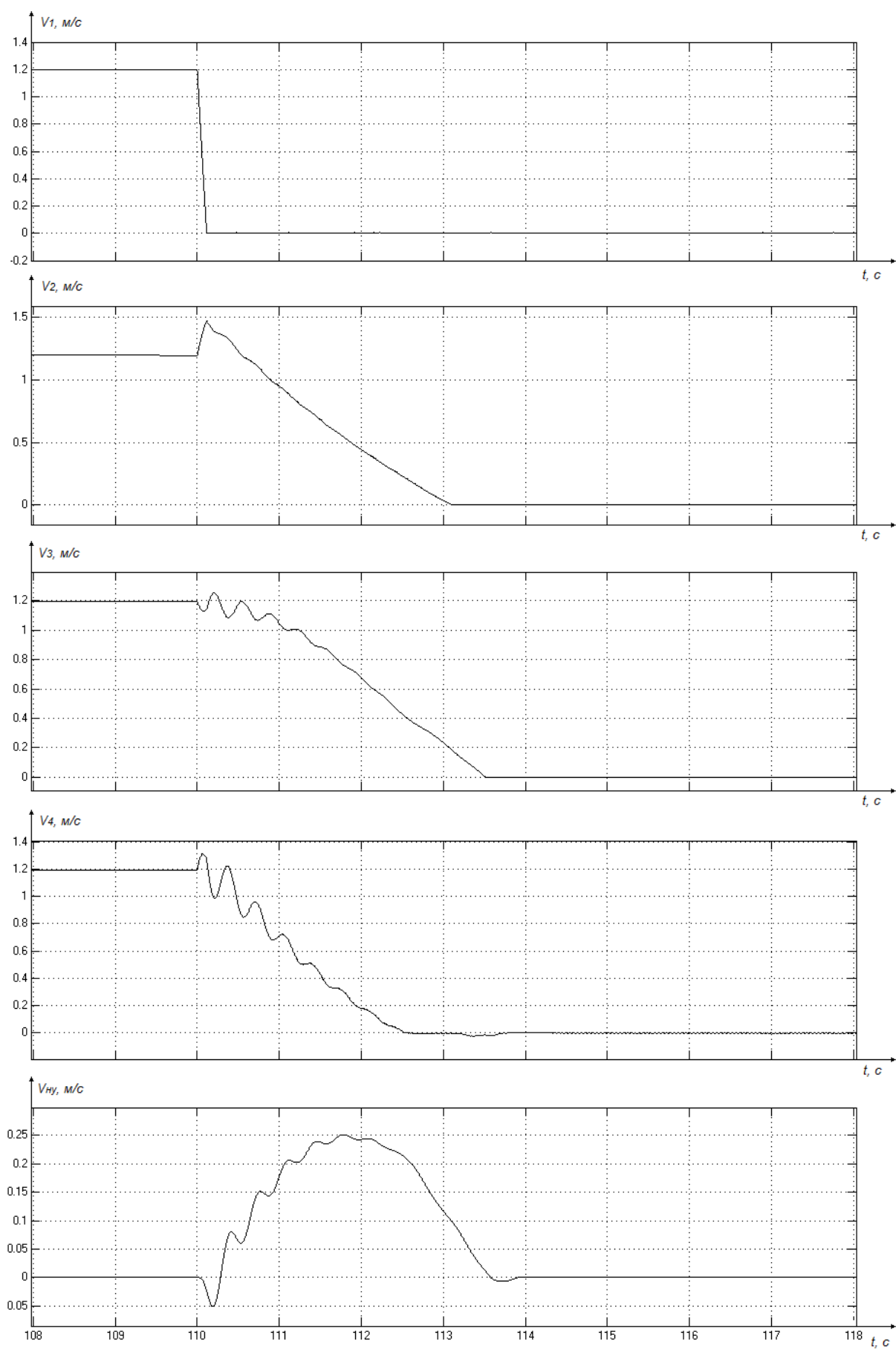


Рисунок 2.23: Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при останове конвейера с торможением приводного барабана

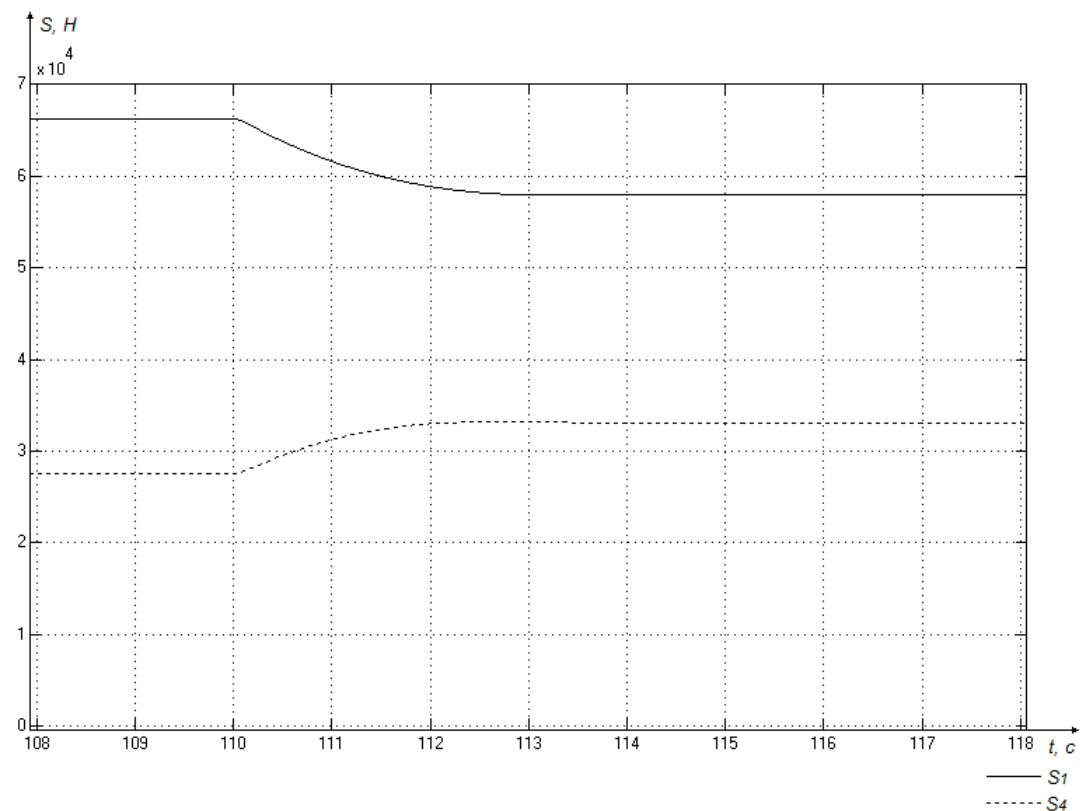


Рисунок 2.24: Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана при останове конвейера с торможением приводного барабана

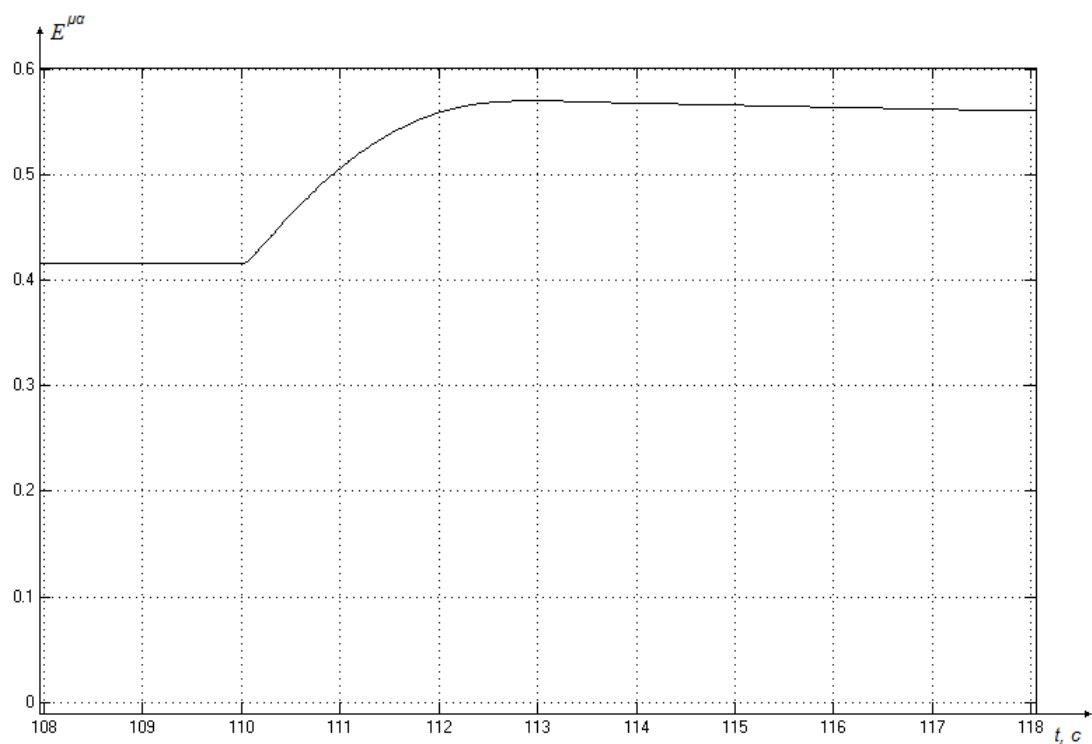


Рисунок 2.25: Изменение величины тягового фактора при останове конвейера с торможением приводного барабана

2.5.4 Торможение хвостового барабана конвейера

Рассмотрим случай частичного торможения хвостового барабана конвейера без отключения привода (без останова конвейера). Этот случай позволяет наблюдать поведение участков ленты при создании дополнительного тормозного момента на хвостовом барабане и представляет определенный интерес для разработки алгоритма останова конвейера, который обеспечивает контроль проскальзывания ленты.

Рассмотрим торможение хвостового барабана с приложением к нему тормозного момента определенной величины (500 Нм. Технологически эта операция осуществляется включением тормозного устройства на хвостовом барабане в определенное время (привод конвейера при этом не отключается). Проведем моделирование торможения конвейера при скорости движения ленты, равной 1,2 м/с. Через 100 секунд после пуска конвейера включим тормозное устройство и еще через 60 секунд отключим его. На рис. 2.26 представлены графики переходных процессов по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства.

При приложении тормозного момента к хвостовому барабану скорость его движения уменьшается (об этом можно судить по графику скорости сосредоточенной массы m_3). Через 20 секунд скорость сосредоточенной массы m_3 восстанавливается до номинальной величины. При этом на хвостовом барабане, возможно, имеет место проскальзывание ленты. Для контроля проскальзывания ленты на хвостовом барабане необходимо вычислять натяжения ленты в соответствующих точках и величину тягового фактора для хвостового барабана. Величину тормозного момента необходимо выбирать таким образом, чтобы величина тягового фактора не превышала номинального значения. Вычисление натяжений и тягового фактора для случая торможения хвостового барабана описано в разделе 2.4.

При отключении тормозного устройства наблюдается кратковременное увеличение скоростей сосредоточенных масс и последующее восстановление скоростей до номинальной величины.

Интерес в этом случае представляет изменение значений натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана. Как видно из рис. 2.27, при торможении хвостового барабана натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан увеличивается на 2440 Н до величины 68700 Н, натяжение в точке сбегания ленты с приводного барабана уменьшается на 2540 Н до величины 25000 Н. Величина тягового фактора для режима торможения (рис. 2.28), равного отношению натяжения в точке сбегания ленты с приводного барабана к натяжению в точке набегания ленты на приводной барабан, уменьшается и достигает величины 0,36. Это означает, что в таком режиме (при достаточно низкой величине тягового фактора для режима торможения) может быть произведен останов конвейера (свободным выбегом или с применением торможения приводного барабана) без проскальзывания ленты на приводном барабане.

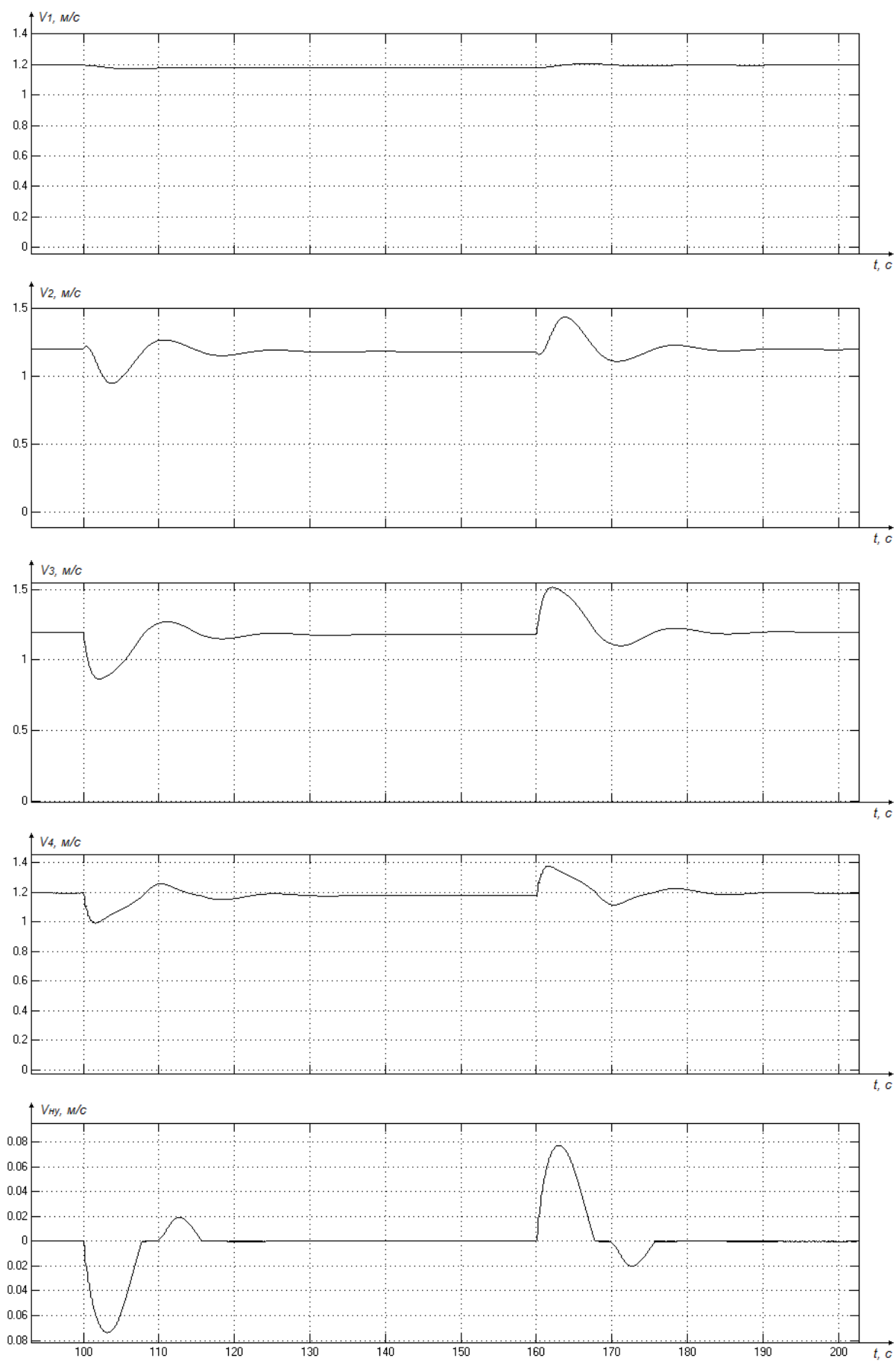


Рисунок 2.26: Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при торможении хвостового барабана конвейера

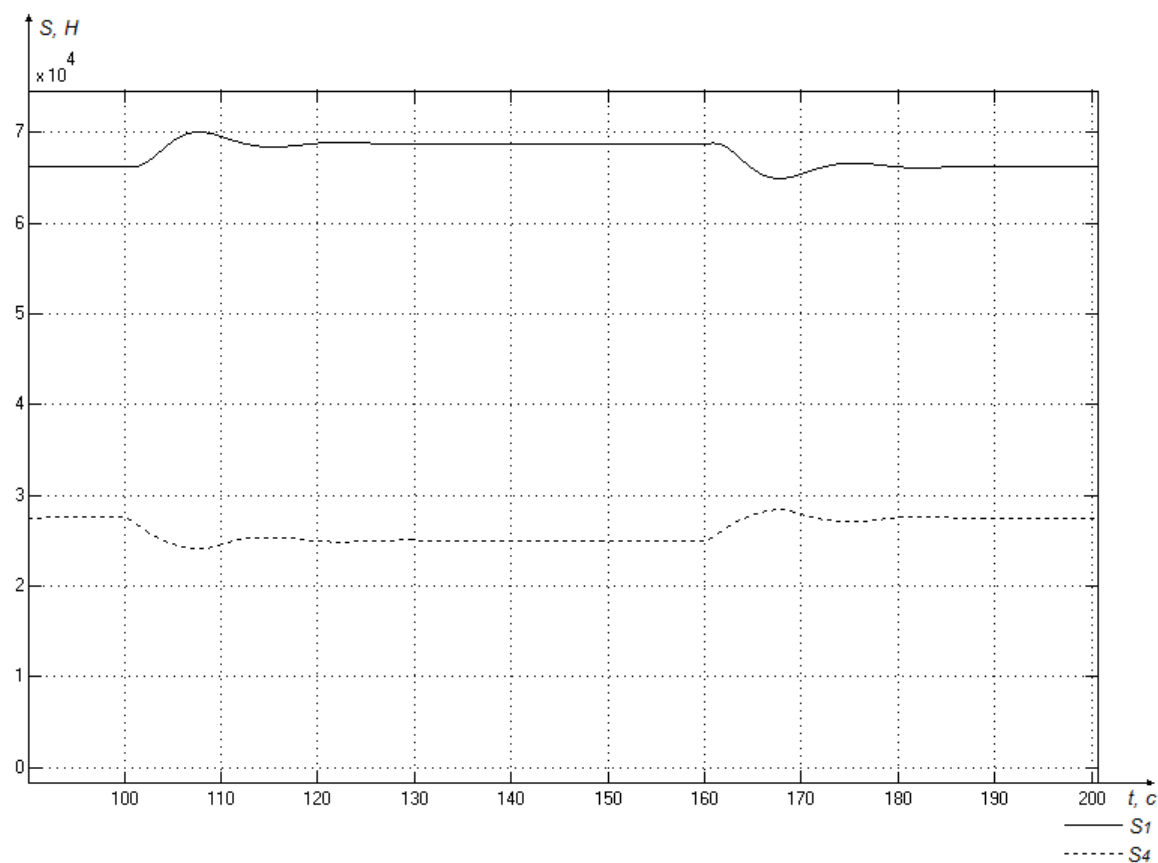


Рисунок 2.27: Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана при торможении хвостового барабана конвейера

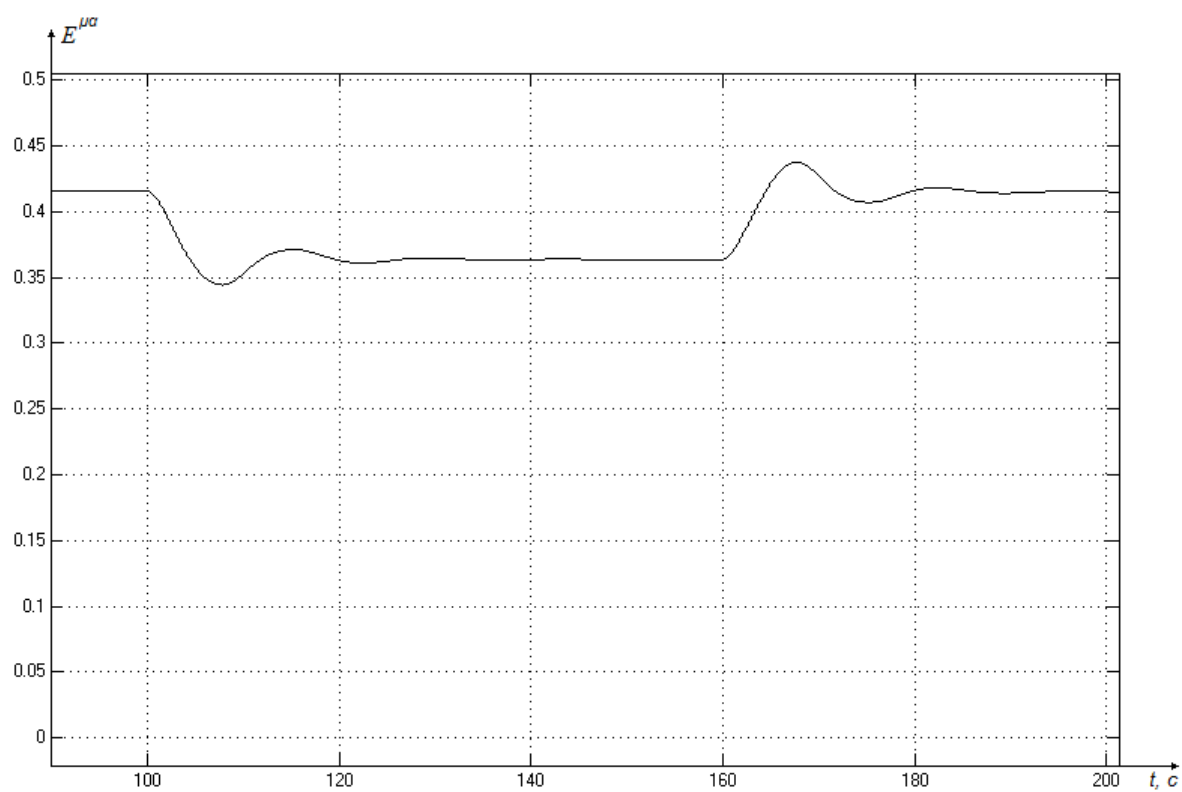


Рисунок 2.28: Изменение величины тягового фактора при торможении хвостового барабана конвейера

2.6 Выводы по главе 2

В настоящей главе описана и модифицирована математическая модель ленточного конвейера, которая вполне соответствует реальному технологическому объекту, а также проведены исследования и анализ параметров следующих переходных процессов конвейерной установки в различных режимах ее работы:

- Переходные процессы по координатам сосредоточенных масс ленты конвейера и натяжного устройства;
- Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты конвейера и натяжного устройства;
- Переходные процессы по изменению натяжений ленты, вычисление которых осуществляется на основе деформаций ленты;
- Переходные процессы по изменению величины тягового фактора, которые позволяют судить о наличии проскальзывания ленты в определенные периоды времени.

Анализ переходных процессов рассмотрен как для режимов пуска и разгона, так и для режима останова (торможения) конвейера. Проведенный анализ позволяет определить набор алгоритмов управления и функций, которые должны входить в состав разрабатываемой комплексной автоматической системы управления конвейером:

- Алгоритм пуска конвейера и регулирования скорости движения ленты. Этот алгоритм управления должен обеспечивать пуск конвейера с выводом на заданную ползучую скорость, ожидать завершения переходных процессов в ленте и обеспечить переключение на номинальную скорость. Кроме того, алгоритм должен обеспечивать плавное переключение скорости движения ленты с применением оптимального регулятора. Переключение скорости движения ленты должно производиться совместно с работой алгоритма стабилизации тягового фактора конвейера для устранения проскальзывания ленты при переключении скорости ее движения;
- Алгоритм стабилизации тягового фактора конвейера для устранения проскальзывания ленты в номинальном режиме работы конвейера. Стабилизация тягового фактора осуществляется посредством изменения веса натяжного устройства. Алгоритм стабилизации реализован по традиционной одноконтурной схеме. На вход регулятора натяжения подается сигнал рассогласования $\varepsilon(t)$ между технологически необходимым значением тягового фактора $e_0^{\mu\alpha}$, и текущим, вычисляемым значением $e^{\mu\alpha}(t)$. В зависимости от величины и знака рассогласования должен изменяться вес груза натяжного устройства, либо перемещаться каретка автоматического натяжного устройства. Сигнал об изменении веса груза натяжного устройства или о перемещении каретки автоматического натяжного устройства подается в качестве управляющего сигнала исполнительному механизму, управляющему натяжным устройством конвейера. При этом происходит изменение натяжений $S_1(t)$ и $S_4(t)$, и, следовательно, стабилизация величины тягового фактора $e^{\mu\alpha}(t)$. Подробное описание алгоритма, синтез регулятора и моделирование описаны в [27];
- Алгоритм стабилизации тягового фактора конвейера для устранения проскальзывания ленты при останове (торможении) конвейера. Предполагается осуществлять стабилизацию тягового фактора за счет предварительного управляемого торможения хвостового и приводного барабанов конвейера. При торможении хвостового барабана изменяются натяжения $S_n(t)$ и $S_r(t)$ в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана до определенных величин и, соответственно, изменяется величина тягового

фактора $\frac{1}{E^{\mu\alpha}(t)}$ до технологически необходимого значения $\frac{1}{E_0^{\mu\alpha}}$, что позволяет осуществить снижение скорости, останов или торможение конвейера без проскальзывания ленты на приводном барабане.

Подробное описание этого алгоритма и особенности его работы представлены в главе 3.

- Контроль провисания ленты конвейера при останове (торможении) конвейера. При снижении скорости движения ленты натяжение в грузовой ветви может уменьшиться до такой величины, при которой будет наблюдаться провисание ленты между роlikоопорами. Для контроля этого процесса необходимо обеспечивать требуемое технологическое значение натяжения грузовой ветви ленты конвейера после его останова [66]. Это значение рассчитывается по формуле

$$S_{min} = 5 \div 8(q_r + q_l)l'_p,$$

где q_r и q_l – погонный вес грузовой и порожней ветвей соответственно, l'_p – расстояние между роlikоопорами конвейера.

Подробное описание этого алгоритма и особенности его работы представлены в главе 3;

Проведенный анализ также позволяет сформулировать следующие требования и рекомендации к разрабатываемым алгоритмам в частности и комплексной автоматической системе управления конвейером в общем:

- Комплексная автоматизированная система управления конвейером должна быть реализована на современном программном и аппаратном обеспечении, рассчитанном на работу в сложных условиях горных предприятий;
- Комплексная автоматизированная система управления конвейером должна совмещать в себе все описанные алгоритмы управления, быть легко масштабируемой для реализации новых алгоритмов управления и возможности резервирования;
- Комплексная автоматизированная система управления конвейером должна позволять осуществлять работу нескольких описанных алгоритмов совместно;
- Комплексная автоматизированная система управления конвейером должна поддерживать свою работу как в номинальном, так и в аварийном (экстренное торможение) режимах работы конвейера;
- Комплексная автоматизированная система управления конвейером должна предусматривать возможность отключения для обеспечения ручного режима управления конвейером;
- Алгоритм стабилизации тягового фактора конвейера для устранения проскальзывания ленты при переключении скорости с меньшей на большую должен использоваться при пуске конвейера и увеличении скорости движения ленты только в случаях возможного возникновения проскальзывания ленты. Случаи возможного возникновения проскальзывания ленты определяются на основе текущего значения тягового фактора $E^{\mu\alpha}(t)$.
- Алгоритм стабилизации тягового фактора конвейера для устранения проскальзывания ленты при останове конвейера должен также использоваться только в случаях возможного возникновения проскальзывания ленты. Случаи возможного возникновения проскальзывания ленты определяются на основе текущего значения тягового фактора $\frac{1}{E^{\mu\alpha}(t)}$.

