

На правах рукописи



Кожубаев Юрий Нургалиевич

**СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ
ТРАНСПОРТЕРНЫХ ЛЕНТ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНВЕЙЕРОВ
СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НЕЧЕТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Системы и технологии управления»

Научный руководитель: **Семенов Игорь Михайлович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Загривный Эдуард Анатольевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»,
профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики

Лукичев Дмитрий Вячеславович
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики», доцент кафедры
электротехники и прецизионных электромеханических систем

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.
В.И. Ульянова (Ленина)»**

Защита состоится 29 декабря 2016 г., в 14 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.20 в ФГАОУ ВО «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт – Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте университета <http://www.spbstu.ru/science>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Постоянное улучшение технико-экономических показателей ленточных конвейеров вследствие увеличения мощности приводов, скорости движения конвейерных (транспортных) лент, увеличения длины конвейеров в одном ставе и длины конвейерных линий приводит к тому, что конвейеры получили широкое распространение из-за существенных преимуществ перед другими видами транспортных систем. Однако увеличение производительности ленточных конвейеров ведет к возрастанию нагрузок на конвейерные ленты, что требует применения более дорогостоящих лент. Т.к. стоимость конвейерных лент составляет более 50% стоимости конвейеров, то для дальнейшего улучшения технико-экономических показателей ленточных конвейеров необходимо обеспечить снижение нагрузок на конвейерные ленты, без снижения производительности конвейеров.

Снижение срока службы конвейерных лент происходит из-за их износа и растяжения в процессе эксплуатации ленточных конвейеров. Поэтому необходимо обеспечить снижение интенсивности изнашивания транспортных лент. Под интенсивностью изнашивания транспортных лент понимают отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы. Под изнашиванием понимается процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличение его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. Износ транспортных лент является результатом их изнашивания. По видам износ ленты можно подразделить на срывы участков резины рабочей обкладки, ее отслоение от сердечника, истирание рабочей и нерабочей обкладок, истирание нерабочей обкладке при упругом проскальзывании ленты на барабане и при пробуксовке, проколы и порывы ленты, продольные разрывы лент, поперечные разрывы лент, расслоение прокладок.

Экспериментальными исследованиями установлено, что на износ нижней обкладки, в том числе от пробуксовки, приходится более 30% всех износов конвейерных лент. А для протяженных ленточных конвейеров данный вид износа составляет более 50% от всех видов износа. Из-за износа нижней обкладки лент возникает повреждение сердечника, истирание и срывы прокладок лент. Износ нижней обкладки лент является следствием высоких касательных напряжений, передаваемых обкладкой сердечнику, больших давлений ленты на приводные барабаны. При увеличении длины конвейера увеличивается суммарная масса перевозимого груза, увеличивается общее натяжение ленты, что приводит к увеличению величины давления ленты на поверхность приводного, натяжного и отклоняющего барабанов, роликов, что в свою очередь ведет к увеличению износа нижней обкладки ленты.

Современные конвейеры обычно имеют несколько приводов. Применение многоприводных ленточных конвейеров позволяет снизить величины максимальных натяжений

лент по сравнению с одноприводными конвейерами. Однако у многоприводных ленточных конвейеров возможен режим работы, когда при возрастании нагрузки на приводных барабанах возникает пробуксовка ленты. Данный аварийный режим работы конвейеров проявляется в потере устойчивости конвейерных лент на приводных барабанах, т.е. в их проскальзывании относительно приводных барабанов.

Проскальзывание лент на приводных барабанах конвейеров является причиной простоев и возникновения пожаров, сопровождаемых большими убытками и человеческими жертвами. Для обеспечения надежной работы конвейера необходимо обеспечить отсутствие пробуксовки. Устранение проскальзывания лент обычно решается путем регулирования натяжения лент посредством натяжных устройств таким образом, чтобы обеспечить необходимое натяжение и исключить возможность работы ленточных конвейеров в аварийном режиме. Однако данный способ управления приводит к увеличению натяжения лент. Последнее приводит к повышенному износу лент и их обрывам.

Вместе с тем недостаточное натяжение приводит к проскальзыванию конвейерных лент на приводных барабанах, а излишнее способствует увеличению износа лент и их обрывам. Проскальзывание лент и увеличение их натяжения приводит к повышению интенсивности изнашивания лент, что снижает их срок службы. Поэтому для снижения интенсивности изнашивания транспортерных лент протяженных конвейеров необходимо обеспечить такое минимально возможное натяжение конвейерных лент по всей длине конвейера, при котором возможность аварий, связанных с проскальзыванием лент была бы исключена.

Наиболее эффективным методом решения данной задачи является разработка систем автоматического управления электроприводами ленточных конвейеров, которые обеспечивают:

- минимальное натяжение конвейерных лент;
- рациональное распределение нагрузки между приводами конвейеров;
- равный запас по тяговой способности приводных барабанов, независимо от реализуемой на них мощности.

Объект исследования: протяженные многоприводные ленточные конвейеры.

Степень разработанности:

Работа базируется на результатах исследований Шахмейстера Л.Г., Спиваковского А.О., Дмитриева В.Г., Галкина В.И., Тарасова Ю.Д., Биличенко Н.Я., Полунина В.Г. и др.

Цель работы – снижение интенсивности изнашивания конвейерных лент средствами электропривода.

Идея работы – путем рационального распределения нагрузки между приводами обеспечить эффективную передачу тягового усилия от приводных барабанов конвейерной

ленте, гарантирующую отсутствие пробуксовки ленты при минимально возможном ее натяжении.

Задачи исследования:

1. Исследование причин снижения долговечности лент.
2. Анализ систем управления приводами с точки зрения их способности обеспечить работу конвейеров без пробуксовки лент.
3. Разработка алгоритмов управления электроприводами, обеспечивающих работу конвейеров без пробуксовки при минимально-возможном натяжении лент.
4. Разработка модели ленточного конвейера, с целью ее использования для анализа работы ленточного конвейера.
5. Экспериментальные (на модели) исследования.

Методы исследований:

Для решения поставленных задач использован комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научных работ, опыт эксплуатации ленточных конвейеров, методы теории автоматического управления электромеханическими системами.

Научная новизна работы:

1. Разработана имитационная модель ленточного конвейера, отражающая основные свойства ленточных конвейеров, которую можно использовать для разработки, наладки и исследования работы ленточных конвейеров в статических и динамических режимах.
2. Предложены способы управления многоприводными ленточными конвейерами, которые при отсутствии проскальзывания ленты, обеспечивают:
 - минимальное натяжение конвейерной ленты;
 - рациональное распределение нагрузки между приводами конвейера;
 - равный запас по тяговой способности приводных барабанов, независимо от реализуемой на них мощности.
3. Разработаны и исследованы системы управления электроприводами ленточных конвейеров, реализующие предложенные способы управления.
4. Предложен способ измерения коэффициента сцепления лент с приводными барабанами.

Защищаемые положения:

1. Имитационная модель ленточного конвейера, которая учитывает основные свойства ленточных конвейеров, вязкоупругие свойства конвейерных лент, процесс массопереноса, взаимодействие конвейерной ленты с приводными барабанами.

2. Система управления электроприводами ленточного конвейера на базе нечеткого регулятора, которая, при отсутствии проскальзывания конвейерной ленты относительно приводных барабанов, обеспечивает:

- минимальное натяжение конвейерной ленты;
- рациональное распределение нагрузки между приводами конвейера;
- равный запас по тяговой способности приводных барабанов, независимо от реализуемой на них мощности.

Обоснованность и достоверность защищаемых положений, выводов, результатов и рекомендаций подтверждается использованием в работе комплексной методики исследования на основе математического моделирования с удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая ценность работы:

1. Имитационная модель ленточного конвейера может быть использована для контроля эксплуатационных характеристик ленточных конвейеров и изучения устройств непрерывного транспорта.

2. Предложенные способы управления электроприводами ленточных конвейеров и измерения фактического значения коэффициента сцепления ленты с приводным барабаном могут быть использованы в проектных организациях при разработке новых конвейеров.

3. Предложенные варианты систем управления могут быть использованы при проектировании новых конвейеров и модернизации действующих конвейеров.

Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: VIII Международной молодежной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2007» в секции «Автоматика и электротехника» (г.Ухта, Ухтинский государственный технический университет, 2007), международной научно-практических конференции «XXXIX НЕДЕЛЯ НАУКИ» в секции «Системы автоматического управления электромеханическими объектами и электромеханическими комплексами» (СПб, СПбГПУ, 2010г.), научно-практической конференции с международным участием «XLII НЕДЕЛЯ НАУКИ» в секции «Системы и технологии управления» (СПб, СПбГПУ, 2013г.), международном научной конференции Symposium on Automated Systems and Technologies» (г.Ганновер, Германия, Ганноверский университет имени Лейбница, 2014г.).

Личный вклад автора:

1. Создана имитационная модель ленточного конвейера, которая отличается от известных учетом вязкоупругих свойств конвейерных лент, процесса массопереноса, взаимодействия конвейерной ленты с приводными барабанами.

2. Исследованы и предложены способы управления многоприводными ленточными конвейерами, которые обеспечивают:

- минимальное натяжение конвейерной ленты;
- рациональное распределение нагрузки между приводами конвейера;
- равный запас по тяговой способности приводных барабанов, независимо от реализуемой на них мощности.

3. Разработаны системы управления электроприводами ленточных конвейеров, реализующие предложенные способы управления.

4. Предложен способ измерения фактического значения коэффициента сцепления лент с приводными барабанами.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из которых 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента на полезные модели, свидетельство о государственной регистрации программы для электронно-вычислительных машин.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований. Полный объем диссертации – 111 страниц, в том числе рисунков – 61, таблиц – 8.

Основное содержание работы:

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика и сформулирована идея работы, на основании которой определены задача и цель исследования, практическая ценность и новизна результатов работы, выделены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния конвейеров, транспортерных лент, электромеханических систем конвейеров. Проанализированы причины снижения долговечности конвейерных лент, проскальзывания конвейерных лент относительно приводных барабанов. Проведен анализ влияния динамических процессов в ленточных конвейерах на распределение нагрузки между приводами. Проанализированы существующие системы управления электромеханическими системами конвейеров с точки зрения их способности обеспечить работу конвейеров без пробуксовки лент.

Во второй главе разработана имитационная модель ленточного конвейера, реализованная в программной среде Matlab/Simulink, которая отличается от известных учетом вязкоупругих свойств конвейерных лент, процесса массопереноса, взаимодействия конвейерной ленты с приводными барабанами. Проведены исследования (на разработанной модели) различных способов управления электромеханическими системами ленточных

конвейеров с целью определения их эффективности в обеспечении передачи ленте тягового усилия. Представлены результаты данных исследований.

В третьей главе предложены способы и принципы управления электромеханическими системами конвейеров, обеспечивающие минимальное натяжение конвейерных лент при равном запасе по тяговой способности приводных барабанов. С помощью блока Fuzzy Logic Toolbox в программной среде Matlab/Simulink разработана система управления электроприводами с нечетким регулятором, реализующая предложенные способы управления. Проведены исследования (на модели) работы системы управления. Предложен способ измерения фактического значения коэффициента сцепления лент с приводными барабанами.

Заключение отражает выводы по результатам проведенных в работе исследований в соответствии с целью и поставленными задачами.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Имитационная модель ленточного конвейера, которая учитывает основные свойства ленточных конвейеров, вязкоупругие свойства конвейерных лент, процесс массопереноса, взаимодействие конвейерной ленты с приводными барабанами.

Наиболее часто свойства лент представляют моделью Фохта (рисунок 1а). Напряжение и деформация для данной модели в случае простого растяжения связаны зависимостью:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

где σ – напряжение, Па; E – модуль упругости, Па; ε – относительная деформация; η – коэффициент внутреннего трения, Па с;

Более точное описание дают модели, составленные из нескольких элементов одноподобных реологических моделей (рисунок 1б).

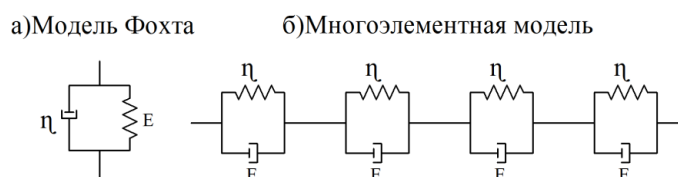


Рисунок 1 – Модели конвейерной ленты

Ленточный конвейер может быть представлен моделью, в которой распределенные массы ленты, груза, барабанов заменены определенным числом сосредоточенных масс, связанных невесомыми упругими и демпфирующими звеньями, представленной на рисунке 2.

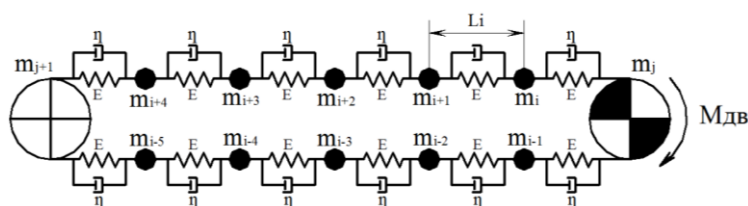


Рисунок 2 – Модель с сосредоточенными параметрами

Разбив контур конвейера на n участков одинаковой длины l , м, приводя действующую на ленту силу сопротивления к выбранным сосредоточенным массам, получена система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, представленная в формуле:

$$\frac{d^2 u_i}{dt^2} = \frac{1}{m_i} (-C \cdot (2u_i - u_{i+1} - u_{i-1}) - B \cdot (2\dot{u}_i - \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_{i-1}) - W_i + F_i), \quad (2)$$

при $i = 1, 2, \dots, n - 1$, где $C = \frac{iBE}{l}$ – коэффициент жесткости ленты; $B = \frac{\eta Bi}{l}$ – коэффициент вязкости ленты; u_{i-1}, u_i, u_{i+1} – величина растяжения соответствующего участка ленты, м; $\dot{u}_{i-1}, \dot{u}_i, \dot{u}_{i+1}$ – скорость растяжения соответствующего участка ленты, м/с; m_i – масса соответствующего участка, кг; F_i – сила (усилие привода – F_n , усилие натяжного устройства – F_n), действующая на соответствующем участке ленты, Н; W_i – сила сопротивления на соответствующем участке ленты, нелинейно зависящая от искомых переменных, Н.

С учетом формулы (2) получена структурная схема модели ленточного конвейера, учитывающая упруго-вязкие свойства ленты, фрагмент которой представлен на рисунке 3.

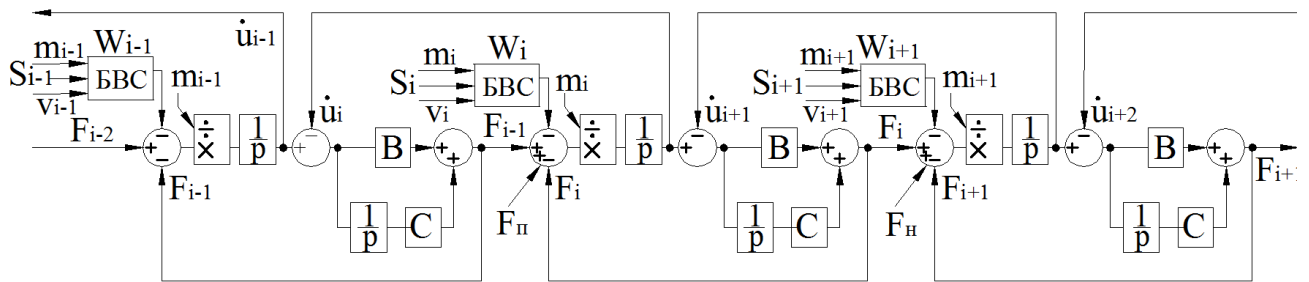


Рисунок 3 – Фрагмент имитационной модели отдельных участков конвейера

На рисунке 3 введены обозначения: v_{i-1}, v_i, v_{i+1} – скорости движения сосредоточенных масс соответствующих участков ленты, м/с, BBC – блок вычисления силы сопротивления движению участка ленты. Сила сопротивления движению ленты на участке находится путем суммирования всех сил сопротивления движению как распределенных, так и сосредоточенных, возникающих на данном участке при движении ленты.

