

Федеральное Государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)

На правах рукописи



КАУНГ ПЬЕЙ АУНГ

**Разработка и исследование системы
автоматической стабилизации тягового
фактора двухприводного
ленточного конвейера**

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

**диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Кубрин Сергей Сергеевич

Москва 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. Анализ исследований по вопросам повышения эффективности эксплуатации ленточного конвейера и постановка задач исследований	7
1.1. Анализ работ по вопросам повышения эффективности эксплуатации ленточного конвейера	7
1.2. Анализ работ, посвященных способам регулирования тягового фактора конвейера	19
1.3. Применение бункеров и дискретная регулировка скорости ленты.	20
1.4. Регулирование скорости конвейеров в зависимости от грузопотока.	23
1.5. Задачи диссертационного исследования	29
1.6. Выводы по главе	31
ГЛАВА 2. Разработка и исследование математической модели движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей	33
2.1. Модель конвейера с двухдвигательным приводом и натяжным устройством.	35
2.1.1. Модель движения ленты двухприводного ленточного конвейера.	35
2.2. Исследование моделированием модели движения ленты конвейера с двухдвигательным приводом и натяжным устройством	48
2.3. Выводы по главе	51
ГЛАВА 3. Разработка алгоритма автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки.	53
3.1. Конструкция натяжных устройств	53
3.2. Разработка алгоритма и структуры системы автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки.	58

3.3.Экспериментальные исследования системы автоматической стабилизации тягового фактора	62
3.4.Разработка системы управления движением ленты ленточного конвейера с подсистемой стабилизации тягового фактора	68
3.5.Выводы по главе.....	69
ГЛАВА 4. Автоматическая система стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера.....	71
4.1.Выбор исполнительного устройства в системе регулирования положения каретки натяжного устройства	71
4.2.Технические средства для автоматической системы стабилизации тягового фактора ленточного конвейера.....	73
4.3.Рекомендация к внедрению автоматизированной системы автоматической стабилизации тягового фактора на ленточных конвейерах шахты „Калева” в государстве Союз Мьянма	78
4.4.Выводы по главе.....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	88
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	106
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....	108

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень проработанности темы исследования. Повышение эффективности горнодобывающих предприятий, обеспечение безопасности проведения горных работ, рост длин очистных участков угольных шахт требуют увеличения нагрузки на системы транспортирования полезных ископаемых, что влечет необходимость применения высокопроизводительных конвейерных установок большой мощности.

Большой объем и неравномерность загрузки являются основными причинами проскальзывания ленты на приводных барабанах конвейера, что увеличивает износ и число отказов транспортной магистрали. Поэтому создание автоматической системы стабилизации тягового фактора – соотношения между натяжениями в набегающей и сбегавшей ветвях конвейерной ленты конвейерных установок большой мощности с двумя приводами - актуально для угольных предприятий Российской Федерации и Республики Союз Мьянма.

Вопросам стабилизации тягового фактора ленточных конвейерных установок посвящены работы многих ученых. Александр Онисимович Спиваковский (1888—1986), член-корреспондент Академии наук СССР, поставил задачу регулирования тягового фактора. В конце 60-х годов прошлого столетия Солод Г.И., Шахмейстер Л.Г., Мерцалов Р.В. сформулировали задачу создания системы автоматической стабилизации нагрузки на ленте конвейера. Над поставленными вопросами работали Бишеле И.В., Папоян Р.Л., Пономаренко В.А., Зарецкий О.М., Лобачева А.К., Певзнер Л.Д., Дмитриев В.Г., Назаренко В.М., Мамалыга В.М., Сокотнюк Ю.А., Дмитриева В.В., A. Butko, Zhan Zhang, Guomundur Amar, Gretarsson. Ими получены существенные результаты, внедренные в промышленность. Однако, с развитием мощной конвейерной техники на горных предприятиях задача стабилизации тягового фактора не только не потеряла своей актуальности, но и приобрела необходимость развития, особенно для двухприводных ленточных конвейеров.

Целью диссертации является разработка системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера, эксплуатируемого в шахтных условиях неравномерной загруженности.

Основная **идея работы** состоит в том, что регулирование тягового фактора двухприводного ленточного конвейера осуществляется с помощью автоматически управляемого устройства натяжения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить научно-технический анализ литературных источников по проблеме повышения эффективности эксплуатации магистральных ленточных конвейеров;
- разработать и исследовать математическую модель движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей;
- разработать алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки;
- разработать автоматическую систему управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией натяжения ленты в условиях неравномерной нагрузки;
- использование результатов диссертационного исследования на угольных шахтах Российской Федерации и на шахте «Калева» Республики Союз Мьянма.

Научные положения, разработанные соискателем, и их новизна:

- разработанная математическая модель ленточного конвейера отличается тем, что учитывает использования двух приводов и работу натяжного устройства, адекватно описывает динамические процессы движения ленты конвейера, что позволяет рассматривать эту модель как объект системы управления;
- предложенный алгоритм регулирования тягового фактора двухприводного конвейера позволяет стабилизировать его значение на расчетном уровне при штатных и нештатных режимах движения ленты;

- разработанная система автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного конвейера отличается возможностью регулировать натяжение ленты, исключая её пробуксовку на приводных барабанах конвейера в шахтных условиях неравномерной загруженности.

Научное значение диссертации заключается в разработке и обосновании алгоритма стабилизации соотношения между натяжениями в набегающей и сбегавшей ветвях конвейерной ленты конвейерных установок большой мощности, с двумя приводами в условиях неравномерной загрузки для минимизации проскальзывания ленты на приводных барабанах конвейера с целью снижения её износа и опасности возгорания.

Практическая полезность работы состоит в том, что система стабилизации тягового фактора приводит к снижению износа движущегося полотна ленточного конвейера за счет поддержания требуемого соотношения между натяжениями в набегающей и сбегавшей ветвях конвейерной ленты, и повышает эффективность эксплуатации, приводит к экономии энергоресурсов.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается корректным применением известных методов конечномерного математического моделирования динамических систем с распределенными параметрами для составления модели движения ленты конвейера, структурно близкой с известными и ранее апробированными моделями. Достоверность моделирования подтверждена достаточным на уровне 90% соответствия результатов с осциллограммами процессов движения реального ленточного конвейера и практическими наблюдениями в шахте.

Методы исследования. В работе использовались общенаучные методы анализа о параметрах и характеристиках работы конвейерных установок, теоретические методы построения математических моделей, принцип наименьшего действия, уравнение Лагранжа, методы статистики и теории вероятности, системный анализ.

Реализация полученных результатов исследования. Разработанная автоматическая система управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией натяжения ленты в условиях неравномерной нагрузки внедрена на шахте «Калева» Республики Союз Мьянма, разработанный алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки принят к использованию на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» Российской Федерации.

Апробации работы. Основные положения и результаты работы докладывались на международной научно-практической конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли» 2017 ИПКОН РАН; на 13 международной научной школы молодых ученых и специалистов «проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 2016 ИПКОН РАН; на международном симпозиуме «Неделя горняка. 2015, 2016, 2017 и 2018»; на семинарах кафедры «Автоматизация» и кафедры «Автоматизированных систем управления» НИТУ МИСиС; на семинаре «Микроэлектроника и информатика. 2015» – НИУ МИЭТ; на международной конференции «Third International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering – MAE. 2015», Rome, Italy; на международной конференции «International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI-2016) », Beijing, China; на международной конференции «2017 international conference on Geo-spatial technologies and Earth resources (GTER 2017) », Hanoi, Vietnam.

Публикации. По теме исследования опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 в журнале из перечня, установленного ВАК Минобрнауки РФ, подана заявка на свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 146 наименований, содержит 26 рисунков и 4 таблицы.

ГЛАВА 1. Анализ исследований по вопросам повышения эффективности эксплуатации ленточного конвейера и постановка задач исследований

1.1. Анализ работ по вопросам повышения эффективности эксплуатации ленточного конвейера

Форма правления Республики Союз Мьянма сменилась на более демократическую в 2010 году. Страна была освобождена от многих санкций, введенных западноевропейскими странами. Ранее государственные налоги на импортные товары были высоки. Сегодня они становятся значительно меньше, чем раньше. Иностранные инвестиции выросли. Мьянма богата природными ресурсами. Имеются драгоценные минералы (рубины, нефриты и т.д.), уголь, нефть, газ и т.д.

Уголь является одним из мировых энергетических ресурсов. Сорок процентов мировой электроэнергии вырабатывается за счет сжигания угля. Благодаря этому на сегодняшний день на многих фабриках в разных странах осуществляется дешевое использование электроэнергии.

Ведущие страны мира – Россия, США, Китай, Индия, Япония, Германия и Южная Корея являются основными потребителями угля. Благодаря углю глобальная промышленность достигла существующего статуса.

Мьянма как развивающаяся страна нуждается во всех энергетических ресурсах для своего развития. Она располагает большим количеством угля. Имеются угольные шахты в районах Калева, Сан Лаунг, Намма, Нант Сам и Мо Тоунг.

Только 3,5% электроэнергии в Мьянме получают из угольной энергетики: металлургические заводы, обогатительные фабрики, цементные, текстильные, предприятия пищевой промышленности и т.д., сжигал угольной горелки. Тем не менее, уголь способствует, в значительной степени, промышленному развитию Мьянмы.

В Мьянме все еще недостаточно развита энергетическая инфраструктура, которая входит в электроэнергетику, а она необычайно важна для жизни людей. Энергоснабжение было ограничено даже в Янгоне, который является крупнейшим городом в Мьянме. В 2017 г. Государство запланировало построить угольные электростанции в Штате Кайин.

На угольных месторождениях угля Калева в области Сагаин работают многие угольные компании. Данные о шахте „Калева” базируются на отчете компании Max Myanmar (рис. 1.1.) [144].



Рисунок.1.1. Карта местонахождения шахты „Калева” в области Сагаин Республики Союза Мьянма

Большинство компаний осуществляют добычу угля открытым способом. Развитые страны переходят к добыче полезных ископаемых подземным способом [113].

Технико-технологические ресурсы угольной отрасли в области Сагаин.

Угольная отрасль добывающей промышленности государства Союз Мьянма, перешедшая на рыночные отношения, требует рентабельной работы ее предприятий, что возможно только на основе высокопроизводительной и надежной техники. Шахты в Мьянме в настоящее время оснащены очистными механизированными комплексами зарубежного производства.

К сожалению, в Мьянме нет машиностроительных заводов, способных обеспечить угледобывающие предприятия высокопроизводительной и надежной техникой. Поэтому она приобретается за рубежом.

Современное горное предприятие - это крупное механизированное и автоматизированное производство, характеризующееся многообразием технологического оборудования, в работе которого в оптимальных режимах требуется согласованность и взаимодействие между его отдельными звеньями.

В состав основных средств производства шахты входят:

- 1) ленточные конвейеры – 10 шт. (в т.ч. в эксплуатации – 7 шт.);
- 2) вагонетки - 65 шт;
- 3) очистные комбайны -1 шт;
- 4) проходческие комбайны– 2 шт;
- 5) электровозы– 3 шт. (в т.ч. в эксплуатации – 2 шт.).

Общие сведения о месторождении „Калева”

Следует отметить, что на месторождении угля „Калева” работают карьеры и шахты, одна из которых носит название месторождения- „Калева”. Большая часть месторождения, где добыча угля еще мало изучены ввиду своего расположения в труднодоступных районах. На тех участках, которые уже

разведаны, ведется добыча открытым и подземным способами. Месторождение „Калева” занимает площадь 42 км², расположено на среднем западе Штата Сагаин (на северо-западной части Мьянмы). Геологические каменноугольные запасы достигают 30 млрд тонн.

Площадь разделена на четыре подблока с юга на север.

Блок А (от Вахтейн чаунг до Сатта чаунг)	4 км
Блок В (от Сатта чаунг до Нантахин чаунг)	3,2 км
Блок С (от Нантахин чаунг до Баингбин чаунг)	4,8 км
Блок D (от Баингбин чаунг до Чин чаунг)	9,7 км

Мощности выбранных угольных пластов – (всего восемь пластов) с подтвержденными запасами:

а) верхние угольные слои: 3 пласта UB, UC, UD (подблок А, В, С)

б) нижние угольные слои:

3 пласта LB, LD, LE (подблок А, В, С)

5 пластов LA, LB, LC, LD, LE (подблок D)

Простираание угольных пластов 152,4 км

Общая средняя мощность

	UCG*	LCG*
Блок А	5 м	4,4 м
Блок В	4,9 м	3,8 м
Блок С	4,2 м	3 м
Блок D	—	5,4 м

*UCG —upper coal group (верхняя угольная группа)

*LCG —lower coal group (нижняя угольная группа)

Из этих восьми угольных пластов, два пласта, UC(9) из UCG и LD(7) из LCG, являются наиболее привлекательными к разработке пластами благодаря своей стабильной мощности, высокому качеству угля и выдержанным горно-геологическим условиям.

Разведочный блок размещается в 4,8 километрах от западного берега реки Чиндвин и почти в 8 км от поселка Титчаук, который находится на автодороге город Калева-Кале, в 6,4 км от Калева и в 32 км от города Кале (рис. 1.2, 1.3).

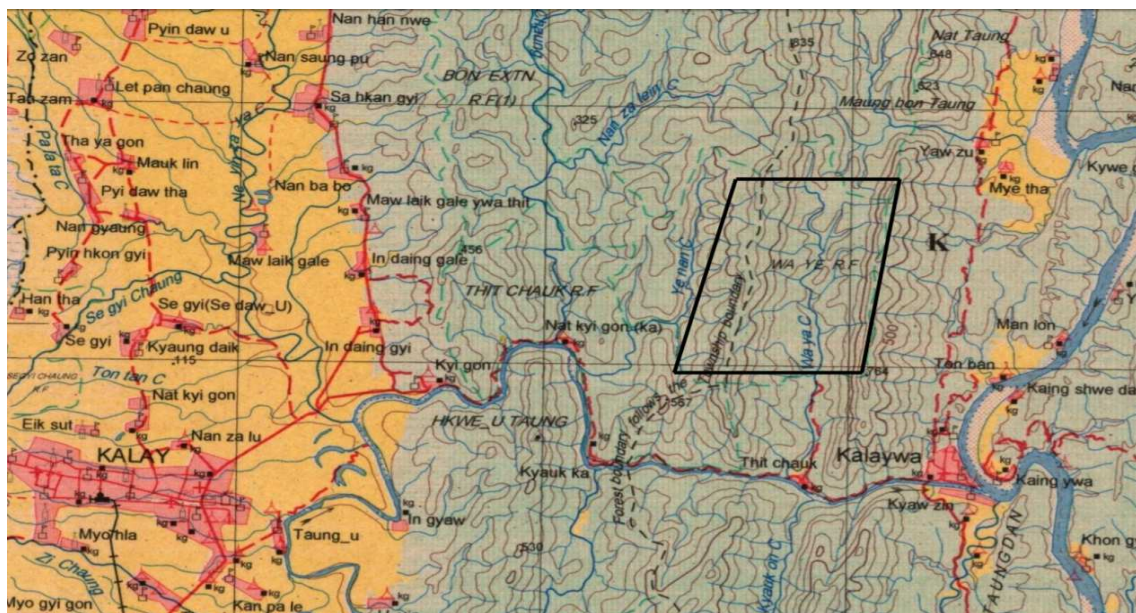


Рисунок 1.2. Детальная карта местонахождения шахты „Калева”

На месторождении „Калева” большинство компаний осуществляют добычу открытым способом. В последние годы наблюдается тенденция перехода развитых стран к добыче полезных ископаемых подземным способом. Транспортировка добытого полезного ископаемого наиболее эффективно осуществляется при подземном способе ленточными конвейерами.

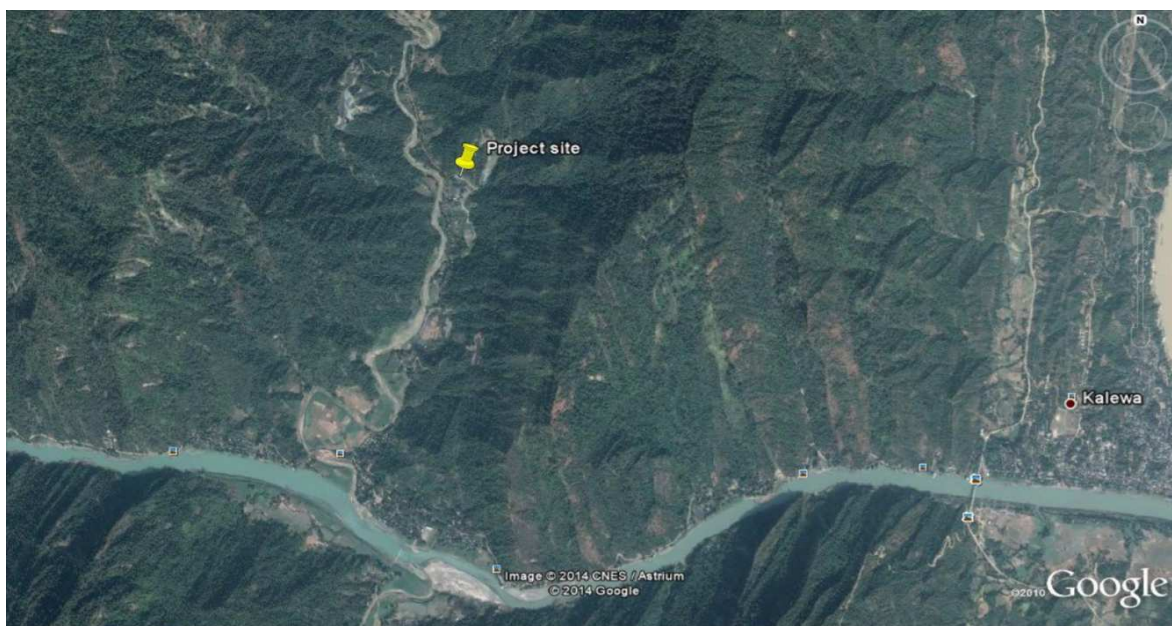


Рисунок 1.3. Вид со спутника местонахождения шахты „Калева”

Данная работа посвящена актуальной в настоящее время на шахте „Калева” проблеме повышения производительности и эффективности экономической эксплуатации конвейерного транспорта.