Глава 3

Разработка алгоритма управления процессами останова и пуска конвейера

В данной главе рассматривается разработка и исследование работы алгоритмов управления процессами останова и пуска конвейера, которые включают в себя стабилизацию тягового фактора для устранения проскальзывания ленты при торможении конвейера и контроль провисания ленты в грузовой ветви конвейера после его останова.

Работа алгоритма управления остановом основана на предварительном торможении хвостового барабана по определенному закону для управляемого изменения натяжений ленты в точках набегания на приводной барабан и сбегания с приводного барабана.

Алгоритм управления пуском представляет собой последовательность действий, осуществляющую пуск конвейера в условиях измененных при торможении значений натяжений ленты в ветвях конвейера с целью уменьшения нагрузки на привод во время пуска.

Общий принцип работы алгоритма управления остановом состоит в том, чтобы при инициировании останова конвейера осуществить торможение хвостового барабана таким образом, чтобы возникающие при этом динамические натяжения в ветвях конвейера изменили значение тягового фактора $\frac{1}{e^{\mu\alpha}}$ до такой величины, при которой с момента отключения привода до момента останова приводного барабана проскальзывание ленты на нем будет отсутствовать. Отключение привода необходимо осуществлять после достижения значения тягового фактора определенной величины, то есть сигнал на останов привода должен быть сформирован через некоторое время после инициирования останова конвейера, определяемое скоростью распространения упругих волн в конвейерной ленте.

Алгоритм управления остановом можно разделить на следующие фазы:

- получение сигнала останова конвейера;
- торможение хвостового барабана для создания динамических натяжений в ленте;
- отключение привода после создания необходимых условий отсутствия проскальзывания ленты;
- переходные процессы в ленте после останова привода, обусловленные ее механическими свойствами.

Для обеспечения корректного останова конвейера необходимо решить следующие задачи:

- выбрать величину тормозного момента хвостового барабана. Очевидно, что от величины тормозного момента зависит величина возникающих сил сопротивления движению ленты,

а следовательно, величины возникающих при этом динамических натяжений. Диапазон допустимых значений тормозного момента должен быть ограничен с одной стороны минимальным значением, при котором обеспечивается необходимая величина тягового фактора, с другой стороны – максимальным значением, при котором усилия в ленте не превышают допустимых технологических значений для ленты выбранного типа;

- выбрать минимальное значение тягового фактора, при котором останов привода осуществляется без проскальзывания ленты. После создания дополнительных натяжений в ветвях конвейера и остановки привода натяжения начинают резко изменяться, что приводит к изменению значения тягового фактора и возможному проскальзыванию ленты на приводном барабане. Поэтому необходимо обеспечить такие величины натяжений в ветвях конвейера, при которых значение тягового фактора будет удовлетворять условию Эйлера на протяжении всего времени остановки привода;
- минимизировать негативные переходные процессы в ленте после остановки конвейера. К таким переходным процессам относится, прежде всего, возможное движение приводного барабана в обратном направлении под действием увеличенных натяжений в грузовой ветви, колебания скоростей сосредоточенных масс ленты, а также создание условий провисания ленты между роlikоопорами грузовой ветви.

3.1 Исследование изменения натяжений ленты конвейера при торможении хвостового барабана

Проведем более подробные исследования процесса торможения хвостового барабана, кратко описанные в разделе 2.5.4 с целью изучения изменения натяжений ленты конвейера. Примем допущение, что груз на ленте распределен равномерно и грузопоток имеет максимальное значение, то есть конвейер полностью нагружен.

3.1.1 Общее описание процесса торможения

В общем случае процесс торможения хвостового барабана конвейера можно описать следующим образом. При активации тормозного устройства на хвостовом барабане возникает тормозной момент, направленный противоположно направлению движения барабана. Тормозной момент создает дополнительное сопротивление движению ленты конвейера, в следствие чего появляются динамические натяжения в грузовой и порожней ветвях. При этом, в точке набегания ленты на приводной барабан в грузовой ветви натяжение увеличивается:

$$S_{гр} = 0,5G_{ну} + W_{гр},$$

а в точке сбегания ленты с приводного барабана в порожней ветви натяжение уменьшается:

$$S_{п} = 0,5G_{ну} - W_{п}.$$

Здесь $W_{гр}$ и $W_{п}$ – силы сопротивления движению для грузовой и порожней ветвей соответственно. Для установившегося режима работы эти силы вычисляются по формулам 2.2 и 2.3.

Однако, при торможении хвостового барабана конвейера возникают дополнительные динамические натяжения ленты $\Delta S_{гр}$ и $\Delta S_{п}$. Тогда натяжения в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана будут равны:

$$S'_{гр} = 0,5G_{ну} + W_{гр} + \Delta S_{гр}, \quad (3.1)$$

$$S'_n = 0,5G_{ny} - (W_n + \Delta S_n). \quad (3.2)$$

Ниже показано, что возникающие при торможении хвостового барабана динамические натяжения пропорциональны силе трения между тормозной колодкой и тормозным барабаном (либо тормозным диском).

Рассмотрим тормозное устройство, состоящее из одного тормозного барабана и одной тормозной колодки [3]. Общая схема такого тормозного устройства представлена на рис. 3.1.

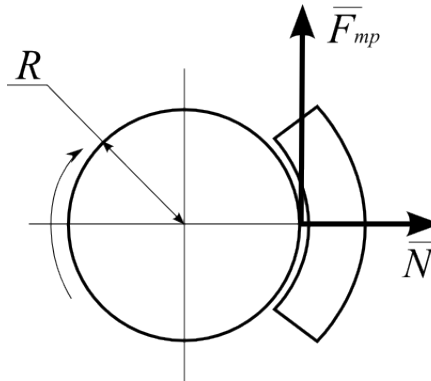


Рисунок 3.1: Общая схема одноколодочного тормозного устройства

При торможении колодка прижимается к барабану с силой определенной величины, при этом возникает сила реакции опоры \bar{N} , модуль которой равен модулю силы, прикладываемой к колодке, а направление – обратное направлению силы, прикладываемой к колодке.

Сила трения, возникающая между колодкой и барабаном равна

$$\bar{F}_{тр} = \bar{N}f,$$

где f – коэффициент трения, величина которого зависит от используемых материалов тормозного барабана и тормозной колодки [2].

Тормозной момент, возникающий на хвостовом барабане конвейера, равен

$$\bar{M}_{ТХв} = \bar{F}_{тр}R,$$

где R – радиус тормозного барабана. В исследуемой модели для упрощения расчетов радиус тормозного барабана принят равным радиусу хвостового барабана конвейера.

3.1.2 Определение зависимости между динамическими натяжениями ленты и силой трения, возникающей при торможении хвостового барабана

Чтобы показать пропорциональную зависимость между возникающими при торможении хвостового барабана динамическими натяжениями ленты и величиной силы трения, проведем несколько итераций моделирования торможения хвостового барабана конвейера при фиксированных значениях скорости движения ленты и веса натяжного устройства. Вес натяжного устройства выберем равным 80000 Н, скорость движения ленты – 1,2 м/с. Для каждой итерации моделирования выберем определенное значение тормозного момента на хвостовом барабане.

На основе результатов моделирования были вычислены действительные значения возникающих при торможении динамических натяжений по формулам 3.1 и 3.2, а также соответствующие им значения возникающей силы трения между тормозным барабаном и колодкой как отношение величины тормозного момента на хвостовом барабане к радиусу хвостового барабана. Результаты расчетов приведены в таблице 3.1. Помимо этого, экспериментально было установлено, что величина скорости движения ленты, изменяемая в диапазоне номинальных значений, не влияет на результаты расчета.

Последние два столбца таблицы 3.1 содержат отношения величины динамических натяжений ленты при торможении хвостового барабана к величине сил трения между тормозным барабаном и колодкой для грузовой и порожней ветвей соответственно.

Результаты моделирования показывают, что величина возникающих при торможении хвостового барабана динамических натяжений ленты линейно зависит от силы трения, возникающей между тормозным барабаном и колодкой. Коэффициент пропорциональности не зависит от величины тормозного момента. Кроме того, модули динамических натяжений для грузовой и порожней ветвей равны между собой – при торможении хвостового барабана конвейера натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан в грузовой ветви увеличивается на определенную величину ΔS , а натяжение в точке сбегания ленты с приводного барабана в порожней ветви уменьшается на ту же самую величину ΔS .

Пусть

$$\frac{\Delta S_{\text{гр}}}{F_{\text{тр}}} = \frac{\Delta S_{\text{п}}}{F_{\text{тр}}} = \varepsilon.$$

ε – коэффициент пропорциональности сил сопротивления движению. Среднее значение ε на основе результатов моделирования равно 2,004. Для упрощения расчетов примем $\varepsilon = 2$.

Таблица 3.1: Результаты определения зависимости между силой трения, возникающей при торможении хвостового барабана и возникающими при этом динамическими натяжениями ленты.

Тормозной момент M_T , Нм	Натяжение в точке набегания $S'_{\text{гр}}$, Н	Натяжение в точке сбегания $S'_{\text{п}}$, Н	Величина силы трения $F_{\text{тр}}$, Н	Динамическое натяжение в грузовой ветви $\Delta S_{\text{гр}}$, Н	Динамическое натяжение в порожней ветви $\Delta S_{\text{п}}$, Н	$\frac{\Delta S_{\text{гр}}}{F_{\text{тр}}}$	$\frac{\Delta S_{\text{п}}}{F_{\text{тр}}}$
1000	76200	27463	2500	4985	5037	1,994	2,015
1500	78750	25004	3750	7535	7496	2,009	1,999
2000	81289	22536	5000	10074	9964	2,015	1,993
2500	83787	20025	6250	12572	12475	2,012	1,996
3000	86291	17523	7500	15076	14977	2,010	1,997
3500	88806	15030	8750	17591	17470	2,010	1,997
4000	91318	12534	10000	20103	19966	2,010	1,997
4500	93813	10021	11250	22598	22479	2,009	1,998
5000	96312	7512,5	12500	25097	24988	2,008	1,999

С учетом описанных выше результатов моделирования формулы 3.1 и 3.2 принимают следующий вид:

$$S'_{гр} = 0,5G_{н\gamma} + W_{гр} + 2F_{тр}, \quad (3.3)$$

$$S'_{п} = 0,5G_{н\gamma} - (W_{п} + 2F_{тр}). \quad (3.4)$$

Таким образом, используя формулу 3.3 или 3.4, можно определить величину силы трения, возникающей между тормозным барабаном и колодкой при торможении хвостового барабана (а следовательно, величину тормозного момента), необходимую для того чтобы изменить натяжения ленты в ветвях конвейера до требуемых значений.

Для определения требуемой величины силы трения воспользуемся формулой 3.4 для порожней ветви. Такой выбор обусловлен следующими факторами. Измерительные датчики целесообразно устанавливать на порожнюю ветвь конвейера, так как при этом минимизируется возможность повреждения датчиков транспортируемым грузом. Кроме этого, значение суммарного погонного веса $q_{п\Sigma}$ порожней ветви, которое используется для вычисления силы сопротивления движению (2.3), не зависит от массы транспортируемого конвейером груза и его распределения на ленте, что позволит использовать зависимость тормозного момента на хвостовом барабане от величины результирующего натяжения ленты как в случае равномерного распределения груза на ленте, так и в случае его неравномерного распределения.

Тогда величина силы трения, возникающая между тормозным барабаном и колодкой при торможении хвостового барабана, равна:

$$F_{тр}(S'_{п}) = \frac{(0,5G_{н\gamma} - W_{п} - S'_{п})}{2}.$$

Отсюда, величина тормозного момента $M_{Тхв}$, который требуется приложить к хвостовому барабану, чтобы величина натяжения ленты стала равной S'_1 , выражается следующим образом:

$$M_{Тхв}(S'_{п}) = F_{тр}(S'_{п})R_{\delta} = \frac{R_{\delta}(0,5G_{н\gamma} - W_{п} - S'_{п})}{2}.$$

Тогда с учетом формулы 3.2 выражение для тормозного момента хвостового барабана можно выразить через модуль динамического натяжения:

$$M_{Тхв}(\Delta S) = \frac{R_{\delta}}{2}\Delta S. \quad (3.5)$$

По полученной формуле можно рассчитать величину силы трения (либо тормозного момента) на хвостовом барабане по известной величине результирующего натяжения ленты для двухбарабанного ленточного конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части. Для определения требуемой величины тормозного момента необходимо располагать следующими параметрами конвейерной установки:

- вес натяжного устройства $G_{н\gamma}$;
- длина конвейера l ;
- радиус тормозного барабана (тормозного диска) R_{δ} ;
- коэффициент сопротивления движению ленты w ;
- погонный вес порожней ветви ленты $q_{л}$;
- погонный вес роlikоопор в порожней ветви ленты $q_{р}$.

3.1.3 Моделирование процесса торможения хвостового барабана с предварительно рассчитанной величиной тормозного момента

Для подтверждения полученных в 3.1.2 результатов произведем расчет требуемой величины тормозного момента, необходимой для уменьшения величины тягового фактора до значения 0,4 для конвейера, параметры которого указаны в таблице 2.1.

Как видно из результатов моделирования режимов работы конвейера, описанных в разделе 2.5.4, установившееся значение тягового фактора $\frac{1}{e^{\mu\alpha}}$ при постоянной скорости движения ленты равно 0,456. При этом установившиеся значения натяжений равны $S_{y1}(t) = 71190H$, $S_{y4}(t) = 32470H$. Если к хвостовому барабану приложить тормозной момент определенной величины, будет справедливо равенство

$$\frac{1}{e^{\mu\alpha}(t)} = \frac{S'_n(t)}{S'_{rp}(t)} = \frac{S_{уст\ n}(t) - \Delta S}{S_{уст\ rp}(t) + \Delta S}.$$

Подставим в это равенство числовые значения:

$$0,4 = \frac{32470 - \Delta S}{71190 + \Delta S}.$$

Отсюда, $\Delta S = 2852,86$ – модуль модуль возникающих в ленте динамических натяжений при торможении хвостового барабана, который обеспечивает требуемую величину тягового фактора. Дополнительные натяжения именно такой величины требуется создать в ветвях конвейера посредством торможения хвостового барабана.

Рассчитаем значение тормозного момента по формуле 3.5:

$$M_{ТХВ} = \frac{0,4}{2} 2852,86 = 576.572(H).$$

Проведем моделирование торможения хвостового барабана конвейера с приложением тормозного момента вычисленной величины. На рис. 3.2 представлен переходной процесс изменения значения тягового фактора при торможении хвостового барабана с моментом, равным 576,572 Н при движении ленты со скоростью 1,2 м/с. Торможение осуществлялось в момент времени 60 сек.

Из графика на рис. 3.2 видно, что после переходного процесса с колебательностью, равной 2, перерегулированием, равным 39 % и временем регулирования, равным 30 сек, значение тягового фактора устанавливается равным предварительно заданной величине 0,4.

3.1.4 Моделирование процесса останова конвейера посредством свободного выбега с предварительным торможением хвостового барабана

Если моделировать свободный выбег конвейера (рис. 2.21), то есть останов посредством отключения привода без использования торможения на приводном барабане, то можно видеть, что величина тягового фактора увеличивается за счет возникающих в ленте динамических усилий, связанных с остановкой движущихся частей конвейера. В этом случае, в процессе останова привода проскальзывание ленты может иметь место, так как предварительно уменьшенная торможением хвостового барабана величина тягового фактора может превысить значение, определенное условием Эйлера. Поэтому величину тягового фактора будем выбирать с учетом коэффициента запаса сил трения на приводном барабане k_T , равного 1,1 – 1,15 [66].

Проведем моделирование останова конвейера посредством свободного выбега, создав предварительный тормозной момент на хвостовом барабане для обеспечения требуемой величины тягового фактора с учетом коэффициента запаса сил трения на приводном барабане k_T .

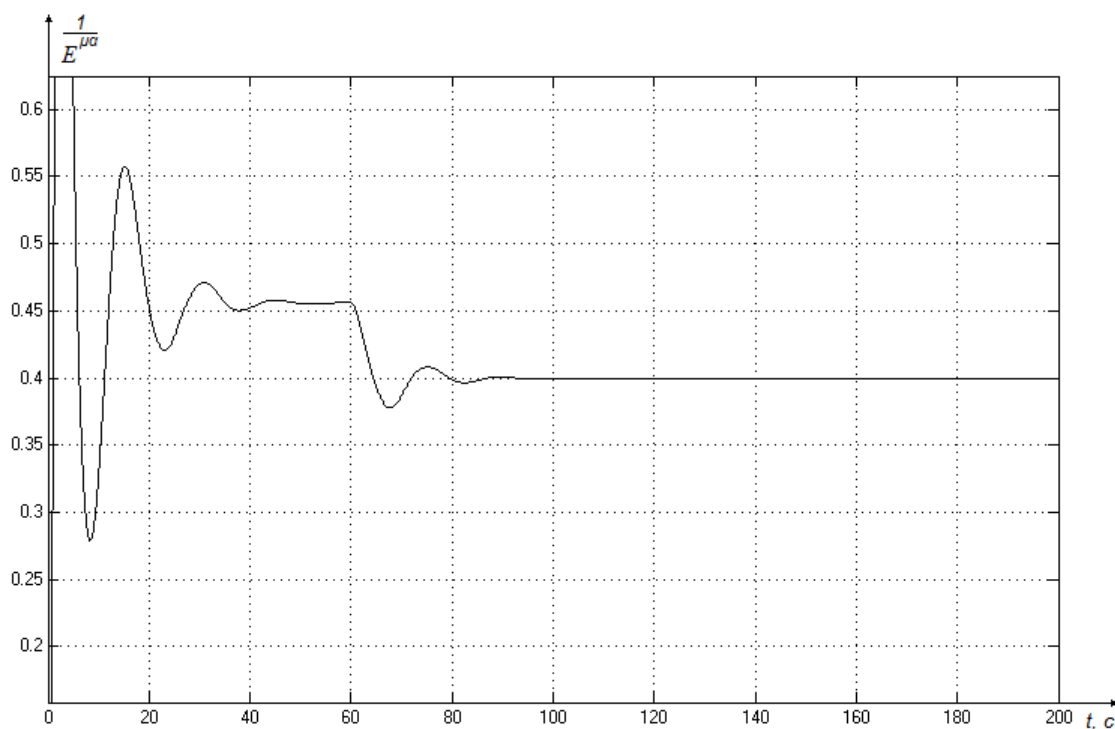


Рисунок 3.2: Переходной процесс изменения значения тягового фактора при торможении хвостового барабана

Номинальное значение тягового фактора равно:

$$\frac{1}{e^{\mu\alpha}} = 0,4 \cdot \frac{1}{1,15} = 0,35.$$

Тогда соответствующее ему значение тормозного момента, согласно формуле 3.5, равно $M_{\text{ТХВ}} = 1125,04 \text{ Нм}$.

На рис. 3.3 представлен переходной процесс изменения значения тягового фактора, значение которого выбрано с учетом коэффициента запаса сил трения на приводном барабане. Торможение хвостового барабана производится с моментом, равным 1125,4 Н.

Из графика на рис. 3.3 видно, что в момент времени 100 сек переходной процесс завершился и величина тягового фактора приняла расчетное значение, равное 0,35.

Проведем моделирование останова конвейера посредством свободного выбега с предварительным торможением хвостового барабана. Торможение хвостового барабана инициируем в момент времени 60 сек с тормозным моментом равным 1125,4 Нм, отключение привода произведем в момент времени 100 сек, когда переходной процесс изменения величины тягового фактора гарантировано завершится. Временная задержка в 40 секунд в данном случае выбрана на основе результатов моделирования стабилизации тягового фактора при торможении хвостового барабана с учетом коэффициента запаса сил трения (рис. 3.3).

Результаты моделирования останова конвейера посредством свободного выбега приведены на рис. 3.4. Из графика видно, что при отключении привода значение тягового фактора резко возрастает, что является следствием резкого уменьшения натяжения в точке набегания ленты на приводной барабан и увеличения натяжения в точке сбегания ленты с приводного барабана. В свою очередь, это может привести к проскальзыванию ленты в определенный период останова привода, а также к провисанию ленты между роlikоопорами в грузовой ветви после останова конвейера.

В данном случае проскальзывания ленты при останове конвейера не происходит. В этом можно убедиться, сравнив время останова приводного барабана и время, в течение которого

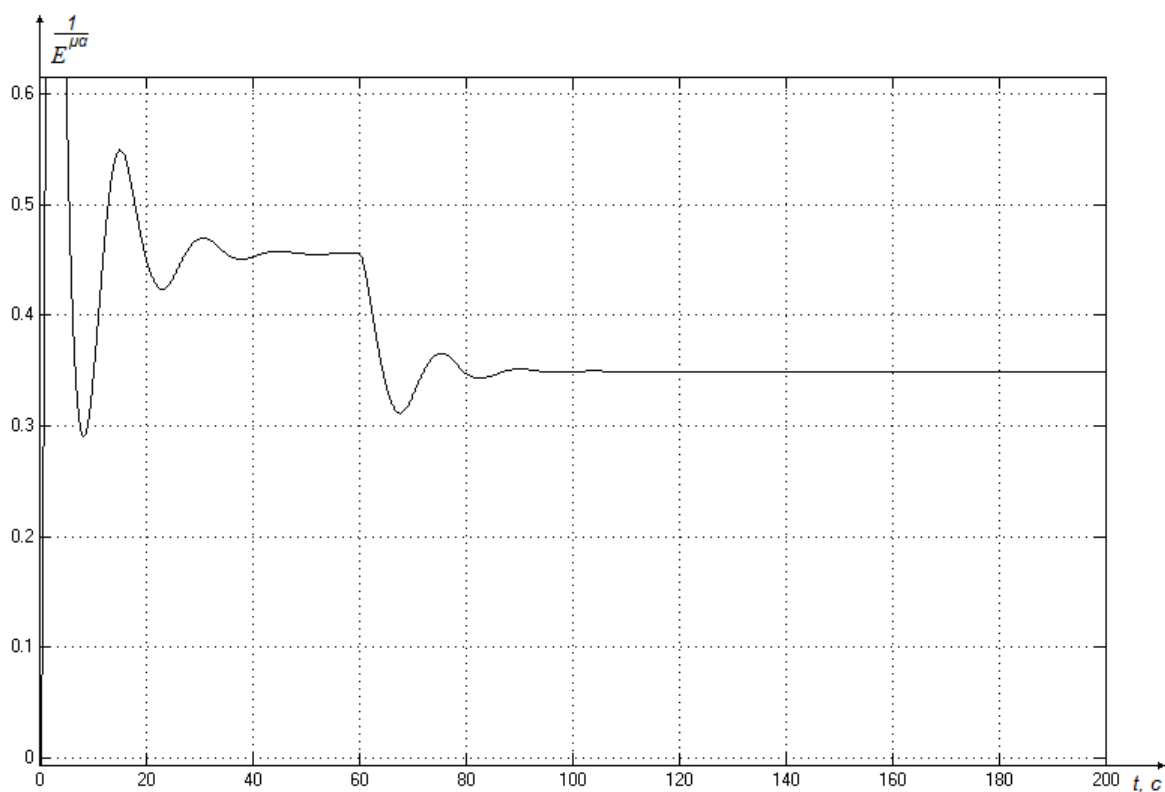


Рисунок 3.3: Переходной процесс изменения значения тягового фактора при торможении хвостового барабана. Значение тягового фактора выбрано с учетом коэффициента запаса сил трения на приводном барабане

значение тягового фактора после отключения привода не превышало значения 0,4 (рис. 3.5). Время, в течение которого останавливался привод, $t_o = 0,67c$. Время, в течение которого значение тягового фактора после отключения привода не превышало значения 0,4 $t_c = 1,14c$. $t_c > t_o$.

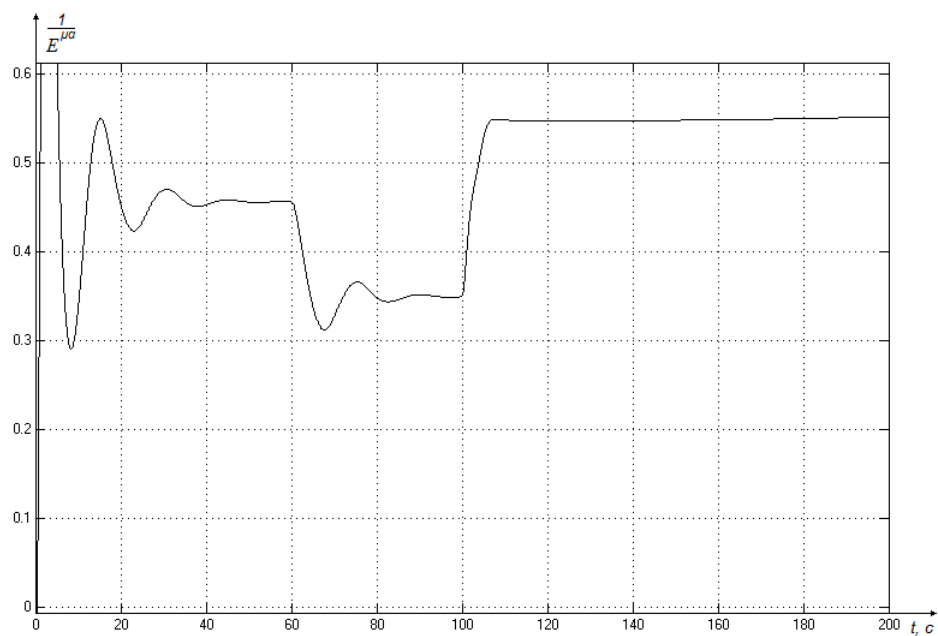


Рисунок 3.4: Переходной процесс изменения значения тягового фактора при торможении хвостового барабана и последующем отключении привода конвейера

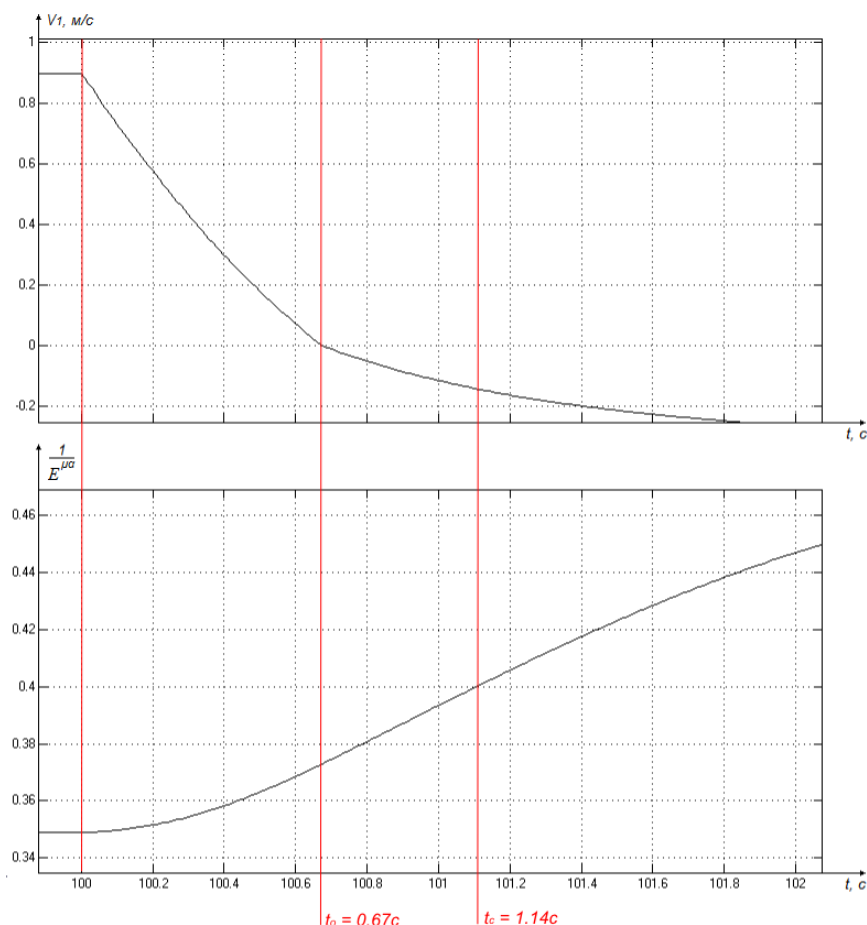


Рисунок 3.5: Сравнение времени останова привода и времени, в течение которого значение тягового фактора после отключения привода не превышало значения 0,4

3.2 Исследование изменения натяжений ленты конвейера после останова привода

Изменение натяжений после останова привода происходит за счет механических свойств ленты, которая стремится принять свое нормальное состояние. Вместе с этим возможно и вращение приводного барабана в обратном направлении. На рис. 3.6 виден промежуток времени в течение которого скорость приводного барабана отрицательна. В этот же промежуток времени на рис. 3.4 наблюдается увеличение величины тягового фактора в следствие изменения натяжений. При этом, наиболее опасным является резкое уменьшение натяжения в грузовой ветви конвейера, что может привести к провисанию ленты с грузом между роlikоопорами.