В процессе эксплуатации конвейерная лента подвергается упругим деформациям, в результате чего происходит изменение скоростей движения разных участков ленты в зависимости от величины натяжения. Относительное удлинение ленты получается:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (3)$$

где l и l_0 – длина соответственно деформированного участка ленты и недеформированного.

Отсюда длина участка деформированной ленты:

$$l = l_0(\varepsilon + 1). \quad (4)$$

Принимаем, что в участок с зоной деформации и относительным удлинением ε_1 за промежуток времени Δt входит отрезок недеформированной ленты длиной $v_1 \Delta t / (1 + \varepsilon_1)$. За это же время из одного участка в другой участок должен войти такой же отрезок нерастянутой ленты, равный $v_2 \Delta t / (1 + \varepsilon_2)$. Приравнявая эти выражения, получим:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{1 + \varepsilon_1}{1 + \varepsilon_2}, \quad (5)$$

где v_1 и v_2 – линейные скорости участков ленты, м/с.

Принимая скорость движения ленты на участке огибания приводного барабана v_1 и рассчитав величины относительных удлинений участков лены, получаем:

$$v_2 = v_1 \frac{1 + \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1}. \quad (6)$$

С учетом этого получена структурная схема модели распределения скоростей участков ленточного конвейера, фрагмент которой представлен на рисунке 4.

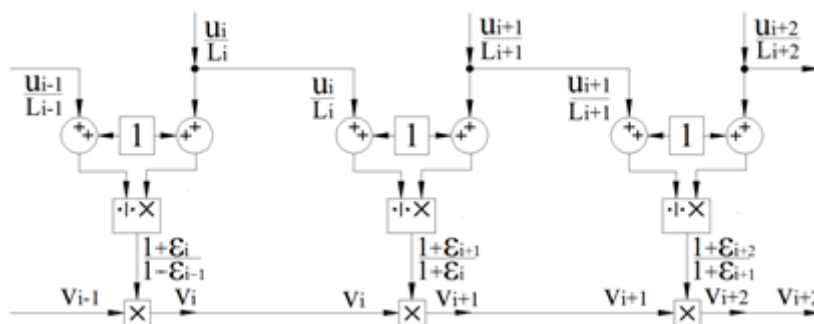


Рисунок 4 – Фрагмент имитационной модели распределения скоростей участков конвейера

Для создания имитационной модели необходим учет распределения массы груза по длине конвейера в зависимости от поступающего на конвейер грузопотока. На участке загрузки, скорость которого, $v(t)$, м/с, грузопоток формирует линейную плотность $\rho(t)$, которая находится по формуле:

$$\rho(t)|_{x=0} = \frac{dm_{ex}(t)}{dt} \cdot \frac{1}{v(t)}, \quad (7)$$

где $v(t)$ – скорость движения участка ленты конвейера, м/с; $\rho_{ex\ i}(t)$ – входная и $\rho_{вых\ i}(t)$ – выходная плотности для i – го участка ленты, скорость которого $v_i(t)$, $m_{ex}(t)$ – масса груза, кг.

Масса груза на участке ленты определяется следующим образом:

$$m_i(t) = \int_0^t v_i(t) \cdot [\rho_{ex\ i}(t) - \rho_{вых\ i}(t)] \cdot dt = \int_0^t v_i(t) \cdot [\rho_{ex\ i}(t) - \rho_{ex\ i}(t - \tau)] \cdot dt \quad (8)$$

где $\tau(t)$ – переменное запаздывание, с; l – длина конвейера, м.

С учетом этого получим структурную схему модели ленточного конвейера, фрагмент которой представлен на рисунке 5.

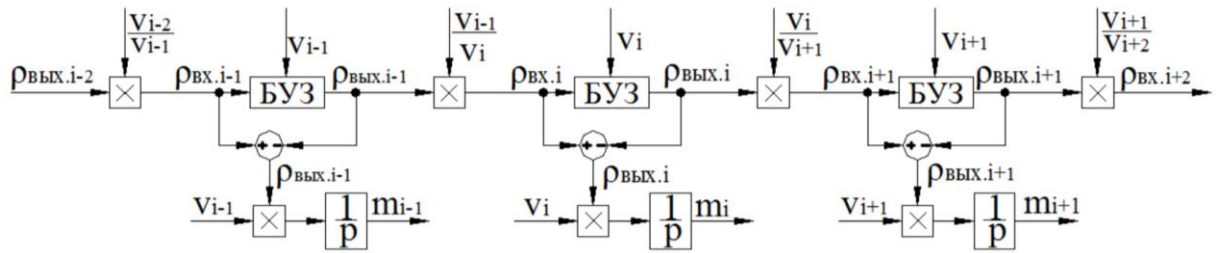


Рисунок 5 – Фрагмент структурной схемы модели переноса груза

На рисунке 5 представлена структурная схема модели переноса груза, где БУЗ – блок управляемого транспортного запаздывания, на управляющий вход которого подается скорость ленты $v(t)$, а на информационный вход подается плотность груза $\rho(t)$. Формируемые переменные массы учитываются в структурной схеме модели динамики ленточного конвейера.

С учетом рисунков 3, 4, 5 получим фрагмент структурной схемы имитационной модели ленточного конвейера:

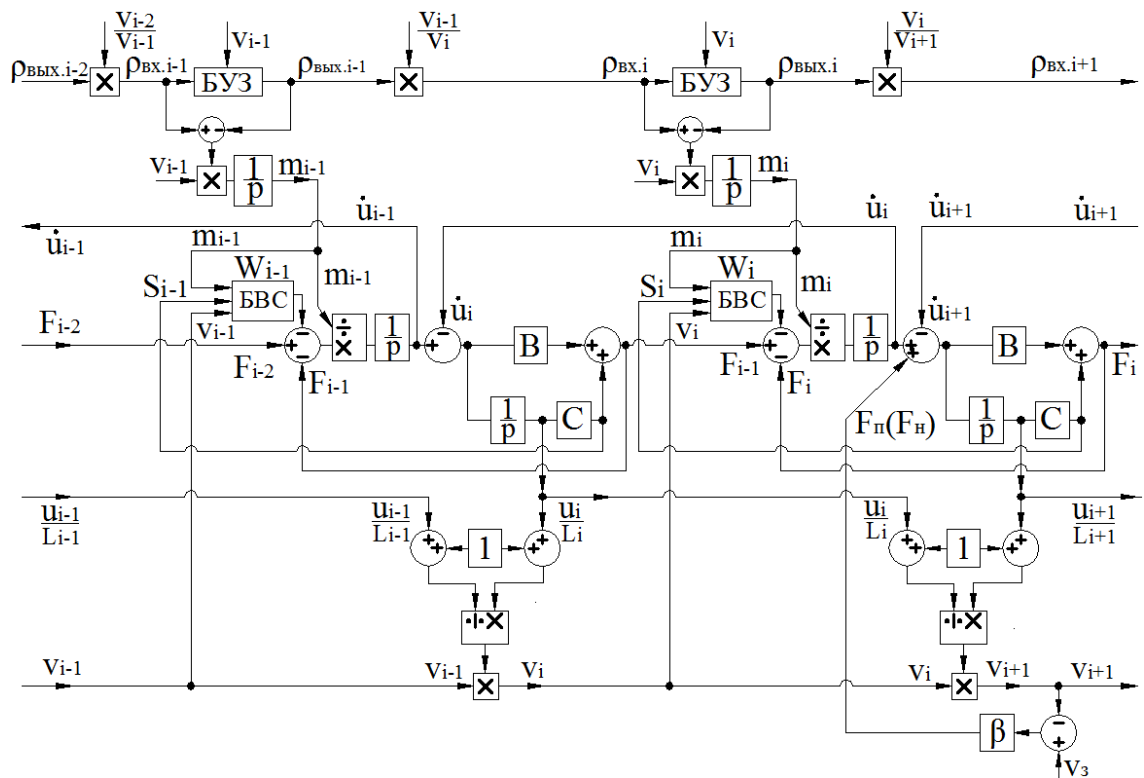


Рисунок 6 – Фрагмент структурной схемы модели ленточного конвейера

Разработанная модель исследована на примере моделирования ленточного конвейера, параметры и режимы работы которого схожи с ленточным конвейером, задействованным при строительстве двухпутного перегонного тоннеля, соединившим строящиеся станции Санкт-Петербургского метрополитена. Исходные данные модели конвейера представлены в таблице 1.