Решение этой задачи будет способствовать:

- снижению нагрузки на электропривод ленточного конвейера;
- уменьшению износа движущегося полотна ленточного конвейера;
- экономии энергоресурсов за счет эффективной работы автоматической системы управления скоростью движения конвейерной ленты в зависимости от фактического грузопотока, поступающего на полотно конвейера [36,37].

Существенная неравномерность нагрузки – угольного потока из забоев является основной причиной изменения тягового фактора ленточного конвейера. В данной работе исследовались реальные грузопотоки, поступающие на ленточный конвейер в течении нескольких дней. По этим данным видно, как

сильно меняется загрузка ленточных конвейеров. Ежедневно в потоке появляется как минимум одна импульсная нагрузка, превышающая в десятки раз среднюю. Это момент начала работы забоя. Эта импульсная нагрузка приводит к длительному проскальзыванию ленты, её износу и в последствии к потере. Поэтому возникает необходимость стабилизировать тяговой фактор.

Таблица 1.1

Техническая характеристика ленточного конвейера 2Л100У-01

Параметр	Величина
Приемная способность, м ³ /мин при скорости движения ленты:	
1,6 м/с	10,6
2,0 м/с	13,2
2,5 м/с	16,5
3,15 м/с	20,8
Максимальная производительность т/ч при скорости движения ленты:	
1,6 м/с	570
2,0 м/с	710
2,5 м/с	890
3,15 м/с	
Лента конвейерная -тип	Лента трудно- сгораемая
Ширина, мм	1000
Длина конвейера м	700 и 1500
Угол установки град.	-3...+18
Мощность привода, кВт при скорости движения ленты	
1,6 м/с	2 x100
2,0 м/с	2 x132
2,5 м/с	2 x160
3,15 м/с	2 x200

Шахтный ленточный конвейер 2Л100У-01 предназначен для транспортирования горной массы с максимальным размером кусков угля не более 500 мм и породы не более 300 мм, по прямолинейным в плане горным выработкам угольных и сланцевых шахт опасных по газу и пыли (табл.1.1).

Структура обозначения конвейера 2Л100У-01: 2- типоразмер, Л- ленточный, У- унифицированный. Сведения о ленточном конвейере в источнике [68].

В Республике Союз Мьянма широкое распространение получили китайские конвейера аналоги ленточного конвейера Российского производства (АО «ЗАВОД ИМЕНИ М.И. ПЛАТОВА») 2Л100У-01, технические параметры которого приведены в табл. 1.2. На шахте используют двухприводной ленточный конвейер.

Автоматизация магистральной конвейерной линии

Подача необходимого объема угля на поверхность осуществляется с помощью системы магистральных ленточных конвейеров. Загрузка угля осуществляется скребковым конвейером непосредственно в приемный бункер, через перегружатель. С забойных конвейеров транспортируемый уголь перегружается на магистральный конвейер.

Конвейерная линия состоит из 3 ленточных конвейеров. Приводы ленточных конвейеров используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В соответствии с требованиями к системам автоматизации конвейерных линий на шахте „Калева” принята схема автоматизации представленная на рис. 1.3, предусматривает:

1. Запуск конвейеров в направлении, противоположном грузовому потоку. Это устраняет риск образования блокировки в месте перевалки. В этом случае команда запуска следующего конвейера выполняется после того, как

грузонесущий орган включившегося конвейера разогнался до номинальной скорости.

2. Другие конвейеры должны продолжать работать, чтобы освободить тяговый орган от груза.

3. Контроль времени запуска конвейеров. При длительном запуске конвейер должен отключиться и предотвратить запуск других конвейеров. Длительный запуск указывает на неисправность электропривода или проскальзывание ленты, что может привести к ее возгоранию.

4. Аварийная остановка конвейера и всех конвейеров, которые подают груз до аварийной остановки, при затянувшемся времени пуска конвейера, конвейер замедляется, разрываются тяговые органы, перегружаются конвейерные двигатели, барабаны перегреваются, образуются завалы в местах перегрузки, сходе ленты конвейера.

5 Возможность остановки конвейерной линии из любой точки [1].

Каждый конвейер состоит из приводной станции, установленной на гусеничном ходу, секции типичных, переходных и концевых самоходных бункеров. Тяговым и несущим органом конвейеров представляют собой ленту шириной 800 мм. Необходимая предварительная сила в ленте создается станциями натяжения нагрузки.

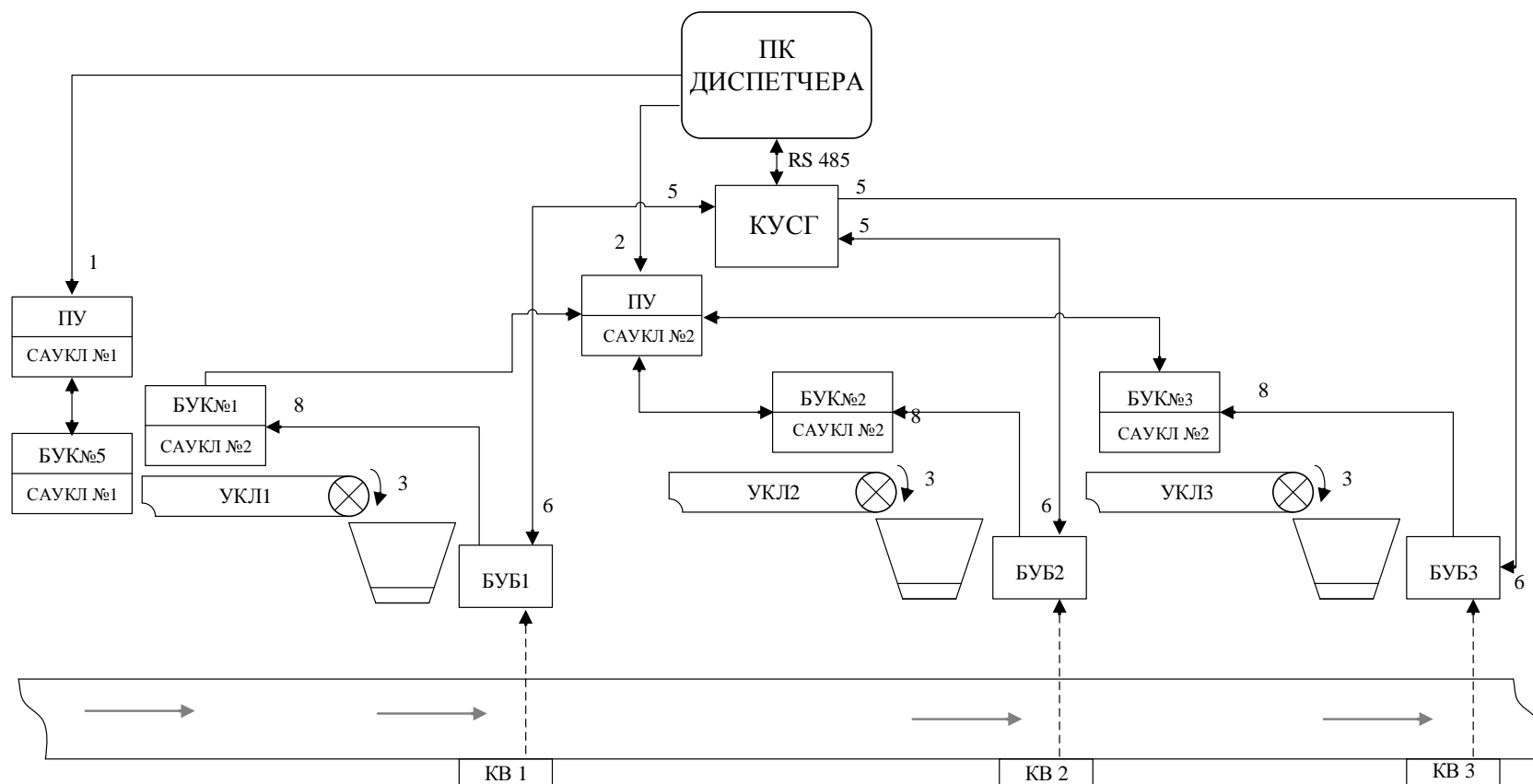


Рис.1.4. Структурная схема системы автоматизации магистральной конвейерной линии

На схеме обозначено: КУСГ – Координирующее устройство стабилизации грузопотока; УКЛ – Участковая конвейерная линия; САУКЛ - Система автоматизированного управления конвейерными линиями; ПУ – Пульт управления; БУК – Блок управления конвейером; БУБ – Блок управления бункером; КВ – Конвейерные весы.

Принцип работы автоматизированной системы, схема которой представлена на рис. 1.4, заключается в следующем: сигнал (1) на панель управления (ПУ) системы САУКЛ № 1 для включения магистральной конвейерной линии отправляется с ПК диспетчера шахты, затем сигнал (2) посылается таким же образом на ПУ системы САУКЛ № 2, чтобы включить участковую конвейерную линию. Масса горной породы (3), поступающая с участка добычи, транспортируется в бункер-накопитель для хранения посредством линии секционного конвейера. Под опорами бункерного питателя БП установлены тензодатчики ВДУ, которые преобразуют тяжесть бункера с материалом в электрический сигнал. Сигнал, характеризующий состояние загрузки бункера, отправляется в блок управления бункером, где он анализируется вместе с сигналом (4) – вес ленточного бункерного конвейера относительно состояния загрузки ленты: информация от блока (5) управления бункером подается на координирующее устройство, стабилизирующее грузовой поток, где команда (6) анализируется от КУСГ до блока управления соответствующего бункера для открытия / закрытия шибер (Ш) бункера. Затем стабилизированное грузовое движение (7) доставляется на станцию погрузки с помощью магистральной конвейерной линии. Если уровень угля в бункере достигает аварийного уровня, и шибер бункера полностью открыт, то сигнал (8) отправляется из блока управления этого бункера в блок управления БУК соответствующего участкового конвейера, чтобы отключить линию конвейера секции, а затем уведомить диспетчера шахты об аварии. Основные сведения об автоматизации магистральной конвейерной линии подробно описаны в источнике [1,28].

Ленточные конвейеры имеют широкое распространение в горнодобывающей, строительной и других отраслях промышленности Мьянмы. На шахте „Калева” для транспортировки угля используются магистральные

конвейеры. Использование ленточных конвейеров актуально при открытом и подземном способе добычи полезных ископаемых. В настоящее время задача повышения экономической и технической эффективности конвейерной доставки угля для шахты „Калева” является актуальным. Решение этой важной для государства задачи будет способствовать: экономии энергоресурсов, снижению нагрузки на электропривод ленточного конвейера и уменьшению износа движущегося полотна ленточного конвейера.

Широкое внедрение ленточных конвейеров на горных предприятиях способствует повышению технического уровня и эффективности горного производства и создает благоприятные условия для применения поточной технологии. В механизированном добычном комплексе ленточный конвейер выступает в роли особо важного оборудования. Актуальным в последние десятилетия стал вопрос поиска способов эффективного использования конвейерных установок. Повысить эффективность использования транспортных машин при работе с подобными сыпучими грузопотоками можно путем применения автоматизированного регулирования скорости движения грузонесущего полотна в зависимости от величины поступающего грузопотока. При смене скорости движения в ленте возникают дополнительные динамические нагрузки, которые приводят к пробуксовке конвейерной ленты на приводных барабанах. Устранение этого неблагоприятного явления возможно только путем автоматического совместного управления приводами конвейера по величине фактического грузопотока и реального значения тягового фактора.

На сегодняшний день, как следствие развития промышленной микропроцессорной техники и частотно-управляемого асинхронного привода появилась возможность решения многих вопросов управления конвейерными установками большой мощности.

Первым этапом на пути достижения положительных результатов в этом направлении является создание адекватной математической модели движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей. Вторым этапом – разработка алгоритма автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки. Третьим этапом – разработка автоматической системы управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией ее натяжения. В настоящей работе в соответствии с представленным планом в виде этапов проведены теоретические и экспериментальные научные исследования направленные на создание системы автоматической стабилизации величины тягового фактора двухприводного ленточного конвейера.

1.2. Анализ работ, посвященных способам регулирования тягового фактора конвейера

Вопросам стабилизации тягового фактора ленточных конвейерных установок посвящены работы многих ученых. Впервые задачу регулирования тягового фактора поставил Александр Онисимович Спиваковский – советский учёный в области промышленного транспорта и горного машиностроения, член-корреспондент Академии наук СССР. В конце 60-х годов прошлого столетия в московском горном институте Солод Г. И., Шахмейстер Л.Г., Мерцалов Р.В. сформулировали задачу создания системы автоматической стабилизации нагрузки на ленте конвейера. Над поставленными задачами работали в ИГД им. акад. А.А. Скочинского, Академии наук СССР и в других организациях и институтах. Были получены существенные результаты, внедренные в промышленность, тем не менее, с развитием конвейерной техники задача стабилизации тягового фактора не только не потеряла своей актуальности, но и приобрела дополнительную необходимость решения, особенно для двухприводных ленточных конвейеров.

В этой работе, рассматривается регулирование загрузки ленточных конвейеров, выявляются причины, которые обуславливают снижение эффективности конвейеров при их эксплуатации в горнодобывающей промышленности. Значительная недогрузка ленты, в результате того, что колебания грузопотока от 10 до 100% отличаются от расчетного. Отклонение режимов работы главного привода и натяжной станции от предполагаемых, вызванное выбором оборудования на основе максимального значения коэффициента использования во времени. Отмечается, что экономическая эффективность может быть достигнута за счет приведения к согласованности режимов работы и параметров ленточного конвейера с фактическим входным грузопотоком.

Для стабилизации загрузки ленточного конвейера, следует обеспечить, чтобы поступающий грузопоток был непрерывным и равномерным. Между тем, поступающий поток не является равномерным. Получается, что для улучшения показателей эффективности при использовании ленточных конвейеров следует обеспечивать за счет непрерывности. Для этого надо либо оказывать воздействие на грузопоток, либо регулировать скорость конвейера.

Подобного можно достичь двумя способами.

1.3. Применение бункеров и дискретное регулирование скорости ленты

При использовании бункеров достигается непрерывность работы выемочной машины, если происходит короткий по времени отказ одной из составляющих транспортной схемы. Работы Назаренко В. М. рассматривают системы управления скоростью ленточного конвейера при помощи бункеров. Они выполнены в 1987-1992 годах на рудных карьерах. Автор представил описания нескольких возможных режимов управления. В случае небольшой вместимости бункера, которая может составлять 10 процентов от массы груза, находящегося на ленте, и при наличии регулирующего устройства его разгрузочной щели наиболее желателен способ согласования скорости

ленточного конвейера и интенсивности грузопотока за счет изменения размеров разгрузочной щели [22]. Данный способ, а также регулирование приводом позволяют значительно уменьшить недогрузку ленточного конвейера.

В случае большой вместимости бункера, чтобы обеспечить накопление максимального запаса, рекомендуется транспортировать груз с загрузкой, приближенной к расчетной. Транспортировка груза осуществляется при накапливании в бункере груза до определенного уровня, а затем цикл повторяется заново. При применении такого способа, не допускается превышение периода включения приводных двигателей. Указывается, что при использовании дробилок в ходе технологического процесса, осуществление режима работы ленточного конвейера упрощается. Дробилки измельчают груз, изменяют его частотный спектр размеров кусков, что дает возможность прогнозировать частоты спектра в зависимости от сортности руды. Чтобы снизить количество пуско-тормозных режимов, рекомендуется [22] управлять приводом конвейера при присутствии в регуляторе зоны нечувствительности, размер которой можно варьировать в зависимости от статистических характеристик исходного грузопотока. Величина зоны нечувствительности определяется по спектральной плотности грузопотока.