Для того чтобы не допустить уменьшения натяжения в грузовой ветви конвейера после останова привода, необходимо задействовать тормозное устройство на приводном барабане в момент его останова. При этом вращение тормозного барабана блокируется и за счет этого натяжение ленты в грузовой ветви уменьшаться не будет.

Рассчитаем минимальную величину тормозного момента, необходимую для блокировки приводного барабана после его останова. Рассмотрим момент времени, когда в ветвях конвейера созданы динамические натяжения путем предварительного торможения хвостового барабана и приводной барабан остановлен (рис. 3.7):

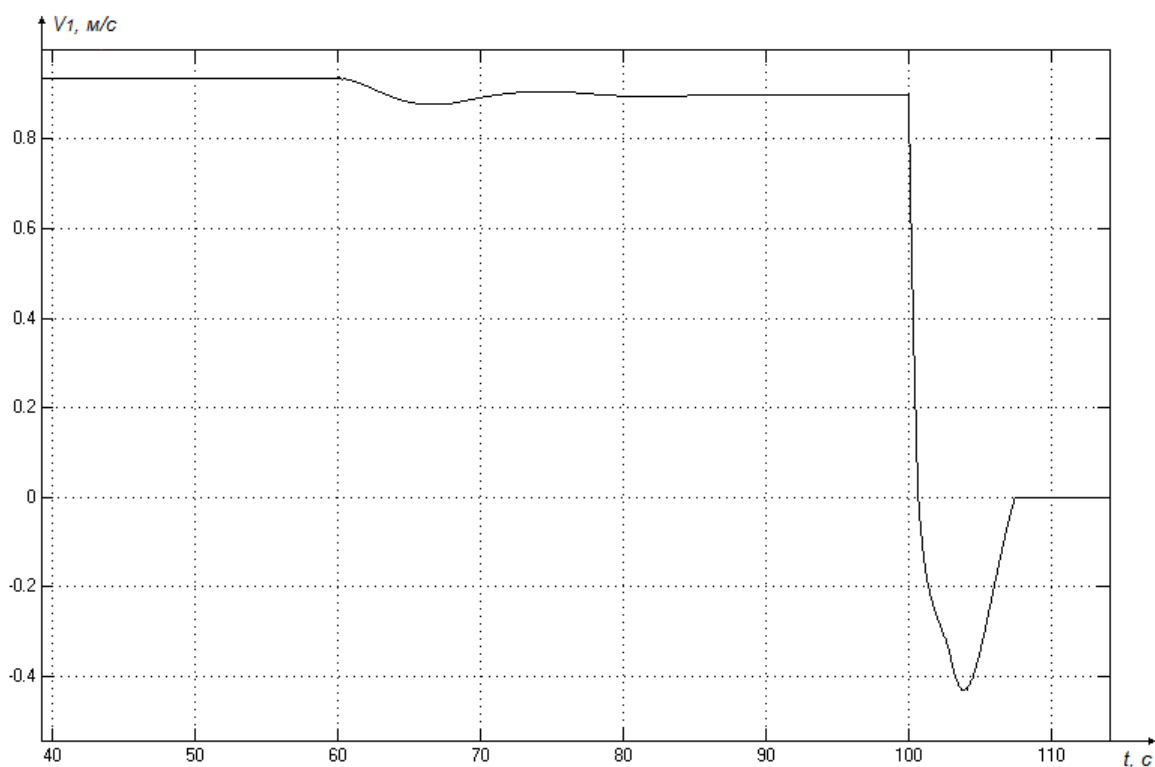


Рисунок 3.6: Изменение скорости вращения приводного барабана при останове конвейера с предварительным торможением хвостового барабана

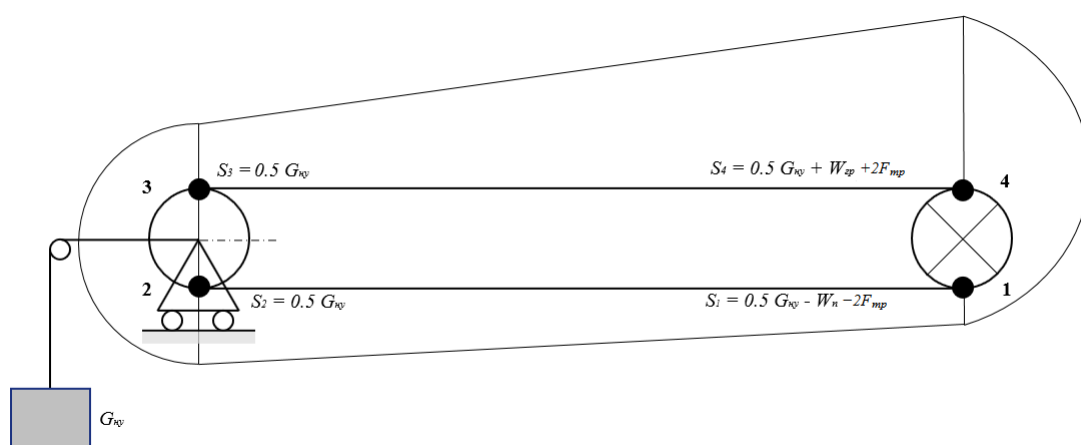


Рисунок 3.7: Определение натяжений после останова приводного барабана

Предположим, что в этой системе движение ленты осуществляется в обратном направлении, то есть грузовая ветвь ленты движется в направлении от приводного барабана к хвостовому. Рассмотрим силы, действующие на ленту в точках 1, 2, 3 и 4 (рис. 3.7).

В точках 1 и 4 на ленту конвейера действуют силы, модули которых равны суммарным натяжениям в момент останова приводного барабана, которые можно приблизительно вычислить по формулам 3.3 и 3.4, зная приложенный к хвостовому барабану тормозной момент. Направление силы, действующей на ленту в точке 4, совпадает с направлением движения ленты. Сила, действующая на ленту в точке 1, направлена противоположно движению ленты.

В точках 2 и 3 на ленту действуют силы, модули которых равны приблизительно половине веса натяжного устройства $S_2 = S_3 = 0,5G_{ny}$. Направление силы, действующей на ленту в точке

3, совпадает с направлением движения ленты. Сила, действующая на ленту в точке 2, направлена противоположно движению ленты.

Кроме того, так как лента приводится в движение, в ней возникают силы сопротивления движению $W_{гр}$ и $W_{п}$ для грузовой и порожней ветвей соответственно. Направления их действия противоположны направлению движения ленты.

Тогда суммарная действующая на приводной барабан сила в момент его останова вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= S_4 - S_1 + 0,5G_{\text{хв}} - W_{гр} - 0,5G_{\text{хв}} - W_{п} = \\ &= 0,5G_{\text{хв}} + W_{гр} + 2F_{тр} - 0,5G_{\text{хв}} + W_{п} + 2F_{тр} + 0,5G_{\text{хв}} - W_{гр} - 0,5G_{\text{хв}} - W_{п} = \\ &= 4F_{тр}. \end{aligned}$$

Так как сила трения на хвостовом барабане $F_{тр} = \frac{M_{T\text{хв}}}{R_6}$, результирующий момент сил, действующий на приводной барабан в момент его останова, равен:

$$M_{T\Sigma} = 4 \frac{M_{T\text{хв}}}{R_6}. \quad (3.6)$$

Таким образом, с помощью зависимости 3.6, зная величину приложенного к хвостовому барабану тормозного момента, получим значение суммарного момента, действующего на приводной барабан после в момент останова. Следовательно, требуемая величина тормозного момента, который необходимо приложить к приводному барабану для его блокировки, равна взятой с обратным знаком величине суммарного момента: $M_{T\text{пр}} = -M_{T\Sigma}$. Так как в исследуемой модели конвейера радиус хвостового барабана равен 0,4 м, то, в соответствии с зависимостью 3.6, величина момента, требуемая для блокировки приводного барабана, должна в 10 раз превышать величину тормозного момента, приложенного к хвостовому барабану для создания предварительных натяжений в ветвях конвейера.

3.3 Моделирование торможения ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова

Рассмотрим торможение ленты конвейера, движущейся со скоростью 1 м/с посредством предварительного торможения хвостового барабана с остановом привода и последующей блокировкой приводного барабана. Величину тормозного момента, прикладываемого к хвостовому барабану рассчитаем согласно разделу 3.1.2, величину тормозного момента, прикладываемого к приводному барабану для его блокировки рассчитаем согласно разделу 3.2. Останов привода будем производить через время Δt после начала торможения хвостового барабана, соответствующее первому достижению величинами натяжений расчетных значений. Это время зависит от длины конвейера и скорости распространения волн деформаций в ленте. Расчет времени Δt не рассматривается в настоящей работе. При моделировании значение этого параметра выбирается экспериментально.

В соответствии с параметрами выбранной конвейерной установки, представленными в табл. 2.1, рассчитаем требуемые для работы алгоритма торможения параметры.

Сила сопротивления движению грузовой ветви рассчитывается по формуле 2.2:

$$W_{гр} = q_{гр\Sigma}lw = 1040 \cdot 1000 \cdot 0,03 = 31215H.$$

Сила сопротивления движению порожней ветви рассчитывается по формуле 2.3:

$$W_{\pi} = q_{\pi\Sigma}lw = 250 \cdot 1000 \cdot 0,03 = 7500H.$$

Требуемое для создания натяжений необходимой величины значение тормозного момента $M_{Tпр}$, прикладываемого к хвостовому барабану, рассчитано в разделе 3.1.3. Для того, чтобы величина тягового фактора достигла значения 0,35 (с учетом коэффициента запаса сил трения), к хвостовому барабану требуется приложить тормозной момент величиной $M_{Tпр} = 1125$ Нм.

Тогда величина тормозного момента, который требуется приложить к приводному барабану после останова для его блокировки, $M_{Tпр} = 10M_{Tхв} = 11250$ Нм.

Результатами моделирования являются:

- график изменения величины тягового фактора (рис. 3.8);
- графики изменения величин натяжений (рис. 3.10);
- переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства (рис. 3.9).

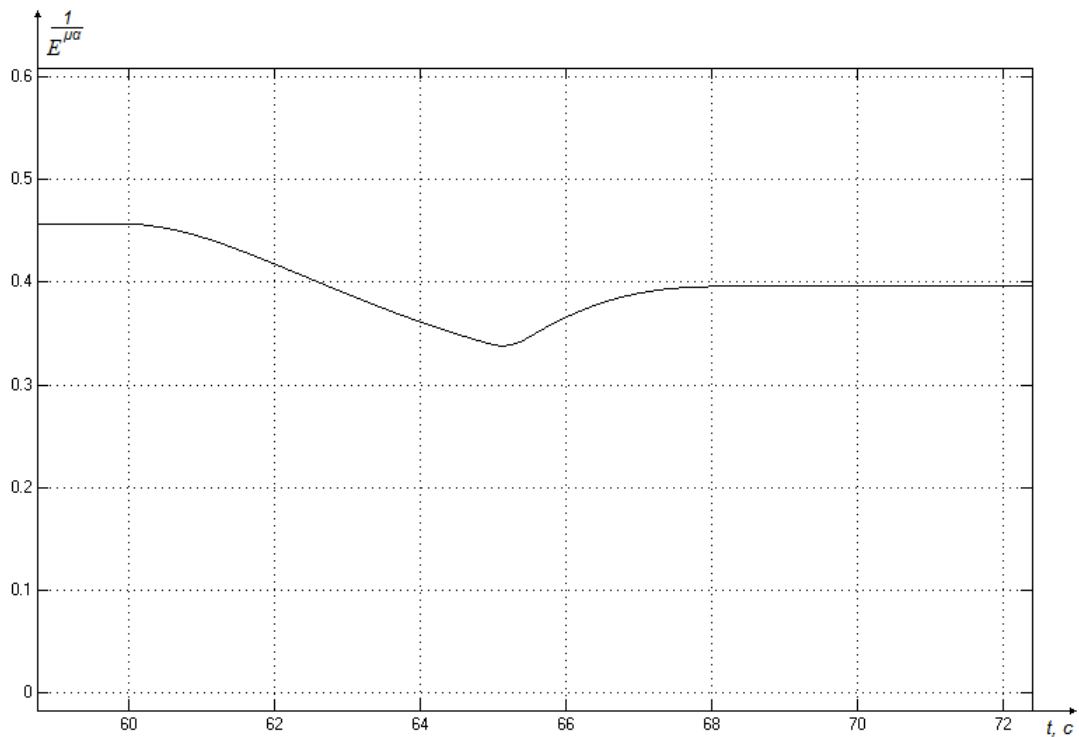


Рисунок 3.8: График изменения величины тягового фактора при торможении ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова

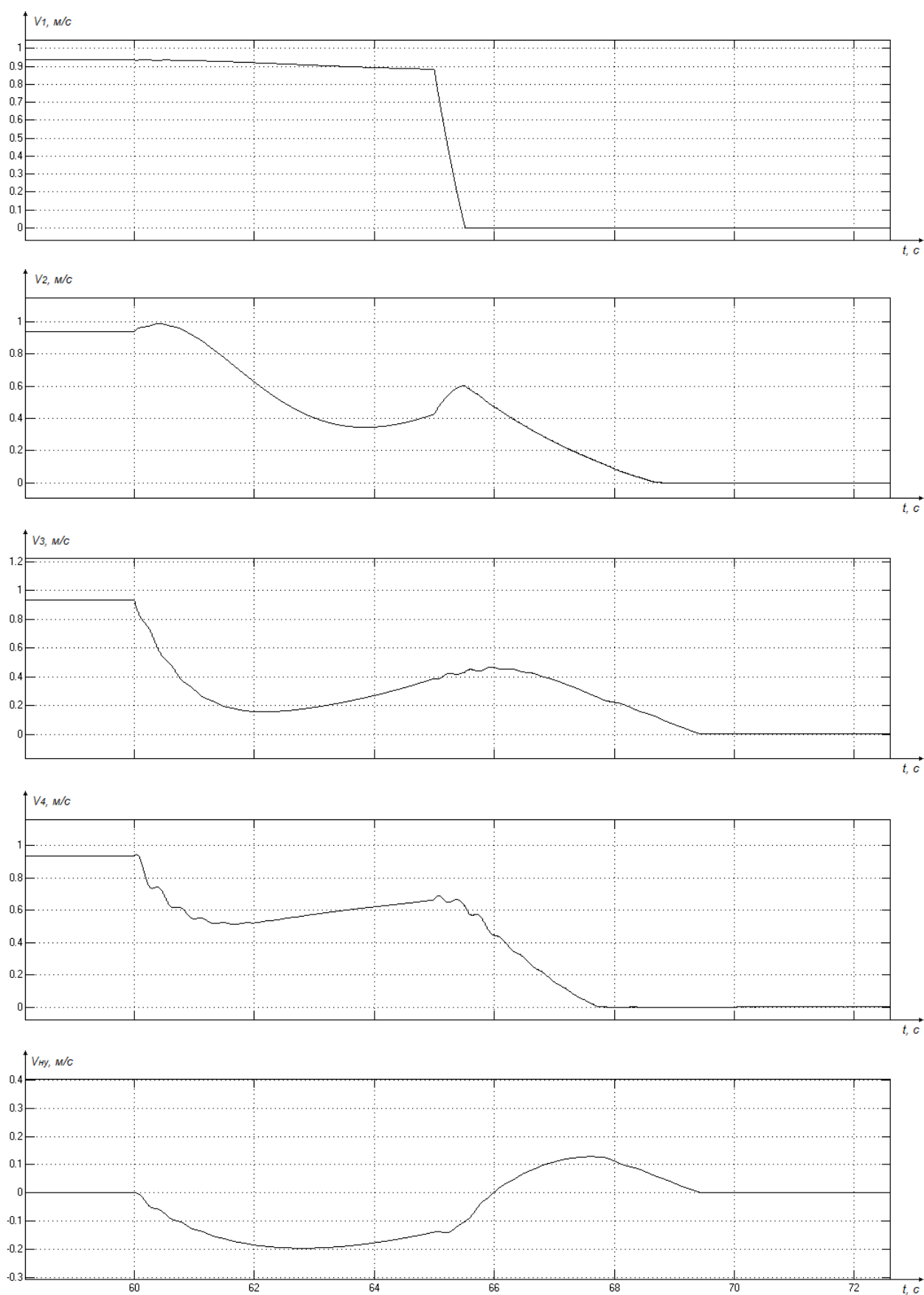


Рисунок 3.9: Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при торможении ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова

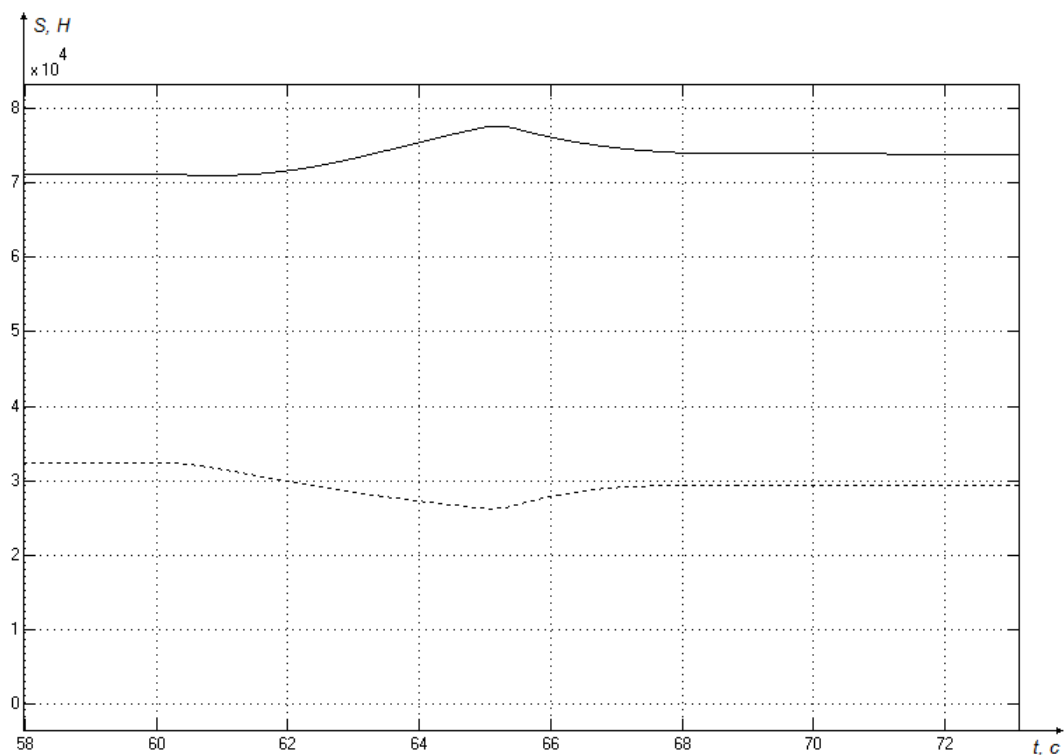


Рисунок 3.10: Графики изменения натяжений ленты при торможении ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова

3.4 Исследование режима пуска конвейера после его останова с предварительным торможением хвостового барабана

После останова конвейера с применением разработанного алгоритма предварительного торможения в исследуемых точках ленты конвейера (точка набегания ленты на приводной барабан и точка сбегания ленты с приводного барабана) сохраняются натяжения, отличные от номинальных, определяемых весом натяжного устройства. Это имеет положительный эффект – увеличенное, по отношению к номинальному, натяжение в грузовой ветви не позволяет ленте провисать между роlikоопорами, что в свою очередь не позволяет находящемуся на ленте грузу просыпаться при последующем пуске конвейера. Условие отсутствия провисания ленты определяется по следующей формуле [66]:

$$S_{гр} \geq S_{доп\ min} = 5 \div 8(q_{гр} + q_{л})l_p,$$

где $S_{гр}$ – натяжение ленты в точке набегания ленты на приводной барабан, $q_{гр}$ – погонный вес груза, $q_{л}$ – погонный вес ленты, l_p – расстояние между роlikоопорами в грузовой ветви конвейера.

Если после останова конвейера отключить тормозные устройства, то это приведет к возникновению переходного процесса в ленте – натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан будет уменьшаться до номинального значения, определяемого весом натяжного устройства, натяжение в точке сбегания ленты с приводного барабана будет увеличиваться до номинального значения. Этот переходной процесс может сопровождаться колебаниями величин натяжений, и при этом могут возникнуть условия (возможно, кратковременные), приводящие к провисанию ленты между роlikоопорами в грузовой ветви и последующему ее распрямлению, что приведет

к просыпанию груза с ленты. В свою очередь, это приводит к уменьшению производительности конвейера и возможному повышению травматизма среди обслуживающего персонала.

Решить эту проблему возможно двумя способами:

- уменьшать тормозные моменты (отключать тормозные устройства) после останова конвейера таким образом, чтобы переходной процесс изменения натяжений в ветвях конвейера происходил без колебаний;
- не отключать тормозные устройства, пока конвейер остановлен. При пуске конвейера одновременно с запуском привода (или с какой-либо временной задержкой) отключать тормозные устройства.

Ниже оценим пригодность и целесообразность использования каждого способа.

3.4.1 Исследование отключения тормозных устройств на остановленном конвейере

Проведем моделирование процесса изменения натяжений в ленте остановленного конвейера при одновременном отключении тормозных устройств на приводном и хвостовом барабанах. Исходным состоянием исследуемой установки будем считать состояние, когда привод остановлен, скорости сосредоточенных масс ленты равны нулю, в ветвях ленты предварительно с помощью разработанного алгоритма созданы динамические натяжения такой величины, которая требуется для стабилизации тягового фактора до значения, обеспечивающего отсутствие проскальзывания ленты при останове конвейера, тормозные устройства активированы. Конечным состоянием является состояние, при котором скорости сосредоточенных масс ленты равны нулю, тормозные устройства отключены, в ветвях ленты установились номинальные значения натяжений. Так как номинальные значения натяжений определяются весом натяжного устройства, проведем несколько итераций моделирования с различным значением веса натяжного устройства.

Результаты моделирования показали, что для любого значения веса натяжного устройства (в пределах допустимых) изменение натяжений в ветвях ленты происходит без колебаний, то есть значение натяжения в точке набегания ленты на приводной барабан никогда не становится ниже номинального, а значение натяжения в точке сбегания ленты с приводного барабана никогда не превышает номинального.

В качестве одного из результатов моделирования на рис. 3.12 приведены графики переходных процессов по величинам натяжений для конвейера с натяжным устройством весом $80000H$. На рис 3.11 приведены графики переходных процессов по скоростям сосредоточенных масс. Сигнал на останов конвейера был инициирован в момент времени $t_1 = 60c$, отключение тормозных устройств было инициировано в момент времени $t_2 = 80c$. Длительность переходного процесса (время регулирования) составляет 4 секунды для порожней ветви и 5 секунд для грузовой ветви. Перерегулирование и колебательность отсутствуют.