Исходные данные имитационной модели ленточного конвейера

Наименование показателя	Обозн.	Ед.изм	Показатель
Длина конвейера	L	м	4000
Ширина ленты	H	мм	1000
Транспортируемый материал	-	-	Суглинок, торф и песок
Производительность	Q_{\max}	т/ч	1000
Скорость движения ленты	v	м/с	3,5
Мощность двигателей	N_i	кВт	5x160
Тип привода	-	-	Мотор-редуктор с частотным регулятором

Структурная схема выбранного ленточного конвейера представлена на рисунке 7.

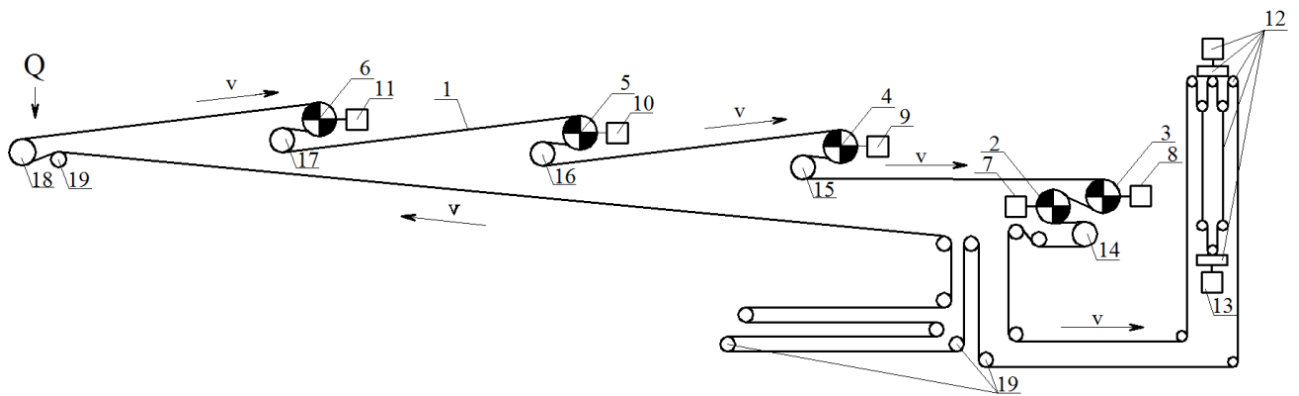


Рисунок 7 – Схема ленточного конвейера: 1 – конвейерная лента; 2, 3, 4, 5, 6 – приводные барабаны; 7, 8, 9, 10, 11, 13 – приводы; 12 – натяжное устройство; 14, 15, 16, 17, 18 – отклоняющие барабаны; 19 – отклоняющие ролики

Для исследования работы имитационной модели ленточного конвейера реализованы схемы управления электроприводами конвейеров, представленные на рисунках 8 и 9.

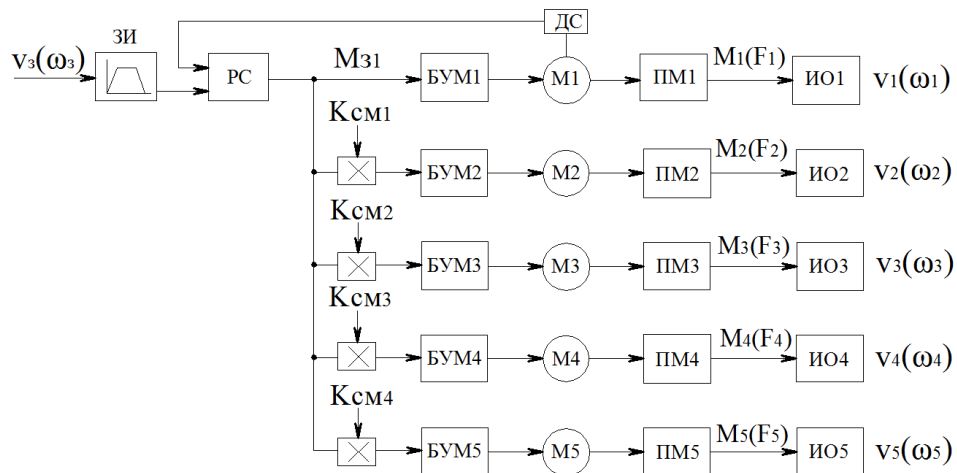


Рисунок 8 – Функциональная схема управления соотношением моментов

На рисунке 8 представлены: БУМ – блоки управления моментами приводов, РС – регулятор скорости, М – электродвигатели, ПМ – передаточные механизмы, ЗИ – задатчик интенсивности, ДС – датчик скорости, ИО – исполнительные органы, $K_{см}$ – коэффициентов соотношения моментов приводов, M – момент привода, v – скорость движения исполнительного органа. Первый привод – ведущий работает в режиме регулирования скорости и в соответствии с заданием обеспечивает требуемую скорость движения ленты. Для обеспечения плавного пуска конвейера на входе этого привода включен задатчик интенсивности ЗИ. Ведомые приводы работают в режиме регулирования моментов. Все приводы через свои исполнительные органы – приводные барабаны передают тяговые усилия ленте. Величины моментов (усилий), реализуемые приводами 2–4, устанавливаются с помощью коэффициентов соотношения моментов $K_{см}$ в зависимости от установленной мощности двигателей.

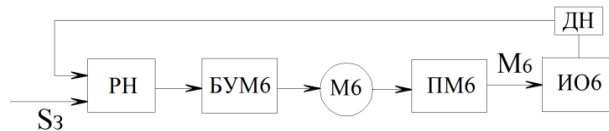


Рисунок 9 – Функциональная схема управления натяжением

Схема управления натяжным устройством снабжена регулятором натяжения – РН и ДН – датчиком натяжения. Электропривод натяжного устройства реализует заданное натяжение S_3 посредством перемещения ИО6 (натяжного устройств, каретки, барабана).

С учетом рисунков 6, 7, 8, 9 получим схему имитационной модели конвейера:

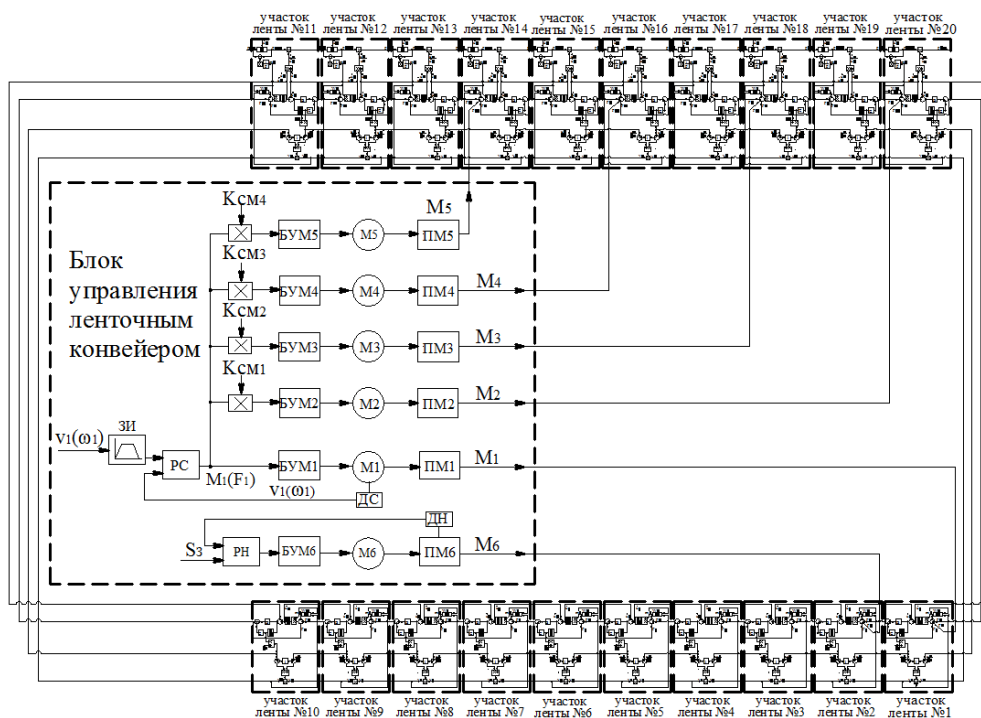


Рисунок 10 – Имитационная модель ленточного конвейера с управлением соотношения МОМЕНТОВ

Для экспериментальных исследований имитационной модели ленточного конвейера выбраны следующие параметры моделирования, представленные на графиках изменения заданной скорости, грузопотока, представленных на рисунках 11, 12.