В работе [22] уделяется внимание вопросу управления скоростью в случае, когда математическое ожидание грузопотока не является постоянной во времени величиной грузопотока. Основываясь на анализе статистических характеристик нестационарного изначального грузопотока, можно представить его математическое ожидание из n значений, отличающихся на мерную величину друг от друга, чему соответствуют n уровней количества материала в бункере и скоростей ленточного конвейера. В таком случае вместимость бункера должна выбираться из соображения перевода ленточного конвейера с одного уровня скорости на другой с ускорением или замедлением на два

порядка ниже, чем пусковые. При значительной нестационарности исходного грузопотока необходимо поддерживать работу конвейера на более высокой скорости на время, за которое произошло заполнение бункера до предыдущего уровня. Когда груз в бункере будет достигать верхнего уровня, необходимо переключить ленточный конвейер на максимальную скорость с пусковым ускорением. Когда будет достигаться равенство входного и выходного грузопотоков, бункер можно разгрузить, увеличив скорость. Ситуация, когда происходит смена скорости ленточного конвейера с ползучей скорости на максимальную, наиболее сложна. Это та, ситуация, когда происходит переход с самого низкого уровня в бункере на самый высокий. При равноускоренном разгоне с ускорением a , расчетным весом q , и скоростью v , вместимость бункера, которая позволяет сохранить надежность ленточного конвейера рассчитывается по следующей формуле.

$$Q_b = \frac{0,5qv^2}{a}.$$

Использование подобных бункеров обеспечивает снижение количества пуско-тормозных режимов. Утверждается, что при данном режиме динамика практически отсутствует, при номинальной наполненности ленточного конвейера режим постоянно статистический, благодаря чему осуществляется эффективное использование ленточного конвейера и приводов.

Иногда возникают сложности с контролем массы груза по причине отсутствия возможности установить средства для контроля в месте загрузки. В таком случае предполагаемое количество груза рассчитывается с помощью корреляционного анализа на основе выявленной связи грузопотока и потребляемой активной мощности двигателя.

Среди режимов, обеспечивающих переменную скорость транспортировки, наиболее прост в осуществлении режим, когда уровень скорости

устанавливается в зависимости от дискретного уровня производительности питателя на загрузке.

При использовании бункеров ленточный конвейер работает в режиме пуск-торможение, что влечет увеличение износа механического оборудования конвейера. Кроме того, при подземных работах такой метод нельзя применить, поскольку пространство горных выработок ограничено.

А.Б. Филимонов и Е.К. Травкин решали задачу управления грузопотоками на сборном участке конвейерной линии с несколькими бункерами. Учитывая, что каждый конвейер имеет одинаковую скорость перемещения груза, а количество груза, поступающего на конвейер, регулируется с помощью осредняющих бункеров, авторы рекомендуют управлять грузопотоками упреждающе, дабы избежать простоя конвейеров, которые вызваны перегрузкой сборного конвейера и переполненностью бункеров.

1.4. Регулирование скорости конвейеров в зависимости от грузопотока

В исследовании Лобачевой А.К. [62,127,128] представлен метод синтеза системы непрерывного и дискретного регулирования скорости ленты конвейера в условиях случайного шахтного грузопотока. При дискретном управлении, скорость конвейера будет изменяться скачкообразно по достижении грузопотоком определенного уровня. Лобачева описывает методику, с помощью которой устанавливаются основные параметры дискретного управления. Такие параметры включают в себя: эффективные уровни переключения скорости, рациональное число переключений, среднее время работы на каждом уровне, погонную нагрузку при дискретном регулировании.

В.В Солодовников в своих работах [108] исследует синтез оптимальной системы управления в частотной области. По разработанной автором методике,

частотная передаточная функция $W(j\omega)$ оптимальной системы регулирования получается по следующей формуле.

$$W(j\omega) = \frac{1}{2\pi\psi(j\omega)} \int_0^{\infty} e^{-j\omega t} dt \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_{h\varphi}(\omega)}{\psi^*(j\omega)} e^{j\omega t} d\omega,$$

где $S_{h\varphi}(\omega)$ - взаимная спектральная плотность, $S_{\varphi}(\omega)$ - спектральная плотность сигнала, пропорциональная поступающему грузопотоку, $S_h(\omega)$ - спектральная плотность сигнала, пропорционального рассчитаной скорости полотна конвейера, $\psi(j\omega)$ и $\psi^*(j\omega)$ - вспомогательные функции, которые удовлетворяют равенству

$$\psi(j\omega)\psi^*(j\omega) = |\psi(j\omega)|^2 = S_{\varphi}(\omega).$$

По найденной оптимальной передаточной функции системы и передаточной функции неизменяемой части системы, автором была создана модель корректирующего устройства. Методы для исследования были графическими и аналитическими. В. В. Солодовников изучил, каким образом возможно подключить корректирующее устройство, рассмотрел плюсы и минусы каждого варианта. Автор установил допустимую ошибку регулирования, которая задается геометрией роликов. Кроме того, он разработал рекомендации по созданию оптимальной системы регулирования при задержках и значительных помехах. В работе дан общий обзор по способам регулирования скорости двигателей постоянного и переменного тока, применяемых на конвейерных линиях.

Автор не применил в данной модели величину натяжения ленты, что, к сожалению, является значительным упущением. Натяжение ленты является важной величиной для ленточного конвейера. Таким образом, не было представлено оценок уровня влияния типа натяжного устройства и быстроты

его действий на переходные процессы конвейера. Стабилизация тяговой способности приводов конвейера также была исключена из поля исследования. Аналоговая модель конвейера рассчитывалась касательно скорости ленты, принималось, что лента конвейера двигалась совместно с приводным барабаном, без пробуксовки. Вопрос стабилизации тяговой способности приводов конвейера актуален, поскольку при переходе с меньшей на большую скорость, может произойти пробуксовка привода, которая опасна возгоранием угольной пыли.

О.Н. Петков изучил карьерные угольные грузопотоки, рассчитал их предполагаемые характеристики. Автор показал, что распределения длительностей временных отрезков поступления и отсутствия грузопотока происходят экспоненциально. В работе О.Н. Петкова [76] представлена модель грузопотока, выполненная вычислительными средствами «МАСС». Предложены модели конвейера и привода с асинхронным электродвигателем с фазным ротором. Для моделей конвейера и привода в работе получены коэффициенты передачи, постоянные времени и постоянные запаздывания. Автор сумел решить задачу регулирования скорости ленточного конвейера с целью стабилизации погонной нагрузки, однако эти исследования получены при сильном упрощении модели. Настройки регуляторов рассчитаны под определенный грузопоток. Поэтому приведенную в работе систему нельзя использовать для грузопотоков на других карьерах или шахтах.

На рубеже 1990х годов в свет вышли работы, в которых исследовались системы управления ленточными конвейерами. Работы Мамалыги В.М., Назаренко В.М., Сокотнюка Ю.А. посвящены управлению асинхронными приводами конвейеров, которые установлены по разным технологическим схемам.

Мамалыга В.М. [67] представил способ построения системы автоматического распределения нагрузок в n -двигательном конвейере, который должен обеспечивать равномерное распределение нагрузок между приводами в зависимости от расположения и количества приводов, скорости конвейера. Это позволило бы снизить статический запас прочности ленты. В результате – стоимость ленты снижается. Дополнительным преимуществом является то, что размеры конвейерной линии удлиняются.

Автор уделил внимание оптимизации динамических режимов работы ленточного конвейера. В работе предлагается при запуске конвейера ограничивать динамические нагрузки, а именно рывок и ускорение. Это обеспечивает меньший износ ленты конвейера, позволяет снизить прочность ленты, и стоимость ленты. При работе конвейера с постоянной скоростью следует стремиться к точности регулирования скорости, тогда износ и пробег ленты снижается.

В диссертационном исследовании Мамалыги В.М. [67] представлена методика синтеза оптимальной системы управления, которая обеспечивает плавный режим пуска и высокую точность регулирования скорости. Описан способ постройки и наладки системы автоматического управления многодвигательным конвейером. В результате достигается равномерное распределение нагрузки на все функционирующие приводы в независимости от загрузки ленты конвейера. Между тем, автор не рассматривал вопрос непосредственного регулирования скорости конвейера в зависимости грузопотока на ленте.

В работе Сокотнюка Ю.А. [103] разработана система автоматического управления наклонным ленточным конвейером с регулируемым электроприводом, который обеспечивает ограничение динамических нагрузок привода. В системе вводится обратная связь по разности скоростей ленты на

приводных и натяжном барабанах. В системе используется общий регулятор скорости вращения и тяговой способности второго барабана в зависимости от состояния первого барабана, что приводит к выравниванию тяговой способности обоих барабанов.

Рассматривая систему управления приводами конвейера, автор [103], делает вывод о невозможности добиться эффективного демпфирования колебаний динамических нагрузок на привод, связанных с упруго-жесткими свойствами ленты, используя только регулятор скорости привода. При введении дополнительных показателей, система только усложняется и возможность ее практического использования очень мала.

В работе Кожубаева Ю.Н. [58] представлена разработанная модель ленточного конвейера, отражающая его основные свойства, которую предполагает автор можно использовать для разработки, наладки и исследования работы ленточных конвейеров в различных режимах. Автор исследовал 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.

В работе [58] не решены задачи синтеза алгоритма управления перемещением каретки натяжного устройства для поддержания отношения натяжения грузовой ленты к холостой в допустимых пределах.

Целью работы Дмитриевой В.В. [33] являлась создание системы автоматического управления скоростью движения конвейерной ленты, которая позволяет обеспечить равномерную загрузку конвейера. В работе представлена математическая модель многомерной системы управления движением ленты, с

учетом работы частотно-управляемого асинхронного электропривода. Модель [33] позволяет 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 нагрузкой одноприводного конвейера [33], которая позволяет реализовать алгоритм рациональной загрузки 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».

Таким образом, на настоящее время вопросы, связанные с стабилизацией тягового фактора ленточных конвейерных установок, либо исследованы недостаточно полно, либо ориентированы на решение относительно узких прикладных задач. В частности, отсутствуют структура и состав комплекса технических средств автоматической системы стабилизации тягового фактора конвейера, обобщающие накопленный к настоящему времени опыт их проведения. Все это свидетельствует о необходимости дальнейшего развития исследований по данному направлению. В настоящее время с развитием компьютерной техники можно решать такие задачи, используя численные методы расчета, и достаточно надежно определять натяжения в характерных точках конвейера в текущий момент времени. Задача 'Автоматическая система стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера' вообще не рассматривались.

1.5. Задачи диссертационного исследования

Повышение эффективности эксплуатации ленточного конвейера за счет повышения мощности приводов и частоты вращения приводных барабанов вызывает необходимость дополнительного натяжения ленты конвейера, что ведет к появлению эффекта пробуксовки и резкому износу ленты. Стабилизация величины тягового фактора электродвигателей будет обеспечивать беспробуксовочную работу приводов ленточных конвейеров, приведет к уменьшению динамических усилий в ленте и снизит коэффициент запаса прочности конвейерной ленты, позволяя уменьшить затраты на конвейерной ленте.

В последние годы все большее число шахт переходят на поточное и поточно-циклическое транспортирование полезного ископаемого. Увеличение длин транспортирования и объемов грузопотоков вызвало потребность формирования высокопроизводительных ленточных конвейеров большой длины и мощности с использованием дорогостоящих синтетических и резиновых лент. Это приводит к внушительному увеличению цен конвейерной установки.

В настоящее время процент использования дорогостоящих конвейерных установок на горных предприятиях государства Республика Союз Мьянма составляет до 50,7% [144] по применению, и загрузка их по времени не превышает 60,7%. Низкая эффективность применения конвейерных установок приводит к повышению холостого пробега ленты неоправданным затратам на электроэнергию, износу ленты, роликов. Неравномерность загрузки является основной причиной проскальзывания ленты на приводных барабанах конвейера, что увеличивает износ и число отказов транспортной магистрали.

Неэффективное применение конвейерных линий связано еще и с тем, что грузопотоки, поступающие от горных машин, обладают значительной

дискретностью и неравномерностью во времени, наличием большого числа интервалов отсутствия груза. Существенная неравномерность загрузки полотна является основной причиной износа ленты шахтного конвейера. На рис.1.5. приведены данные реального грузопотока, поступающего на ленточный конвейер за пятидневный период шахты «Полысаевская АО «СУЭК-Кузбасс»». В ежедневном потоке обязательно наблюдается один, два, иногда больше пиковых нагрузок, превышающих в 40-50 раз среднюю величину потока. Такие импульсные броски нагрузки приводят к проскальзыванию ленты на приводных барабанах конвейера. На мощных ленточных конвейерах регулирование натяжения ленты оказывается необходимым условием эффективной эксплуатации этих дорогостоящих горных машин.

Решением одной из задач повышения эффективности эксплуатации ленточного конвейера является разработка системы автоматической стабилизации натяжения ленты конвейерных установок.

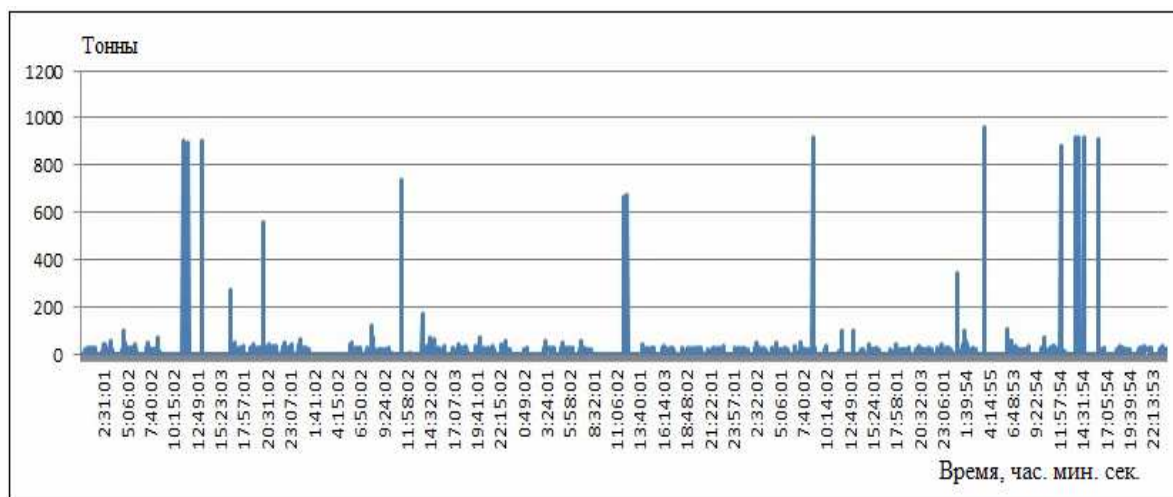


Рисунок. 1.5. Реальный поток угля, поступающего на ленточный конвейер

Создание автоматической системы стабилизации тягового фактора конвейеров позволит устранить проскальзывание ленты, продлить срок ее службы и ленты, повысить эффективность эксплуатации. Разработка системы

автоматической стабилизации тягового фактора мощной ленточной конвейерной установки с двумя приводами, будучи актуальной, является основной задачей настоящего диссертационного исследования.

Для решения этой задачи необходимо разработать:

- математическую модель движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей;
- алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки;
- автоматическую систему управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией натяжения ленты.

На конвейерах большой мощности регулирование натяжения ленты является необходимым условием эффективной эксплуатации этих дорогостоящих горных машин. Поэтому, создание автоматической системы стабилизации тягового фактора конвейерных установок большой мощности, с двумя приводами актуально для угольных предприятий Российской Федерации и Республики Союз Мьянма.

Разработанную систему регулирования натяжения ленты конвейера предполагается использовать на шахте „Калева” и угольных разрезах в государстве Союз Мьянма, как один из важных факторов повышения эффективности работы горнодобывающих производств страны.

1.6. Выводы по главе

Выполнены анализ исследований по вопросам стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера и анализ предшествующих исследований по вопросам моделирования движения ленты конвейера.

Определены основные этапы научного теоретического и экспериментальных исследований:

1. первый этап – создание адекватной математической модели движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей;
2. второй этап – разработка алгоритма автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки;
3. третий этап – разработка автоматической системы управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией ее натяжения.

Повышение эффективности горнодобывающих предприятий, обеспечения безопасности проведения горных работ, рост длины очистных участков угольных шахт требует увеличения нагрузки на системы транспортирования полезных ископаемых, применения конвейерных установок большой мощности. На конвейерах большой мощности регулирование натяжения ленты является необходимым условием эффективной эксплуатации этих дорогостоящих горных машин. Поэтому, создание автоматической системы стабилизации тягового фактора конвейерных установок большой мощности, актуальна для угольных предприятий Российской Федерации и Республики Союз Мьянма.

Выполнено обоснование актуальности научно-технической задачи автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера.

Сформулированы задачи диссертационного исследования:

- разработать и исследовать математическую модель движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей;
- разработать алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки;
- разработать автоматическую систему управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией натяжения ленты.

ГЛАВА 2. Разработка и исследование математической модели движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей.

Для решения основной задачи исследования – синтез системы автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера необходимо составить математическую модель объекта управления – модель движения ленточного конвейера с натяжным устройством. Ленточный конвейер как объект управления является довольно сложной системы, лента – система с распределенными параметрами, ее динамика движения существенно зависит от ее механических характеристик как твердого тела. Поэтому при составлении достаточно точной математической модели движения ленточного полотна следуют использовать знания о механических свойствах твердых тел при переменных нагрузках.

Однако в задаче управления движением ленты конвейера, как показали исследования [42], выполненные еще в прошлом веке, нет необходимости рассматривая ленту как твердое тело, учитывать ее механические свойства ползучести и релаксации, а достаточно учитывать лишь ее упругость, что позволяет рассматривать ленту как механическую систему масс, связанных упругими элементами, что позволяет при составлении уравнений движения этой системы конечномерную концепцию представления модели, что позволяет использовать второй метод Лагранжа, когда необходимо и достаточно учитывать потенциальную и кинетическую энергии электромеханической системы конвейера.