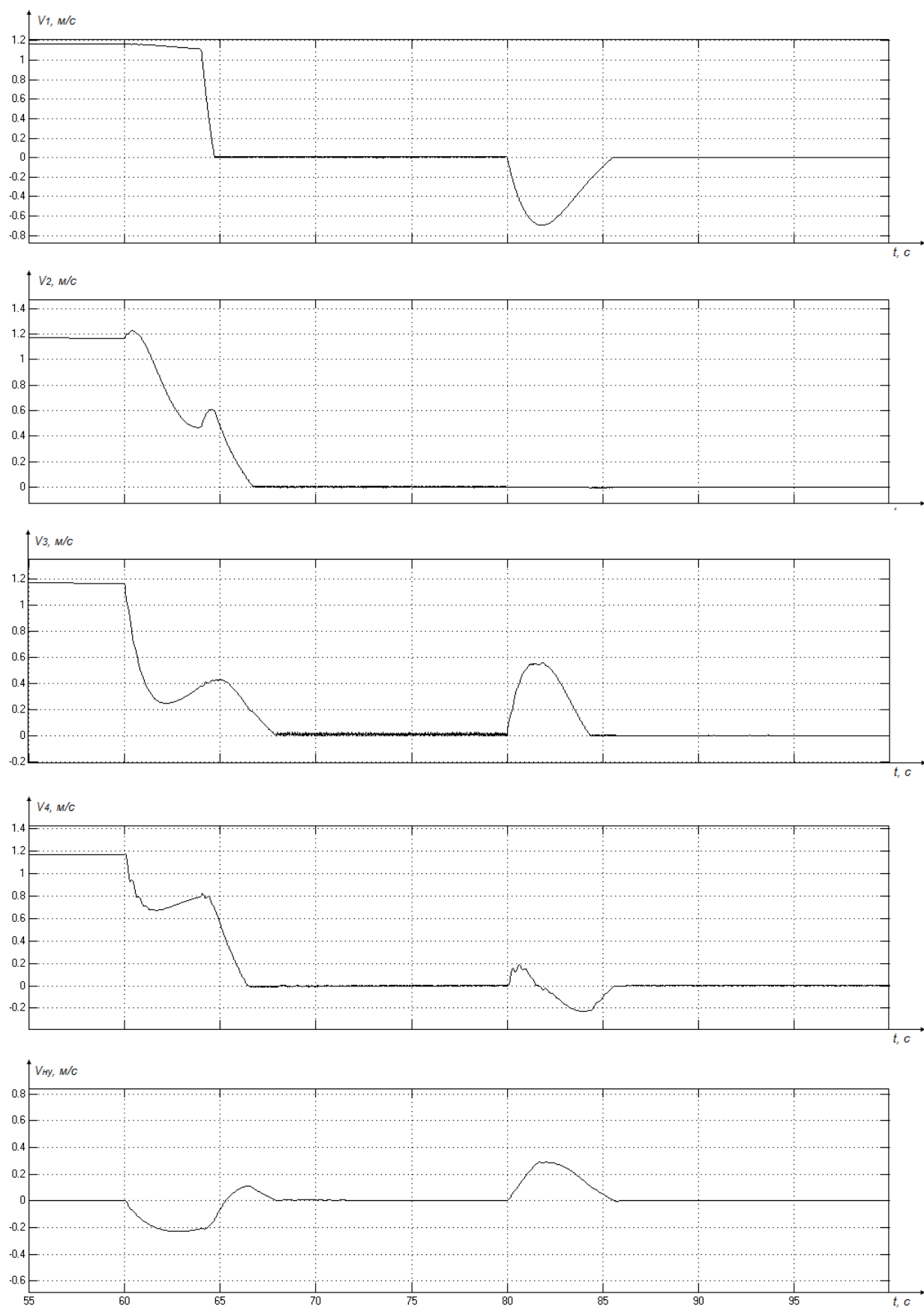


Рисунок 3.11: Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при отключении тормозных устройств остановленного конвейера

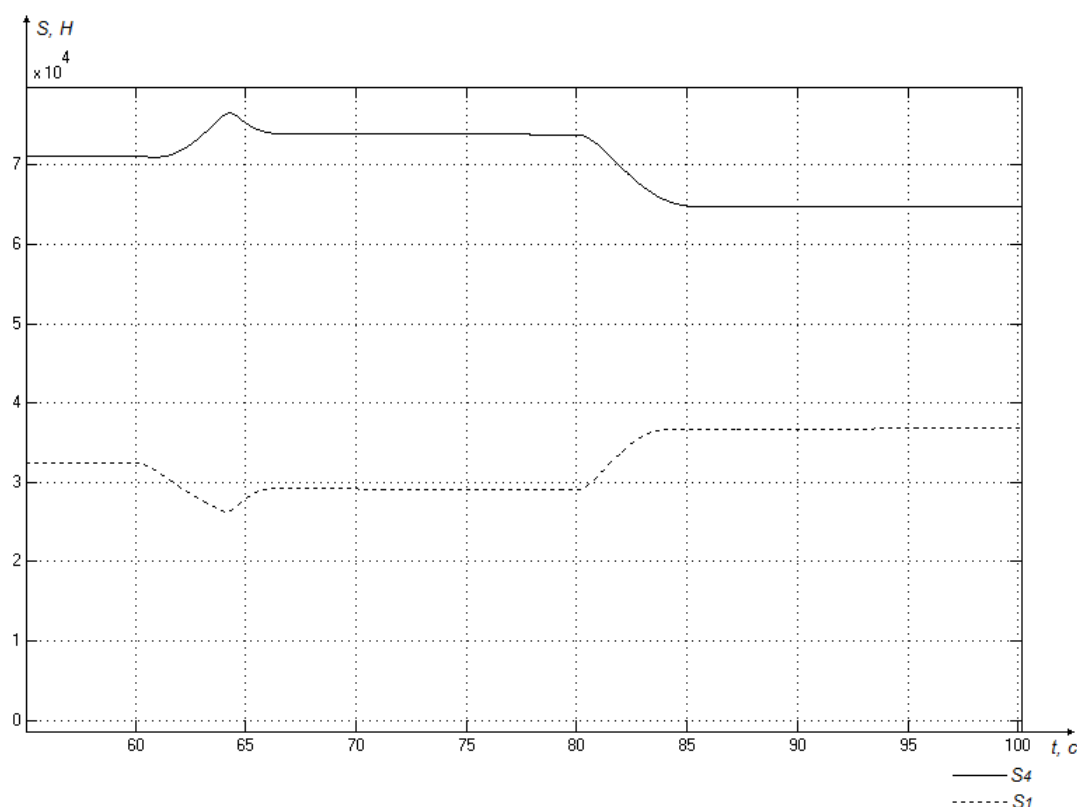


Рисунок 3.12: Графики изменения натяжений ленты при отключении тормозных устройств остановленного конвейера

Полученные результаты моделирования говорят о том, что отключение тормозных устройств после полного останова конвейера не оказывает никакого негативного эффекта на последующий пуск конвейера и на эффективность его работы в целом. Поэтому для пуска конвейера после его остановки с помощью разработанного алгоритма предварительного торможения могут без ограничений использоваться известные алгоритмы.

3.4.2 Исследование пуска конвейера с одновременным отключением тормозных устройств

Проведем моделирование пуска остановленного конвейера при одновременном отключении тормозных устройств на приводном и хвостовом барабанах с целью исследования переходных процессов во время пуска. Исходным состоянием исследуемой установки будем считать состояние, когда привод остановлен, скорости сосредоточенных масс ленты равны нулю, в ветвях ленты предварительно с помощью разработанного алгоритма созданы динамические натяжения такой величины, которая требуется для стабилизации тягового фактора до значения, обеспечивающего отсутствие проскальзывания ленты при останове конвейера, тормозные устройства активированы. Конечным состоянием является состояние, при котором скорости сосредоточенных масс ленты равны номинальным (лента движется с номинальной скоростью), тормозные устройства отключены, в ветвях ленты установились номинальные значения натяжений.

В качестве результата моделирования рассмотрим переходной процесс скорости первой сосредоточенной массы (скорость приводного барабана), представленный на рис. 3.13. Пуск привода осуществлялся в момент времени, равный 80 сек., одновременно с этим были отключены оба тормозных устройства.

Из графика на рис. 3.13 видно, что скорость приводного барабана в первые моменты времени отрицательна, то есть приводной барабан сначала движется в обратную сторону при работаю-

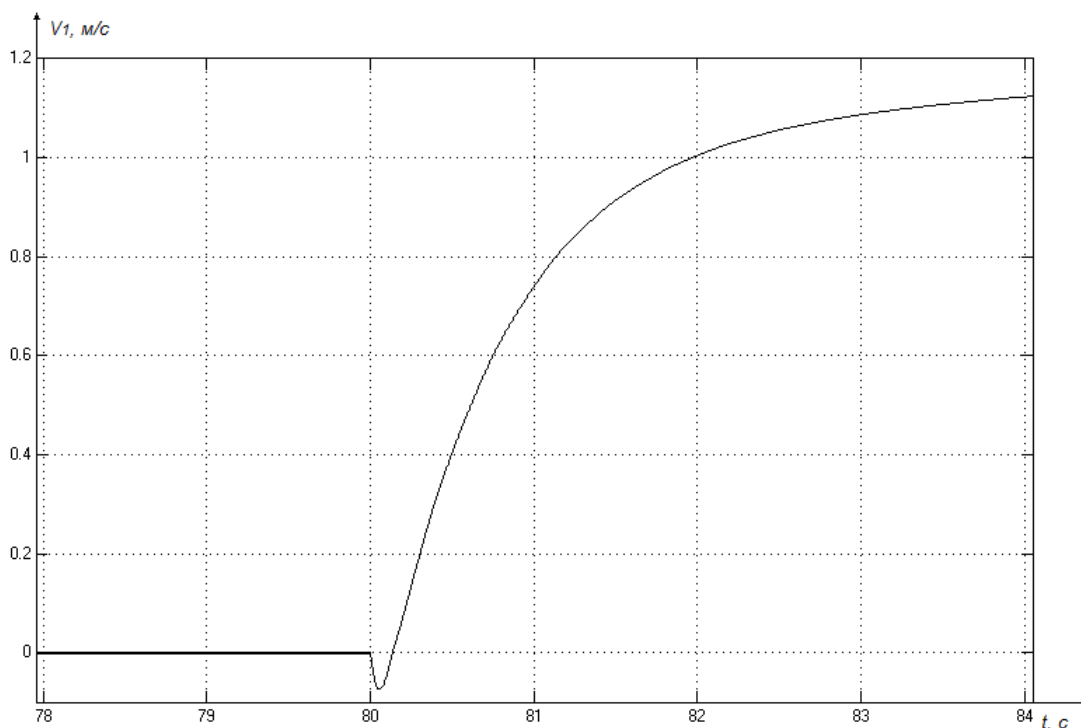


Рисунок 3.13: Графики изменения натяжений ленты при отключении тормозных устройств остановленного конвейера

щем приводе. Это говорит о том, что первые моменты времени после старта привода момент, создаваемый натяжениями в ленте, превышает момент привода. Это практически не влияет на эффективность работы конвейера в плане процесса пуска и движения ленты, но может быть причиной повышенных нагрузок на привод, что уменьшит срок его службы.

По этой причине будем считать результаты, описанные в п. 3.4.1 более приемлемыми и использовать именно их при реализации комплексной системы управления конвейером.

3.5 Описание общей методики расчета параметров для работы алгоритма останова конвейера с предварительным торможением хвостового барабана

Учитывая описанные выше исследования, приведем общую методику расчета параметров для алгоритма останова конвейера с предварительным торможением хвостового барабана. Эта методика позволит рассчитывать параметры алгоритма для конвейеров различных модификаций на основе их характеристик. При этом предполагается, что исследуемый конвейер оборудован тормозными устройствами на приводном и хвостовом барабанах, которыми можно управлять в произвольные моменты времени.

Для работы алгоритма требуются числовые значения следующих параметров:

- номинальное значение тягового фактора $\frac{1}{E\mu\alpha}$, при котором гарантировано отсутствует проскальзывание ленты во время останова привода;
- величина тормозного момента $M_{ТХВ}$, создаваемого тормозным устройством хвостового барабана, требуемая для достижения номинального значения тягового фактора $\frac{1}{E\mu\alpha}$;

- величина тормозного момента $M_{\text{Тпр}}$, создаваемого тормозным устройством приводного барабана, требуемая для блокировки приводного барабана после его останова;

Характеристики конвейерной установки, необходимые для расчета параметров алгоритма:

- длина конвейера L ;
- угол обхвата лентой приводного барабана α ;
- коэффициент сопротивления движению ленты w (зависит от типа используемой ленты и барабанов конвейера);
- коэффициент трения скольжения между лентой и барабаном μ (зависит от типа используемой ленты и барабанов конвейера);
- погонный вес ленты порожней ветви $q_{\text{л}}$;
- вес роlikоопор порожней ветви $q_{\text{р}}$;
- вес натяжного устройства $G_{\text{ну}}$;
- радиус тормозного барабана (диска) R .

Предельное значение тягового фактора вычисляется по формуле:

$$E_0 = \frac{1}{e^{\mu\alpha}}.$$

В реальных условиях для обеспечения отсутствия проскальзывания ленты необходим некий запас по величине тягового фактора, который учитывается с помощью коэффициента k_T . В соответствии с рекомендациями [66] его значение выбирается в диапазоне $0,9 \div 0,8$. Результирующая формула определения требуемой для отсутствия проскальзывания величины тягового фактора следующая:

$$E_0 = k_T \frac{1}{e^{\mu\alpha}}. \quad (3.7)$$

Для расчета значения тормозного момента, который требуется приложить к хвостовому барабану для стабилизации тягового фактора до величины E_0 , сначала рассчитывается величина динамических натяжений, которые необходимо создать в ветвях конвейера. Согласно разделу 3.1.3, справедливо следующее равенство:

$$E_0 = \frac{S_{\text{устП}} - W_T}{S_{\text{устГР}} + W_T},$$

где W_T – величина динамических натяжений, $S_{\text{устГР}}$ и $S_{\text{устП}}$ – значения натяжений в грузовой и порожней ветвях в установившемся режиме соответственно. Значения натяжений измеряются в реальном времени с помощью измерительных устройств (датчиков), размещенных в конвейерной установке. Тогда величина динамических натяжений, которые необходимо создать в ветвях конвейера, вычисляется по следующей формуле:

$$W_T = \frac{S_{\text{устП}} - E_0 S_{\text{устГР}}}{E_0 + 1}. \quad (3.8)$$

Величина тормозного момента, который требуется приложить к хвостовому барабану для стабилизации тягового фактора до величины E_0 , рассчитывается по формуле 3.5:

$$M_{\text{Тхв}} = \frac{R(0,5G_{\text{ну}} - (q_{\text{л}} + q_{\text{р}})Lw - S_{\text{уП}} + W_T)}{2}. \quad (3.9)$$

Величина тормозного момента, который требуется приложить к приводному барабану для его блокировки после останова привода, рассчитывается по формуле 3.6

$$M_{Tnp} = 4 \frac{M_{Txb}}{R}. \quad (3.10)$$

3.6 Исследования работы алгоритма предварительного управляемого торможения конвейера в зависимости от загрузки конвейера

Математическая модель ленточного конвейера, рассматриваемая в настоящей работе, описывает конвейер, работающий при полной нагрузке. Масса груза на ленте учитывалась при построении модели [28], так как от массы груза на ленте зависит кинетическая энергия системы, а уравнения движения в модели представлены системой дифференциальных уравнений, составленных по общей схеме уравнения Лагранжа второго рода [33]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} T \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x_i} T \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \Pi + \frac{\partial}{\partial x_i} A = 0.$$

Кинетическая энергия любого участка ленты длиной l с распределенной массой $\frac{G}{g}$ определяется следующим образом. Пусть dz – элементарный участок ленты на расстоянии z от начала отсчета, выделенный из участка $x_1 x_2$. Скорость перемещения элементарного участка dz равна v , причем $\dot{x}_1 < v < \dot{x}_2$. В работе [27] показано, что

$$\frac{\dot{x}_i - v}{z} = \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l},$$

откуда

$$v = \dot{x}_i - \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l} z.$$

Тогда кинетическая энергия элементарного участка dz длиной l равна:

$$dT = \frac{G_{ij} v^2}{2g} dz = \frac{G_{ij}}{2g} \left(\dot{x}_i - \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l} z \right)^2 dz.$$

Значение кинетической энергии для распределенных масс каждого участка ленты получено интегрированием выражения для dT в пределах от 0 до l :

$$T_{ij} = \int_0^l \frac{G_{ij}}{2g} \left(\dot{x}_i - \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l} z \right)^2 dz = \frac{G_{ij} l}{6g} (\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i \dot{x}_j + \dot{x}_j^2),$$

где G_{ij} – вес ленты, вращающихся частей роlikоопор и груза на участке ij , l – длина участка, g – ускорение свободного падения.

При расчетах (приложение А) величина $\frac{G_{ij} l}{6g} = m_r$ принята постоянной и равной 870,8 кг/м. Это значение соответствует максимальной расчетной величине грузопотока для конвейера типа 1Л-100К (420 т/час).

В работе [42] рассмотрены основные принципы построения и исследования систем непрерывного и дискретного регулирования скорости полотна ленточного конвейера на основании вероятностных характеристик случайного шахтного грузопотока. В данной работе изложена методика определения основных параметров дискретного управления, в частности методика определения количества уровней, на которые целесообразно разделить диапазон изменения грузопотока при

регулировании скорости конвейера. Воспользуемся при веденной в работе методикой для аналогичного разделения диапазона изменения грузопотока с целью исследования работы алгоритма торможения с различной загруженностью ленты.

Примем допущение, что при любом значении входящего грузопотока груз на ленте конвейера распределен равномерно. Тогда можно говорить о линейной зависимости параметра m_T от величины входящего грузопотока Q . Отсутствию груза на ленте соответствует значение параметра $m_T = 38,8$ кг/м. По этим двум точкам составим уравнение линейной зависимости параметра m_T от величины реального грузопотока Q , используя уравнение прямой следующего вида:

$$\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0}.$$

Полученная зависимость имеет следующий вид:

$$m_T(Q) = 1,98Q + 38,8.$$

По полученной зависимости можно определить значение параметра m_T , соответствующей средней величине грузопотока 240 т/ч: $m_T = 514$ кг/м.

Проведем моделирование процесса торможения конвейера с применением разработанного алгоритма при различных значениях параметра m_T , равных 38,8 кг/м, 514 кг/м, и 870,8 кг/м. В качестве результатов моделирования приведены графики изменения тягового фактора конвейера (рис. 3.14 а). На рис. 3.14 б показан временной интервал с 51-й по 70-ю секунды, полностью включающий период торможения.

На графиках видно, что тяговый фактор стабилизируется до требуемой величины при каждом из выбранных значений грузопотока. Максимальное различие между стабилизированными значениями тягового фактора при различных значениях грузопотока составляет 0,02, что равно 5% от величины задания. Причем при меньших значениях грузопотока происходит стабилизация тягового фактора до меньшей величины. Исходя из этого можно говорить о том, что если алгоритм торможения конвейера удовлетворительно стабилизирует тяговый фактор при максимальном значении грузопотока, то при меньших значениях грузопотока также можно ожидать удовлетворительной стабилизации тягового фактора.

Так как при различных значениях грузопотока стабилизация тягового фактора происходит до различных величин (при условии неизменной величины тормозного момента хвостового барабана), необходимо определить, на как следует изменять величину тормозного момента, чтобы стабилизация тягового фактора оставалась постоянной.

Как видно из формулы (3.5), тормозной момент хвостового барабана, который требуется приложить для стабилизации тягового фактора до определенной величины, пропорционален величине возникающего при этой динамического натяжения ленты конвейера.

На рис. 3.15 а показан график изменения натяжения ленты в грузовой ветви при отсутствии грузопотока, а на рис. 3.15 б показан график изменения натяжения ленты в грузовой ветви при максимальном грузопотоке. Величина динамического натяжения, возникающего при торможении хвостового барабана конвейера, в этих случаях равна 9922 Н и 10099 Н соответственно. Разница этих значений составляет 177 Н. Тогда изменение величины тормозного момента, необходимое для того чтобы стабилизация тягового фактора оставалась постоянной, равно (в соответствии с формулой (3.5)):

$$\Delta M_{ТХВ} = \frac{0,4}{2} 177 = 35,5 \text{ Нм},$$

что составляет 3,16 % от величины тормозного момента (1125 Н), требуемого для корректной стабилизации тягового фактора при максимальном грузопотоке.

Таким образом, если при работе алгоритма управляемого предварительного торможения ленточного конвейера применять величину тормозного момента хвостового барабана, рассчитанную для максимального значения входящего грузопотока, то при случайных изменениях грузопотока изменение величины тягового фактора после стабилизации не превысит 5 %. Для устранения этого изменения необходимо изменять величину тормозного момента в зависимости от величины входящего грузопотока в пределах 3,16 % от величины тормозного момента, рассчитанной для максимального значения входящего грузопотока. Подобные доработки усложняют как используемый алгоритм торможения, так и разработку системы автоматического управления. А в силу незначительности изменения исследуемых параметров эти доработки можно считать нецелесообразными и для любого режима работы конвейера использовать величину тормозного момента, рассчитываемую для максимального значения входящего грузопотока.

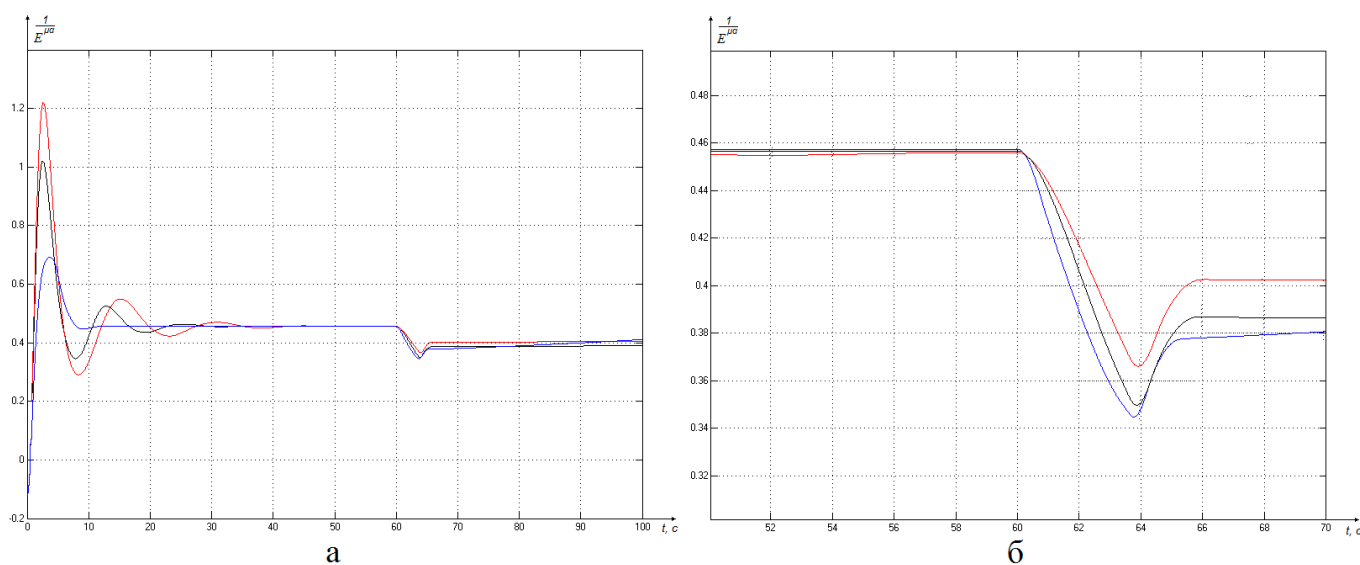


Рисунок 3.14: Графики изменения величины тягового фактора во время торможения конвейера при различных значениях грузопотока

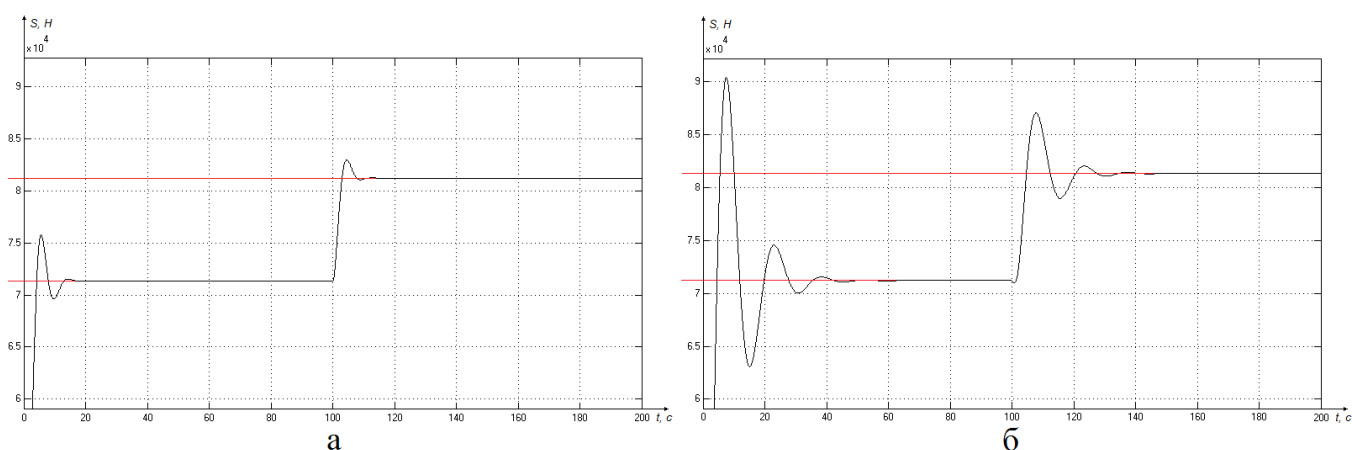


Рисунок 3.15: Графики изменения величины натяжения ленты в точке набегания на приводной барабан при различных значениях грузопотока

3.7 Выводы по главе 3

В настоящей главе описан общий случай процесса торможения конвейера с использованием колодочных тормозных устройств, и на основе описанных в предыдущей главе исследований разработан алгоритм останова конвейера, основанный на предварительном управляемом торможении хвостового барабана. Применение этого алгоритма позволяет устранить либо минимизировать проскальзывание ленты конвейера на приводном барабане во время его останова. Кроме того, применение этого алгоритма позволяет значительно сократить время останова привода (то есть время, в течение которого проскальзывание ленты в принципе может возникнуть). Например, для исследуемой установки время останова привода при свободном выбеге составляет 4,4 секунды (рис. 2.19), а при останове с использованием разработанного алгоритма время останова привода составляет 0,7 секунды (рис. 3.9). Таким образом, период времени, в течение которого потенциально может возникнуть проскальзывание ленты, сокращается более чем в шесть раз. Кроме того, создаваемые в процессе работы алгоритма останова динамические натяжения в ветвях конвейера фиксируются тормозными устройствами после его останова, что позволяет гарантировано избежать случаев провисания ленты между роlikоопорами грузовой ветви. Все это говорит о том, что применение разработанного алгоритма останова конвейера позволяет снизить износ ленты и уменьшить потери транспортируемого груза, а следовательно, повысить эффективность работы конвейерной установки даже в случае неполного устранения проскальзывания ленты.

В главе также описана общая методика расчета уставок и параметров, необходимых для работы алгоритма останова конвейера, в зависимости от его характеристик. Методика основывается на найденных в результате модельных исследований зависимостях требуемых параметров от характеристик конвейерной установки и построена таким образом, что может быть применима к любой конвейерной установке в рамках определенного класса.

В заключение, в главе описаны исследования изменения натяжений в ленте после останова конвейера посредством отключения тормозных устройств и влияние этого процесса на последующий пуск конвейера. Исследования показывают, что одновременное отключение тормозных устройств при остановленном приводе влечет за собой плавное изменение натяжений в ленте до номинальных значений. Это изменение характеризуется отсутствием колебаний и других нежелательных процессов, которые могли бы повлечь за собой изменение натяжения до такой величины, при которой возможно провисание ленты между роlikоопорами грузовой ветви. Это позволяет использовать для последующего пуска конвейера известные алгоритмы, в том числе, и алгоритм со стабилизацией тягового фактора, описанный в работе [27].

Глава 4

Разработка комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой

В данной главе рассматривается построение общей структуры комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой, включающей в себя различные алгоритмы управления, в том числе и алгоритмы, разработанные в предыдущей главе.

На основе рассматриваемой структуры системы приводится пример ее реализации с использованием современного программного и аппаратного обеспечения, а также обоснование выбора инструментов для реализации системы и подбор управляющего, исполнительного и измерительного оборудования.

Автоматизированная система реализует следующие алгоритмы:

- Алгоритм пуска конвейера и регулирования скорости движения ленты;
- Алгоритм стабилизации тягового фактора конвейера для устранения проскальзывания ленты в номинальном режиме работы при переключении скорости движения [27];
- Алгоритм стабилизации тягового фактора конвейера для устранения проскальзывания ленты при останове (торможении) конвейера;

4.1 Структура комплексной автоматизированной системы управления конвейерной установкой

Структура комплексной системы управления конвейером содержит в себе три подсистемы, каждая из которых реализует определенные алгоритмы управления: подсистему пуска и регулирования скорости (осуществляет запуск конвейера и переключения скорости движения ленты), подсистему стабилизации тягового фактора в номинальном режиме работы (осуществляет управление натяжным устройством таким образом, чтобы величина тягового фактора в номинальном режиме работы не превышала технологического значения для выбранного типа конвейера) и подсистему управления торможением конвейера (осуществляет останов конвейера с использованием алгоритма, разработанного в главе 3). Общая структурная схема системы представлена на рис. 4.1.