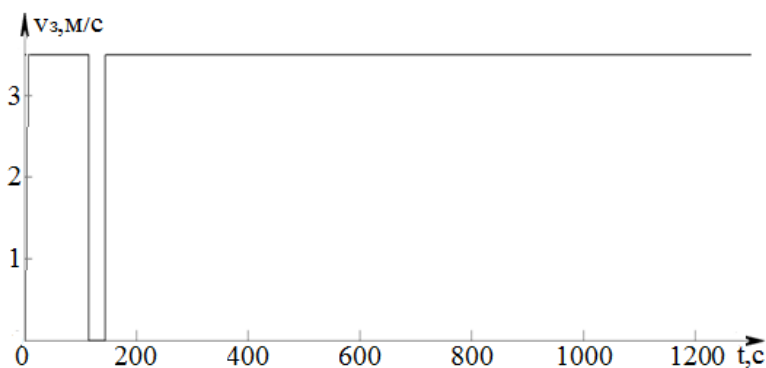


Рисунок 11 – График изменения заданной скорости – движения конвейерной ленты

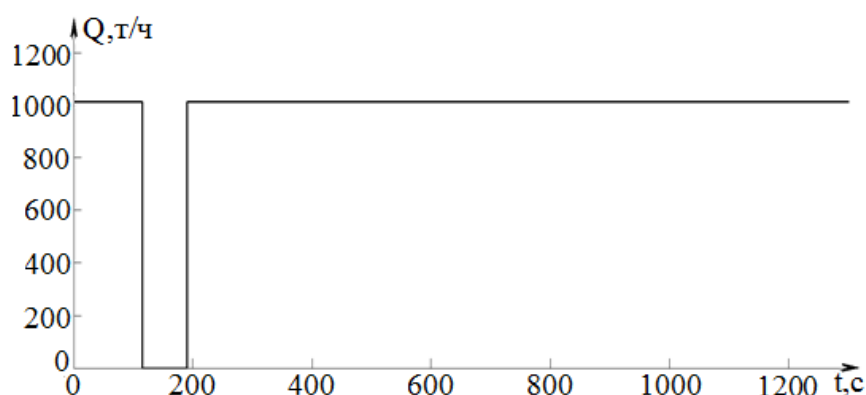


Рисунок 12 – График изменения заданного грузопотока, поступающего на конвейер

При моделировании работы ленточного конвейера (первый привод является ведущим, а на остальных реализуется момент равный моменту первого привода) получены зависимости:

- изменения загрузки участков ленточного конвейера по времени (рисунок 13);
- изменения натяжений участков ленты по времени (рисунок 14).

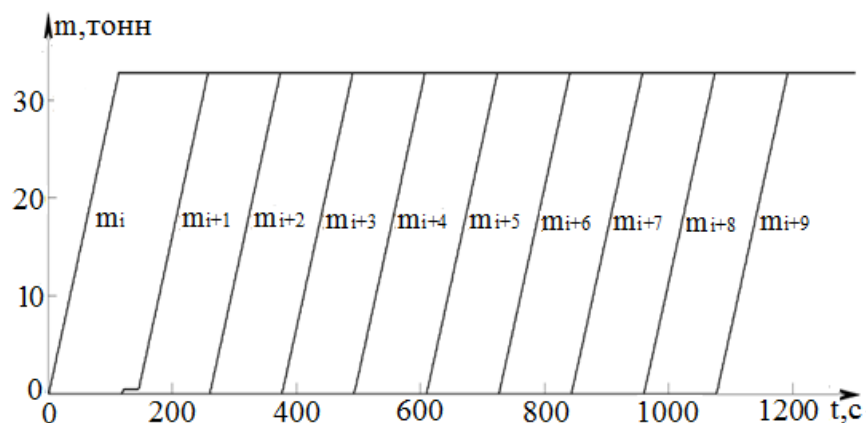


Рисунок 13 – График изменения загрузки участков ленточного конвейера по времени

Из рисунка 13 следует, что масса груза, поступающая на конвейер, перемещается вдоль конвейера, участки ленты загружаются последовательно до полной загрузки конвейера.

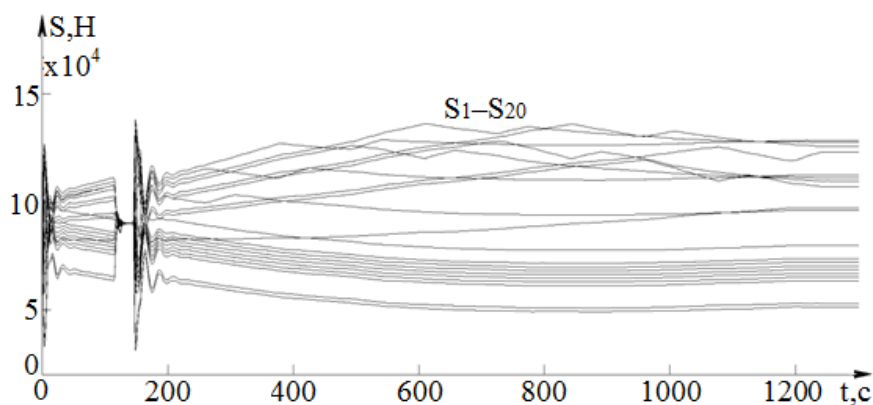


Рисунок 14 – График изменения натяжений участков ленты по времени

Из рисунка 14 видно, что:

- максимальные значения натяжений достигаются при пусках ленточного конвейера, причем при пуске загруженного конвейера натяжение выше, чем при пуске конвейера без груза;
- при полной остановке ленточного конвейера значения натяжений всех участков практически одинаковы;
- натяжения на всех участках ленточного конвейера увеличиваются с увеличением суммарной загрузки конвейера;
- после полной загрузки конвейера в установившемся режиме работы конвейера значения натяжений не изменяются.

Приведенные выше факты подтверждают, что результаты моделирования схожи с результатами динамических процессов, происходящих в эксплуатируемых конвейерах. Имитационная модель отражает все основные свойства ленточного конвейера и может быть использована при разработке и наладке системы автоматического управления.

2. Система управления электроприводами ленточного конвейера на базе нечеткого регулятора, которая, при отсутствии проскальзывания конвейерной ленты относительно приводных барабанов, обеспечивает:

- **минимальное натяжение конвейерной ленты;**
- **рациональное распределение нагрузки между приводами конвейера;**
- **равный запас по тяговой способности приводных барабанов, независимо от реализуемой на них мощности.**

Условие отсутствия проскальзывания ленты относительно приводного барабана определяется следующей формулой:

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} \leq e^{f\alpha}, \quad (9)$$

где $S_{нб}$ – натяжение ленты в точке ее набегания на приводной барабан, Н; $S_{сб}$ – натяжение ленты в точке ее сбегания с приводного барабана, Н; $e^{f\alpha}$ – тяговый фактор

приводного барабана; f – коэффициент сцепления ленты с приводным барабаном; α – угол обхвата лентой приводного барабана.

На примере ленточного конвейера с двумя приводами отсутствие проскальзывания ленты относительно приводных барабанов целесообразно достичь путем увеличения натяжения ленты только на участке между приводными барабанами без увеличения натяжения всей ленты.

Схема соединения двух приводов приведена на рисунке 15.