Впервые конечномерную модель движения ленты создал И.В.Запенин [42], в диссертации В.В. Дмитриевой [33] использован его метод, для создания математической модели сложной системы управления движением ленты магистрального конвейера с частотно-управляемым асинхронным приводом.

Созданная В.В. Дмитриевой модель [33] позволяет исследовать конвейер и случайный грузопоток как единый объект управления, проводить моделирование движение ленты, синтезировать систему стабилизации погонной нагрузки конвейера.

В настоящей диссертации создаваемая математическая модель в отличии от известных учитывает факт наличия у ленточного конвейера двух приводов и натяжного устройства. Расчетная конечномерная схема отличается от предыдущих числом масс, представляющих ленту, содержит массы двух приводов и массу натяжного устройства. Для составления математической модели системы с распределенными параметрами был использован метод кусочно-линейной аппроксимации. Модель движения ленты, представлена системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Модель будет реализована в программной среде Matlab/Simulink. Simulink – интерактивный инструмент для моделирования, имитации и анализа динамических систем. Он дает возможность строить графические блок-диаграммы, имитировать динамические системы, исследовать работоспособность систем и совершенствовать проекты. Это высокопроизводительное программное средство позволяет выполнять для исследования движения динамических систем, описываемых обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями. Применяя стандартные конструкции Simulink, подобрана структурная модель системы, содержащей в себе модель контура ленты конвейера и модель натяжного устройства. Для моделирования были использованы блоки: State Space, Mux и прочие, моделирование проводилось для числовых значений конкретного конвейера. Моделирование позволяет определять скорости и натяжения в характерных точках ленточного конвейера, что необходимо для процедуры синтеза системы управления скоростью движения конвейерной ленты с целью исключения

пробуксовки на приводных барабанах и автоматически распределять нагрузку равномерно между приводами при любой скорости движения конвейера.

2.1. Модель конвейера с двухдвигательным приводом и натяжным устройством.

2.1.1. Модель движения ленты двухприводного ленточного конвейера.

Для разработки математической модели движения ленты конвейера составляем расчетную схему движения системы нескольких масс, соединенных упругими элементами, в которой учитываются инерционные элементы, связи между ними и все действующие на эту систему масс силы.

Для этой цели принимаются основные допущения:

- отсутствие влияния провеса ленты между роlikоопорами на ее упругие свойства;
- вязко-упругие свойства ленты и сопротивления ее перемещению учитываются в соответствии с конечномерной моделью движения ленты.

Ленточный конвейер является системой с распределенными параметрами, для составления математической модели ее движения принята идея кусочно-линейной аппроксимации непрерывной ленты в виде системы сосредоточенных масс, предложенной в шестидесятых годах прошлого века И.В. Запениным [42].

Пользуясь методом кусочно-линейной аппроксимации распределения массы ленты, согласно схемы, представленной на рис. 2.1, [8] составляем расчетную схему конечномерного представления конвейерной ленты.

Принимаем, что масса грузовой части ленты представляется тремя сосредоточенными массами m_1, m_2, m_3 , а масса порожней части ленты представляется двумя сосредоточенными массами m_4, m_5 . Масса натяжного

устройства обозначена m_6 . В расчетную схему, представленную на рис.2.1, внесены два привода M_1, M_2 на барабаны и привод $M_{\text{нп}}$ устройства натяжения (НУ), расположенного в хвостовой части конвейера.

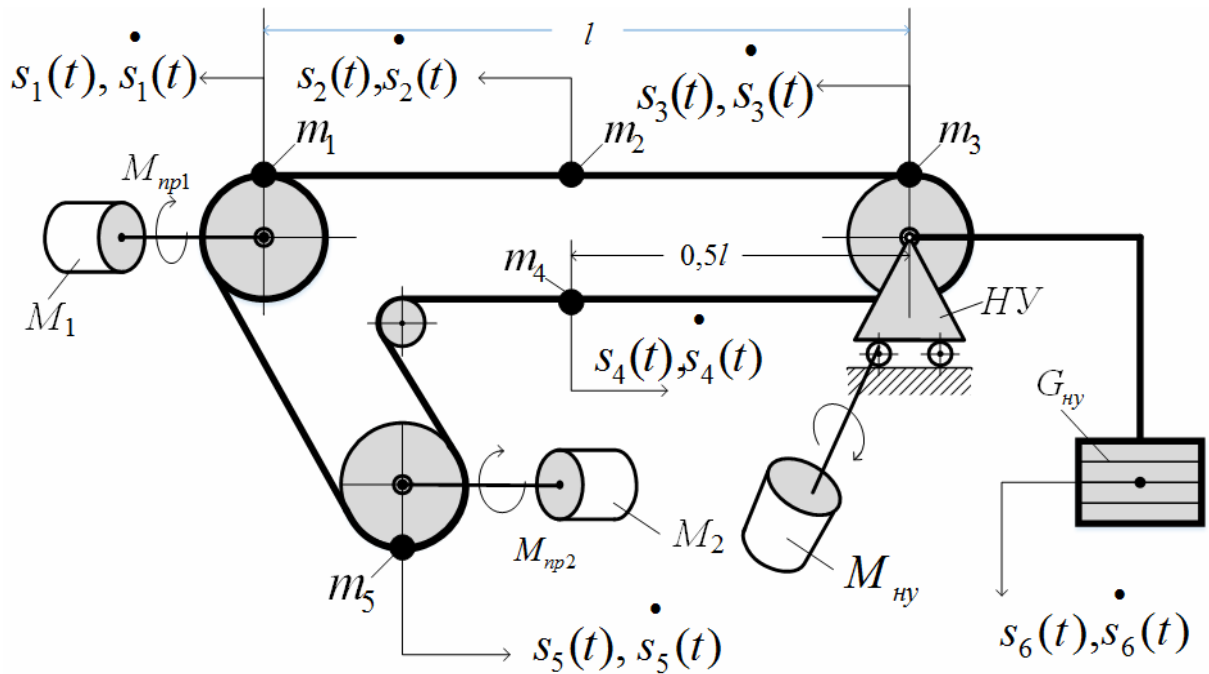


Рисунок.2.1. Расчетная схема ленточного конвейера с двумя приводами

Перемещение и скорость перемещения соответствующей массы следует принимать $s_i(t), \dot{s}_i(t)$, $i=1,6$ в качестве переменных координат расчетной схемы.

Для составления математической модели движения конвейера в виде шестимассовой системы был использован метод Лагранжа второго рода. Конечномерная математическая модель движения конвейера с грузом описывается в обобщенных координатах $x_i(t) = s_i(t), \dot{x}_i(t) = \dot{s}_i$, $i = \overline{1,6}$ – перемещения и скорости перемещения сосредоточенных масс соответственно. Модель составлена по общей методологии уравнений Лагранжа второго рода, но с учетом того, что для расчетной схемы системы, представленной на рис. 2.1, кинетическая энергия системы является функцией только обобщенных

скоростей, поэтому для применения метода Лагранжа использованы уравнения в виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} T(\dot{x}_i) \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \Pi(x_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} A(x_i) = 0, \quad i = \overline{1,6}. \quad (2.1)$$

где $T(x_i)$ – кинетическая энергия i -го участка, $\Pi(x_i)$ – потенциальная энергия этого участка, $A(x_i)$ – работа внешних сил на этом участке.

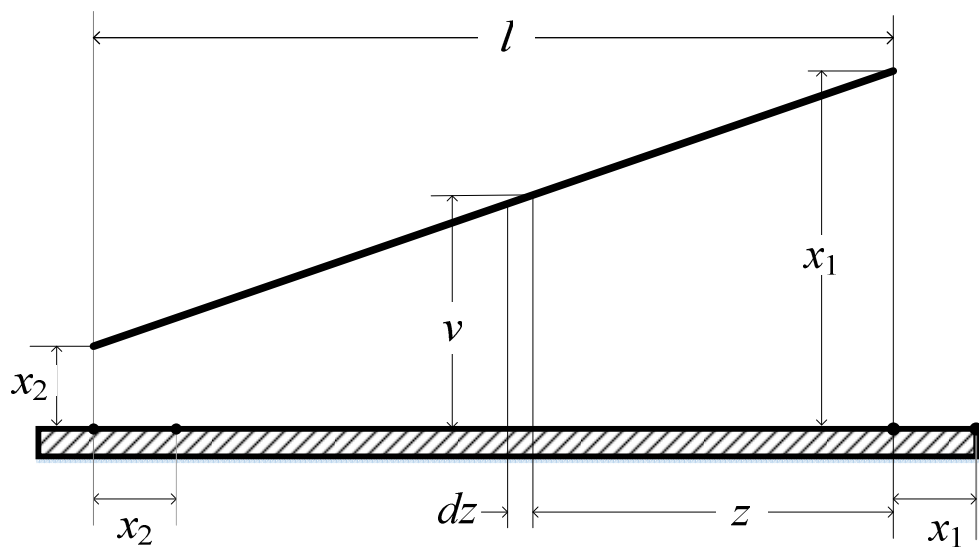


Рисунок 2.2 Схема замещения участка с распределенными параметрами сосредоточенной массой

Кинетическая энергия любого участка длиной l с распределенной массой $\frac{G}{g}$ определяется исходя из дифференциального подхода, схема которого показана на рис. 2.2. Во-первых, конвейерная лента рассматривается как однородное протяженное тело, тогда на участке ленты x_1, x_2 выделяется элементарный участок dz на расстоянии z от начала отсчета. Скорость перемещения элементарного участка равна v , при этом $\square_1 > v > \square_2$.

Из рис. 2.2 видно, что $\frac{\dot{x}_i - v}{z} = \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l}$. Отсюда $v = \dot{x}_i - \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l} z$.

Кинетическая энергия элементарного участка dz , длиной l равна

$$dT = \frac{G_{ij}v^2}{g^2} dz.$$

Используя в полученном выражении найденную выше скорость v , кинетическая энергия элементарного участка равна:

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

где G_{ij} – вес ленты, роlikоопор и груза на участке между точками i и j ,

l_{ij} – длина участка, g – ускорение свободного падения.

Кинетическая энергия ленты и груза, равномерно распределенного на соответствующем участке между точками i и j , представлена выражением

$$T(\dot{x}_i, \dot{x}_j) = \frac{G_{ij}}{6g} (\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i \dot{x}_j + \dot{x}_j^2), \quad (2.2)$$

Потенциальная энергия ij участка длиной l_{ij} складывается из энергии упругих деформаций и потенциальной энергии замкнутого контура ленты с распределенной массой

$$П_{ij}(x_i, x_j) = c_{ij} \frac{(x_i - x_j)^2}{2} + G_{ij} l_{ij} \frac{x_i + x_j}{2} \sin \beta, \quad (2.3)$$

здесь c_{ij} – жесткость участка, β – угол наклона конвейера к горизонту.

Работа внешних сил на ij участке определяется суммой сил сопротивления движению и движущей силы привода, которое находится из выражений

$$A_{ij}(x_i, x_j) = G_{ij} l_{ij} \mu \frac{x_i + x_j}{2} \cos \beta, \quad A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_{\sigma 1}} x_1 - \frac{M_{np2}}{R_{\sigma 2}} x_5, \quad (2.4)$$

где μ – коэффициент сопротивления движению, M_{np1} и M_{np2} – движущие моменты приводов, приведенные к радиусам $R_{\sigma 1}$, $R_{\sigma 2}$ приводных барабанов.

Работа сил внутреннего трения на участке ij определяется из предположения, что силы внутреннего трения пропорциональны скоростям деформации:

$$A_{ij}(x_i, \dot{x}_i) = 0,5\eta((\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})(x_i - x_{i+1}) + (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})(x_i - x_{i-1})), \quad (2.5)$$

где η – коэффициент вязкости ленты.

В расчетной схеме кинетическая энергия системы формируется с учетом кинетической энергии замкнутого контура ленты с одинаково распределенным на ней грузом в верхней ветви T_K , кинетической энергии приводных устройств T_H и кинетической энергии натяжного устройства T_H .

Кинетическая энергия замкнутого контура ленты:

$$T_K = \frac{G_z l}{6g}(\dot{x}_1^2 + \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) + \frac{G_z l}{6g}(\dot{x}_2^2 + \dot{x}_2 \dot{x}_3 + \dot{x}_3^2) + \frac{G_n l}{6g}(\dot{x}_3^2 + \dot{x}_3 \dot{x}_4 + \dot{x}_4^2) + \\ + \frac{G_n l}{6g}(\dot{x}_4^2 + \dot{x}_4 \dot{x}_5 + \dot{x}_5^2) + \frac{G_n l_{np}}{6g}(\dot{x}_5^2 + \dot{x}_5 \dot{x}_1 + \dot{x}_1^2),$$

где G_n , G_z – погонный вес движущихся частей соответственно порожней и грузенной ветви, $l_{np} = L_{np}/2$ – длины участков на промежуточной ветви.

Кинетическая энергия приводных устройств:

$$T_n = \frac{m_{np1} \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_{np2} \dot{x}_5^2}{2},$$

где m_{np1}, m_{np2} – масса вращающихся частей электродвигателя, редуктора, муфт и приводного барабана, приведенная к ободу барабана, соответственно первого и второго двигателя.

Кинетическая энергия натяжного устройства определяется выражением

$$T_H = \frac{G_{ny} \dot{x}_6^2}{2g},$$

где G_{ny} , \dot{x}_6 - соответственно вес и скорость перемещения натяжного устройства.

Суммируя найденные соотношения, определяем выражения для полной кинетической энергии системы:

$$\begin{aligned} T_{\Sigma} = & \frac{G_{\varepsilon} l}{6g} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) + \frac{G_{\varepsilon} l}{6g} (\dot{x}_2^2 + \dot{x}_2 \dot{x}_3 + \dot{x}_3^2) + \frac{G_n l}{6g} (\dot{x}_3^2 + \dot{x}_3 \dot{x}_4 + \dot{x}_4^2) + \\ & + \frac{G_n l}{6g} (\dot{x}_4^2 + \dot{x}_4 \dot{x}_5 + \dot{x}_5^2) + \frac{G_n l_{np}}{6g} (\dot{x}_5^2 + \dot{x}_5 \dot{x}_1 + \dot{x}_1^2) + \frac{m_{np1} \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_{np2} \dot{x}_5^2}{2} + \frac{G_{ny} \dot{x}_6^2}{2g}. \end{aligned}$$

Найдя производные по времени от частных производных кинетической энергии для каждой обобщенной координаты[31], получим:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_1} T_{\Sigma} \right) = \frac{G_{\varepsilon} l}{6g} (2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + \frac{G_n l_{np}}{6g} (2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_5) + m_{np1} \ddot{x}_1,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_2} T_{\Sigma} \right) = \frac{G_{\varepsilon} l}{6g} (2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + \frac{G_{\varepsilon} l}{6g} (2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_3),$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_3} T_{\Sigma} \right) = \frac{G_{\varepsilon} l}{6g} (2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_2) + \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_4),$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_4} T_{\Sigma} \right) = \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_3) + \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_5),$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_5} T_{\Sigma} \right) = \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_4) + \frac{G_n l_{np}}{6g} (2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_1) + m_{np2} \ddot{x}_5,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_6} T_{\Sigma} \right) = \frac{G_{ny} \ddot{x}_6}{g}.$$

Потенциальная энергия системы состоит из потенциальной энергии упругих деформаций системы и потенциальной энергии положения натяжного устройства Π_{ε} . Потенциальная энергия упругой деформации системы при

принятых допущениях вычисляется с учетом энергии замкнутого контура Π_K ленты конвейера и в канате натяжного устройства Π_H [34].

Потенциальная энергия замкнутого контура конвейерной ленты:

$$\Pi_K = \frac{(x_1 - x_2)^2 C_1}{2} + \frac{(x_2 - x_3)^2 C_2}{2} + \frac{(x_3 - x_4)^2 C_3}{2} + \frac{(x_4 - x_5)^2 C_4}{2} - \frac{(x_5 - x_1)^2 C_5}{2},$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 , - коэффициенты жесткости соответствующих участков конвейерной ленты. Поскольку участки ленты однородны, то предполагаются что все коэффициенты жесткости равны:

$$\Pi_K = \frac{(x_1 - x_2)^2 C}{2} + \frac{(x_2 - x_3)^2 C}{2} + \frac{(x_3 - x_4)^2 C}{2} + \frac{(x_4 - x_5)^2 C}{2} - \frac{(x_5 - x_1)^2 C}{2},$$

где C - коэффициент жесткости каждого участка.

Потенциальная энергия канатов натяжного устройства:

$$\Pi_H = 0.5 \left(\frac{x_3 - x_4}{2} - x_6 \right)^2 C_k,$$

где C_k - коэффициент жесткости каната.