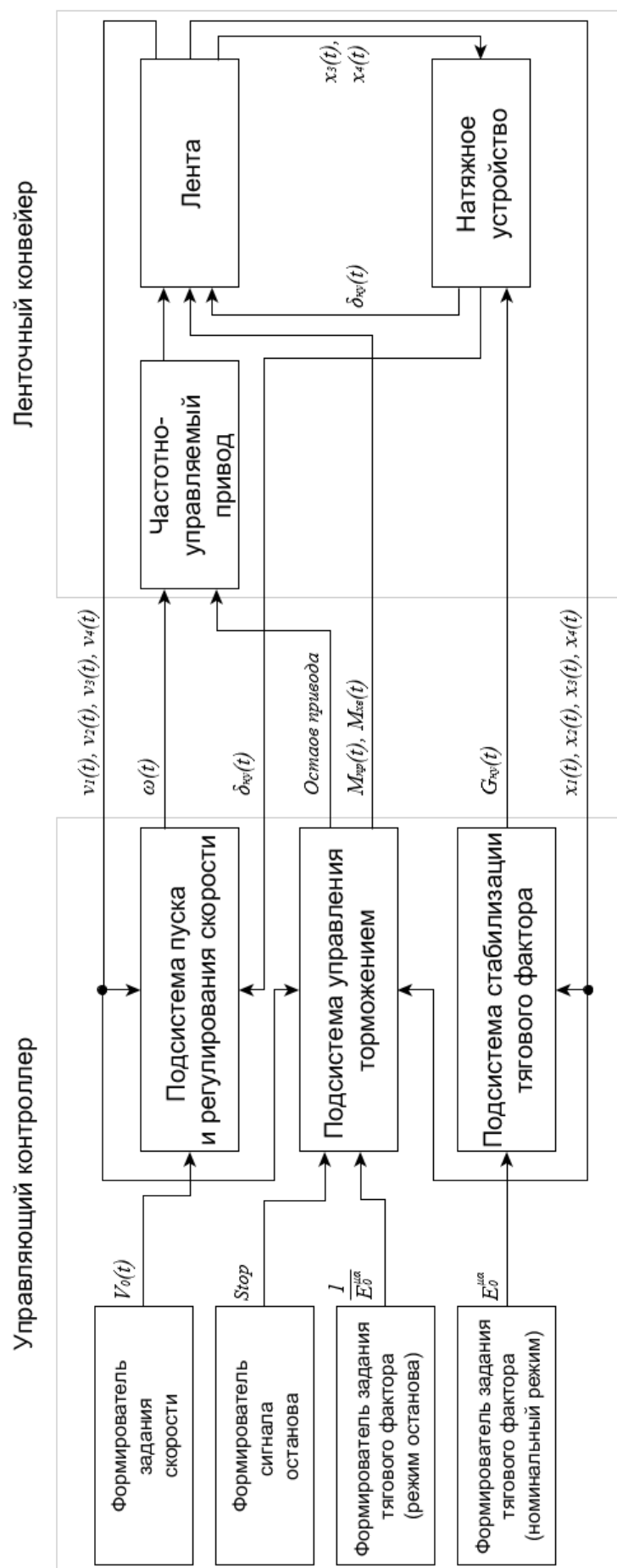


Рисунок 4.1: Общая структурная схема комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой

В схеме приняты следующие обозначения: $M_{\text{пр}}(t)$ – движущий момент привода, $v(t)$ – текущие скорости движения характерных точек ленты, $V_0(t)$ – заданное значение скорости привода, $\omega(t)$ – частота вращения ротора привода, $G_{\text{нп}}(t)$ – текущее натяжение, создаваемое весом натяжного устройства, $E^{\mu\alpha}(t)$ – текущее значение тягового фактора, $E_0^{\mu\alpha}$ – заданное значение тягового фактора для номинального режима работы, $\frac{1}{E_0^{\mu\alpha}}$ – заданное значение тягового фактора для режима останова, $\delta_{\text{нп}}(t)$ – перемещение натяжного устройства, $M_{\text{Тпр}}(t)$ – значение тормозного момента, прикладываемого к приводному барабану, $M_{\text{Тхв}}(t)$ – значение тормозного момента, прикладываемого к хвостовому барабану.

Подсистема пуска и регулирования скорости содержит в себе оптимальный регулятор скорости, разработанный на основе метода А.М. Летова [27]. В качестве критерия оптимальности был выбран функционал, который интегрально характеризует качество переходных процессов и величину энергетических затрат на движение [40]:

$$I = 0,5 \int_0^T [X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t)]dt,$$

где Q и R – положительные определенные симметричные матрицы.

Оптимальное управление в этом случае формируется по следующему закону:

$$U(t) = -KX(t) + K(-(A - BK))^{-1}BU^*(t) + U^*(t),$$

где K – матрица обратных связей, которая определяется согласно процедуре принципа максимума Л. С. Понтрягина [17]. Структурная схема регулятора, соответствующая этому закону управления, представлена на рис. 4.2.

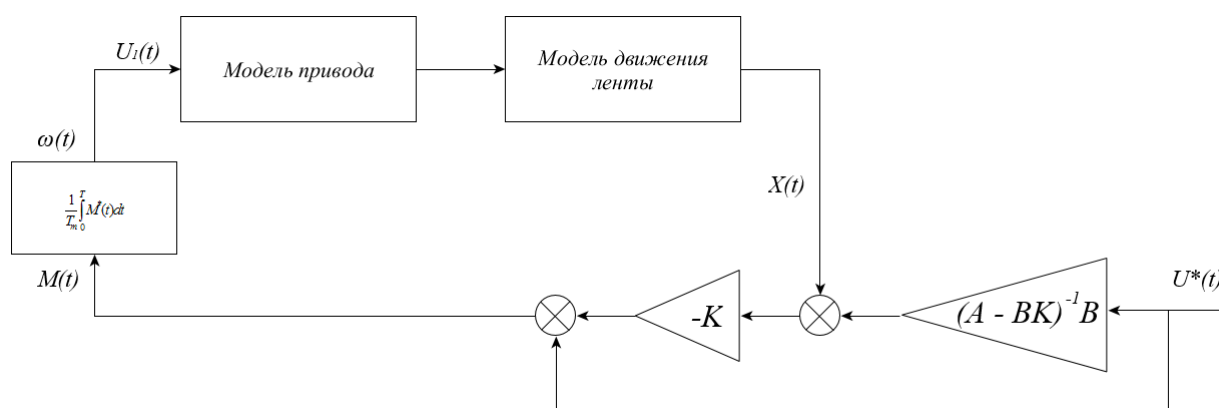


Рисунок 4.2: Структурная схема регулятора скорости

Подсистема пуска и регулирования скорости работает в двух режимах. В режиме пуска подсистема получает задания скорости $V_{0 \text{ пуск}}$ и $V_{0 \text{ ном}}$ и осуществляет пуск конвейера и вывод на ползучую скорость $V_{0 \text{ пуск}}$, ожидает завершения переходных процессов в ленте и переключает скорость на номинальную $V_{0 \text{ ном}}$. В режиме регулирования скорости подсистема получает задание скорости $V_0(t)$, которое зависит от внешних условий (например, от случайно изменяющегося грузопотока), получает текущее значение скорости приводного барабана и положения натяжного устройства, и осуществляет переключение скорости движения ленты посредством изменения частоты вращения ротора привода по закону оптимального управления.

Подсистема стабилизации тягового фактора содержит в себе блок расчета текущего значения тягового фактора, реализованный согласно структурной схеме, изображенной на рис. 2.7,

и регулятор, осуществляющий управление усилиями в канатах натяжного устройства в зависимости от текущей величины тягового фактора при работе конвейера в номинальном режиме. Стабилизация тягового фактора осуществляется для исключения проскальзывания ленты на приводном барабане при переключении скорости ее движения в номинальном режиме работы конвейера и достигается за счет изменения значений натяжений в характерных точках ленты. Регулятор натяжения подробно описан в работе [27].

Подсистема стабилизации тягового фактора получает задание тягового фактора для номинального режима работы $E_0^{\mu\alpha}$, рассчитанное на основе параметров используемого конвейера, и текущие значения перемещений в характерных точках ленты. На основе текущих значений перемещений подсистема вычисляет текущие значения натяжений в характерных точках ленты и, следовательно, текущую величину тягового фактора (2.4). Регулятор натяжения формирует сигнал управления на основе текущего значения тягового фактора и значения задания по определенному закону. Структурная схема подсистемы стабилизации тягового фактора представлена на рис. 4.3.

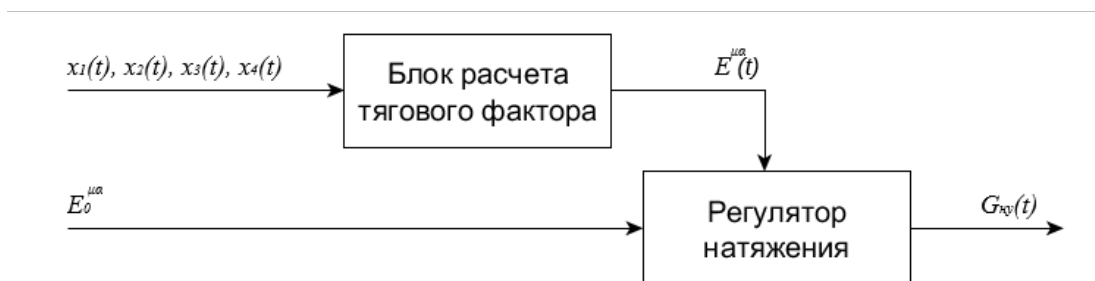


Рисунок 4.3: Структурная схема подсистемы стабилизации тягового фактора

Подсистема управления торможением содержит в себе блок расчета текущего значения тягового фактора для режима торможения, реализованный согласно структурной схеме, изображенной на рис. 2.7, и блок формирования управляющих сигналов для останова привода и для управления тормозными устройствами. Подсистема является реализацией алгоритма предварительного управляемого торможения конвейера, описанного в главе 3. Структурная схема подсистемы управления торможением представлена на рис. 4.4.

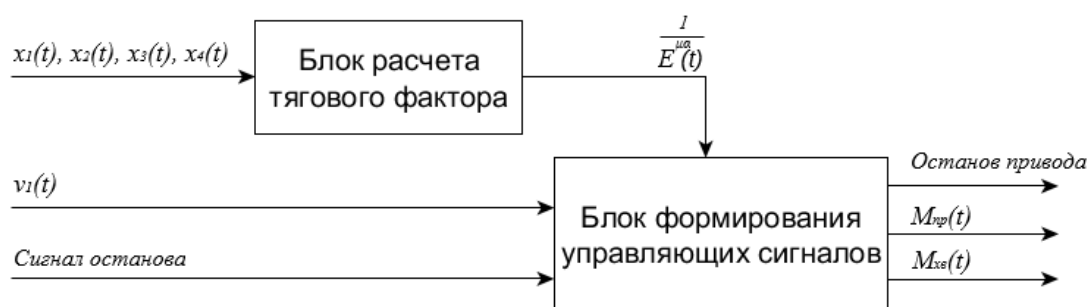


Рисунок 4.4: Структурная схема подсистемы управления торможением

Описанная структура комплексной системы управления конвейерной установкой позволяет наглядно видеть взаимосвязи между управляющими компонентами системы и компонентами объекта управления, а также внутреннюю структуру управляющих компонентов, определить параметры и сигналы объекта управления, необходимые для работы управляющих компонентов.

Техническая реализация системы управления согласно описанной структуре позволит реализовать каждую управляющую подсистему в виде независимого функционального блока (блоков), что согласовывается с современными стандартами разработки систем управления на основе решений ведущих производителей специализированного программного и аппаратного обеспечения. Это также облегчит разработку и отладку системы, сделает возможным использовать компоненты системы независимо друг от друга, расширять функциональность системы, добавляя новые требуемые алгоритмы управления и без какого-либо ущерба использовать известные средства резервирования и повышения отказоустойчивости, применяемые в промышленных системах автоматизации и управления.

Согласно общей структурной схеме системы управления, оборудование, составляющее аппаратную платформу системы, должно принимать один дискретный сигнал, инициирующий останов конвейера и шесть аналоговых сигналов (входные аналоговые каналы) для получения следующей информации:

- скорость первой сосредоточенной массы $v_1(t)$;
- скорость второй сосредоточенной массы $v_2(t)$;
- скорость третьей сосредоточенной массы $v_3(t)$;
- скорость четвертой сосредоточенной массы $v_4(t)$;
- положение натяжного устройства $\delta_{\text{нп}}(t)$;
- задание скорости движения ленты.

Также оборудование должно иметь один дискретный выходной канал для управления пуском и остановом привода и четыре аналоговых выходных канала для формирования управляющих воздействий:

- частота вращения ротора привода $\omega(t)$;
- усилие в канатах натяжного устройства $G_{\text{нп}}(t)$;
- тормозной момент приводного барабана $M_{\text{Т пр}}(t)$;
- тормозной момент хвостового барабана $M_{\text{Т хв}}(t)$.

Комплексная система автоматического управления ленточного конвейера является распределенной системой, что обусловлено значительной длиной конвейерной установки. Это предполагает использование нескольких коммуникационных модулей (устройств связи с объектом, УСО) и одного управляющего программируемого контроллера, объединенных между собой посредством промышленной сети передачи данных. Коммуникационные модули получают данные с первичных преобразователей, осуществляют их нормализацию и конвертацию в цифровой вид, обеспечивают гальваническую развязку с сетью передачи данных. Также коммуникационные модули преобразовывают управляющие сигналы, формируемые контроллером, в сигналы для исполнительных механизмов. Управляющий контроллер осуществляет сбор данных от коммуникационных модулей, обеспечивает работу управляющих алгоритмов и передает формируемые ими управляющие сигналы на коммуникационные модули.

В качестве сети передачи данных предлагается использовать промышленную сеть стандарта Profibus. Profibus – это открытый международный стандарт, который описывает шинную систему, предназначенную для установления связи с процессами и полевыми устройствами на полевом уровне, а также для обмена данными в пределах отдельной ячейки автоматизации. Физически

Profibus может представлять собой электрическую сеть с шинной топологией, использующую экранированную витую пару, соответствующую стандарту RS-485, оптическую сеть на основе волоконно-оптического кабеля или инфракрасную сеть. Скорость передачи по ней может варьироваться от 9,6 Кбит/сек до 12 Мбит/сек.

Особенностью ленточного конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части, как объекта автоматизации является подвижный хвостовой барабан. Хвостовой барабан жестко соединен с автоматическим натяжным устройством посредством канатов. Натяжное устройство в процессе работы конвейера изменяет усилия с канатах для управления натяжениями в ленте. Из-за этого хвостовой барабан, на котором расположено тормозное устройство, осуществляет перемещения. Для управления тормозным устройством хвостового барабана необходимо соединение его исполнительного механизма с коммуникационным модулем вывода. Согласно результатам модельных исследований (рис. 2.13), натяжное устройство перемещает хвостовой барабан конвейера в пределах 15 метров, что делает невозможным использование прямого проводного соединения исполнительного механизма тормозного устройства с коммуникационным модулем.

Для решения этой проблемы автор предлагает использовать беспроводную промышленную коммуникационную сеть. Для этого необходима установка отдельного коммуникационного модуля вместе с тормозным устройством на тележке хвостового барабана. Этот коммуникационный модуль соединяется с принимающим устройством (антенной), также расположенной на тележке хвостового барабана, которая осуществляет прием управляющих сигналов от неподвижного передающего устройства (точки доступа), подключенного к общей сетевой инфраструктуре системы автоматического управления.

В качестве беспроводной сети передачи данных предлагается использование сети стандарта IEEE 802.11. Характеристики такой сети приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1: Характеристики беспроводной сети передачи данных на основе стандарта IEEE 802.11b

Характеристика	Значение
Полоса частот	2,4 ГГц
Скорость передачи данных	11 Мбит/сек
Непересекающиеся каналы	3
Мощность передачи	100 мВт
Модуляция	DSSS
Проникновение через стены	Среднее
Отражения	Сильные
Опасность помех от радиоустройств	Средняя

Применение беспроводных технологий в системах автоматизации накладывает определенные требования к стандарту передачи данных. Промышленная реализация беспроводных сетей обеспечивает возможность расширения требований стандарта IEEE 802.11 на системы промышленной связи. При этом обеспечивается детерминированное время обмена данными, возможность использования резервированных беспроводных каналов связи, возможность использования одной сети для передачи как критичных (например, аварийных), так и не критичных (например, сервисных или диагностических) сообщений. Особенности промышленных беспроводных сетей описаны в [79].

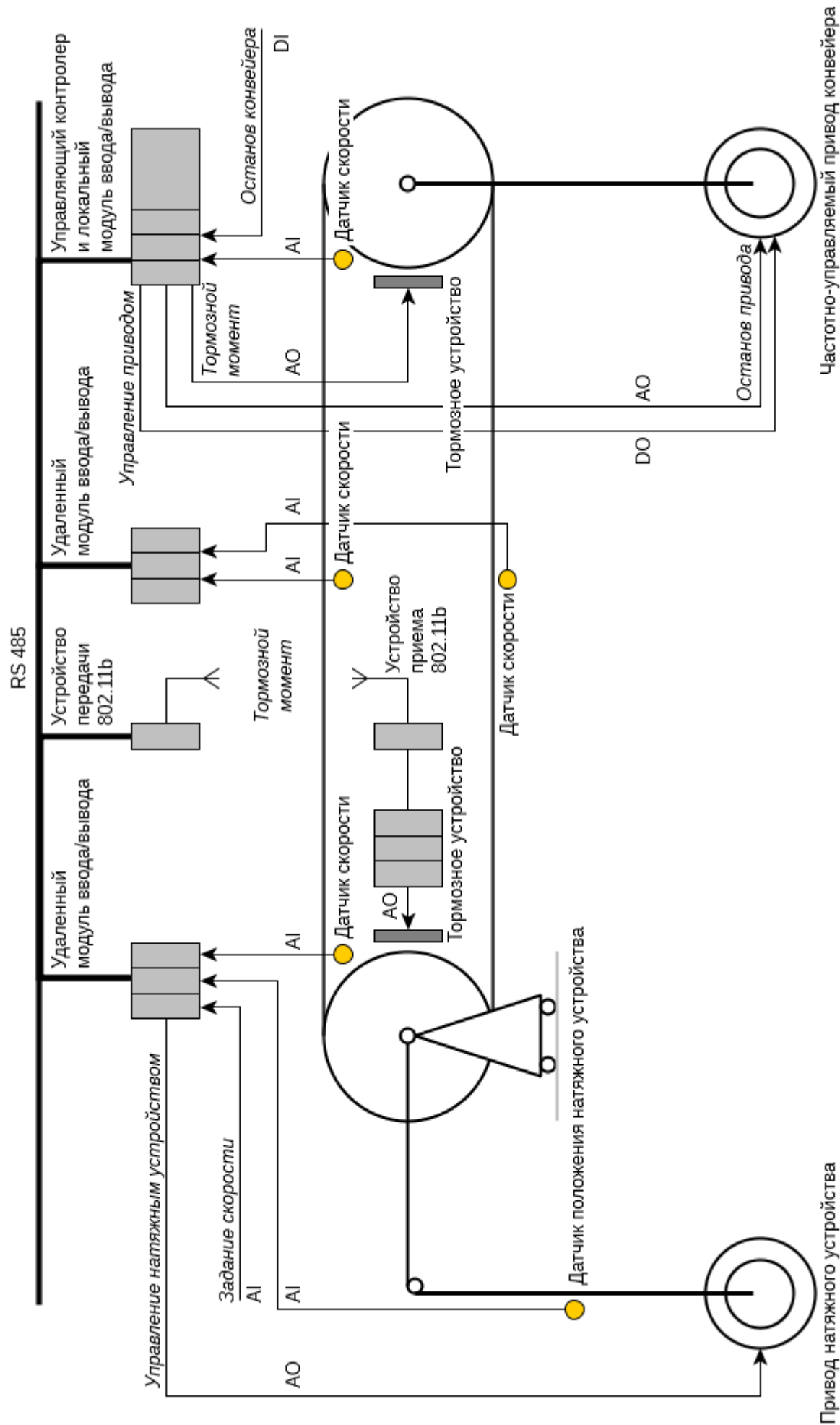


Рисунок 4.5: Общая схема технической реализации комплексной системы управления конвейерной установкой

4.2 Выбор управляющего программного и аппаратного обеспечения для технической реализации комплексной автоматизированной системы управления конвейерной установкой

Для технической реализации комплексной системы управления конвейерной установкой требуется следующий комплекс программного и аппаратного обеспечения:

- программируемые логические контроллеры для вычисления управляющих сигналов в соответствии с реализованными алгоритмами управления;
- устройства связи с объектом (УСО, коммуникационные модули) для преобразования сигналов от измерительных устройств к виду, пригодному для использования при расчетах, а также для преобразования управляющих сигналов, формируемых программируемым контроллером к виду, адаптированному для того или иного исполнительного устройства;
- источники питания для оборудования системы управления;
- измерительные устройства (датчики) для измерения требуемых параметров объекта управления;
- специализированное ПО (среда разработки и компиляторы) для программирования алгоритмов управления с возможностью выполнения их на программируемом контроллере;
- система верхнего уровня для диспетчерского управления и сбора данных (SCADA).

Основой разрабатываемой системы управления является техническая реализация разработанных ранее алгоритмов управления на современном промышленном аппаратном обеспечении (программируемых логических контроллерах), поэтому технологии создания программного обеспечения для систем, построенных на базе ПЛК, следует уделить особое внимание. Реализованные алгоритмы должны соответствовать современным стандартам промышленного программного обеспечения и иметь возможность выполняться на различном оборудовании (быть легко переносимыми). Поэтому при реализации алгоритмов управления целесообразно следовать стандарту МЭК 61131-3, описывающему промышленные языки программирования для программируемых логических контроллеров [53].

4.2.1 Выбор программируемого контроллера и среды разработки алгоритмов

На рынке средств промышленной автоматизации в настоящее время представлены разнообразные аппаратные и программные средства разработки систем управления. При выборе комплекса оборудования и программного обеспечения для построения системы управления необходимо учитывать совместимость компонентов системы между собой (контроллеры, коммуникационные модули, источники питания и т. д.), а также поддержку выбранным оборудованием средств и языков программирования стандарта МЭК 61131-3.

Задачу выбора аппаратного и программного обеспечения для разрабатываемой системы можно решить путем использования комплексных решений от ведущих мировых производителей, предлагающих функционально полный набор ПЛК, коммуникационных модулей ввода/вывода, дополнительного оборудования и совместимое с ними программное обеспечение.

В качестве аппаратной платформы выберем программируемый контроллер SIMATIC S7-300 с центральным процессором CPU 312, который производится концерном Siemens, а в качестве программного обеспечения для реализации алгоритмов управления выберем среду Simatic Step 7, которая представляет собой специализированное программное обеспечение для создания и обслуживания систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров Simatic S7-300 и Simatic S7-400 фирмы Siemens.

Преимущество выбранной платформы состоит в том, что производитель выпускает все необходимые компоненты, включая источники питания и модули связи с объектами и обеспечивает их полноценную совместимость между собой.

Программируемые контроллеры SIMATIC S7-300 допускают использование в жестких внешних условиях. Они имеют расширенный температурный рабочий диапазон: $(-25... + 60)^{\circ}$, повышенную вибрационную и ударную стойкость, соответствующие стандарту IEC 68 часть 2-6, удовлетворяют требованиям по влагостойкости, устойчивости к образованию конденсата и инея согласно IEC 721-3-3 Class 3 K5 [7].

Программируемый контроллер SIMATIC S7-300/400 имеет модульную конструкцию. Модули, из которых составляется требуемая конфигурация контроллера, могут быть центральными (располагаться по соседству с центральным процессором) или распределенными. В системах SIMATIC S7 распределенные входы/выходы являются составной частью системы. Центральный процессор, имеющий различные области памяти, составляет основу оборудования системы для обработки программ пользователя. Загрузочная память (load memory) целиком содержит пользовательскую программу; части программы, выполняемые в любое заданное время (исполняемый модуль программы), находятся в рабочей памяти (work memory), обеспечивающей малое время доступа к данным, что обеспечивает высокую скорость обработки данных [7]. Общий вид программируемого контроллера SIMATIC S7-300 представлен на рис. 4.6.

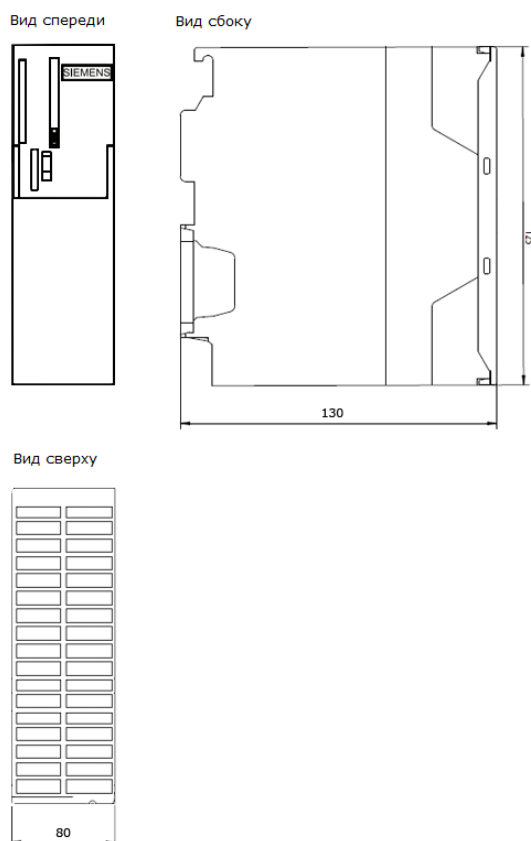


Рисунок 4.6: Общий вид программируемого контроллера SIMATIC S7-300

Технические характеристики выбранного оборудования представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2: Технические характеристики программируемого контроллера SIMATIC S7-300 с центральным процессором CPU 312

Характеристика	Значение
Степень защиты корпуса	IP 20 в соответствии с IEC 60 529
Рабочие температуры при горизонтальной установке	$(-25... + 60)^{\circ}$
Рабочие температуры при вертикальной установке	$(-25... + 40)^{\circ}$
Относительная влажность	5 ... 95%
Атмосферное давление	795 ... 1080 ГПа
Встроенная память	32 Кбайт
Цифровые каналы	
– встроенные каналы (DI)	10
– встроенные каналы (DO)	6
– входы	266
– выходы	262
– входы, центральные	266
– выходы, центральные	262
Аналоговые каналы	
– встроенные каналы (AI)	нет
– встроенные каналы (AO)	нет
– входы	64
– выходы	64
– входы, центральные	64
– выходы, центральные	64
Импульсные выходы	2 канала с широтно-импульсной модуляцией, макс. 2,5 кГц
Интерфейсы	
Тип интерфейса	RS 485
Потенциальная развязка	Нет
Электропитание на интерфейсе	макс. 200 мА
Программирование	
Языки программирования	LAD/FBD/STL/SCL
Защита программы пользователя	Да
Монтажные размеры Ш x В x Г (мм)	80 x 125 x 130
Масса	409 г
Питающее напряжение	24 В пост. тока
Потребление тока (номинальная величина)	500 мА
Мощность потерь	6 Вт

4.2.2 Выбор коммуникационных модулей

Согласно рис. 4.5, для построения распределенной системы управления требуется три группы коммуникационных модулей ввода/вывода.