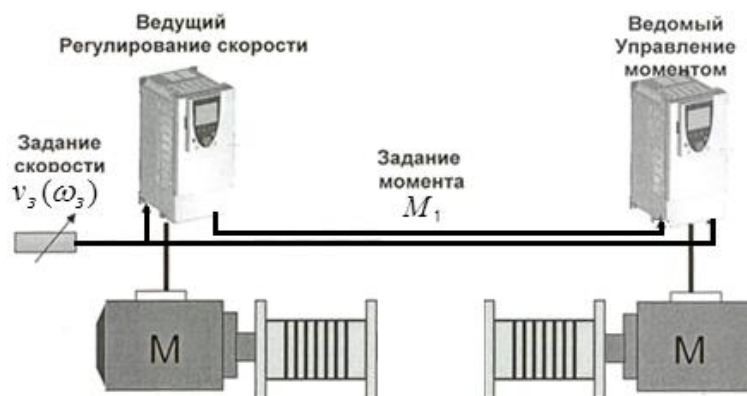


Рисунок 15 – Схем соединения двух приводов

В процессе эксплуатации значение $e^{f\alpha}$ тягового фактора приводного барабана снижается за счет истирания ленты и футеровки приводного барабана. Поэтому в качестве входной лингвистической переменной необходимо выбрать параметры, учитывающие изменение величин $e^{f\alpha}$ на каждом из приводных барабанов. Таким параметром может быть $K_{зан}$ – величина запаса тяговой способности приводного барабана (в процентах от максимально возможного значения). Как известно, величина $\frac{S_{нб}}{S_{сб}}$ может изменяться в диапазоне значений от 1 до $e^{\mu\alpha}$.

С учетом этого получена величина запаса по тяговой способности приводного барабана:

$$K_{зан} = 100 - \left(\frac{\frac{S_{нб}}{S_{сб}} - 1}{e^{\mu\alpha} - 1} \right) \cdot 100, \% \quad (10)$$

Все выше написанное о двухбарабанном приводе можно распространить на многоприводные ленточные конвейера.

В условиях работы конвейера, описанных выше, при случайном характере изменения загрузки конвейера блок управления, выполненный на базе нечеткого контроллера, обладает тем преимуществом, что имеет высокое быстродействие, не нуждается в точной настройке внутренних параметров, остается более устойчивым и не дает больших отклонений от оптимальной настройки по сравнению с другими типами блоков управления.

Для реализации разработанной системы управления конвейером использована разработанная в среде Matlab/Simulink программа. Выбран конвейер с исходными данными, представленными в соответствии с таблицей 1.

Для формирования базы правил систем нечёткого вывода необходимо предварительно определить входные и выходные лингвистические переменные. В качестве входных лингвистических переменных выбраны K_{31}/K_{32} , K_{32}/K_{33} , K_{33}/K_{34} , K_{34}/K_{35} , где K_{31} , K_{32} , K_{33} , K_{34} , K_{35} – величины запасов по тяговой способности приводных барабанов.

В качестве выходных лингвистических переменных выбраны коэффициенты соотношения моментов приводов ленточного конвейера $K_{см1}$, $K_{см2}$, $K_{см3}$, $K_{см4}$, которые находятся по формулам:

$$K_{см1} = M_1 / M_2, \quad (11)$$

$$K_{см2} = M_1 / M_3, \quad (12)$$

$$K_{см3} = M_1 / M_4, \quad (13)$$

$$K_{см4} = M_1 / M_5, \quad (14)$$

где M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 – моменты первого, второго, третьего, четвертого, пятого приводов соответственно.

В качестве терм-множеств входной лингвистической переменной K_{31}/K_{32} выбрано множество $T_1 = \{\text{«меньше нормы»}, \text{«норма»}, \text{«больше нормы»}\}$. В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной $K_{см1}$ выбрано множество $T_2 = \{\text{«уменьшить»}, \text{«оставить без изменений»}, \text{«увеличить»}\}$. Для входных лингвистических переменных K_{32}/K_{33} , K_{33}/K_{34} , K_{34}/K_{35} и выходных лингвистических переменных $K_{см2}$, $K_{см3}$, $K_{см4}$ выбраны аналогичные множества.

С учетом результатов экспериментальных данных для реализации нечеткого управления сформированы эвристические правила:

ПРАВИЛО_1: ЕСЛИ значение K_{31}/K_{32} находится в области значений «меньше нормы», ТО значение $K_{см1}$ «уменьшить».

ПРАВИЛО_2: ЕСЛИ значение K_{31}/K_{32} находится в области значений «норма», ТО значение $K_{см1}$ «оставить без изменений».

ПРАВИЛО_3: ЕСЛИ значение K_{31}/K_{32} находится в области значений «больше нормы», ТО значение $K_{см1}$ «увеличить».

Аналогично сформированы эвристические правила для входных лингвистических переменных K_{32}/K_{33} , K_{33}/K_{34} , K_{34}/K_{35} и выходных лингвистических переменных $K_{см2}$, $K_{см3}$, $K_{см4}$.

Функциональная схема предложенной системы управление электроприводом на базе нечеткого регулятора представлена на рисунке 16.

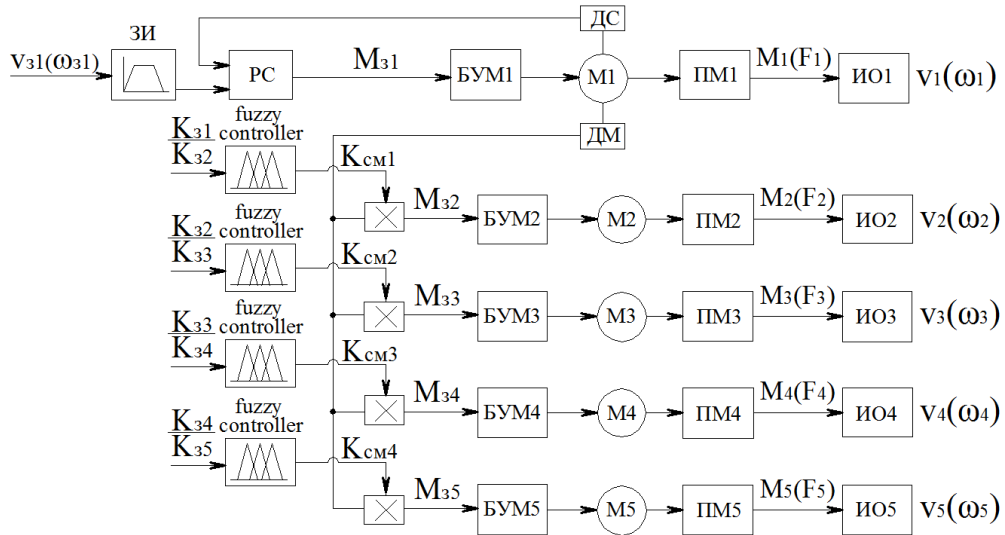


Рисунок 16 – Функциональная схема системы управления электроприводом на базе нечеткого регулятора (fuzzy controller)

Схема конвейера с системой управления представлена на рисунке 17.