Потенциальная энергия положения натяжного устройства:

$$\Pi_z = G_{ny} x_6.$$

Суммируя полученные выражения и производя алгебраические преобразования, найдем выражения для полной потенциальной энергии системы:

$$\begin{aligned} \Pi_K = & \frac{(x_1 - x_2)^2 C}{2} + \frac{(x_2 - x_3)^2 C}{2} + \frac{(x_3 - x_4)^2 C}{2} + \frac{(x_4 - x_5)^2 C}{2} - \frac{(x_5 - x_1)^2 C}{2} + \\ & + 0.5 \left(\frac{x_3 - x_4}{2} - x_6 \right)^2 C_k + G_{ny} x_6. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Найдены частные производные по обобщенным координатам от потенциальной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \Pi_{\Sigma} = (x_1 - x_2)C + (x_1 - x_6)C,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_2} \Pi_{\Sigma} = (x_2 - x_1)C + (x_2 - x_3)C,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_3} \Pi_{\Sigma} = (x_3 - x_2)C + (x_3 - x_4)C + \frac{x_3 - x_4}{4} C_k - \frac{x_6}{2} C_k,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_4} \Pi_{\Sigma} = (x_4 - x_3)C + (x_4 - x_5)C + \frac{x_4 - x_3}{4} C_k - \frac{x_6}{2} C_k,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_5} \Pi_{\Sigma} = (x_5 - x_4)C + (x_5 - x_1)C,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_6} \Pi_{\Sigma} = -\frac{x_3}{2} C_k + \frac{x_4}{2} C_k + x_6 C_k + G_{ny}.$$

Работа внешних сил складывается из работы, движущей силы приводов и сил сопротивления движению ветвей ленты и натяжных грузов.

Работа движущих сил приводов:

$$A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_{\delta 1}} x_1 - \frac{M_{np2}}{R_{\delta 2}} x_5,$$

где M_{np1} , M_{np2} – моменты двигателей, приведенные к валу их приводных барабанов; $R_{\delta 1}$, $R_{\delta 2}$ – радиусы приводных барабанов. Допустим, что $R_{\delta 1} = R_{\delta 2} = R_{\delta}$, тогда:

$$A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_{\delta}} x_1 - \frac{M_{np2}}{R_{\delta}} x_5.$$

Работа сопротивления движению ветвей ленты:

$$A_K = G_{\varepsilon} l w' \frac{x_1 + x_2}{2} + G_{\varepsilon} l w' \frac{x_2 + x_3}{2} + G_n l w'' \frac{x_3 + x_4}{2} + G_n l w'' \frac{x_4 + x_5}{2} + G_n l_{np} w'' \frac{x_5 + x_1}{2},$$

где w' , w'' – коэффициенты сопротивления движению груженой и порожней ветвей будем считать равными. Силы сопротивления движению участков W_i всегда направлены противоположно скорости \dot{x}_i этих участков, то есть

$$W_i = G_i l_{ij} w \operatorname{sgn} \dot{x}_i.$$

Работа сил сопротивления движению натяжных грузов:

$$A_H = \pm G_{ny} f x_6,$$

где f – приведенный коэффициент сопротивления движению натяжных грузов.

Найдены частные производные по обобщенным координатам работы внешних сил:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} A = -\frac{M_{np1}}{R_{\sigma}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) + \frac{1}{2} G_e l w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + \frac{1}{2} G_n l_{np} w \operatorname{sgn} \dot{x}_1,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_2} A = \frac{1}{2} G_e l w \operatorname{sgn} \dot{x}_2 + \frac{1}{2} G_e l w \operatorname{sgn} \dot{x}_2 = G_e l w \operatorname{sgn} \dot{x}_2,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_3} A = \frac{1}{2} G_e l w \operatorname{sgn} \dot{x}_3 + \frac{1}{2} G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_3,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_4} A = \frac{1}{2} G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_4 + \frac{1}{2} G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_4 = G_e l w \operatorname{sgn} \dot{x}_4,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_5} A = -\frac{M_{np2}}{R_{\sigma}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5) + \frac{1}{2} G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + \frac{1}{2} G_n l_{np} w \operatorname{sgn} \dot{x}_5,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_6} A = G_{ny} f w \operatorname{sgn} \dot{x}_6.$$

Работа сил внутреннего трения замкнутого контура:

$$A_{\sigma} = (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)(x_1 - x_2)\eta + (\dot{x}_2 - \dot{x}_3)(x_2 - x_3)\eta + (\dot{x}_3 - \dot{x}_4)(x_3 - x_4)\eta + (\dot{x}_4 - \dot{x}_5)(x_4 - x_5)\eta + \\ + (\dot{x}_5 - \dot{x}_1)(x_5 - x_1)\eta,$$

где η – приведенный коэффициент вязкости.

Частные производные по координатам от работы сил внутреннего трения:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} A_e = (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)\eta + (\dot{x}_1 - \dot{x}_6)\eta,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_2} A_e = (\dot{x}_2 - \dot{x}_3)\eta + (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)\eta,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_3} A_e = (\dot{x}_3 - \dot{x}_4)\eta + (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)\eta,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_4} A_e = (\dot{x}_4 - \dot{x}_5)\eta + (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)\eta,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_5} A_e = (\dot{x}_5 - \dot{x}_1)\eta + (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)\eta,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_6} A_e = 0.$$

Введя обозначения $\frac{G_e l}{6g} = m_e$, $\frac{G_n l}{6g} = m_n$, $\frac{G_n l_{np}}{6g} = m_m$, получим математическую модель конвейера, представляющую собой систему из шести нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{aligned} m_e(2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_m(2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_6) + m_{np1}\ddot{x}_1 + C(2x_1 - x_2 - x_6) + \frac{1}{2}(G_e l + G_n l_{np})w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + \\ + \eta(2\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_6) = \frac{M_{np1}}{R} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1), \\ m_e(2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + m_e(2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_3) + C(2x_2 - x_1 - x_3) + G_e w \operatorname{sgn} \dot{x}_2 + \eta(2\dot{x}_2 - \dot{x}_3 - \dot{x}_1) = 0, \\ m_e(2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_2) + m_n(2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_4) + C(2x_3 - x_2 - x_4) + \frac{1}{4}(x_3 - x_4 - 2x_6)C_k + \frac{1}{2}(G_e + G_n)lw \operatorname{sgn} \dot{x}_3 + \\ + \eta(2\dot{x}_3 - \dot{x}_2 - \dot{x}_4) = 0, \\ m_n(2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_3) + m_n(2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_5) + C(2x_4 - x_3 - x_5) + \frac{1}{4}(x_4 - x_3 + 2x_6)C_k + G_n lw \operatorname{sgn} \dot{x}_4 + \\ + \eta(2\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - \dot{x}_5) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_n(2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_4) + m_m(2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_1) + m_{np2}\ddot{x}_5 + C(2x_5 - x_4 - x_1) + \frac{1}{2}(G_n l + G_n l_{np})w \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + \\
& + \eta(2\dot{x}_5 - \dot{x}_4 - \dot{x}_1) = \frac{M_{np2}}{R} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5), \\
& \frac{G_{ny}}{g} \ddot{x}_6 + \frac{1}{2}(x_4 - x_3 + 2x_6)C_k + G_{ny} + G_{ny}f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0.
\end{aligned}$$

После соответствующих преобразований математическая модель движения загруженной ленты конвейера с двумя приводами и натяжным устройством представляется системой шести обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Эти уравнения принимают вид:

$$\begin{aligned}
1. \quad & (2m_e + 2m_m + m_{np})\ddot{x}_1 + m_e\ddot{x}_2 + m_n\ddot{x}_5 + 2\eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_5 + 2Cx_1 - Cx_2 - Cx_5 + \\
& + 0.5(G_e l + G_n l_m)\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_1 = \frac{M_{np1}}{R_0} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1), \\
2. \quad & m_e\ddot{x}_1 + 4m_e\ddot{x}_2 + m_e\ddot{x}_3 - \eta\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_e l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_2 = 0, \\
3. \quad & m_e\ddot{x}_2 + (2m_e + 2m_n)\ddot{x}_3 + m_n\ddot{x}_4 - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 - Cx_2 + (2C + 0.25C_k)x_3 - \\
& - (C + 0.25C_k)x_4 - 0.5C_k x_6 + 0.5(G_e + G_n)l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_3 = 0 \\
4. \quad & m_n\ddot{x}_3 + 4m_n\ddot{x}_4 + m_n\ddot{x}_5 - \eta\dot{x}_3 + 2\eta\dot{x}_4 - \eta\dot{x}_5 - (C + 0.25C_k)x_3 + (2C + 0.25C_k)x_4 - Cx_5 \\
& + G_n l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_4 = 0 \\
5. \quad & m_m\ddot{x}_1 + m_n\ddot{x}_4 + (2m_n + 2m_m + m_{np2})\ddot{x}_5 - \eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_4 + 2\eta\dot{x}_5 - Cx_1 - Cx_4 + 2Cx_5 + \\
& + 0.5(G_n l + G_n l_m)\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_5 = \frac{M_{np2}}{R_0} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5) \\
6. \quad & \frac{G_{ny}}{g} \ddot{x}_6 - 0.5C_k x_3 + 0.5C_k x_4 + C_k x_6 + G_{ny} + G_{ny}f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Матричное представление этой математической модели относительно обобщенного вектора перемещения: $X = (x_1, x_2, \dots, x_6)^T$, которое имеет вид.

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + CX + S \operatorname{sgn} \dot{X} + VG_{ny} = P_1 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)M_{np1} + P_2 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_5)M_{np2}, \tag{2.7}$$

где:

$$M = \begin{bmatrix} 2m_z + 2m_m + m_{np1} & m_z & 0 & 0 & m_m & 0 \\ m_z & 4m_z & m_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_z & 2m_z + 2m_n & m_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_n & 4m_n & m_n & 0 \\ m_m & 0 & 0 & m_n & 2m_n + 2m_m + m_{np2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{ny}}{g} \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 2\eta & -\eta & 0 & 0 & -\eta & 0 \\ -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\eta & 2\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & 0 & -C & 0 \\ -C & 2C & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C & 2C + 0.25C_k & -C - 0.25C_k & 0 & -0.5C_k \\ 0 & 0 & -C - 0.25C_k & 2C + 0.25C_k & -C & 0.5C_k \\ -C & 0 & 0 & -C & 2C & 0 \\ 0 & 0 & -0.5C_k & 0.5C_k & 0 & C_k \end{bmatrix},$$

$$S = \text{diag}[0.5(G_z l + G_n l_m)\mu \quad G_z l \mu \quad 0.5(G_z + G_n)l \mu \quad G_n l \mu \quad 0.5(G_n l + G_n l_m)\mu \quad G_{ny} f],$$

$$P_1 = [R_\phi^{-1} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad P_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad R_\phi^{-1} \quad 0]^T, \quad V = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T.$$

В этих зависимостях: l – длина конвейера, G_{ny} – вес натяжного устройства, M_{np1}, M_{np2} – движущие моменты приводов и барабанов, M_{ny} – движущий момент привода натяжного устройства, η – коэффициент вязкости ленты, C – коэффициент жесткости каждого участка, μ – коэффициент сопротивления движению, C_k – коэффициент жесткости каната, R_ϕ – радиусы приводных барабанов, l_m – длина каната натяжного устройства [36,37].

В целях удобства составления схемы моделирования программными средствами при решении задачи аналитического синтеза системы управления выполнено преобразование модели (7) во внутреннюю модель движения

конвейерной ленты, которое соответствуя виду уравнений Коши, в скалярном представлении является системой двенадцати нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\dot{\tilde{X}} = -M^{-1}((N+C)\tilde{X} + S \operatorname{sgn} \tilde{X} + VG_{ny} + P_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1)M_{np1} + P_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_5)M_{np2}), \quad (2.8)$$

в этой модели $\tilde{X} = (X, X_1)^T$, $X = (x_1, x_2, \dots, x_6)$, $X_1 = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_6)$ – вектор состояния, внешними воздействиями являются движущие моменты, развиваемые двумя приводами

$$u_1(t) = M_{np1}(t), u_2(t) = M_{np2}(t),$$

силы сопротивления движению конвейерной ленты $u_3(t) = \operatorname{sgn} \dot{x}(t)$ и вес натяжного устройства $u_4(t) = G_{ny}(t)$.

Модель движения ленты конвейера (8) является внутренней с матрицей состояния $-M^{-1}(N+C) = A$, а матрицы

$$M^{-1}P_1 = B_1, M^{-1}P_2 = B_2, M^{-1}S = B_3, M^{-1}V = B_4$$

являются составляющими матрицы управления.

Матричное представление математической модели движения ленточного конвейера принимает вид

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + B_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1)u_1 + B_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_5)u_2 + B_3u_3 + B_4u_4, \quad (2.9)$$

в которой

$$A = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 6} & E_{6 \times 6} \\ -M^{-1}C_{6 \times 6} & -MN_{6 \times 6} \end{pmatrix}_{12 \times 12}, B_1 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}P_{1(6 \times 1)} \end{pmatrix}_{12 \times 1},$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}P_{2(6 \times 1)} \end{pmatrix}_{12 \times 1}, B_3 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}S_{6 \times 1} \end{pmatrix}, B_4 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}V_{6 \times 1} \end{pmatrix}.$$

2.2. Исследование моделированием модели движения ленты конвейера с двухдвигательным приводом и натяжным устройством

Исследование составленной математической модели движения ленты двухприводного конвейера с целью проверки ее адекватности реальным процессам проводилось моделированием движения ленты с грузом для конвейера 2Л100У-01 (табл. 2.1) программными средствами.

Моделирование проводилось для числовых значений параметров ленточного конвейера 2Л100У-01:

Таблица 2.1.

Технические данные модели

Наименование характеристики	Значение
Длина ленты $L, м$	1500
Масса участка грузовой ветви $m_з, кг$	1518,5
Масса участка порожней ветви $m_п, кг$	352,5
Масса участков на промежуточной ветви $m_м, кг$	2,4
Масса первого привода $m_{np1}, кг$	3000
Масса второго привода $m_{np2}, кг$	2000
Момент, создаваемый на первом приводном барабане $M_{np1}, Н·м$	20900
Момент, создаваемый на втором приводном барабане $M_{np2}, Н·м$	20900
Вес груза натяжного устройства $G_{ну}, Н$	52000
Радиус приводных барабанов $R_б, м$	0,5
Вязкость ленты с грузом $\eta, Н/м$	4000
Жесткость ленты $C, Н/м$	10000
Жесткость канатов натяжного устройства $C_к, Н/м$	10^{10}
Коэффициент сопротивления движению μ	0.03
Коэффициент сопротивления движению натяжных грузов f	0,3

Был использован блок, позволяющий задать внутреннюю модель движения конвейерной ленты, блок объединяющий управляющие воздействия в вектор $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$, для моделирования приводов используются готовые модели асинхронных короткозамкнутых приводов с частотно-векторным управлением[36,37]. Схема моделирования приведена на рис.2.3.

Матрицы $M, N, C, S, R, V, P_1, P_2$ системы уравнений математической модели принимают вид:

$$M = \begin{bmatrix} 6040 & 1518,5 & 0 & 0 & 352 & 0 \\ 1518,5 & 6072 & 1518,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1518,5 & 3740 & 352 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 352 & 1408 & 352 & 0 \\ 2,4 & 0 & 0 & 352 & 2708 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5200 \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 8000 & -4000 & 0 & 0 & -4000 & 0 \\ -4000 & 8000 & -4000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4000 & 2200 & -4000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4000 & 8000 & -4000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4000 & 8000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 20000 & -10000 & 0 & 0 & -10000 & 0 \\ -10000 & 20000 & -10000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10000 & 25000 & 20000 & -25000 & 10000 & 0 & -50000000000 \\ 0 & 0 & -25000 & 10000 & 25000 & 20000 & -10000 & 50000000000 \\ -10000 & 0 & 0 & -10000 & 20000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -50000000000 & 50000000000 & 0 & 100000000000 \end{bmatrix},$$

$$S = \text{diag}[1341.4 \quad 2678.6 \quad 1650.2 \quad 621.8 \quad 313 \quad 15600],$$

$$P_1 = [2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad P_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 2 \quad 0], \quad V = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 52000].$$

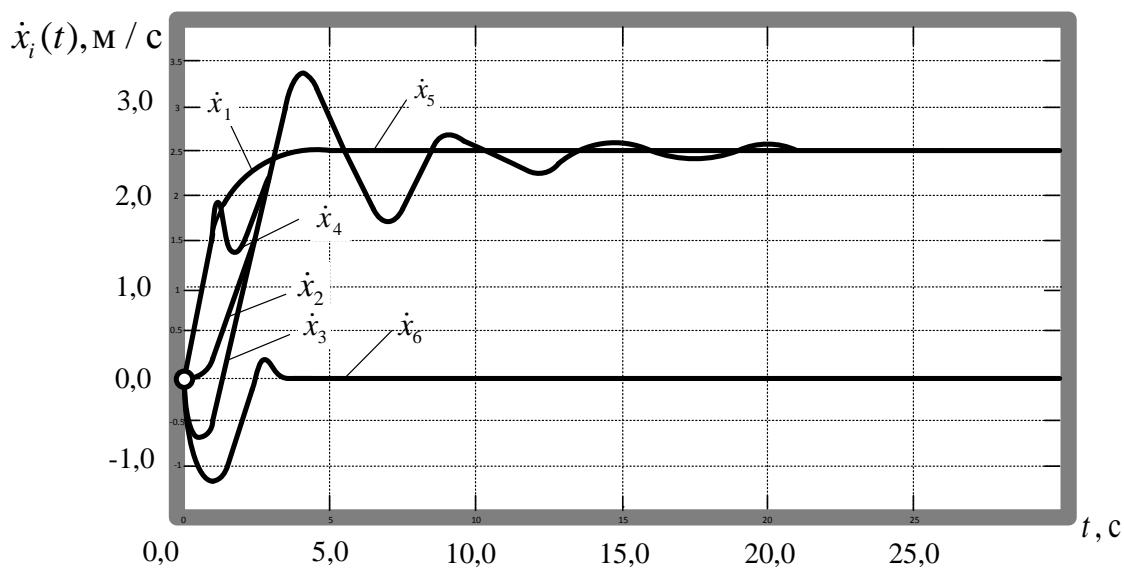


Рисунок 2.4. Переходные процессы по скоростям обобщенных координат при пуске конвейера до скорости 2,5 м/с.