Первая группа модулей принимает аналоговый сигнал датчика скорости участка грузовой ветви ленты у приводного барабана, осуществляет вывод аналоговых и дискретных сигналов управления приводом и тормозным устройством приводного барабана.

Вторая группа модулей принимает аналоговые сигналы датчиков скорости участка ленты центра грузовой ветви и участка ленты центра порожней ветви, которые расположены относительно близко друг к другу.

Третья группа модулей принимает аналоговые сигналы датчика скорости участка ленты грузовой ветви у хвостового барабана и датчика положения натяжного устройства, а также осуществляет вывод аналоговых сигналов управления натяжным устройством и тормозным устройством хвостового барабана.

Для ввода/вывода аналоговых сигналов выберем коммуникационные модули SM 334; AI 4/AO 2 x 12 Bit производства Siemens [77]. Эти модули имеют 4 аналоговых входа в 2 группах и 2 аналоговых выхода в одной группе с разрешающей способностью 12 битов + знак на канал. Модули имеют гальваническую развязку с интерфейсом задней шины и с напряжением на нагрузке и поддерживают измерение напряжения, сопротивления или температуры. Общий вид коммуникационного модуля представлен на рис. 4.7.

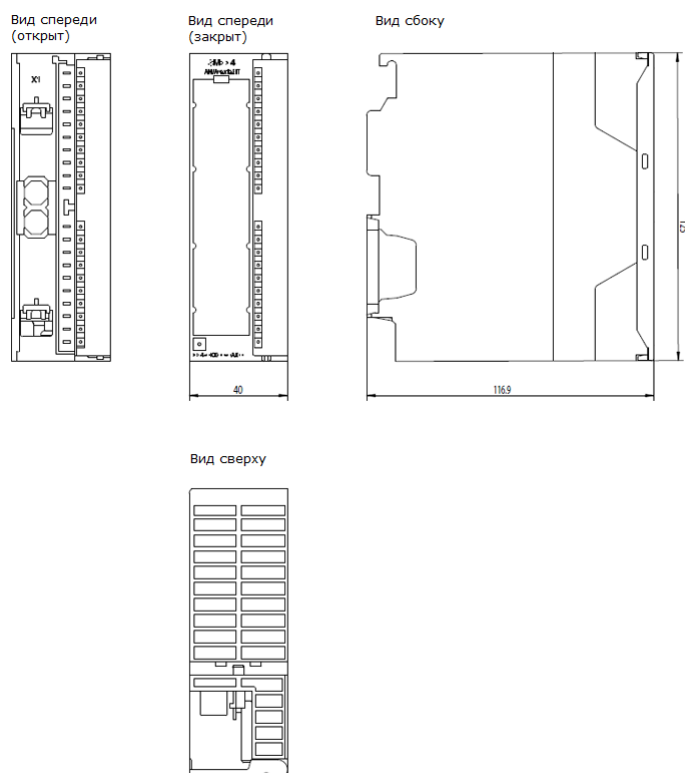


Рисунок 4.7: Общий вид аналогового коммуникационного модуля SM 334; AI 4/AO 2 x 12 Bit

Технические характеристики выбранного аналогового коммуникационного модуля представлены в табл. 4.3.

Для ввода/вывода дискретных сигналов выберем коммуникационные модули SM 323; DI 8/DO 8 производства Siemens [77]. Эти модули имеют 8 дискретных входов и 8 дискретных выходов. Модули имеют гальваническую развязку и пригодны для получения дискретных сигналов от переключателей и для вывода дискретных сигналов для электромагнитных клапанов, контакторов

постоянного тока и индикаторных ламп. Общий вид коммуникационного модуля представлен на рис. 4.8.

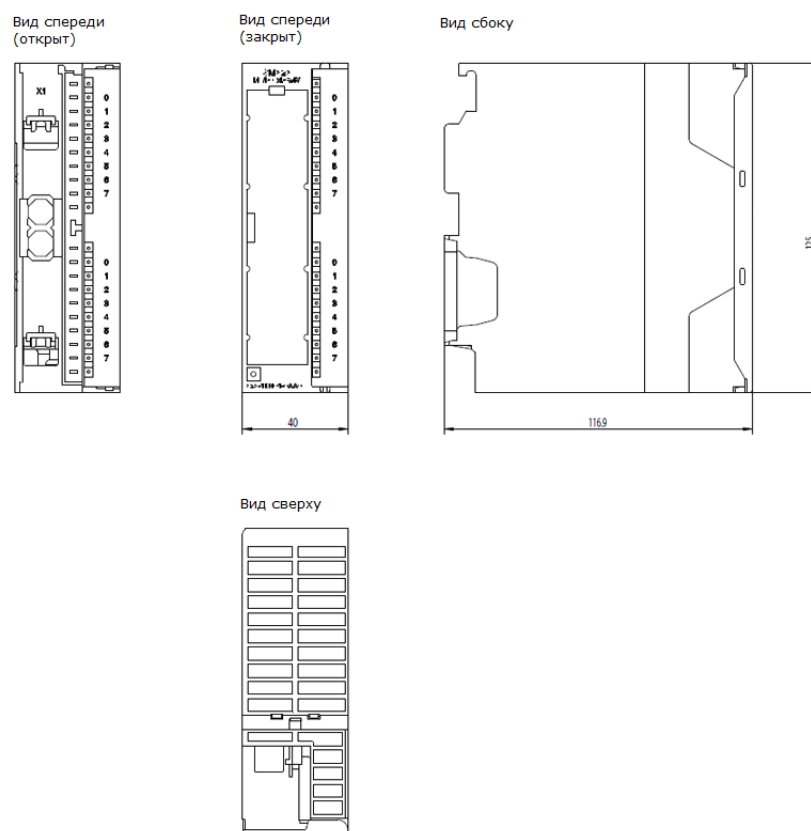


Рисунок 4.8: Общий вид дискретного коммуникационного модуля SM 323; DI 8/DO 8

Технические характеристики выбранного аналогового коммуникационного модуля представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.3: Технические характеристики коммуникационного модуля SM 334 AI 4/AO 2x12 Bit

Характеристика	Значение
Размеры, Ш x В x Г (мм)	40 x 125 x 117
Вес (гр)	200
Число входов	4
Число выходов	2
Длина кабеля	макс. 100 м
Номинальное напряжение источника питания	24 В постоянного тока
Принцип измерения	Интегрирующий
Входные диапазоны, напряжение	от 0 до 10 В
Входные диапазоны, сопротивление	10 кОм
Входные диапазоны, сопротивление	10 кОм
Входные диапазоны, температура	Pt 100
Выходной диапазон, напряжение	от 0 до 10 В

Таблица 4.4: Технические характеристики коммуникационного модуля SM 323; DI 8/DO 8

Характеристика	Значение
Размеры, Ш x В x Г (мм)	40 x 125 x 117
Вес (гр)	200
Число входов	8
Число выходов	8
Длина кабеля	макс. 1000 м
Напряжение питания	24 В постоянного тока
Потенциальная развязка	Да
Данные для выбора датчика	
номинальное значение входного напряжения	24 В пост. тока
значение напряжения для сигнала «1»	от 13 до 24 В
значение напряжения для сигнала «0»	от – 30 до 5 В
Входной ток	тип. 7 мА
Входная характеристика	в соответствии с МЭК 61131 – 1
Данные для выбора исполнительного устройства	
Выходное напряжение	мин. L + (- 0,8 В)
Выходной ток	0,5 мА
Диапазон сопротивления нагрузки	от 48 Ом до 4 кОм

4.2.3 Выбор источников питания

Все выбранные аппаратные компоненты системы управления требуют питания 24 В постоянного тока. В качестве источника питания выберем Блок питания PS 307; 2 А [77]. Отличительной особенностью этого блока питания является то, что он может использоваться не только для питания электроники коммуникационных модулей и программируемого контроллера, но и для питания цепей датчиков и исполнительных устройств. Технические характеристики выбранного источника питания представлены в табл. 4.5

Таблица 4.5: Технические характеристики блока питания PS 307; 2 А

Характеристика	Значение
Размеры, Ш x В x Г (мм)	40 x 125 x 117
Вес (гр)	420
Входное напряжение	120 / 230 В переменного тока
Частота сети	50 – 60 ГЦ
Номинальный входной ток	0,5 А
Выходное напряжение	24 В постоянного тока ($\pm 5\%$)
Выходной ток	2 А
Остаточные пульсации	макс. 150 мВ (пиковое значение)
К.П.Д.	83%
Потребляемая мощность	58 Вт

4.2.4 Выбор первичных преобразователей (датчиков)

Система управления получает от объекта только информацию о скоростях перемещения характерных точек конвейерной ленты и натяжного устройства. Это аналоговые сигналы, значения которых используются как входные параметры управляющих алгоритмов. Для получения этих сигналов необходимо измерять линейную скорость движения ленты и перемещения натяжного устройства. Для этих целей можно использовать тахометрические датчики скорости, например М4207 или ИДС-2. Это измерительные устройства, разработанные специально для применения на конвейерном транспорте для измерения скорости движения ленты. Принцип работы этих датчиков основан на преобразовании поступательного движения конвейерной ленты во вращательное движение вала датчика скорости и генерации электрических импульсов, частота которых пропорциональна скорости вращения вала. Измерительное колесо с помощью конструктивных элементов прижимается к движущейся ленте и преобразует поступательное движение ленты во вращательное движение вала. На валу в корпусе установлен оптический датчик вращения, который имеет разрешение 1000 импульсов на один оборот измерительного колеса. Электрические импульсы могут передаваться по кабелю связи в обрабатывающее устройство (коммуникационный модуль) для вычисления скорости перемещения ленты конвейера.

Плата электрического преобразователя расположена в корпусе за оптическим датчиком. Плата содержит клеммные соединители для подключения информационных и питающих цепей датчика, схему дешифратора сигналов с датчика, схему питания и клеммный соединитель для подключения кабеля связи. Выходной каскад схемы – открытый коллектор. Это позволяет повысить помехоустойчивость линии связи с коммуникационным модулем. Кабель связи пропускается в корпус датчика через герметичный кабельный ввод.

Датчик скорости предназначен для работы в помещениях и на открытом воздухе при температуре окружающего воздуха от минус 30 до плюс 40° С, при относительной влажности не более 80 % при температуре 25° С, атмосферном давлении от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.). Вид климатического исполнения УХЛ 2 по ГОСТ 15150–69.

4.2.5 Выбор языка программирования для реализации алгоритмов управления

Для реализации алгоритмов управления выберем язык SCL [78], который является специализированным языком высокого уровня для программирования промышленных контроллеров. Синтаксис языка SCL подобен синтаксису языка Pascal. SCL позволяет программировать сложные алгоритмы, математические функции, решать задачи управления данными и оптимизации вычислений. Реализация языка SCL, включенная в среду разработки SIMATIC S7, согласуется с концепцией функциональных блоков. Текст программы требует компиляции, результатом которой является функциональный блок, реализующий запрограммированный алгоритм. Этот блок сохраняется в библиотеке и его можно использовать в других программах (в том числе, написанных на других языках), вызывать его из других функциональных блоков. Кроме того, SCL имеет функции отладки, которые позволяют осуществлять наблюдение за выполнением программы в реальном времени, выполнять программу пошагово на основе указываемых точек останова и пользоваться другими преимуществами средств отладки языков высокого уровня.

4.3 Программирование алгоритмов управления

Настоящий раздел содержит описание реализации алгоритмов управления магистральным ленточным конвейером на промышленном языке программирования SCL, а также общее описание программного обеспечения комплексной системы управления магистральным ленточным конвейером, структура которой описана в 4.1.

4.3.1 Об особенностях разработки программного обеспечения для ПЛК Simatic S7–300

Программа контроллера Simatic S7–300 выполняется циклически с жестко заданным временем цикла. При включении контроллера однократно выполняется последовательность вычислений, заданная в блоке запуска (OB100), после этого запускается мониторинг времени цикла и в качестве первой операции цикла осуществляется считывание состояний сигналов из модулей и сохранение данных в области отображения процесса. Далее осуществляется выполнение основной программы, которая должна содержаться в определенном блоке OB1 (cycle execution), при этом может осуществляться обработка прерываний от аппаратных устройств или вызов других функциональных блоков или функций. В конце цикла происходит запись результатов работы программы в область памяти модулей вывода.

Программа состоит из набора функциональных блоков, каждый из которых имеет входы и выходы и выполняет определенную операцию. На входы функциональных блоков могут поступать входные значения параметров из области памяти коммуникационных модулей ввода, либо значения с выходов других функциональных блоков. Параметры с выходов могут поступать в соответствующие области памяти коммуникационных модулей вывода, либо на входы других функциональных блоков. Пользователь имеет возможность разрабатывать собственные функциональные блоки, либо использовать готовые функциональные блоки системной библиотеки.

Настоящая реализация алгоритмов комплексной автоматизированной системы управления ленточным конвейером предполагает разработку отдельных функциональных блоков для каждого алгоритма или вычислительной операции с последующим объединением их в общую управляющую программу.

4.3.2 Функциональный блок расчета параметров управляющих алгоритмов

Блок расчета параметров управляющих алгоритмов реализуется в соответствии с разработанной методикой расчета (3.5) и осуществляет расчет требуемых параметров и уставок управляющих алгоритмов. Для разных типов конвейеров эти параметры могут отличаться, поэтому блок предусматривает набор констант, которые задаются в соответствии с типом используемого конвейера. Данный блок целесообразно размещать в организационном блоке OB100 для того, чтобы расчет параметров и уставок осуществлялся однократно при включении управляющего контроллера.

Исходный код программы расчета параметров управляющих алгоритмов представлен в приложении D.1. Функциональный блок не имеет входов и рассчитывает следующие параметры: задающие значения тягового фактора для номинального режима работы конвейера и для режима торможения, значения тормозных моментов для приводного и хвостового барабанов.

Графическое представление разработанного функционального блока в среде разработки Step 7 представлено на рис. 4.9.

4.3.3 Функциональный блок расчета текущего значения тягового фактора

Расчет текущего значения тягового фактора используется в двух алгоритмах (4.1) – алгоритме стабилизации тягового фактора в номинальном режиме работы конвейера и алгоритме управляемого торможения конвейера, поэтому целесообразно описать его реализацию отдельно. Реализация расчета текущего значения тягового фактора в Simulink приведена в разделе 2.4, структурная схема представлена на рис. 2.7. В соответствии с ней реализован функциональный блок, получающий на входы аналоговые сигналы, соответствующие текущим величинам перемещений характерных точек конвейерной ленты. Выходы блока формируют аналоговые величины,

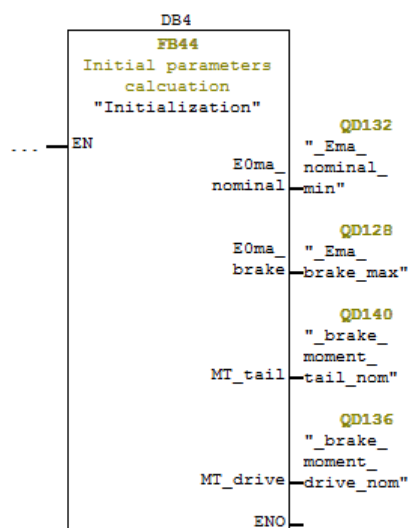


Рисунок 4.9: Графическое представление функционального блока расчета параметров управляющих алгоритмов

соответствующие текущему значению тягового фактора и натяжениям в точках набегания ленты на приводной барабана и сбегания ленты с приводного барабана.

Текущие значения перемещений характерных точек ленты вычисляются путем интегрирования получаемых величин скоростей этих кочек от коммуникационных модулей. Интегрирование осуществляется посредством специального функционального блока, реализующего алгоритм численного расчета интеграла входной величины. Этот алгоритм также реализован на языке SCL выполняется в блоке OB35, который реализует циклические прерывания центрального процессора каждые 100 мс. Исходный код алгоритма представлен в приложении D.5.

Исходный код программы вычисления текущего значения тягового фактора представлен в приложении D.2. Функциональный блок имеет четыре аналоговых входа, предназначенных для получения текущих значений перемещений характерных точек ленты, и четыре аналоговых выхода, формирующих текущие значения тягового фактора для номинального режима работы конвейера и для режима торможения, а также текущие величины натяжений в ветвях конвейера. В коде предусмотрен набор констант, соответствующих коэффициентам зависимостей натяжений от деформаций ленты (2.4, 2.5), так как на эти зависимости влияют свойства используемой ленты.

Графическое представление разработанного функционального блока в среде разработки Step 7 представлено на рис. 4.10.

4.3.4 Функциональный блок реализации алгоритма предварительного торможения конвейера

Данный блок реализует непосредственно алгоритм предварительного торможения конвейера (3.3) и предназначен для формирования управляющих сигналов для тормозных устройств и устройства управления приводом конвейера. В качестве входных сигналов функциональный блок получает скорости характерных точек ленты, текущее значение тягового фактора для режима торможения, определяемое в блоке расчета текущего значения тягового фактора (4.3.3), а также максимальное значение тягового фактора для режима торможения и номинальные значения тормозных моментов, определяемые в блоке расчета параметров управляющих алгоритмов (4.3.2). Выходы блока формируют сигнал останова привода и величины тормозных моментов для тормозных устройств.

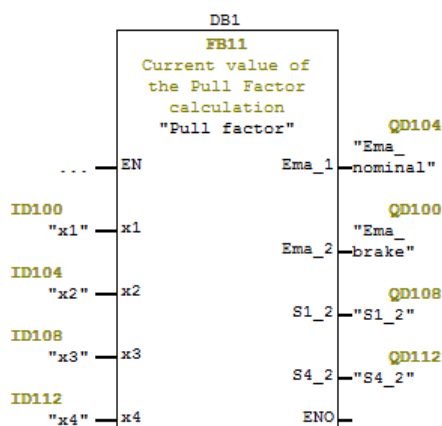


Рисунок 4.10: Графическое представление функционального блока вычисления текущего значения тягового фактора

Исходный код программы реализации алгоритма предварительного торможения конвейера представлен в приложении D.3.

Графическое представление разработанного функционального блока в среде разработки Step 7 представлено на рис. 4.11.

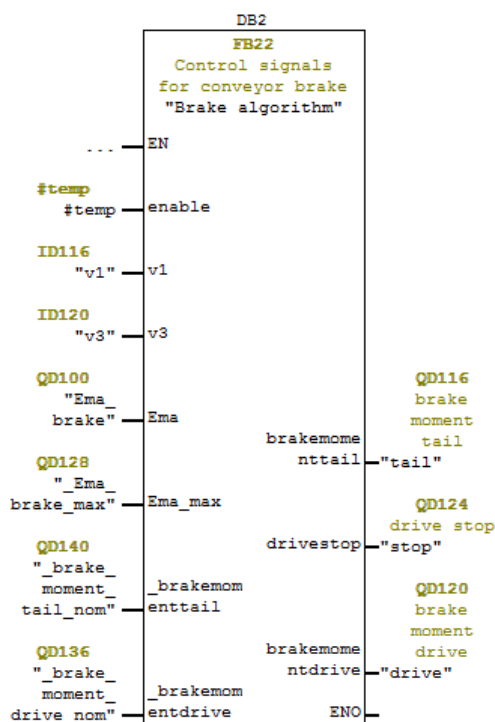


Рисунок 4.11: Графическое представление функционального блока реализации алгоритма предварительного торможения конвейера

4.3.5 Функциональный блок реализации регулятора натяжения ленты конвейера

Данный функциональный блок реализует алгоритм стабилизации тягового фактора в номинальном режиме работы конвейера и формирует управляющие сигналы для изменения положения

каретки натяжного устройства. Принцип стабилизации тягового фактора в номинальном режиме работы конвейера основан на полученной в [27] зависимости требуемого веса натяжного устройства от текущего значения тягового фактора.

Исходный код программы реализации алгоритма предварительного торможения конвейера представлен в приложении D.4. Функциональный блок получает на входы текущее значение тягового фактора для номинального режима работы, определяемое в блоке расчета текущего значения тягового фактора 4.3.3, а также минимальное значение тягового фактора для номинального режима, определяемое в блоке расчета параметров управляющих алгоритмов (4.3.2). Выход блока формирует сигнал управления натяжным устройством. В коде предусмотрен набор констант, соответствующих коэффициентам зависимости требуемого веса натяжного устройства от текущего значения тягового фактора [27]. Структурная схема алгоритма стабилизации тягового фактора представлена на рис. 4.12. Графическое представление разработанного функционального блока в среде разработки Step 7 представлено на рис. 4.13.

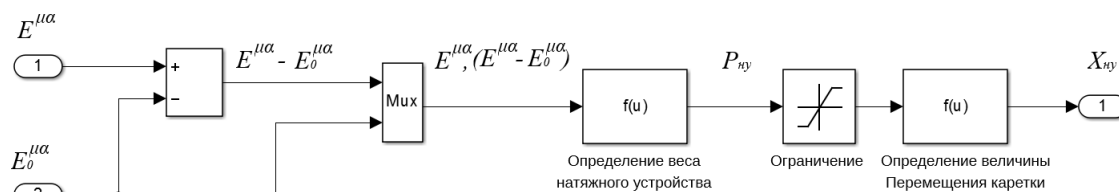


Рисунок 4.12: Структурная схема алгоритма стабилизации тягового фактора

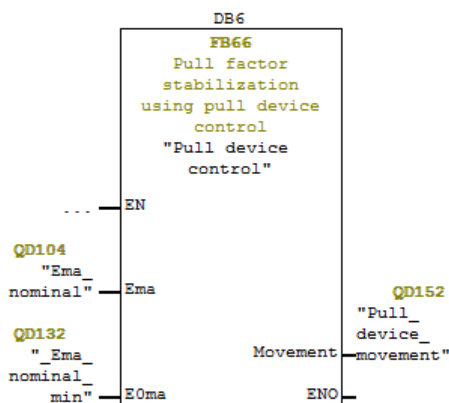


Рисунок 4.13: Графическое представление функционального блока реализации регулятора натяжения ленты конвейера

4.3.6 Функциональный блок реализации оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера

Регулятор скорости вырабатывает сигнал управления в соответствии со следующим законом:

$$U(t) = -KX(t) + K(-(A - BK))^{-1}BU^*(t) + U^*(t),$$

где $K_{[3 \times 10]}$ – матрица коэффициентов обратных связей по управляющему сигналу, $X(t)_{[10 \times 1]}$ – вектор координат состояния управляемой системы, $A_{[10 \times 10]}$ – матрица состояния управляемой системы, $B_{[10 \times 3]}$ – матрица управления системы, $U^*(t)$ – измеряемое управление, пропорционально которому должна быть изменена скорость движения ленты (задание скорости движения ленты).

Как следует из закона управления, для работы оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера необходим полный вектор координат состояния управляемой системы. В данном случае это перемещения и скорости характерных точек ленты конвейера и натяжного устройства. Поэтому соответствующий функциональный блок реализации регулятора имеет десять аналоговых входов, принимающих координаты состояния. Значения перемещений характерных точек ленты и натяжного устройства передаются от коммуникационных модулей, значения их скоростей получаются путем дифференцирования перемещений методом определения численного значения производной с использованием разностного отношения. Также функциональный блок принимает задание требуемой скорости движения ленты от формирователя задания скорости, дискретный сигнал пуска конвейера и значение интеграла задания скорости движения ленты.

Регулятор скорости вырабатывает оптимальное управление, пропорциональное движущему моменту привода. Однако управление конвейером должно происходить путем задания частотно-управляемому приводу требуемой частоты вращения. Переход осуществляется путем рования формируемого сигнала управления, поскольку связь между моментом и частотой вращения ротора задается уравнением $T_m \frac{d\omega}{dt} = M$.

Интегрирование задания скорости движения ленты и формируемого оптимального управления осуществляется посредством специального функционального блока, реализующего алгоритм численного расчета интеграла входной величины. Этот алгоритм также реализован на языке SCL выполняется в блоке OB35, который реализует циклические прерывания центрального процессора каждые 100 мс. Исходный код алгоритма представлен в приложении D.5.

Исходный код программы реализации оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера представлен в приложении D.6.

Графическое представление разработанного функционального блока в среде разработки Step 7 представлено на рис. 4.14.

4.3.7 Основная управляющая программа

Основная управляющая программа реализует совместное выполнение разработанных алгоритмов управления и представляет собой взаимосвязь описанных выше функциональных блоков. Вызов функциональных блоков, реализующих непосредственно алгоритмы управления, осуществляется циклически с интервалом 100 мс, вызов функциональных блоков, вычисляющих производные и интегралы сигналов, осуществляется циклически по прерываниям, вызов функционального блока, вычисляющего параметры алгоритмов управления, осуществляется при старте и перезапуске контроллера. Исходный код основной программы (на языке ST) представлен в приложении D.8. Список входных, выходных и локальных переменных, которые использует управляющая программа, представлен в приложении D.7.

4.4 Особенности реализации и отладки комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой

В процессе разработки и отладки описанных выше алгоритмов требуется большое количество экспериментов с использованием реального оборудования. Однако часто такие исследования проводить невозможно в силу ряда факторов — отсутствия оборудования для экспериментов, невозможности прервать действующий технологический процесс, риска вывода оборудования из строя во время отладки алгоритмов управления.

Поэтому для разработки и отладки алгоритмов управления и системы в целом была использована методика компьютерной имитации, в основе которой лежит взаимодействие среды моделирования работы управляющего контроллера и модели конвейерной установки, реализованной в

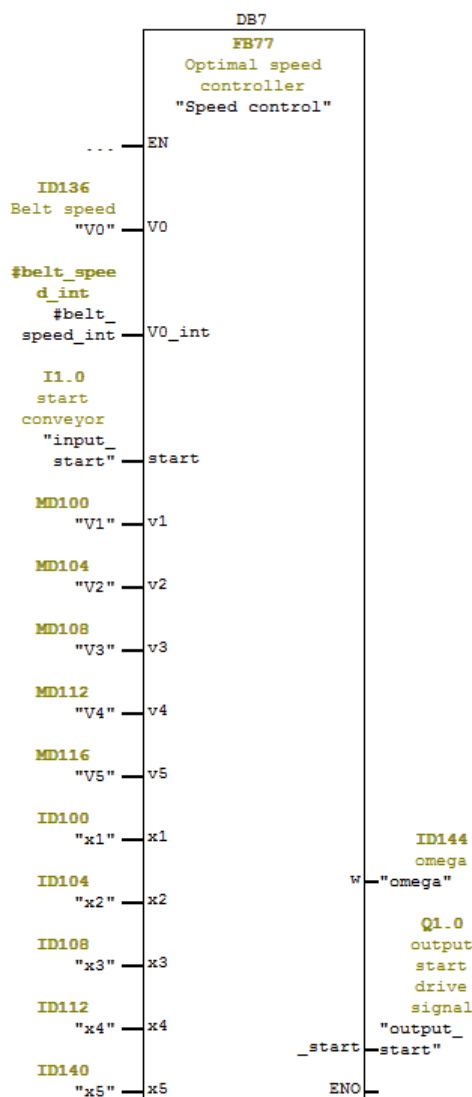


Рисунок 4.14: Графическое представление функционального блока реализации оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера

приложении Simulink пакета прикладных программ Matlab, которое позволяет с достаточной степенью детализации и достоверности моделировать не только сам технологический процесс, но и работу технологического оборудования и исполнительных механизмов. Среда моделирования работы управляющего контроллера – это программное обеспечение, которое обычно разрабатывается производителем управляющего контроллера и позволяет полностью эмулировать его работу, гарантируя идентичность реальным условиям эксплуатации.