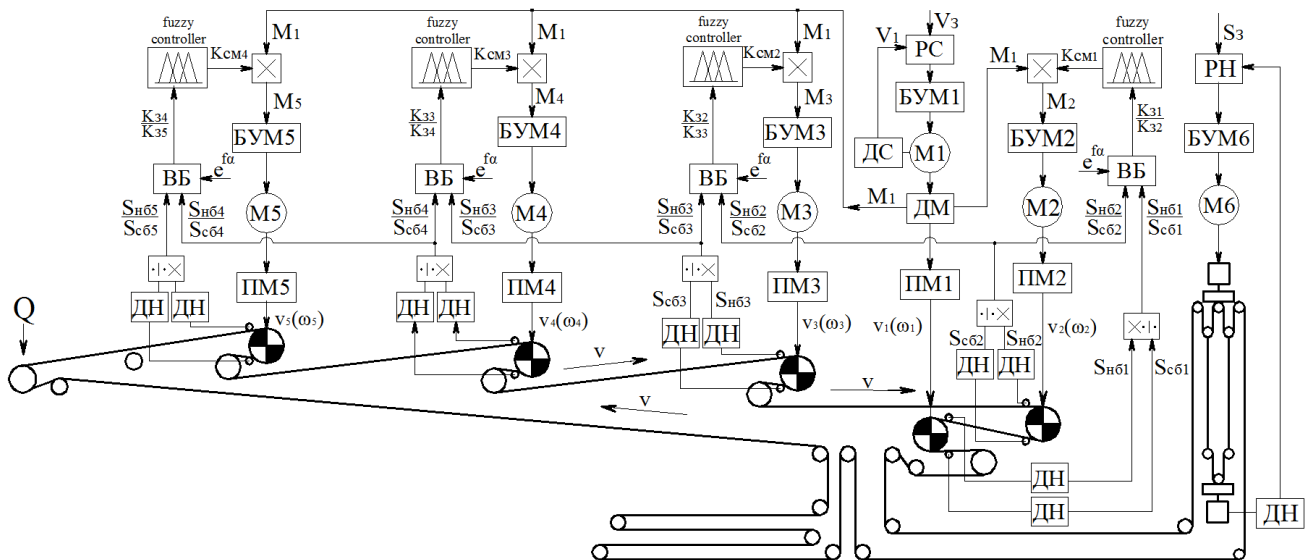


Рисунок 17 – Схема ленточного конвейера с системой управления электроприводом на базе нечеткого регулятора

Архитектура компонентов процесса нечеткого управления ленточным конвейером представлена на рисунке 18. Нечеткий регулятор содержит: базу правил, блок фаззификации – БФ, блок нечеткого вывода – БНВ, блок дефаззификации – БДФ.

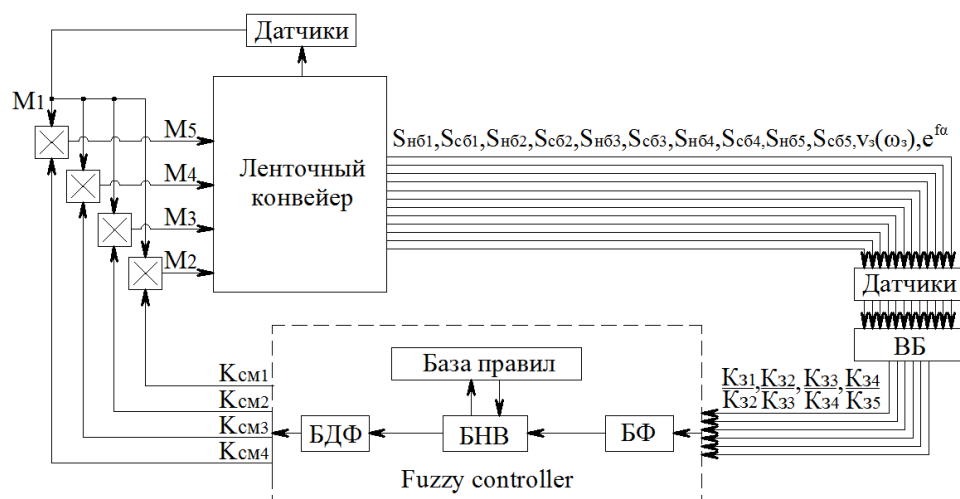


Рисунок 18 – Архитектура компонентов процесса нечеткого управления ленточным конвейером

Для реализации системы управления ленточным конвейером необходимо знать тяговые факторы приводных барабанов, которые зависят от коэффициентов сцепления лент с приводными барабанами. Фактическое значение коэффициента сцепления ленты с приводным барабаном определяется:

$$f = \frac{\ln\left(1 - \frac{M_n}{R_\sigma \cdot S_{сб.}}\right)}{\alpha} \quad (15)$$

где R_σ – радиус приводного барабана, м; M_n – момент на валу приводного барабана при пробуксовке, Нм.

Значение момента на валу приводного барабана при пробуксовке определяется датчиком измерения момента. Факт пробуксовки определяется с помощью реле контроля скорости ленты. Пробуксовка ленты создается с помощью стопорного устройства, которое затормаживает ленту. Значения натяжений $S_{нб}$ и $S_{сб}$ определяются датчиками измерения натяжения.

Анализ систем управления ленточным конвейером, в соответствии с таблицей 2, был выполнен с помощью модели, построенной в программной среде Matlab/Simulink.

Таблица 2

Способы управления электроприводами ленточных конвейеров

№ п/п	Способы управления	Системы управления
1	Способ №1	Система с нечетким управлением (первый привод является ведущим, на котором задается скорость, а на остальных блоком нечеткого управления задаются такие моменты, при которых величины запасов по тяговой
2	Способ №2	Система управления с выравниванием моментов (первый привод является ведущим, а на остальных реализуется величина момента первого привода).
3	Способ №3	Система с завышенным натяжением (усилием натяжного устройства лента максимально натянута на 2% от собственной длины).

При моделировании были получены следующие зависимости:

- изменения величин запасов по тяговой способности приводных барабанов ленточного конвейера при различных способах управления (рисунки 19, 20, 21);
- изменения величин максимальных натяжений (выбран участок ленты с наибольшим натяжением) по времени при различных способах управления (рисунок 22);
- значения давлений на поверхностях приводных барабанов при различных способах управления (рисунок 23).

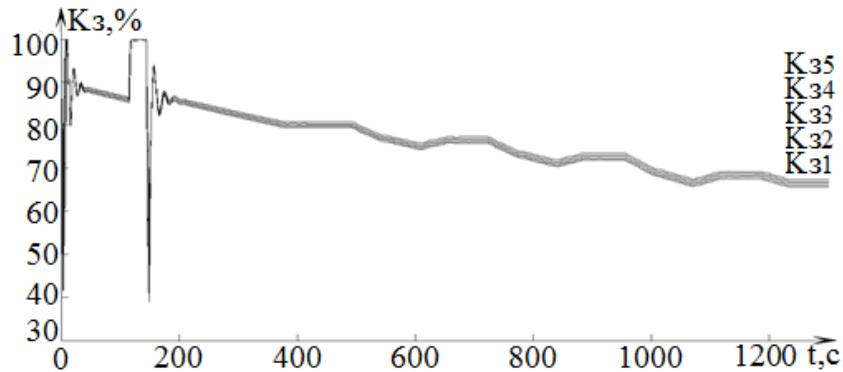


Рисунок 19 – График изменения величин запасов по тяговой способности приводных барабанов ленточного конвейера при способе управления №1

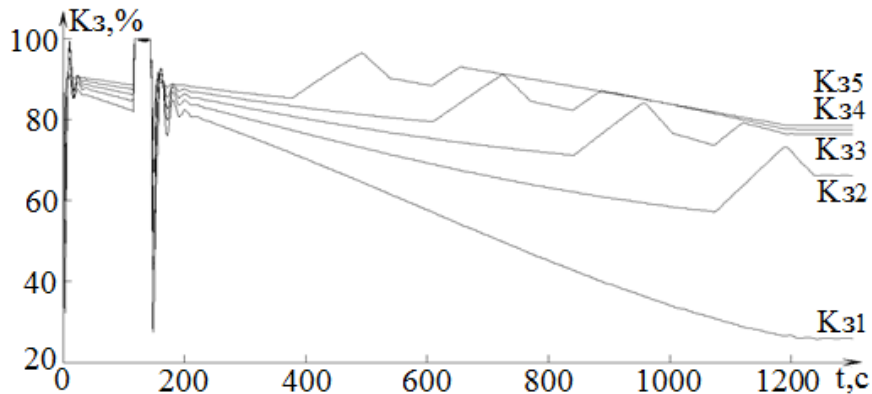


Рисунок 20 – График изменения величин запасов по тяговой способности приводных барабанов ленточного конвейера при способе управления №2