Разработанная модель движения ленты позволяет определять значения скорости движения и натяжения ленты в характерных точках конвейера, что дает возможность использовать эти координаты при разработке системы автоматического управления движением конвейерной ленты для исключения пробуксовки на приводных барабанах и равномерного распределения нагрузки на ленте при любой скорости движения конвейера.

2.3. Выводы по главе

Анализ работ, посвященных математическим моделям движения ленты конвейера, показывает, что эти модели не в полной мере учитывают особенности движения двухприводного конвейера с натяжным устройством.

Создана математическая модель движения ленты магистрального конвейера с двумя приводами и устройством натяжения ленты. Эту модель можно использовать при разных условиях для дальнейшего изучения

двухприводного ленточного конвейера и как объект системы управления движением конвейера.

Разработанная модель движения ленты позволяет определять значения скорости движения и натяжения ленты в характерных точках конвейера, что дает возможность использовать эти координаты при разработке системы автоматического управления скоростью движения конвейерной ленты для исключения пробуксовки на приводных барабанах и равномерного распределения нагрузки на ленте при любой скорости движения конвейера.

Результатами компьютерного моделирования явились переходные процессы по скоростям обобщенных координат движения ленты и перемещения натяжного устройства[36,37]. Полученные кривые сравнивались качественно и количественно с переходными процессами пуска и равномерного движения реального конвейера того же класса. Величина отличия определялась как интегральный квадрат разности этих кривых на достаточно длительном интервале времени, и не превысила 8-10%, что подтверждает заключение об адекватности разработанной модели движения ленты двухприводного конвейера.

ГЛАВА 3. Разработка алгоритма автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки.

3.1. Конструкция натяжных устройств

Тяговые силы передаются приводными барабанами на ленту с помощью силы трения, созданной на поверхностях их фрикционного контакта. Чтобы получить необходимое сцепление между приводными барабанами и ремнем, ленту необходимо надлежащим образом прижать к приводным барабанам. Последнее обычно обеспечивается предварительным натяжением конвейерной ленты с помощью натяжного устройства. Однако повышенное натяжение ленты увеличивает его статическую нагрузку и приводит к быстрому износу, чтобы не было проскальзывания ленты и изменений в загрузке накопителей. Кроме того, увеличивается нагрузка на электродвигатели приводов, что отрицательно сказывается на их ресурсе. Поэтому, в зависимости от режима и нагрузки конвейерной ленты, необходимо контролировать свой коэффициент тяги.

Передача тяги конвейерной ленты осуществляется с помощью конвейерных приводов. Необходимое натяжение ленты для реализации передачи тяговым приводом обеспечивается натяжным устройством.

Давление ленты на поверхности приводного барабана $N / м^2$ определяется натяжением ленты в точке, где лента поднимается на приводной барабан, натяжением ленты в точке, где лента отходит от привода барабана, шириной ленты, диаметром приводного барабана, углом пояса приводного барабана.

Натяжное устройство спроектировано таким образом, чтобы создать требуемое натяжение ленты, которое обеспечивает тягу приводом, ограничение скольжения ленты между роликами выше допустимого значения, а также компенсирует остаточное удлинение ленты во время работы конвейера, который может составлять до 2% длины конвейера. Для автоматической

регулировки натяжения ленты используются натяжители лебедки, которые приводятся в действие электродвигателем.

Для измерения натяжения существуют различные системы и методы автоматического регулирования натяжения лент, в которых используются динамометры, тензометрические, пьезоэлектрические и другие датчики. Существует обширная литература [127,128], в которой подробно описываются принципы проектирования и эксплуатации таких систем. Для измерения скорости конвейерных лент, количества груза, поступающего на конвейерную ленту, момента на валу приводного барабана, имеются, соответственно, различные датчики для измерения скорости ленты, специальных весов, дозаторов, автоматических бункеров для контроля потока товаров, измерителей крутящего момента. Конструкция этих устройств и принцип работы подробно описаны в различных источниках [13,18,21,24].

Натяжные устройства служат для создания и поддержания в заданных пределах натяжения ленты в определенных точках конвейера, а также компенсации удлинений при вытяжке новой ленты или во время переходных процессов. Основным элементом натяжного устройства является натяжной барабан, перемещающийся на натяжной тележке или в специальных направляющих неподвижной рамы.

К натяжным устройствам мощных, преимущественно карьерных, ленточных конвейеров, предъявляется нередко требование регулирования натяжения в зависимости от действующего сопротивления и нагрузки на ленту. Это относится в первую очередь к периодам пуска конвейера, в течение которых действуют значительные добавочные динамические силы сопротивления и возникает опасность срыва сцепления ленты и пробуксовки ее по барабану (барабанам).

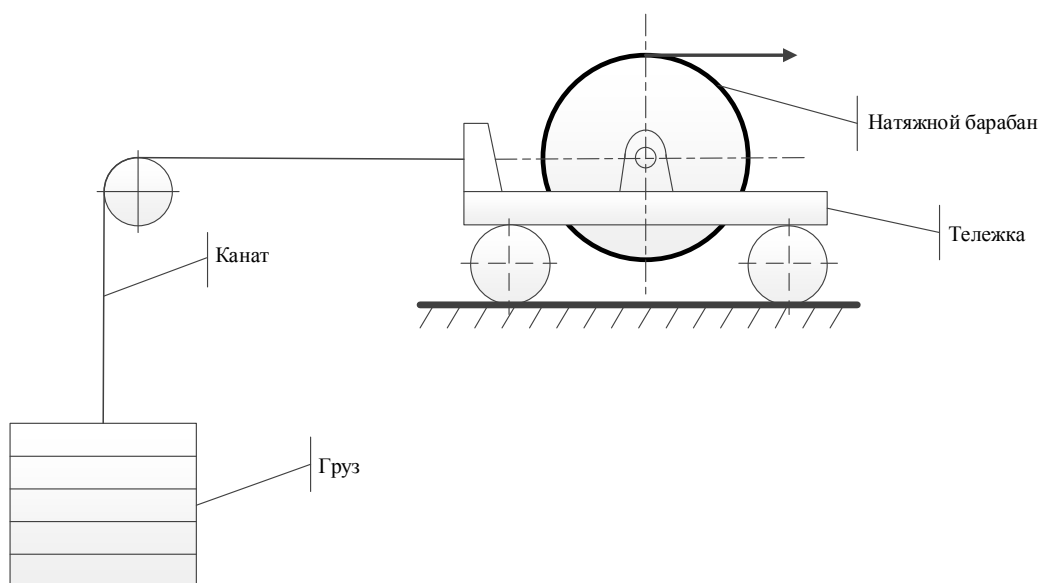


Рисунок 3.1. Схема натяжного устройства

Грузовые натяжные устройства, поддерживающие постоянное натяжение ленты (что, вообще, является их эксплуатационным достоинством), для этой цели не приспособлены и при необходимости регулирования натяжения применяются механические (лебедочные) устройства (рис.3.1). Регулирование натяжения ленты может производиться автоматически включением лебедки на период пуска на повышенное натяжение и затем, при достижении лентой постоянной скорости, снижением натяжения до нормальной величины. Управление лебедкой может производиться по показанию динамометра, регистрирующего величину натяжения ленты, и по изменению скорости ленты, угловой скорости находящегося в контакте с ней бара и ролика. Кроме того, управление лебедкой в первый период может производиться с помощью реле времени, настраиваемого на обычную производительность пускового периода.

Включение лебедки, обеспечивающей повышенное натяжение ленты, следует производить в период работы двигателя на предварительной ступени, так как если ее включение производится до запуска основного двигателя, то происходит предпусковое перераспределение натяжений, увеличивающее

первую амплитуду динамических натяжений в ленте. С целью повышения «чувствительности» устройства к изменению натяжения ленты следует стремиться к снижению приведенной массы и внутренних потерь в блоках полиспастов и других механизмах натяжного устройства. Автоматическое регулирование силы натяжения целесообразно также производить в периоды установившегося движения зависимости от нагруженности ленты: при неполной нагрузке ленты величина её натяжения соответственно снижается, что способствует повышению срока службы ленты.

Работа полуавтоматического устройства основана на сравнении усилий в набегающей и сбегавшей ветви ленты можно описать с помощью алгоритма, представленного на рис. 3.2, заключается в том, что с помощью лебедки производится предварительное натяжение ленты. При запуске или загрузке конвейера натяжение S_4 увеличивается, принятое отношение S_4/S_1 нарушается, в результате подвижная каретка с отклоняющим барабаном движется в сторону приводного барабана, увлекая за собой канат, и вращает с его помощью барабан через зубчатую передачу и барабан уравнительного механизма. Вращение барабанов происходит до тех пор, пока не устанавливается принятое значение отношения S_4/S_1 . При разгрузке конвейера или при уменьшении загрузки барабаны уравнительного механизма вращаются в обратную сторону. Натяжение ленты происходит вследствие разницы ходов подвижной каретки с отклоняющим барабаном и натяжной каретки с натяжным барабаном, причем ход натяжного барабана больше хода отклоняющего барабана в i_y раз [73].

На конвейерах 2Л100У, где которых используется синтетическая лента, которая характеризуется достаточно большой вытяжкой, используется полуавтоматическое натяжное устройство, которое установлено на хвостовой части.

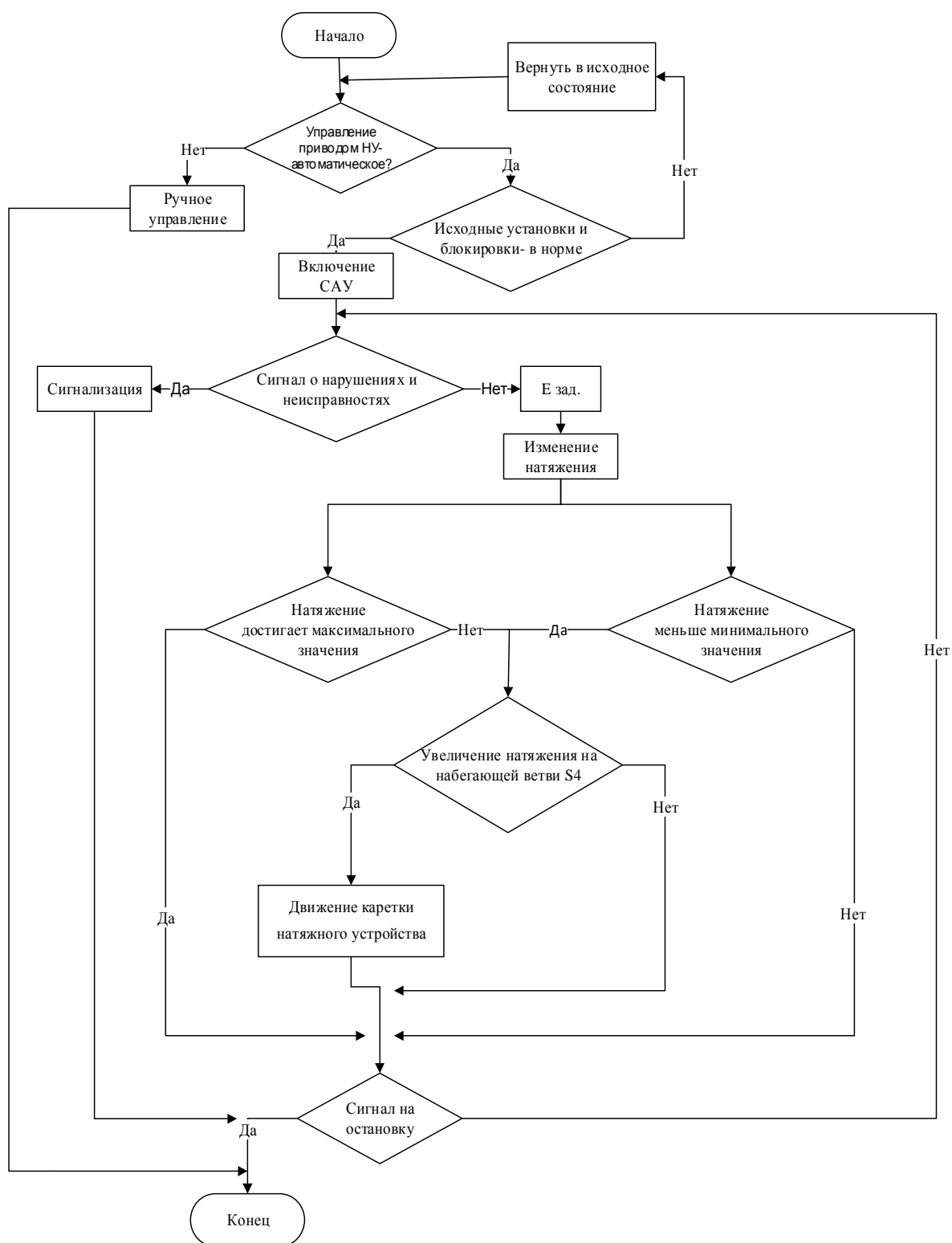


Рисунок 3.2. Алгоритм управления электроприводом натяжного устройства

3.2. Разработка алгоритма и структуры системы автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки.

Натяжное устройство конвейера 2Л100У установлено на хвостовой части. Предварительное натяжение ленты производится с помощью лебедки, последующее управление натяжным устройством осуществляется электроприводом. При загрузке конвейера натяжение грузовой ветви увеличивается и, как следствие, требуемое значение тягового фактора нарушается. Реле давления с гидродатчиком в цепи управления электропривода, включают электродвигатель, когда натяжение в ленте становится меньше минимального, и выключает электродвигатель лебедки при натяжении, достигающем максимального значения, поддерживая таким образом близкое к требуемому натяжению ленты.

Для регулирования тягового фактора необходимо иметь возможность определять натяжения в характерных точках конвейера в текущий момент времени. Разработанная модель конвейера позволяет измерять возникающие натяжения $S_i(t)$, $i = \overline{1,5}$ в каждой из пяти точек ленты, где располагаются сосредоточенные массы расчетной схемы. Предполагается осуществить синтез линейных алгоритмов управления относительно управляемой переменной. Такой подход к синтезу регулятора натяжения дает возможность стабилизировать тяговую способность привода конвейера, как при работе с постоянной скоростью, так и при переводе конвейера с одной скорости движения ленты на другую.

Величина текущего значения тягового фактора определяется соотношением

$$E^{\mu\alpha} = \frac{S_4(t)}{S_1(t)} \quad (3.1)$$

в котором $S_4(t)$ – текущее значение натяжения в набегающей ветви, $S_1(t)$ – текущее значение натяжения в сбегающей ветви (рис.3.3).

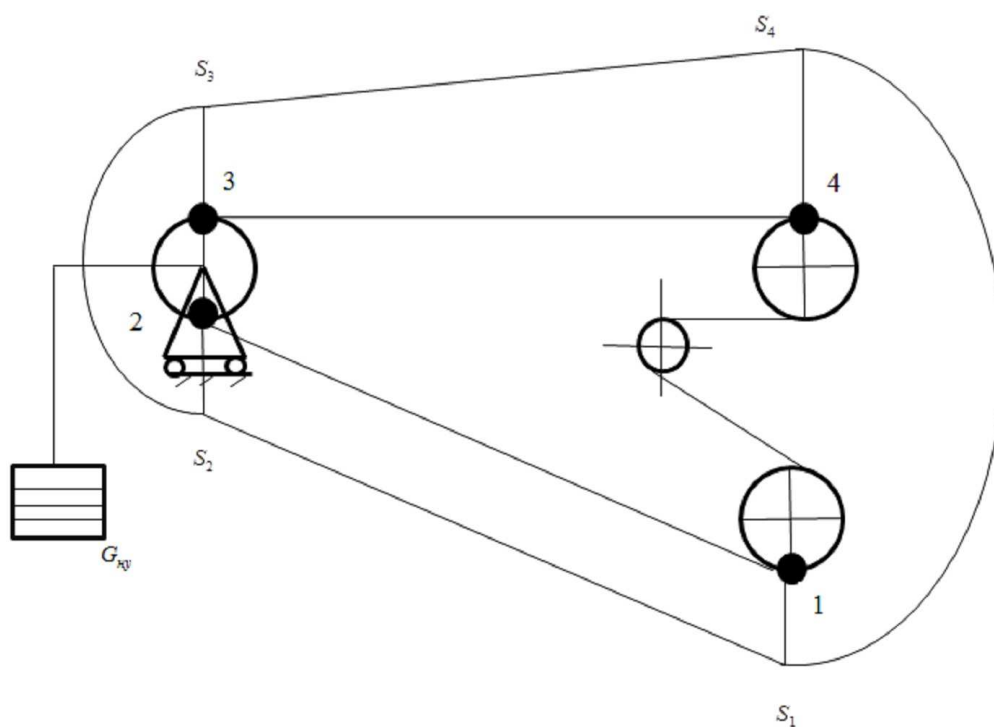


Рис.3.3. Диаграмма натяжений в характерных точках конвейера с натяжным устройством

Для разработки алгоритма системы стабилизации тягового фактора используется функциональная связь между значением тягового фактора и усилием, которое создает натяжное устройство конвейера. Согласно соотношению (3.1) для получения текущего значения тягового фактора, необходимо знать текущее натяжение в сбегающей ветви $S_1(t)$ и натяжение в набегающей ветви $S_4(t)$. При изменении скорости движения конвейера изменяются растяжения участков ленты.