В качестве среды моделирования работы управляющего контроллера используется программное обеспечение PLCSIM, входящее в пакет прикладных программ разработки ПО для контроллеров Siemens. PLCSIM позволяет эмулировать работу программируемого контроллера с управляющим программным обеспечением с возможностью мониторинга состояний сигналов и переменных программы. Следует отметить, что разрабатываемая для среды PLCSIM программа полностью готова для загрузки и работы на реальном контроллере без каких-либо изменений. Общая схема взаимодействия компонентов имитационной среды представлена на рис. 4.15.

В реальных системах управления значения требуемых технологических параметров объекта получают с помощью измерительных устройств (датчиков), значения этих параметров передаются в управляющий контроллер, где производятся необходимые вычисления на основе алгоритмов



Рисунок 4.15: Общая схема взаимодействия компонентов имитационной среды

управления технологическим процессом и формируются сигналы управления, передаваемые на исполнительные устройства объекта. В имитационной среде значения требуемых технологических параметров получают от модели технологического процесса. Эти значения передаются в среду моделирования работы управляющего контроллера. Другими словами, среда моделирования работы управляющего контроллера и среда Simulink, в которой реализована исследуемая модель конвейера, являются независимыми компонентами, поэтому очень важным аспектом является обеспечение передачи данных в реальном времени – только в этом случае можно говорить о корректности имитации реального технологического процесса.

Для передачи данных между компонентами имитационной среды был использован OPC-сервер – программное обеспечение, соответствующее стандарту OPC и предназначенное для совместной работы средств автоматизации. Стандарт OPC описывает универсальный фиксированный интерфейс обмена данными с любыми устройствами и программным обеспечением []. Программное обеспечение, соответствующее стандарту OPC, может быть использовано не только для взаимодействия SCADA-систем с аппаратным обеспечением систем управления, но и для обмена данными между любыми источниками и потребителями данных. Эта возможность была использована при разработке и отладке комплексной системы управления конвейером.

Возможность получения корректных результатов при разработке и отладке системы управления и ее компонентов в имитационной среде, применимых в реальных условиях эксплуатации, обеспечивается выполнением следующих условий:

- использованием математической модели объекта управления, описывающей его с достаточной точностью;
- использованием средств взаимодействия компонентов, обеспечивающих передачу данных в реальном времени;
- использованием специального имитационного программного обеспечения, совместимого с выбранным оборудованием.

Взаимодействие между моделью конвейера и управляющей программой в среде моделирования работы управляющего контроллера осуществляется следующим образом. Simulink обеспечивает передачу требуемых сигналов в реальном времени OPC-сервер посредством блока *OPC Write* из набора компонентов *OPC Toolbox*. С OPC-сервера эти величины считываются программой в имитационной среде, после чего программа производит вычислительные операции,

формирующие сигналы управляющих воздействий. Эти сигналы передаются в реальном времени на OPC-сервер, с которого они считывается Simulink посредством блока *OPC Read* из набора компонентов *OPC Toolbox*.

4.5 Выводы по главе 4

В настоящей главе описана структура и предложен вариант реализации комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой, реализующей алгоритмы управления, использование которых позволяет повысить эффективность работы конвейера, увеличить срок службы конвейерной ленты – наиболее дорогостоящего компонента конвейерной установки. Одним из компонентов системы является реализация разработанного в главе 3 алгоритма предварительного управляемого торможения конвейера.

Описанный вариант реализации системы управления включает в себя предложения по выбору аппаратного обеспечения (программируемых контроллеров, коммуникационных модулей, источников питания), размещению первичных преобразователей для получения информации от объекта управления, а также описывает решение задачи распределенного сбора данных и управления перемещающимися компонентами конвейерной установки. В главе также представлены результаты разработки программного обеспечения, реализующего алгоритмы управления системы на промышленном языке программирования стандарта МЭК 61131-3. Исходные коды программ реализации алгоритмов возможно использовать на любом промышленном вычислительном оборудовании, поддерживающем этот стандарт. Это исключает жесткую привязку разработанного программного обеспечения к выбранному оборудованию и позволяет при необходимости построить систему управления с использованием другого аппаратного обеспечения или использовать разработанное программное обеспечение при построении других автоматических систем управления.

Заключение

В результате проведенных исследований дано новое решение актуальной научно-технической задачи разработки алгоритма предварительного управляемого торможения магистрального ленточного конвейера, а также решение задачи реализации алгоритмов автоматического управления магистральным ленточным конвейером (как алгоритма, разработанного в настоящей работе, так и алгоритмов, разработанных ранее в работе [27]) в виде разработки структуры и варианта реализации комплексной автоматизированной системы управления магистральным ленточным конвейером. Представленные решения позволяют повысить эффективность эксплуатации ленточных конвейеров в различных режимах работы с исключением или минимизацией проскальзывания ленты конвейера на приводном барабане и существенным снижением динамических усилий в ленте в переходных режимах.

Основные научные и практические выводы, полученные лично автором:

1. Эффективность эксплуатации конвейерных устройств на горных предприятиях может быть повышена только при условии автоматического управления технологическими операциями, выполняемыми в процессе эксплуатации. Для создания автоматической системы управления конвейерной установкой, позволяющей исключить проскальзывание ленты конвейера на приводном барабане и снизить динамические усилия в ленте в переходных режимах, необходимы управляющие алгоритмы, учитывающие механические свойства конвейерной ленты и особенности ее поведения: распространение упругих волн, характер возникновения напряжений и деформаций и сил сопротивления движению на различных участках ленты;
2. Произведена доработка существующей математической модели ленточного конвейера. Доработанная математическая модель позволяет исследовать переходные процессы, возникающие при торможении приводного и хвостового барабанов конвейера;
3. Модельные исследования показали, что величина тягового фактора ленточного конвейера при его останове в большинстве случаев превышает технологическое значение, определяемое параметрами конвейера (не соблюдается условие Эйлера), что приводит к проскальзыванию ленты на приводном барабане. На основе модельных исследований был разработан алгоритм управляемого торможения ленточного конвейера, использующий тормозные устройства, расположенные на приводном и на хвостовом барабанах;
4. Разработана методика расчета параметров алгоритма управляемого торможения ленточного конвейера, которая позволяет определить требуемые величины тормозных моментов и тягового фактора, исходя из технологических параметров используемого конвейера;
5. Исследование полученного алгоритма совместно с доработанной математической моделью ленточного конвейера показало, что применение этого алгоритма позволяет минимизировать, а в большинстве случаев исключить проскальзывание ленты при торможении конвейера, а также более чем в шесть раз сократить временной интервал, в течении которого проскальзывание ленты на приводном барабане гипотетически может возникнуть;

6. Наилучшие результаты повышения эффективности эксплуатации конвейерного транспорта могут быть достигнуты только при совместном использовании алгоритмов, осуществляющих не только стабилизацию тягового фактора при торможении конвейера, но и управление другими процессами – стабилизацией тягового фактора в номинальном режиме работы конвейера и регулированием скорости движения ленты при переключении для снижения динамических нагрузок. Для этих целей была разработана структура комплексной автоматизированной системы управления ленточным конвейером, включающая в себя указанные алгоритмы. Предложен вариант реализации системы управления, включающий в себя выбор и обоснование аппаратного обеспечения и компонентов системы, а также разработку программного обеспечения, реализующего указанные управляющие алгоритмы на современном промышленном языке программирования, соответствующем стандарту МЭК 61131-3.

Список рисунков

2.1	Расчетная схема конвейера с натяжным устройством, расположенным в хвостовой части конвейера.	19
2.2	Структурная схема связи моделей ленты и натяжного устройства, которая обеспечивает возможность управления натяжным устройством	23
2.3	Структурная схема модели натяжного устройства	23
2.4	Структурная схема модели формирования тормозного момента.	25
2.5	Определение натяжений в конвейерной ленте.	27
2.6	Графики зависимости натяжений в ветвях конвейера от деформации участков	29
2.7	Структурная схема определения деформаций ленты, вычисления величин натяжений и тягового фактора	29
2.8	Общая схема моделирования конвейерной установки.	30
2.9	Структурная схема модели ленты конвейера.	31
2.10	Изменение момента, развиваемого двигателем и частоты вращения ротора.	32
2.11	Переходные процессы по скоростям обобщенных координат ленты конвейера.	32
2.12	Переходной процесс по скорости перемещения каретки натяжного устройства конвейера.	33
2.13	Переходной процесс по перемещению каретки натяжного устройства конвейера.	33
2.14	Изменение величины тягового фактора.	34
2.15	Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при пуске конвейера	36
2.16	Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана	37
2.17	Изменение величины тягового фактора	37
2.18	Перемещение натяжного устройства	38
2.19	Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при останове конвейера без применения торможения	39
2.20	Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана при останове конвейера без применения торможения	40
2.21	Изменение величины тягового фактора при останове конвейера без применения торможения	40
2.22	Изменение значений тягового фактора для режима пуска (а) и тягового фактора для режима торможения (б) при весе натяжного устройства, равном $65000H$	41
2.23	Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при останове конвейера с торможением приводного барабана	43
2.24	Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана при останове конвейера с торможением приводного барабана	44
2.25	Изменение величины тягового фактора при останове конвейера с торможением приводного барабана	44
2.26	Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при торможении хвостового барабана конвейера	46

2.27	Изменение натяжений в точках набегания ленты на приводной барабан и сбегания ленты с приводного барабана при торможении хвостового барабана конвейера . . .	47
2.28	Изменение величины тягового фактора при торможении хвостового барабана конвейера	47
3.1	Общая схема одноколодочного тормозного устройства	52
3.2	Переходной процесс изменения значения тягового фактора при торможении хвостового барабана	56
3.3	Переходной процесс изменения значения тягового фактора при торможении хвостового барабана. Значение тягового фактора выбрано с учетом коэффициента запаса сил трения на приводном барабане	57
3.4	Переходной процесс изменения значения тягового фактора при торможении хвостового барабана и последующем отключении привода конвейера	57
3.5	Сравнение времени останова привода и времени, в течение которого значение тягового фактора после отключения привода не превышало значения 0,4	58
3.6	Изменение скорости вращения приводного барабана при останове конвейера с предварительным торможением хвостового барабана	59
3.7	Определение натяжений после останова приводного барабана	59
3.8	График изменения величины тягового фактора при торможении ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова	61
3.9	Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при торможении ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова	62
3.10	Графики изменения натяжений ленты при торможении ленты конвейера с предварительным торможением хвостового барабана, остановом привода и блокировкой приводного барабана после его останова	63
3.11	Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства при отключении тормозных устройств остановленного конвейера	65
3.12	Графики изменения натяжений ленты при отключении тормозных устройств остановленного конвейера	66
3.13	Графики изменения натяжений ленты при отключении тормозных устройств остановленного конвейера	67
3.14	Графики изменения величины тягового фактора во время торможения конвейера при различных значениях грузопотока	71
3.15	Графики изменения величины натяжения ленты в точке набегания на приводной барабан при различных значениях грузопотока	71
4.1	Общая структурная схема комплексной автоматической системы управления конвейерной установкой	74
4.2	Структурная схема регулятора скорости	75
4.3	Структурная схема подсистемы стабилизации тягового фактора	76
4.4	Структурная схема подсистемы управления торможением	76
4.5	Общая схема технической реализации комплексной системы управления конвейерной установкой	79
4.6	Общий вид программируемого контроллера SIMATIC S7-300	81
4.7	Общий вид аналогового коммуникационного модуля SM 334; AI 4/AO 2 x 12 Bit . .	83
4.8	Общий вид дискретного коммуникационного модуля SM 323; DI 8/DO 8	84
4.9	Графическое представление функционального блока расчета параметров управляющих алгоритмов	88

4.10	Графическое представление функционального блока вычисления текущего значения тягового фактора	89
4.11	Графическое представление функционального блока реализации алгоритма предварительного торможения конвейера	89
4.12	Структурная схема алгоритма стабилизации тягового фактора	90
4.13	Графическое представление функционального блока реализации регулятора натяжения ленты конвейера	90
4.14	Графическое представление функционального блока реализации оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера	92
4.15	Общая схема взаимодействия компонентов имитационной среды	93

Список таблиц

2.1	Параметры магистрального ленточного конвейера 1Л-100К	18
2.2	Результаты расчета натяжений ленты при различных значениях веса натяжного устройства и соответствующие им деформации.	28
3.1	Результаты определения зависимости между силой трения, возникающей при торможении хвостового барабана и возникающими при этом динамическими натяжениями ленты.	53
4.1	Характеристики беспроводной сети передачи данных на основе стандарта IEEE 802.11b	78
4.2	Технические характеристики программируемого контроллера SIMATIC S7-300 с центральным процессором CPU 312	82
4.3	Технические характеристики коммуникационного модуля SM 334 AI 4/AO 2x12 Bit	84
4.4	Технические характеристики коммуникационного модуля SM 323; DI 8/DO 8	85
4.5	Технические характеристики блока питания PS 307; 2 А	85
D.1	Список переменных программы управляющего контроллера	122

Литература

1. Авдиенко И. Н. Автоматизированное управление многоярусной конвейерной системой с композиционными полимерными лентами. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Санкт-Петербург, 2001.
2. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины. Учебник для машиностроительных специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1985.
3. Александров М. П. Тормозные устройства. Справочник. М.: Машиностроение, 1985.
4. Андриевский Б. Р., Фратков А. П. Избранные главы теории автоматического управления с примерами из MATLAB. Санкт-Петербург: Наука, 1999.
5. Бабенко А. Г. Цифровые системы управления. Екатеринбург, издательство УГТГА, 2003.
6. Бельфор В.Е. Исследование переходных процессов в многоприводных ленточных конвейерах для горнорудных предприятий. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Москва, 1968.
7. Бергер Г. Автоматизация посредством STEP 7 с использованием STL и SCL и программируемых контроллеров SIMATIC S7-300/400. Siemens-Bestell-Nr., 2001.
8. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. Санкт-Петербург: Профессия, 2004.
9. Бочкарев И. В. Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей. Москва: Энергоатомиздат, 2001.
10. Бухаров Р. А. Методы управления скоростью движения ленты магистрального конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. 2012.–№12.
11. Бухаров Р. А. Интеграция среды моделирования simulink и аппаратного обеспечения систем управления на примере контроллера siemens s7-200 // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. 2014.–№2.
12. Бухаров Р. А. Разработка и компьютерное моделирование алгоритма управления торможением шахтного ленточного конвейера, обеспечивающего отсутствие проскальзывания ленты // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. 2014.–№н.
13. Бухаров Р. А. Разработка и компьютерное моделирование алгоритма управления для оптимизации процесса торможения магистрального ленточного конвейера // Научный вестник МГТУ. 2014.–№3.
14. Волков Р. А., Гнутов А. Н., Дьячков В. К. Конвейеры: Справочник / под ред. Ю. А. Пертена. Л.; Машиностроение, 1984.

15. Володин А. А. Система микропроцессорного управления частотнорегулируемым электроприводом в режиме торможения. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Санкт-Петербург, 1992.
16. Вольченко А. И. Барабанно-колодочные тормозные устройства. Львов, Изд-во при Львов ун-те, 1980.
17. Э. М. Галеев В. М. Тихомиров. Оптимизация: теория, примеры, задачи. М., «Эдиториал УРСС», 2000.
18. Гершун С. В. Система автоматической стабилизации тягового фактора магистрального ленточного конвейера с двухдвигательным приводом. Диссертация на соискание ученой степени магистра техники и технологии. Москва, 2009.
19. Городецкий А. В. Исследование влияния пускового режима на выбор параметров линейной части ленточного конвейера на ходовых опорах. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Жданов, 1985.
20. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М: Горячая Линия-Телеком, 2009.
21. Дмитриев В. Г., Галкин В. И., Дьяченко В. П. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий: Учебное пособие. М.: Горная книга; Издательство МГГУ, 2011.
22. Дмитриев В. Г., Егоров П. Н., Малахов В. А. Основы автоматизации проектирования горных транспортных машин. М.: Горная книга; Издательство МГГУ, 2004.
23. В. В. Дмитриева Р. А. Бухаров. Микропроцессорная система управления скоростью движения ленты конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. 2011.–№10.
24. В. В. Дмитриева Р. А. Бухаров. Интеграция среды моделирования simulink и аппаратного обеспечения систем управления // Научный вестник МГГУ. 2011.–№10.
25. В. В. Дмитриева Р. А. Бухаров. Микропроцессорная система управления скоростью движения ленты конвейера // Кафедре «Автоматики и управления в технических системах» Московского государственного горного университета – 50 лет. 2010.
26. В. В. Дмитриева Р. А. Бухаров. Методика компьютерной имитации системы стабилизации тягового фактора ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. 2015.–№1.
27. Дмитриева В. В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Москва, 2005.
28. Дмитриева В. В. Математическая модель магистрального конвейера как объекта управления и автоматизации // Горные машины и автоматика №7. 2001.
29. Дмитриева В. В. Модель "магистральный конвейер – асинхронный привод" и анализ ее динамических процессов // Издательство МГГУ, депозит №348/05-04. 2004.
30. Дьяконов В. П. SIMULINK 4. Специальный справочник. Санкт-Петербург: Питер, 2002.
31. В. П. Дьяконов В. В. Круглов. Математические пакеты расширения Matlab. Специальный справочник. Санкт-Петербург: Питер, 2001.

32. Евневич А. В. Транспортные машины и комплексы. 3-е издание. М.: Недра, 1975.
33. Запенин И. В. Исследование нестационарных процессов в мощных ленточных конвейерах. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Москва, 1966.
34. Запенин И. В., Бельфор В.Е., Селищев Ю. А. Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров. М.: Недра, 1969.
35. Зеленский О. В., Петров А. С. Справочник по проектированию ленточных конвейеров. М.: Недра, 1986.
36. Каледин Н. В., Кравцов С. И., Гребешков Ю. В. Тормозные устройства шахтных подъемных установок. Киев: Техника, 1982.
37. Современная прикладная теория управления / А. А. Колесников, Г.Е. Веселов, О.Т. Вавилов [и др.]. Москва-Таганрог: ТРТУ, 2000.
38. Кангин В. В. Повышение эффективности систем управления распределительными конвейерами и автоматизированными складами на основе структурного моделирования процессов и объектов. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Москва, 2002.
39. Коткин Г. Л., Черкасский В. С. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием MATLAB. Новосибирск, НГУ, 2001.
40. Красовский А. А. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М., Наука, 1987.
41. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Санкт-Петербург: Питер, 2005.
42. Лобачева А. К., Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточного конвейера. М.: Машиностроение, 1974.
43. Мамалыга В. М. Взаимосвязанная система управления многодвигательными ленточными конвейерами. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Киев, 1988.
44. Мартынов В. В. Разработка алгоритмов и устройств автоматического контроля количества сыпучих материалов на ленте конвейера на основе деформации электрополей. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Москва, 2000.
45. Программируемые логические контроллеры в автоматизированных системах управления / И. Г. Минаев, В. М. Шарапов, В. В. Самойленко [и др.]. Ставрополь: АГРУС, 2010.
46. Мишель Ж., Лоржо К., Эспьо Б. Программируемые контроллеры. М.: Машиностроение, 1986.
47. Ткач В. М. Опыт разработки и внедрения систем автоматического управления конвейерными линиями // Горный журнал, №5. 1994.
48. Толпежников Л. И. Автоматизация подземных горных работ. М.: Недра, 1976.
49. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления. М. Высшая школа, 2006.
50. Певзнер Л.Д., Чураков Е. П. Математические основы теории систем. М. Высшая школа, 2009.
51. Парр Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера. М.: БИНОМ, 2007.

52. Петков О. Н. Разработка и исследование системы автоматического управления скоростью ленточного конвейера по входному грузопотоку. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Москва, 1984.
53. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / под ред. В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
54. Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x. М.: Диалог – МИФИ, 1999.
55. Пухов Ю. С. Транспортные машины. М.: Недра, 1987.
56. Романов В. П. Основы языка программирования STEP7 и базового программного обеспечения промышленных контроллеров Siemens: Учебно-методическое пособие. Новокузнецк: ФГОУ СПО "Кузнецкий индустриальный техникум 2009.
57. Сериков С. А. Оптимальная адаптивная система управления электроприводами подвесных конвейеров. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Липецк, 2004.
58. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
59. Симонс А. Разработка и научное обоснование параметров тормозного устройства мощных наклонных ленточных конвейеров. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Санкт-Петербург, 2001.
60. Сокотнюк Ю. А. Управление конвейерными линиями на базе асинхронного электропривода в рамках АСУ ТП. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Воронеж, 1990.
61. Стадник Н. И., Ильюшенко В. Г., Егоров С. И. Справочник по автоматизации шахтного конвейерного транспорта. К.: Техника, 1992.
62. Сухарев И. А. Система автоматического управления наклонным ленточным конвейером. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Днепропетровск, 2003.
63. Тарасов Ю. Д. Тормозные и улавливающие устройства ленточных конвейеров. Санкт-Петербург: Политехника, 1999.
64. Тихонов Н. В. Транспортные машины горнорудных предприятий. М., Недра, 1985.
65. Траубе Е. С., Найдено И. С. Тормозные устройства и безопасность шахтных подъемных машин. М.: Недра, 1980.
66. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1987.
67. Шаронов С. В. Адаптивная система торможения рудничного электровоза. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Санкт-Петербург, 2001.
68. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Расчет ленточных конвейеров для шахт и карьеров. М.: издательство МГИ, 1982.
69. Шахмейстер Ю. Л. Новые средства метрологии для проведения испытаний горно-шахтных машин и оборудования. Научные сообщения ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского №324. 2003.
70. Л. Г. Шахмейстер В. Г. Дмитриев. Элементы статистической динамики транспортных машин. М.: издательство МГИ, 1970.

71. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Элементы статистической динамики транспортных машин. М.: Издательство МГИ, 1970.
72. Чен К., Джиблин П., Ивринг А. Matlab в математических исследованиях. Москва: Мир, 2001.
73. Черемушкина М. С. Синтез алгоритмов управления многодвигательным электроприводом конвейерного транспорта с использованием полупроводниковых преобразователей. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Санкт-Петербург, 2009.
74. Data Access Automation Interface Standard. Version 2.02. OPC Foundation, 1994.
75. Mahnke W., Leitner S., Damm M. OPC Unified Architecture. Springer, 1999.
76. Siemens AG. Bereich Automatisierungstechnik: SIMATIC Komponenten für die Vollintegrierte Automation. Siemens-Bestell-Nr., 1997.
77. Siemens AG. Система автоматизации S7-300. Данные модулей. Руководство. Siemens-Bestell-Nr., 2006.
78. Siemens AG. SIMATIC S7-SCL V5.3 for S7-300/400. Manual. Siemens-Bestell-Nr., 2005.
79. Siemens AG. SIMATIC NET. Основы промышленных беспроводных ЛВС. Системное руководство. Siemens-Bestell-Nr., 2008.
80. Schneider Electric. Руководство по решениям в автоматизации. Практические аспекты систем управления технологическими процессами. Schneider Electric S. A., 2011.
81. Schneider Electric. Устройства плавного пуска и торможения Altistart 48 : Каталог. Schneider Electric S. A., 2002.