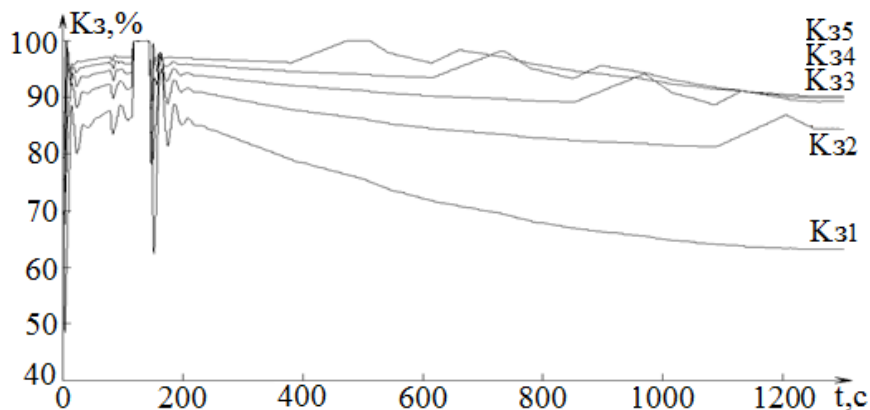


Рисунок 21 – График изменения величин запасов по тяговой способности приводных барабанов ленточного конвейера при способе управления №3

Из рисунков 19, 20, 21 следует, что при одинаковых условиях работы ленточных конвейеров с различными системами управления, величины запасов по тяговой способности приводных барабанов при работе ленточного конвейера с системой нечеткого управления исчерпываются одинаково и в наименьшей степени по сравнению с другими системами управления.

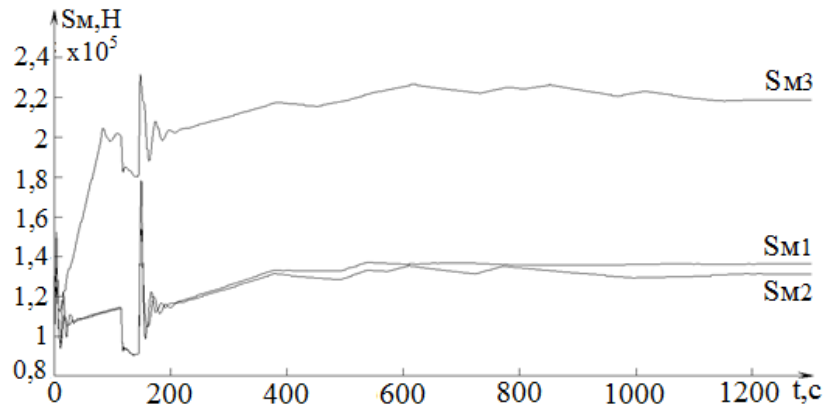


Рисунок 22 – График изменения величин максимальных натяжений по времени при способах управления №1, №2, №3

На рисунке 22, S_{M1} – величина изменения максимального натяжения ленты при способе управления №1, S_{M2} – величина изменения максимального натяжения ленты при способе управления №2, S_{M3} – величина изменения максимального натяжения ленты при способе управления №3. Величина максимального натяжения ленты достигается при способе управления №3, поэтому увеличение натяжения ленты посредством натяжного устройства для обеспечения надежного сцепления конвейерных лент с приводными барабанами является неэффективным способом из-за резкого увеличения величины максимального натяжения ленты, что увеличивает интенсивность износа ленты.

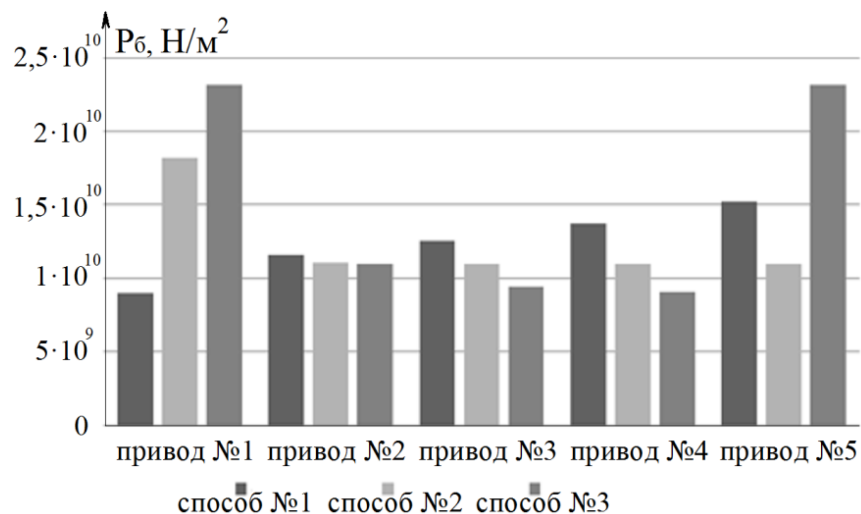


Рисунок 23 – Гистограмма давлений на поверхностях приводных барабанов при полной загрузке ленты при различных способах управления

Из рисунка 23 следует, что предложенные принципы, способы, алгоритмы управления имеют следующие преимущества перед другими:

- выравняется разница между значениями давлений на поверхностях всех приводных барабанов;

- уменьшается значение максимальных давлений на поверхностях приводных барабанов.

Полученные зависимости подтверждают, что разработанная система управления ленточными конвейерами на базе нечеткого регулятора является наиболее эффективной для снижения интенсивности изнашивания конвейерных лент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научно-практической задачи увеличения срока службы конвейерных лент за счет снижения интенсивности их изнашивания средствами электропривода с нечетким регулятором.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Кожубаев Ю.Н. Анализ динамических процессов в ленточных конвейерах [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Сер.: Наука и образование. – 2009. - № 4-2(89). – С. 103-107.

2. Кожубаев Ю.Н. Моделирование поточно-транспортной системы ленточных конвейеров [Текст] / Ю.Н. Кожубаев, О.В. Прокофьев, В.И. Филимонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Сер.: Наука и образование. – 2010. - № 3(106). – С. 73-78.

3. Кожубаев Ю.Н. Имитационная модель ленточного конвейера [Текст] / Ю.Н. Кожубаев, О.В. Прокофьев, И.М. Семенов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Сер.: Наука и образование. – 2011. – № 3 (130). – С. 116-121.

4. Кожубаев Ю.Н. Системы управления ленточным конвейером [Текст] / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 2 (195). – С. 181-186.

В других изданиях:

5. Кожубаев Ю.Н. Векторное управление электроприводами конвейерного транспорта угольной шахты / Ю.Н. Кожубаев, Б.А. Иванов // VIII международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2007» [Текст]: материалы конференции (21-23 марта 2007 г., Ухта): в 3 ч.; ч.1. – Ухта: УГТУ, 2007. – С. 32-35.

6. Кожубаев Ю.Н. Управление активными устройствами ленточного конвейера в целях обеспечения его безаварийной работы / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов // Вычислительные, измерительные и управляющие системы: сборник научных трудов / под ред. Ю.Б. Сениченкова. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010. – С. 54-57.

7. Кожубаев Ю.Н. Рациональное распределение нагрузки в многоприводных ленточных конвейерах / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. VIII. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010. – С. 58-60.

8. Кожубаев Ю.Н. Нечеткие регуляторы в системах управления ленточным конвейером / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт информационных технологий и управления СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – С. 90-93.

9. Kozhubaev Y.N. Fuzzy control system for belt conveyor / Y.N. Kozhubaev, I.M. Semenov // Results of Joint Research Activity of Scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover Proceeding of Symposium on Automated Systems and Technologies. – Hannover.: Leibniz University of Hannover, 2014. – P. 111-114.

Патенты и свидетельства:

10. Патент РФ на полезную модель № 111119, МПК В65G15/00. Ленточный конвейер [Текст] / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (ФГБОУВПО «СПбГПУ»)). – №2011126778/11; заявл. 29.06.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. №34. – бс.: ил.

11. Патент РФ на полезную модель № 147927, МПК В65G23/44. Ленточный конвейер [Текст] / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (ФГБОУВПО «СПбГПУ»)). – №2014124594/11; заявл. 17.06.2014; опубл. 20.11.2014, Бюл. №32. – бс.: ил.

12. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613817 Программный комплекс имитационной модели ленточного конвейера / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов, О.В. Прокофьев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (ФГБОУВПО «СПбГПУ»)). – №2014611183; заявл. 18.02.2014; опубл. 20.05.2014. – 1,27 Мб.