Пусть

$$\begin{aligned} \Delta_1(t) &= x_4(t) - x_5(t), \\ \Delta_4(t) &= x_1(t) - x_2(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

– текущее значение растяжения порожней ветви и текущее значение растяжения грузовой ветви соответственно.

Пусть в первом точке натяжение $S_1(t)$; в втором точке натяжение равно $S_2(t)=S_1(t)+W_{2,1}(t)$; в третьей точке натяжение равно $S_3(t)=K_6S_2(t)$; в четвертой точке натяжение равно $S_4(t)=S_3(t)+W_{4,3}(t)$, где $W_{2,1}(t)$ – сопротивление движению на порожней ветви, $W_{4,3}(t)$ – сопротивление движению на грузовой ветви. K_6 – коэффициент, учитывающий возрастание натяжения в ленте при обходе отклоняющего барабана, $K_6= 1,05$.

При изменении усилия натяжного устройства изменяются деформации $\Delta_1(t), \Delta_4(t)$, а так же значения натяжений $S_1(t)$ и $S_4(t)$, которые зависят от этих деформаций. С другой стороны, вычислить натяжения можно, используя соотношения

$$\begin{aligned} S_1(t) &= 0,5G_{ny} - W_{2,1}(t), \\ S_4(t) &= 0,5G_{ny} - W_{4,3}(t), \end{aligned} \quad (3.3)$$

где $W_{2,1}(t)$ – сопротивление движению на порожней ветви, $W_{4,3}(t)$ – сопротивление движению на грузовой ветви.

Для определения функциональной зависимости натяжения ленты от ее деформации были использованы данные экспериментальных исследований суть которых заключалась в изменении веса натяжного устройства G_{ny} и в одновременном расчете по формуле (3.3) натяжений, снятии данных о деформациях ленты.

На основании этих экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены линейные зависимости натяжений от деформаций

$$\begin{aligned} S_1(\Delta_1) &= 72990\Delta_1 + 47525 ; \\ S_4(\Delta_4) &= 73138\Delta_4 + 76004 . \end{aligned} \quad (3.4)$$

Найденные текущие значения натяжения по формулам (3.3), пусть недостаточно точные в силу линейной аппроксимации, позволяют получить

оценку значения тягового фактора, как функции времени $E^{\mu\alpha}(t)$ по формуле (3.1).

Текущее значение оценки тягового фактора является по существу управляемой переменной в синтезируемом алгоритме управления. В предлагаемой структуре системы автоматической стабилизации найденная переменная $E^{\mu\alpha}(t)$ позволяет сформировать отклонение от заданного значения величины тягового фактора $E_{зад}^{\mu\alpha}$

$$E_{зад}^{\mu\alpha} - E^{\mu\alpha}(t) = \varepsilon^{\mu\alpha}(t). \quad (3.5)$$

Найденное значение ошибки является входной величиной для регулятора системы стабилизации, который реализует регулирование тягового фактора с передаточной функцией ПИД-регулятора

$$W(p) = k_1 + \frac{k_2}{p} + k_3 p. \quad (3.6)$$

Таким образом, алгоритмом управления является последовательность операций:

$$x_1, x_2, x_4, x_5 \rightarrow_{(3.2)} \Delta_1, \Delta_4 \rightarrow_{(3.4)} S_1, S_4 \rightarrow_{(3.1)} E^{\mu\alpha} \rightarrow_{(3.5)} \varepsilon^{\mu\alpha} \rightarrow_{(3.6)}. \quad (3.7)$$

Сформированный алгоритм (3.7) определил структуру подсистемы системы стабилизации тягового фактора, представленной на рис. 3.4.

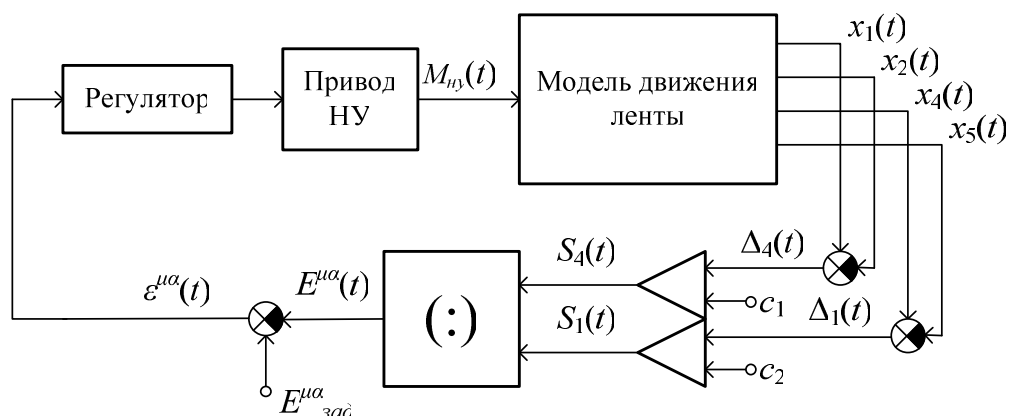


Рисунок 3.4. Структурная схема подсистемы автоматической системы стабилизации тягового фактора

3.3. Экспериментальные исследования системы автоматической стабилизации тягового фактора

Проведем тарирование конвейерной ленты, суть которого заключается в изменении веса натяжного устройства G_{ny} и в одновременном расчете по формуле (3.3) натяжений, и снятии модельных данных о деформациях Δ . Вес натяжного устройства изменялся от 3 тонн до 11 тонн. Данные экспериментов занесены в табл.3.1.

Таблица 3.1.

Вес натяжного устройства G_{ny}, H	Деформация $\Delta_1, м$	Деформация $\Delta_4, м$	Натяжение в сбегающей ветви S_1, H	Натяжение в набегающей ветви S_4, H
30000	-0.6298	-0.1337	2812,5	67500
35000	-0.5876	-0.09145	5312.5	70000
40000	-0.5482	-0.0521	7812,5	72500
45000	-0.5071	-0.01092	10312.5	75000
52000	-0.4488	0.04753	13812.5	78500
60000	-0.3956	0.1006	17812.5	82500
70000	-0.3289	0.1672	22812.5	87500
80000	-0.268	0.2281	27812.5	92500
90000	-0.2012	0.2949	32812.5	97500
100000	-0.1377	0.3585	37812.5	102500
110000	-0.07882	0.4173	42812.5	107500

Для оценки эффективности разработанного алгоритма и структуры системы автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера выполнено моделирование процесса изменения тягового фактора в зависимости от внешнего возмущения в виде изменения грузопотока и, как следствие, изменение скорости движения ленты [36,37].

На рис.3.5 представлена кривая изменения тягового фактора при режиме пуск без использования процедуры регулирования, полученная моделированием согласно описанной схемы (3.7) алгоритма. На 54 сек произошло резкое изменение скорости движения ленты и, как следствие, резкие колебания величины тягового фактора, провисание ленты конвейера, и ее пробуксовка на барабанах одиннадцать секунд. Значение тягового фактора до расчетного было после нескольких колебаний восстановлено механической системой натяжения.

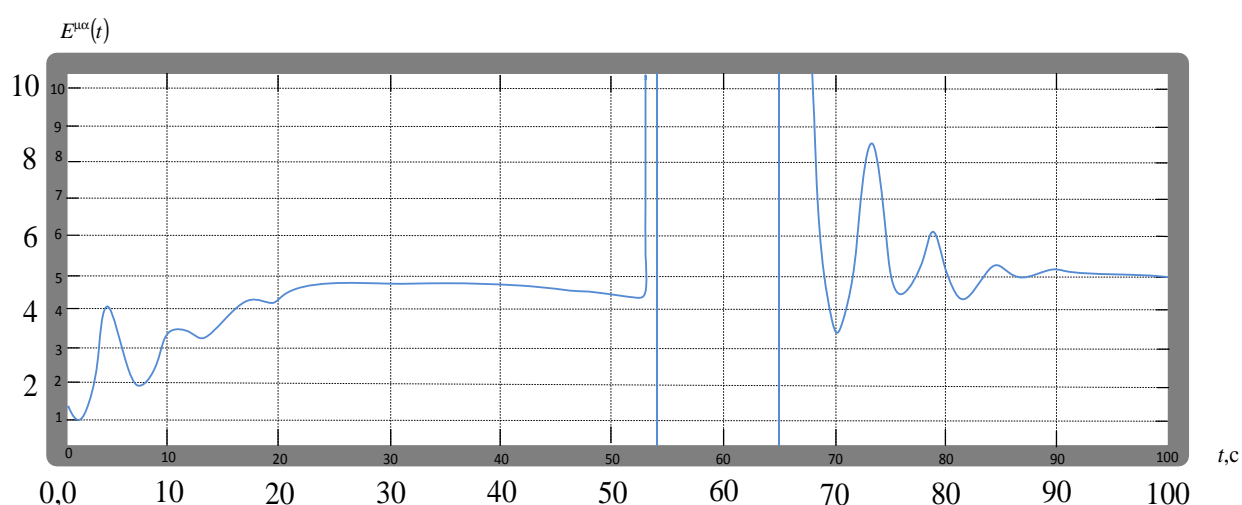


Рисунок 3.5. Динамика тягового фактора без применения регулирования.

Для реализации идеи заключающейся в изменении положения каретки натяжного устройства, регулирования тягового фактора определена зависимость между текущим значением тягового фактора и усилием, которое создает натяжное устройство. Эта зависимость составляет основу алгоритма

разрабатываемой системы стабилизации: усилие, создаваемое натяжным устройством, должно быть следствием изменения скорости движения ленты. Зависимость $E^{\mu\alpha}(G_{ny})$ и обратная к ней $G_{ny}(E^{\mu\alpha})$, найдены методом наименьших квадратов

$$G_{ny}(E^{\mu\alpha}) = 250(E^{\mu\alpha})^2 - 9980E^{\mu\alpha} + 113380. \quad (3.8)$$

Можно вычислить разницу между желаемым значением тягового фактора и фактическим, т. е. ошибку. Полученная величина ошибки веса натяжного устройства может быть поставлена в соответствие ошибке перемещения каретки натяжного устройства s_6 [36,37]. Эти данные приведены в таблице 3.2.

Табл.3.2.

Вес натяжного устройства G_{ny}, H	Перемещения каретки натяжного устройства s_6
3000	-1,04
3500	-1,146
4000	-1,244
4500	-1,347
5000	-1,452
5200	-1,493
6000	-1,626
7000	-1,793
8000	-1,945
9000	-2,112
10000	-2,271

Соотношение (3.4) позволяет вычислить разницу между желаемым значением тягового фактора и фактическим и, как следствие, определить величину требуемого перемещения каретки натяжного устройства

$$s_6(G_{ny}) = -1,61 \cdot 10^{-5} G_{ny} - 0,663, \quad (3.9)$$

реализация которого приведет к корректировке тягового фактора. Выражения (3.8, 3.9) и динамика движения каретки натяжного устройства, тягового фактора



Результаты моделирования работы системы стабилизации приведены на рис. 3.8, показано как после сброса скорости на 56 сек система без перерегулирования и колебаний аperiodически восстанавливает расчетное значение тягового фактора.

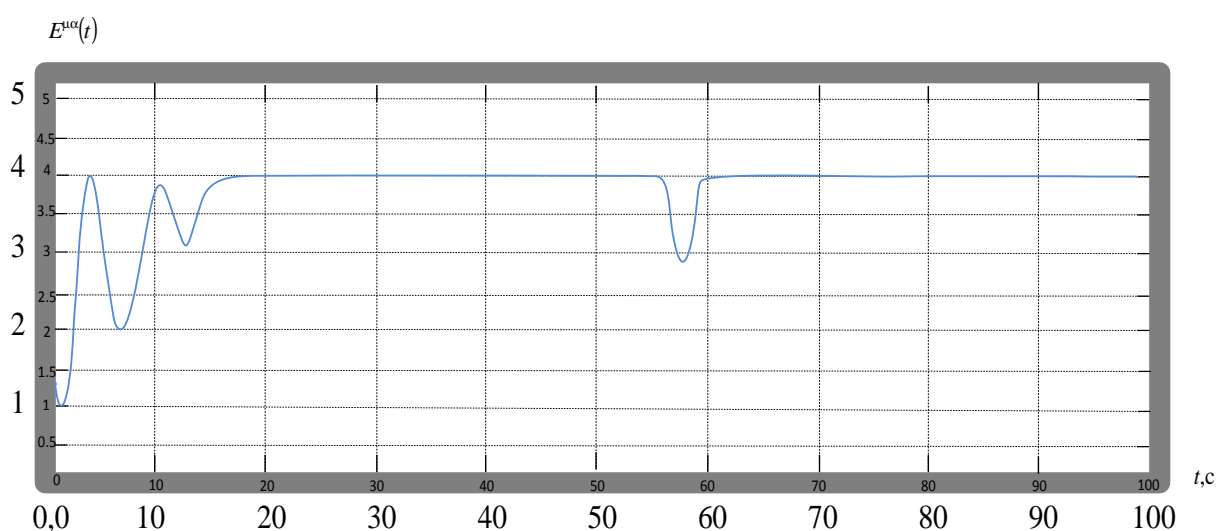


Рисунок 3.8. Динамика тягового фактора при осуществлении регулирования положения каретки натяжного устройства

Изменение положения каретки натяжного устройства происходит при переходе конвейера с одной скорости на другую и за счет этого изменения выбирается слабина ленты. Как видно из графика на рис. 3.7. величина тягового фактора стабилизируется $E^{\mu\alpha} \leq 4$, что удовлетворяет требованиям беспробуксовочного движения ленты [36,37].

На рис.3.9 приведены кривые изменения скоростей сосредоточенных масс при работе системы автоматической стабилизации тягового фактора.

На пятидесятой секунде работы конвейера моделирование увеличения скорости движения ленты почти в двое. Скорости движения всех сосредоточенных масс при работе системы стабилизации тягового фактора вышли на установившееся значение почти также как при пуске конвейера.

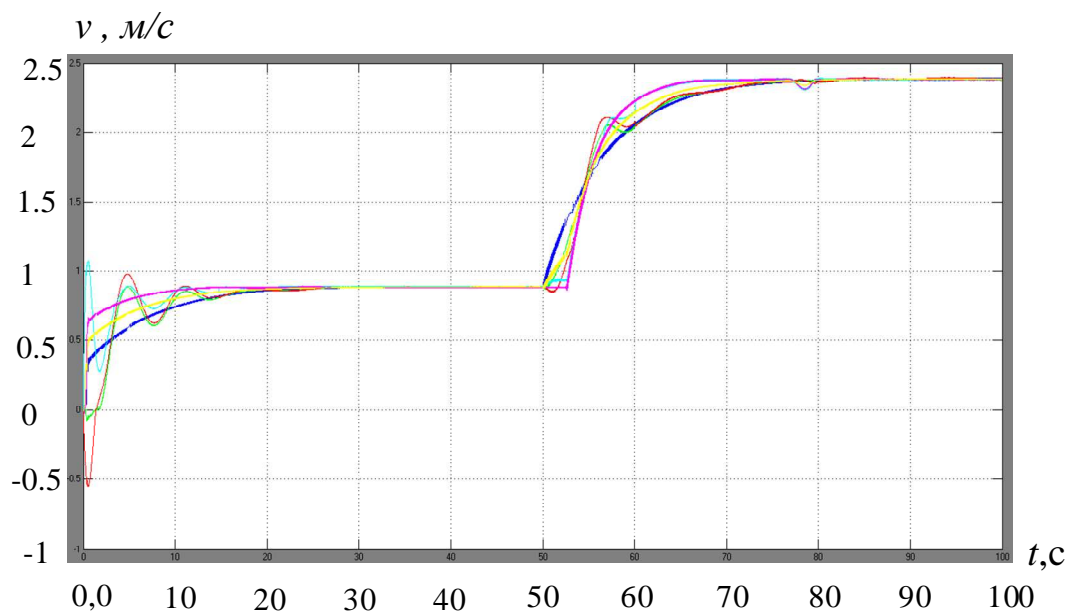


Рисунок 3.9. Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты конвейера при осуществлении регулирования.

На рис.3.10 показано перемещение натяжного устройства при осуществлении регулирования.