Приложение А

Программа расчета параметров математической модели ленточного конвейера

```
format long
% переменные
% длина конвейера / 2
l = 500;
% погонный вес движущихся частей на грузовой ветви, Н/м
Gg = 104.5;
% погонный вес движущихся частей на порожней ветви, Н/м
Gr = 25;
% вес натяжного устройства, Н
G = 80000;
% масса участка грузовой ветви, кг
mg = 870.8;
% масса участка порожней ветви, кг
mr = 208.3;
% масса привода, кг
mpr = 2850;
M = 1;
P = 110000;
% радиус барабана, м
R = 0.4;
% коэффициент сопротивления движению
w = 0.03;
% коэффициент сопротивления движению натяжных грузов
f = 0.3;
% вязкость ленты, Н/м
eta = 1100;
% жесткость ленты, Н/м
C = 1000;
% жесткость канатов натяжного устройства, Н/м
Ck = 5*10^5;
% ускорение свободного падения, м/с^2
g = 9.8;
% _____
```

```

% матрица при вторых производных X, mtM 5x5
mtM = [2*mg+2*mp+mpr mg 0 mp; mg 4*mg mg 0; 0 mg 2*mg+2*mp mp;
        mp 0 mp 4*mp];

% матрица при перых производных X, определяющая вязкости, mtN 5x5
mtN = [2*eta -eta 0 -eta; -eta 2*eta -eta 0; 0 -eta 2*eta -eta;
        -eta 0 -eta 2*eta];

% матрица при координатах X, определяющая жесткости, mtC 5x5
mtC = [2*C -C 0 -C; -C 2*C -C 0; 0 -C 2*C+0.25*Ck -C-0.25*Ck;
        -C 0 -C-0.25*Ck 2*C+0.25*Ck];

% матрица при SGN(X), определяющая силы сопротивления, mtS 5x5
mtS = [0.5*Gg*1*w + 0.5*Gp*1*w 0 0 0; 0 Gg*1*w 0 0;
        0 0 0.5*Gg*1*w + 0.5*Gp*1*w 0; 0 0 0 Gp*1*w];

% матрица, связанная с приводом, mtP1 5x1
mtP1 = [1/R; 0; 0; 0; 0];

% матрица, связанная с тормозным моментом приводного барабана, mtP2 5x1
mtP2 = [-1/R; 0; 0; 0; 0];

% матрица, связанная с тормозным моментом хвостового барабана, mtP3 5x1
mtP3 = [0; 0; -1/R; 0; 0];

% матрица mtG 5x1
mtG = [0; 0; -0.5*Ck; 0.5*Ck];

% Z - нулевая матрица 5x5
% E - единичная матрица 5x5
% ZZ - нулевая матрица 5x1
% ZZZ - нулевая матрица 5x10
Z = zeros(4);
E = eye(4);
ZZ = zeros(4,1);
ZZZ = zeros(4,8);

% матрица состояния системы, A 8x8
A = -[Z -E; (mtM^(-1))*mtC (mtM^(-1))*mtN];

% матрица управления системы, B 8x12
% конкатенация: cat(dim, A, B)
% dim == 1 - вертикальная конкатенация
% dim == 2 - горизонтальная конкатенация
B = cat(2,
        cat(1, ZZ, (mtM^(-1))*mtP1),
        cat(1,
            ZZZ,
            cat(2, Z, -(mtM^(-1))*mtS)
        )
    );

```

```

        ),
        cat(1,
            ZZ,
            -(mtM^-1)*mtG
        ),
        cat(1,
            ZZ,
            (mtM^-1)*mtP2
        ),
        cat(1,
            ZZ,
            (mtM^-1)*mtP3
        )
    );

% матрица выхода модели, C 8x8
C    = eye(8);
D    = zeros(8,12);

```

Приложение В

Числовые значения матриц

В.1 Числовые значения матриц системы уравнений, описывающей исходную математическую модель ленточного конвейера

$$M = \begin{bmatrix} 4008,2 & 870,9 & 0 & 208,3 & 0 \\ 807,8 & 3483,2 & 870,8 & 0 & 0 \\ 0 & 870,8 & 2158,2 & 208,3 & 0 \\ 208,3 & 0 & 208,3 & 833,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3000 \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 2200 & -1100 & 0 & -1100 & 0 \\ -1100 & 2200 & -1100 & 0 & 0 \\ 0 & -1100 & 2200 & -1100 & 0 \\ -1100 & 0 & -1100 & 2200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 2000 & -1000 & 0 & -1000 & 0 \\ -1000 & 2000 & -1000 & 0 & 0 \\ 0 & -1000 & 127000 & -126000 & -250000 \\ -1000 & 0 & -126000 & 127000 & 250000 \\ 0 & 0 & -250000 & 250000 & 500000 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 30000 \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 971,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1567,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 971,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 375 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 02235 \end{bmatrix}.$$

В.2 Числовые значения матриц исходной внутренней модели ленточного конвейера

$$\tilde{A}_{10 \times 10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0,70 & 0,46 & -14,71 & 14,94 & 28,96 & -0,76 & 0,51 & -0,25 & 0,51 & 0 \\ 0,55 & -0,90 & 25,50 & -25,15 & -49,64 & 0,60 & -0,99 & 0,75 & -0,36 & 0 \\ -0,36 & 0,86 & -86,17 & 85,67 & 169,62 & -0,40 & 0,95 & -1,49 & 0,95 & 0 \\ 1,46 & -0,33 & 176,44 & -177,58 & -349,70 & 1,61 & -0,36 & 1,76 & -3,00 & 0 \\ 0 & 0 & 35,00 & -35,00 & -70,00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B}_{110 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 675,70 \\ -193,06 \\ 96,53 \\ -193,06 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B}_{210 \times 10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,26 & 0,12 & -0,04 & 0,03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,08 & -0,54 & 0,14 & -0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,04 & 0,22 & -0,52 & 0,05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,08 & -0,09 & 0,14 & -0,47 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2,94 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B}_{310 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -9,8 \end{bmatrix}.$$

В.3 Числовые значения матриц системы уравнений, описывающей движение ленты конвейера отдельно от натяжного устройства

$$M = \begin{bmatrix} 4008,2 & 870,8 & 0 & 208,3 \\ 870,8 & 3483,2 & 870,8 & 0 \\ 0 & 870,8 & 2158,2 & 208,3 \\ 208,3 & 0 & 208,3 & 833,2 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} 2200 & -1100 & 0 & -1100 \\ -1100 & 2200 & -1100 & 0 \\ 0 & -1100 & 2200 & -1100 \\ -1100 & 0 & -1100 & 2200 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} 2,5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -250000 \\ 250000 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 2000 & -1000 & 0 & -1000 \\ -1000 & 2000 & -1000 & 0 \\ 0 & -1000 & 127000 & -126000 \\ -1000 & 0 & -126000 & 127000 \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 971,25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1567,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 971,25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 375 \end{bmatrix}.$$

В.4 Числовые значения матриц внутренней модели движения ленты конвейера отдельно от натяжного устройства

$$A_{[8 \times 8]} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0,70 & 0,46 & -14,71 & 14,94 & -0,76 & 0,51 & -0,25 & 0,51 \\ 0,55 & -0,91 & 25,51 & -25,15 & 0,61 & -0,99 & 0,75 & -0,36 \\ -0,36 & 0,86 & -86,17 & 85,67 & -0,40 & 0,95 & -1,49 & 0,95 \\ 1,47 & -0,33 & 176,44 & -177,58 & 1,61 & -0,36 & 1,76 & -3,00 \end{bmatrix}.$$

$$B_{np[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,00068 \\ -0,00019 \\ 0,000097 \\ -0,00019 \end{bmatrix},$$

$$B_s[8 \times 8] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,26 & 0,12 & -0,04 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,08 & -0,54 & 0,14 & -0,02 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,04 & 0,22 & -0,52 & 0,05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,08 & -0,09 & 0,14 & -0,47 \end{bmatrix},$$

$$B_{1[8 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 28,96 \\ -49,64 \\ 169,62 \\ -349,69 \end{bmatrix}.$$

В.5 Числовые значения матрицы управления модифицированной модели движения ленты конвейера

$$B_{[8 \times 12]} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,00068 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,26 & 0,12 & -0,04 & 0,029 & 28,96 & -0,00068 & -9,65 \\ -0,0002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,08 & -0,4 & 0,14 & -0,02 & -49,64 & 0,0002 & 0,0004 \\ 0,00009 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,04 & 0,22 & -0,52 & 0,05 & 169,62 & -0,00009 & -0,001 \\ -0,0002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,08 & -0,9 & 0,14 & -0,47 & -349,69 & 0,0002 & 0,0004 \end{bmatrix}.$$

Приложение С

Исходный код программы вычисления зависимостей натяжений в ленте от ее деформаций

```
\% least-squares method for S1 and S4
delta1 = [4.25  5.5   6.76  8.01  8.64  9.26  9.75  10.6  11.12
          11.74 12.36]
S1      = [41200 46200 51200 56200 58700 61200 63700 66200 68700
          71200 73700]

delta4 = [1.34  2.59  3.85  5.1   5.72  6.35  6.99  7.59  8.21
          8.83  9.45 ]
S4      = [2500  7500  12500 17500 20000 22500 25000 27500 30000
          32500 35000]

p1      = polyfit(delta1, S1, 1)
p4      = polyfit(delta4, S4, 1)

xx1     = linspace(delta1(1), delta1(end), 100)
yy1     = polyval(p1, xx1)

xx4     = linspace(delta4(1), delta4(end), 100)
yy4     = polyval(p4, xx4)

figure;
subplot(1,2,1)
plot(delta1, S1, 'o', xx1, yy1)

subplot(1,2,2)
plot(delta4, S4, 'o', xx4, yy4)
```

Приложение D

Исходные коды программ реализации алгоритмов управления

D.1 Исходный код расчета параметров управляющих алгоритмов

```
(*
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code
* Model creator           : Roman Bukharov
* Simulink PLC Coder version : 1.4 (R2012b) 20-Jul-2012
* Target IDE selection      : Siemens SIMATIC Step 7 5.4
*
*)
FUNCTION_BLOCK FB44
  VAR_INPUT
  END_VAR

  VAR_OUTPUT
    E0ma_nominal: REAL;
    E0ma_brake   : REAL;
    MT_tail      : REAL;
    MT_drive     : REAL;
  END_VAR

  VAR
    Wt           : REAL;
  END_VAR

  CONST
    // Belt grasp angle
    alpha        := 3.14;
    // Traction coefficient
    mu           := 0.25;
    // Safety factor
    k_t          := 1.1;
    // Belt weight
    ql           := 100;
    // Roller supports weight
    qr           := 150;
    // Tension of empty branch
    Sup          := 32456;
    // Tension of load branch
    Sug          := 71152;
```

```

    // Brake disk radius
    R      := 0.4;
    // Pull device weight
    Gnu    := 80000;
    // Conveyor length
    L      := 1000;
    // Coefficient of resistance movement
    w      := 0.03;
END_CONST

// Pull factor (normal mode) nominal value
E0ma_nominal := k_t * EXP(mu * alpha);
// Pull factor (brake mode) nominal value
E0ma_brake := 1 / E0ma_nominal;
// Wt calculation
Wt := (Sup - E0ma_brake * Sug) / (E0ma_brake + 1.0);
// Tail brake moment calculation
MT_tail := 0.5 * R * (0.5 * Gnu - (ql + qr) * L * w - Sup + Wt);
// Drive brake moment calculation
MT_drive := 4 * MT_tail / R;
END_FUNCTION_BLOCK

```

D.2 Исходный код функционального блока вычисления текущего значения тягового фактора

```

(*)
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code
* Model creator           : Roman Bukharov
* Simulink PLC Coder version : 1.4 (R2012b) 20-Jul-2012
* Target IDE selection     : Siemens SIMATIC Step 7 5.4
*
*)
FUNCTION_BLOCK FB11
    VAR_INPUT
        x5      : REAL;
        x6      : REAL;
        x7      : REAL;
        x8      : REAL;
    END_VAR

    VAR_OUTPUT
        Ema_1    : REAL;
        Ema_2    : REAL;
        S1_2     : REAL;
        S4_2     : REAL;
    END_VAR

    VAR
        S4      : REAL;
        S1      : REAL;
        rtb_Product1 : REAL;
    END_VAR

    CONST
        S1_a    := 4006.9;
        S1_b    := 24130.5;

```

```

        S4_a          := 4005.6;
        S4_b          := -2904.7;
    END_CONST

    // S1 tension
    S1 := ((x5 - x6) * S1_a) + S1_b;
    // S4 tension
    S4 := (((x8 - x5) * S4_a) + S4_b);
    // E_ma
    rtb_Product1 := S1 / S4;
    // Saturation (E_ma (nominal mode))
    IF rtb_Product1 >= 20.0 THEN
        // max
        Ema_1 := 20.0;
    ELSIF rtb_Product1 > -20.0 THEN
        // default
        Ema_1 := rtb_Product1;
    ELSE
        // min
        Ema_1 := -20.0;
    END_IF;
    // S1 output
    S1_2 := S1;
    // S4 output
    S4_2 := S4;
    // E_ma (brake mode)
    Ema_2 := 1 / Ema_1;
END_FUNCTION_BLOCK

```

D.3 Исходный код функционального блока реализации алгоритма предварительного торможения конвейера

```

(*)
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code
* Model creator          : Roman Bukharov
* Simulink PLC Coder version : 1.4 (R2012b) 20-Jul-2012
* Target IDE selection    : Siemens SIMATIC Step 7 5.4
*
*)
FUNCTION_BLOCK FB22
    VAR_INPUT
        enable          : BOOL;
        v1              : REAL;
        v3              : REAL;
        Ema              : REAL;
        Ema_max          : REAL;
        _brakemomenttail : REAL;
        _brakemomentdrive : REAL;
    END_VAR

    VAR_OUTPUT
        brakemomenttail : REAL;
        drivestop        : REAL;
        brakemomentdrive : REAL;
    END_VAR

    VAR

```

```

END_VAR

VAR_TEMP
    y: REAL;
END_VAR

CONST
END_CONST

IF enable = TRUE THEN
    // Sign (v3)
    IF v3 < 0.0 THEN
        y := -1.0;
    ELSIF v3 > 0.0 THEN
        y := 1.0;
    ELSE
        y := v3;
    END_IF;
    // brake moment (tail) calculation
    brakemomenttail := _brakemomenttail * y;
    // drive stopping
    IF Ema > Ema_max THEN
        drivestop := 0;
    ELSE
        drivestop := 1;
    END_IF;
    // brake moment (drive)
    IF v1 > 0.01 THEN
        // null
        brakemomentdrive := 0.0;
    ELSE
        // Sign (v1)
        IF v1 < 0.0 THEN
            y := -1.0;
        ELSIF v1 > 0.0 THEN
            y := 1.0;
        ELSE
            y := v1;
        END_IF;
        // brake moment (drive) calculation
        brakemomentdrive := _brakemomentdrive * y;
    END_IF;
ELSE
    drivestop := 0;
    brakemomentdrive := 0;
    brakemomenttail := 0;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK

```

D.4 Исходный код функционального блока реализации регулятора натяжения ленты конвейера

```

(*
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code
* Model creator : Roman Bukharov
* Simulink PLC Coder version : 1.4 (R2012b) 20-Jul-2012
* Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7 5.4

```

```

*
*)
FUNCTION_BLOCK fb66
  VAR_INPUT
    Ema      : REAL;
    E0ma     : REAL;
  END_VAR

  VAR_OUTPUT
    Movement : REAL;
  END_VAR

  VAR
    Weight : REAL;
  END_VAR

  CONST
    Weight_a := 22230.0;
    Weight_b := 149540.0;
    Weight_c := 3013810.0;

    Movement_a := 0.0002;
    Movement_b := 0.4257;
  END_CONST

  // Weight calculation
  Weight := ((( -(Ema - E0ma)) + E0ma) ** 2.0 * Weight_a) -
            ((( -(Ema - E0ma)) + E0ma) * Weight_b)) + Weight_c;
  // Saturate
  IF Weight >= 100000.0 THEN
    Weight := 100000.0;
  ELSIF NOT (weight > -100000.0) THEN
    Weight := -100000.0;
  END_IF;
  // Movement calculation
  Movement := (Movement_a * Weight) + Movement_b;
END_FUNCTION_BLOCK

```

D.5 Исходный код функционального блока реализации интегратора

```

FUNCTION_BLOCK FB70
  // Integral calculation
  VAR_INPUT
    IN      : REAL;
    RESET   : BOOL;
    ENABLE   : BOOL;
  END_VAR

  VAR_OUTPUT
    OUT      : REAL;
    RESET_ACTIV : BOOL;
  END_VAR

  VAR
    OUT_LOW  : REAL;
    LAST_IN  : REAL;
    LAST_OUT : REAL;
  END_VAR

```

```

        LAST_TIME      : REAL;
        ACTUAL_TIME    : REAL;
        X : REAL;
        n : INT;
END_VAR

// Reset of values
RESET_ACTIV := RESET;
IF RESET = TRUE THEN
    OUT      := 0.0;
    OUT_LOW  := 0.0;
    LAST_OUT := 0.0;
    LAST_TIME := ACTUAL_TIME;
    ACTUAL_TIME := TIME_TO_DINT(TIME_TCK()) / 1000.0;
    X         := 0.0;
    n         := 0;
ELSIF ENABLE = FALSE THEN
    n := 0;
ELSE
    //First Integral Cyclus
    IF n = 0 THEN
        ACTUAL_TIME := TIME_TO_DINT(TIME_TCK()) / 1000.0;
        LAST_TIME   := ACTUAL_TIME;
        LAST_IN     := IN;
        n           := 1;
    ELSE
        // Input
        ACTUAL_TIME := TIME_TO_DINT(TIME_TCK()) / 1000.0;

        // Overflow Correction
        IF ACTUAL_TIME < LAST_TIME THEN
            X := (ACTUAL_TIME - LAST_TIME + 2147483.647) *
                (IN + LAST_IN) / 2;
        ELSE
            X := (ACTUAL_TIME - LAST_TIME) *
                (IN + LAST_IN) / 2;
        END_IF;

        LAST_TIME := ACTUAL_TIME;
        LAST_IN   := IN;

        // Integral Calculation
        LAST_OUT := OUT;
        OUT      := LAST_OUT + X;
        OUT_LOW  := (OUT - LAST_OUT) - X + OUT_LOW;

        IF OUT_LOW <> 0 THEN
            IF ABS(OUT/OUT_LOW) < 10000000 THEN
                LAST_OUT := OUT;
                OUT      := OUT - OUT_LOW;
                OUT_LOW  := (OUT - LAST_OUT) + OUT_LOW;
            END_IF;
        END_IF;
    END_IF;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK

```

D.6 Исходный код функционального блока реализации оптимального регулятора скорости движения ленты конвейера

```
(*
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code
* Model creator                : Roman Bukharov
* Simulink PLC Coder version    : 1.4 (R2012b) 20-Jul-2012
* Target IDE selection         : Siemens SIMATIC Step 7 5.4
*)
FUNCTION_BLOCK FB77
VAR_INPUT
    // belt speed value
    V0      : REAL;
    // integral of belt speed value
    V0_int  : REAL;
    // start signal
    start   : BOOL;
    //speeds
    v1      : REAL;
    v2      : REAL;
    v3      : REAL;
    v4      : REAL;
    v5      : REAL;
    // coordinates
    x1      : REAL;
    x2      : REAL;
    x3      : REAL;
    x4      : REAL;
    x5      : REAL;
END_VAR

VAR_OUTPUT
    // control signal
    w        : REAL;
    // drive start
    _start   : BOOL;
END_VAR

VAR
    // K matrix
    Feedback : ARRAY[1..10, 1..3] OF REAL :=
        0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0,
        0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0      ,0,
        108.5,116.6,69.8,23.5,4.03,668.5,771.6,485.5,190.7,96.1;
    // -eye(10)*inv(A-B*UPR)*U
    V        : ARRAY[1..1, 1..10] OF REAL :=
        25.388,
        32.487,
        34.362,
        28.000,
        3.201,
        -1,
        -1,
        -1,
        -1,
        -1;
```



```

// U matrix
U      : ARRAY[1..1, 1..10] OF REAL :=
      -1,
      -1,
      -1,
      -1,
      -1,
      -1,
      -1,
      -1,
      -1,
      -1;

// State coordinates
Coords : ARRAY[1..1, 1..10] OF REAL;
// Control signals matrix
Control : ARRAY[1..1, 1..3] OF REAL;
// temporary variables
Sum1,
Sum2,
Sum3   : ARRAY[1..1, 1..10] OF REAL;
Sum4   : ARRAY[1..3, 1..10] OF REAL;
END_VAR

VAR_TEMP
// iterators
row      : INT;
col      : INT;
inner    : INT;
END_VAR

CONST
END_CONST

// enable drive
_start := start;
IF start THEN
  // state coordinates
  Coords[1,1] := x1;
  Coords[1,2] := x2;
  Coords[1,3] := x3;
  Coords[1,4] := x4;
  Coords[1,5] := x5;
  Coords[1,6] := v1;
  Coords[1,7] := v2;
  Coords[1,8] := v3;
  Coords[1,9] := v4;
  Coords[1,10] := v5;
  FOR col := 1 TO 10 BY 1 DO
    //input and -eye(10)*inv(A-B*UPR)*U product
    Sum1[1, col] := 0.13*V0*V[1, col];
    //integral input and U matrix product
    Sum2[1, col] := 0.13*V0_int*U[1, col];
  END_FOR;
  //
  FOR col := 1 TO 10 BY 1 DO
    Sum3[1, col] := Coords[1, col] - Sum1[1, col];
  END_FOR;
  //
  FOR col := 1 TO 10 BY 1 DO
    Sum4[1, col] := Sum3[1, col] + Sum2[1, col];
  END_FOR;

```

```

END_FOR;
// Control signals matrix calculation
FOR row := 1 TO 10 BY 1 DO
    FOR col := 1 TO 3 BY 1 DO
        FOR inner := 1 TO 3 BY 1 DO
            Control[row,col] := Feedback[row,inner] *
                                Sum4[inner,col];
        END_FOR;
    END_FOR;
END_FOR;
// Output
w := Control[1,3];
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK

```

D.7 Список переменных программы управляющего контроллера

Таблица D.1: Список переменных программы управляющего контроллера

Имя переменной	Адрес	Тип	Комментарий
Pull factor	FB 11	FB 11	Функциональный блок вычисления текущего значения тягового фактора
Brake algorithm	FB 22	FB 22	Функциональный блок алгоритма торможения конвейера
Initialization	FB 44	FB 44	Функциональный блок вычисления начальных параметров
Derivative	FB 55	FB 55	Функциональный блок реализации дифференцирования
Pull device control	FB 66	FB 66	Функциональный блок алгоритма стабилизации тягового фактора
Integrator	FB 70	FB 70	Функциональный блок реализации интегрирования
Speed control	FB 77	FB 77	Функциональный блок оптимального регулятора скорости
input start	I 1.0	BOOL	Сигнал пуска конвейера (вход)
x1	MD 100	REAL	Перемещение в первой характерной точке ленты
x2	MD 104	REAL	Перемещение во второй характерной точке ленты
x3	MD 108	REAL	Перемещение в третьей характерной точке ленты
x4	MD 112	REAL	Перемещение в четвертой характерной точке ленты
x5	MD 116	REAL	Перемещение натяжного устройства

brake	ID 128	REAL	Сигнал включения процесса останова
omega	ID 132	REAL	Сигнал управления оптимального регулятора скорости
V0	ID 136	REAL	Задание скорости движения ленты
V1	ID 100	REAL	Скорость первой характерной точки ленты
V2	ID 104	REAL	Скорость второй характерной точки ленты
V3	ID 108	REAL	Скорость третьей характерной точки ленты
V4	ID 112	REAL	Скорость четвертой характерной точки ленты
V5	ID 116	REAL	Скорость натяжного устройства
V0 int	MD 120	REAL	Интеграл задания скорости движения ленты
Cycle execution	OB 1	OB 1	Блок циклического выполнения основной программы
CYC INT5	OB 35	OB 35	Блок выполнения программы по прерыванию времени
COMPLETE RESTART	OB 100	OB 100	Блок выполнения программы при запуске контроллера
output start	Q 1.0	BOOL	Сигнал пуска конвейера (выход)
Ema brake	QD 100	REAL	Текущее значение тягового фактора для режима торможения
Ema nominal	QD 104	REAL	Текущее значение тягового фактора для номинального режима
S1 2	QD 108	REAL	Текущее значение натяжения ленты в точке набегания
S4 2	QD 112	REAL	Текущее значение натяжения ленты в точке сбегания
brake tail	QD 116	REAL	Значение тормозного момента для хвостового барабана (выход)
brake drive	QD 120	REAL	Значение тормозного момента для приводного барабана (выход)
stop	QD 124	REAL	Сигнал останова привода
_Ema brake max	QD 128	REAL	Задание значения тягового фактора для режима торможения
_Ema nominal min	QD 132	REAL	Задание значения тягового фактора для номинального режима
_brake moment drive nom	QD 136	REAL	Значение тормозного момента для приводного барабана (задание)
_brake moment tail nom	QD 140	REAL	Значение тормозного момента для хвостового барабана (задание)
Pull device movement	QD 152	REAL	Перемещение натяжного устройства (выход)
drive control	QD 156	REAL	Управление приводом
TIME_TCK	SFC 64	SFC 64	Системное время

D.8 Исходный код основной управляющей программы

Основной блок OB1 (циклическое исполнение):

```

OB1 : "Main Program Sweep (Cycle)"
Network 1: pull factor calculation
    CALL "Pull factor" , DB1          FB11    -- Current value of the Pull Factor calculation
    x1   := "x1"                      ID100
    x2   := "x2"                      ID104
    x3   := "x3"                      ID108
    x4   := "x4"                      ID112
    Ema_1 := "Ema_nominal"            QD104
    Ema_2 := "Ema_brake"              QD100
    S1_2  := "S1_2"                  QD108
    S4_2  := "S4_2"                  QD112
    NOP   0

Network 2: Brake algorithm
    A      #temp                      #temp
    =      L      31.0
    BLD    103
    A(
    CALL   FB      33 , DB3
    val    := "brake"                  ID128    -- enable brake algorithym
    brake := #temp                      #temp
    A      BR
    )
    JNB    _001
    CALL   "Brake algorithm" , DB2      FB22    -- Control signals for conveyor brake
    enable := L31.0
    v1     := "x5"                      ID116
    v3     := ID120
    Ema     := "Ema_brake"              QD100
    Ema_max := "_Ema_brake_max"         QD128
    _brakemomenttail := "_brake_moment_tail_nom" QD140
    _brakemomentdrive := "_brake_moment_drive_nom" QD136
    brakemomenttail := "brake_tail"     QD116    -- brake moment tail
    drivestop      := "stop"            QD124    -- drive stop
    brakemomentdrive := "brake_drive"    QD120    -- brake moment drive
_001: NOP    0

Network 3: Pull factor stabilization
    CALL "Pull device control" , DB6    FB66    -- Pull factor stabilization using pull device control
    Ema   := "Ema_nominal"              QD104
    EOma  := "_Ema_nominal_min"         QD132
    Movement := "Pull_device_movement"  QD152
    NOP   0

Network 4: Speed control
    A      "input_start"                I1.0    -- start conveyor
    =      L      31.0
    BLD    103
    CALL   "Speed control" , DB7        FB77    -- Optimal speed controller
    V0     := "V0"                      ID136    -- Belt speed
    V0_int := #belt_speed_int           #belt_speed_int
    start  := L31.0
    v1     := "V1"                      MD100
    v2     := "V2"                      MD104
    v3     := "V3"                      MD108
    v4     := "V4"                      MD112
    v5     := "V5"                      MD116
    x1     := "x1"                      ID100
    x2     := "x2"                      ID104
    x3     := "x3"                      ID108
    x4     := "x4"                      ID112
    x5     := ID140
    w      := "omega"                  ID132    -- omega
    _start := "output_start"           Q1.0     -- output start drive signal
    NOP   0

```

Блок OB100 (исполнение при запуске контроллера):

```
OB100 : "Complete Restart"
Network 1: Parameters initialization
CALL "Initialization" , DB4          FB44      -- Initial parameters calculation
E0ma_nominal:="_Ema_nominal_min"      QD132
E0ma_brake := "_Ema_brake_max"        QD128
MT_tail := "_brake_moment_tail_nom"   QD140
MT_drive := "_brake_moment_drive_nom" QD136
NOP 0
```

Блок OB135 (исполнение по циклическому прерыванию каждые 100 мс):

```
OB35 : "Cyclic Interrupt"
Network 1: X calculation
A #enable #enable
= L 22.1
BLD 103
A(
A #enable #enable
= L 22.3
BLD 103
A(
A #enable #enable
= L 22.5
BLD 103
A(
A #enable #enable
= L 22.7
BLD 103
A(
A #enable #enable
= L 23.1
BLD 103
CALL "Integrator" , DB70          FB70
IN := "V1"                       ID100
RESET :=
ENABLE := L23.1
OUT := "x1"                       MD100
RESET_ACTIV:=
A BR
)
JNB _001
CALL "Integrator" , DB70          FB70
IN := "V2"                       ID104
RESET :=
ENABLE := L22.7
OUT := "x2"                       MD104
RESET_ACTIV:=
_001: A BR
)
JNB _002
CALL "Integrator" , DB70          FB70
IN := "V3"                       ID108
RESET :=
ENABLE := L22.5
OUT := "x3"                       MD108
RESET_ACTIV:=
_002: A BR
)
JNB _003
CALL "Integrator" , DB70          FB70
IN := "V4"                       ID112
RESET :=
ENABLE := L22.3
OUT := "x4"                       MD112
RESET_ACTIV:=
_003: A BR
)
JNB _004
CALL "Integrator" , DB70          FB70
IN := "V5"                       ID116
RESET :=
ENABLE := L22.1
OUT := "x5"                       MD116
RESET_ACTIV:=
_004: NOP 0
```

```

Network 2 : Integrator 1
  A      #enable          #enable
  =      L      22.1
  BLD    103
  CALL   "Integrator" , DB70      FB70
  IN      := "V0"                ID136      -- Belt speed
  RESET   :=
  ENABLE  := L22.1
  OUT     := "V0_int"            MD120
  RESET_ACTIV:=
  NOP     0

Network 3 : Integrator 2
  A      #enable          #enable
  =      L      22.1
  BLD    103
  CALL   "Integrator" , DB70      FB70
  IN      := "omega"             ID132      -- omega
  RESET   :=
  ENABLE  := L22.1
  OUT     := "drive_control"      QD156
  RESET_ACTIV:=
  NOP     0

```