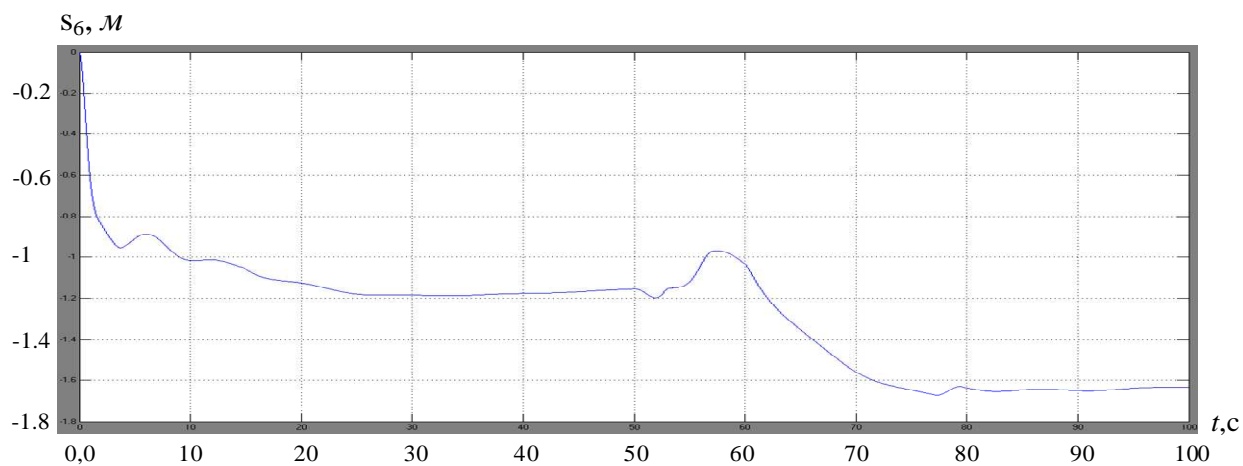


Рисунок 3.10. Перемещение натяжного устройства при осуществлении регулирования.

3.4. Разработка системы управления движением ленты ленточного конвейера с подсистемой стабилизации тягового фактора

Разработанный алгоритм обладает возможностью регулировать натяжение ленты так, что исключает пробуксовку ленты на приводных барабанах при неравномерной загруженности конвейера и любых изменениях скорости движения ленты конвейера.

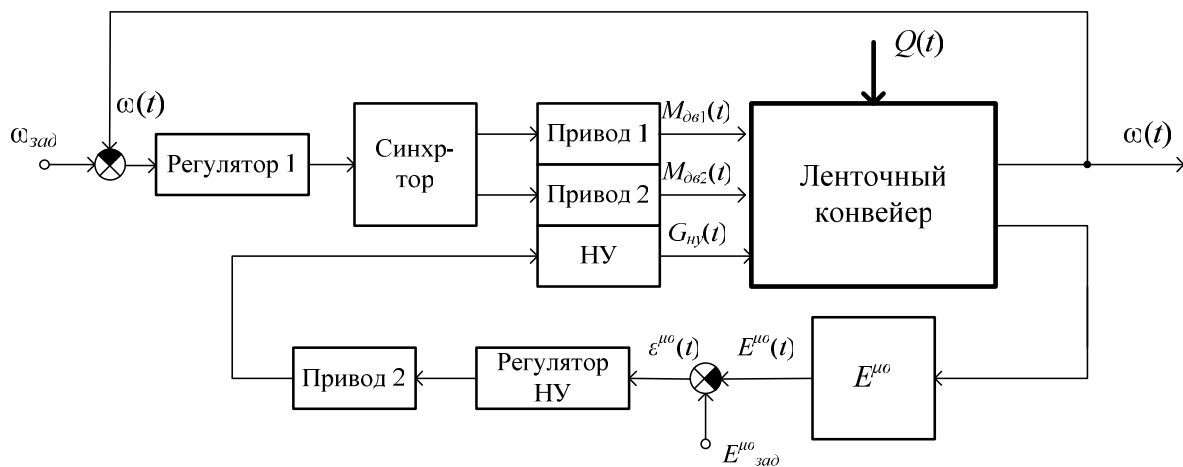


Рисунок 3.11. Структурная схема обобщенной системы автоматической стабилизации тягового фактора.

На рис.3.11 представлена структурная схема обобщенной системы автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера, которая содержит два контура: контур регулирования скорости движения ленты и контур регулирования натяжения ленты.

В системе:

$M_{дв1}(t)$, $M_{дв2}(t)$ – движущие моменты приводов основного движения ленты,
 $\omega(t)$ – текущее значение установившейся скорости ленты конвейера,
 $\omega_{зад}$ – заданное значение установившейся скорости ленты конвейера,
 $G_{ну}(t)$ – текущее значение «веса», создаваемое натяжным устройством для обеспечения необходимого натяжения ленты,
 $E^{\mu}(t)$ – текущее значение тягового фактора,

$E^{\mu\alpha}_{\text{зад}}$ – заданное значение тягового фактора,

$\varepsilon^{\mu\alpha}(t)$ – отклонение текущего значения тягового фактора от заданного.

Выполненные исследования системы регулирования тягового фактора в режимах пуска, различных изменений скорости движения ленты, экстренной остановки и штатного торможения показали удовлетворительную работоспособность системы.

3.5. Выводы по главе

Описано натяжное устройство, предназначенное для создания необходимого натяжения ленты, компенсации остаточного удлинения ленты в процессе эксплуатации. Показано, что существующие натяжные устройства за небольшим изменением, могут быть использованы в автоматической системе стабилизации натяжения.

Разработанная математическая модель двухприводного ленточного конвейера использована как объект при синтезе системы автоматического стабилизации тягового фактора движения ленты конвейера.

Разработан алгоритм системы автоматической стабилизации величины тягового фактора двухприводного ленточного конвейера. Для разработки алгоритма системы стабилизации тягового фактора используется функциональная связь между значением тягового фактора и усилием, которое создает натяжное устройство конвейера. Разработанный алгоритм и структура системы регулирования тягового фактора, позволяют стабилизировать тяговый фактор двухприводного конвейера при штатных и нештатных режимах движения ленты.

Автоматическая стабилизация осуществляется регулированием положения каретки натяжного устройства, служащее на ленточном конвейере для создания на ленте натяжения, необходимого для передачи трением приводными барабанами тяговой силы, а также для ограничения провисания

ленты между роlikоопорами, характеризуется величиной силы натяжения и ходом натяжного барабана.

Выполненные исследования системы регулирования тягового фактора в режимах пуска, различных изменений скорости движения ленты, экстренной остановки и штатного торможения показали удовлетворительную работоспособность системы. Изменение положения каретки натяжного устройства происходит при переходе конвейера с одной скорости на другую и за счет этого изменения выбирается слабина ленты. Как видно из графика на рис. 3.10 величина тягового фактора стабилизируется, что удовлетворяет требованиям беспробуксовочного движения ленты [36,37].

ГЛАВА 4. Автоматическая система стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера

4.1. Выбор исполнительного устройства в системе регулирования положения каретки натяжного устройства

Натяжное устройство служит для создания и стабилизации натяжения ленты в заданных пределах и, кроме того, для компенсации удлинений при вытяжке новой ленты или во время переходных процессов. Автоматическое регулирование силы натяжения целесообразно также производить в периоды установившегося движения в зависимости от нагруженной ленты; при неполной нагрузке ленты величина её натяжения соответственно снижается, что способствует повышению срока службы ленты.

Главным условием, характеризующим выбор электрического привода основного движения конвейера, является обеспечение приемлемых условий запуска и торможения тяговым органом конвейера: электропривод должен владеть значительным пусковым моментом, достаточным для преодоления усилий при пуске и создании динамического момента, который обеспечивает требуемое ускорение.

Из-за остановки конвейера под загрузкой величина момента статических сопротивлений при пуске может оказаться повышенной. По этой причине пусковой момент привода конвейера должен в 1,5-2 раза превышать номинальный.

Таким образом, при пуске привод должен осуществлять плавный разгон тягового органа до требуемой скорости, так как возникающие значительные динамические перегрузки могут привести к проскальзыванию ленты на приводном барабане, что резко повышает ее износ. С другой стороны, лента является упругой системой, следовательно, передача усилия сопровождается упругим её удлинением [121].

Для ленточных конвейерных установок применяются асинхронные двигатели с фазовым ротором и ступенчатым управлением при пуске. Для управления скоростью движения ленты конвейера используют управляемые электроприводы постоянного тока по системе Г-Д или ТП-Д.

Более прогрессивное решение при проектировании электроприводов магистральных ленточных конвейеров состоит в использовании частотного управления асинхронными двигателями. Применение в таких приводах короткозамкнутых асинхронных двигателей позволяет увеличить надежность электроприводов, безопасность их применения во взрывоопасных условиях.

В частотно-управляемом асинхронном приводе натяжного устройства используется асинхронный двигатель (АД) – 4А180S6У3, преобразователь частоты (ПЧ) – АТ04-160, два блока фильтров (БФ), пульт местного управления (ПМУ), контроллер Simatic S7-300 и интерфейс RS-232.

Автоматическая стабилизация тягового фактора конвейера осуществляется регулированием положения каретки натяжного устройства, что в свою очередь обеспечивает приемлемое соотношение натяжения в грузовой и холостой ветвях ленты конвейера.

При нарушении нормальных режимов работы конвейерной установки отключается питание электродвигателей приводов конвейера. Основными причинами аварийной остановки движения конвейера являются: сход ленты со става конвейера, при заштыбовке узла загрузки или при превышении уровня заполнения бункера, принудительное отключение персоналом.

Многократные пуски ленточного конвейера и необходимость изменения скорости движения ленты оправдывают целесообразность использования автоматической системы управления скоростью ленты, которая позволит уменьшить износ таких дорогостоящих частей конвейера как лента и ролики,

стоимость которых составляет около 50% и 30% соответственно от общей стоимости конвейера. Поскольку износ ленты прямо пропорционален ее скорости движения, то за счет регулирования скорости ленты в зависимости от грузопотока [131,132] можно добиться увеличения срока службы ленты, поскольку в этом случае лента будет двигаться с номинальной скоростью только при номинальном грузопотоке равном пропускной способности конвейера.

Управляя скоростью движения ленты можно стабилизировать погонную нагрузку и добиться рационального заполнения ленты конвейера. Сигнал задания скорости движения ленты поступает как управляющий на вход тиристорного преобразователя электропривода. Если прогнозируемая загрузка ленты менее номинального уровня, сигнал задания направлен на уменьшение скорости ленты, если прогнозируется превышение номинального уровня, сигнал задания направлен на увеличение скорости ленты.

4.2. Технические средства для автоматической системы стабилизации тягового фактора ленточного конвейера

Расчетная схема системы автоматической стабилизации тягового фактора для обоснованного выбора технических средств представлена на рис.4.1. Согласно этой схеме следует установить четыре датчика натяжения в голове конвейера на грузовой и порожней ветвях и в хвосте конвейера на грузовой и порожней ветвях.

Для осуществления перемещения каретки натяжного устройства следует обосновать параметры исполнительного устройства с электроприводом. Электропривод натяжного устройства ленточного конвейера должен быть выполнен с использованием частотноуправляемого асинхронного электродвигателя переменного тока. Вычислительные процедуры при формировании алгоритма управления выполняются в контроллере средней вычислительной мощностью. Передача данных от датчиков в процессор, и

передача данных в исполнительные устройства осуществляется по цифровой сети через интерфейс RS-232.

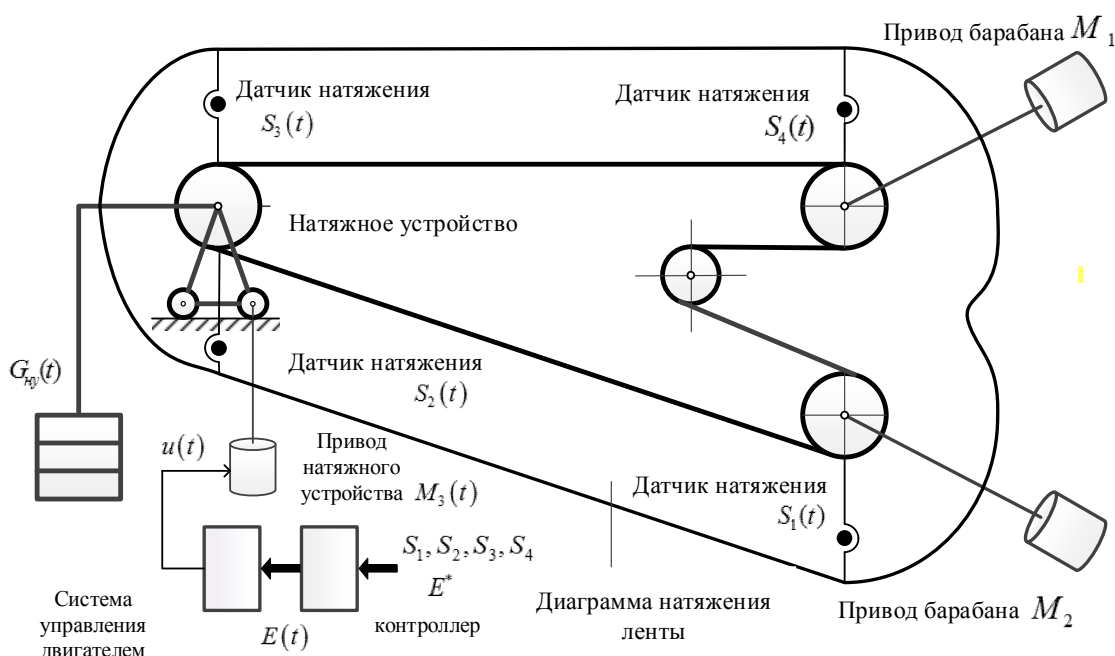


Рисунок 4.1. Схема системы управления положением каретки натяжного устройства

Многократные пуски ленточного конвейера и необходимость изменения скорости движения ленты оправдывают целесообразность использования автоматической системы управления скоростью ленты, которая позволит уменьшить износ таких дорогостоящих частей конвейера как лента и ролики, стоимость которых составляет около 50% и 30% соответственно от общей стоимости конвейера. Поскольку износ ленты прямо пропорционален ее скорости движения, то за счет регулирования скорости ленты в зависимости от грузопотока [131,132] можно добиться увеличения срока службы ленты, поскольку в этом случае лента будет двигаться с номинальной скоростью только при номинальном грузопотоке равном пропускной способности конвейера.

Управляя скоростью движения ленты можно стабилизировать погонную нагрузку и добиться рационального заполнения ленты конвейера. Сигнал задания скорости движения ленты поступает как управляющий на вход тиристорного преобразователя электропривода. Если прогнозируемая загрузка ленты менее номинального уровня сигнал задания направлен на уменьшение скорости ленты, если прогнозируется превышение номинального уровня, сигнал задания направлен на увеличение скорости ленты.

Схема интеграции аппаратного обеспечения обобщенной автоматической системы стабилизации тягового фактора ленточного конвейера представлена на рис. 4.2.

Согласно разработанному алгоритму управления, необходимо определять скорости движения ленты конвейера в точках, где расположены сосредоточенные массы. Для этого в состав аппаратного обеспечения системы автоматической стабилизации тягового фактора входят:

ДС₁... ДС₄ – тахометрические датчики скорости, ВК – весы конвейерные, АЦП – аналогоцифровые преобразователи, ЦАП – цифро-аналоговые преобразователи, В – выпрямитель, Ф – фильтр, АИН – автономный инвертор напряжения, УУП – микропроцессорное устройство управления.

В системе предполагается использовать тахометрические датчики скорости серии ADAM-4000, расположение которых показано на рис. 4.2.

В качестве весоизмерителя используем конвейерные стационарные весы, которые предназначены для непрерывного взвешивания свободного насыпного груза преобразователем частоты, ДПНУ – датчик положения натяжного устройства.

Для приема аналоговых сигналов от датчиков в системе используются модули аналогового ввода серии ADAM-4000. Нормализацию сигналов, операции аналогового и дискретного ввода-вывода, отображения данных позволяет осуществлять микропроцессорное устройство, передачу или прием по

сигналов осуществляется по интерфейсу RS-485. Все модули имеют интерфейс RS-485 и гальваническую развязку. Питание модулей осуществляется нестабилизированным напряжением 10...30 В постоянного тока. В качестве цифрового процессора предлагается использовать ARCON-3216 – контроллер средней вычислительной и информационной мощности.

Диапазон рабочих температур эксплуатации системы предполагается от минус 10 до +70⁰ С. Для ввода сигналов от датчиков скорости и конвейерных весов используется универсальный восьмиканальный модуль аналогового ввода ADAM-4019. Модуль имеет 16-разрядный АЦП, восемь дифференциальных аналоговых каналов ввода с индивидуальной установкой параметров. Тип входного сигнала – напряжение и ток. Модули имеют гальваническую развязку, напряжение изоляции 3000В постоянного тока. Модули аналогового ввода связаны с управляющим контроллером посредством стандартного промышленного интерфейса RS-485.

Замечание относительно выбора электропривода натяжного устройства в разработанной системе стабилизации тягового фактора. Известна эффективность использования управляемых электроприводов ленточных конвейеров для регулирования скоростью движения ленты в функции фактического грузопотока.

Регулирование скорости привода может быть достигнуто изменением напряжения, подводимого к статору, этот способ фазового управления пуском асинхронного короткозамкнутого электродвигателя предполагается использовать в системе управления, что обеспечивает плавный пуск конвейера, движение ленты с пониженной скоростью, плавный переход с одной скорости на другую. Для системы может быть использована серийно выпускаемая тиристорная станция управления ТСУР, которая предназначена для управления электродвигателями с номинальным током от 10 до 100 А, и, следовательно, на

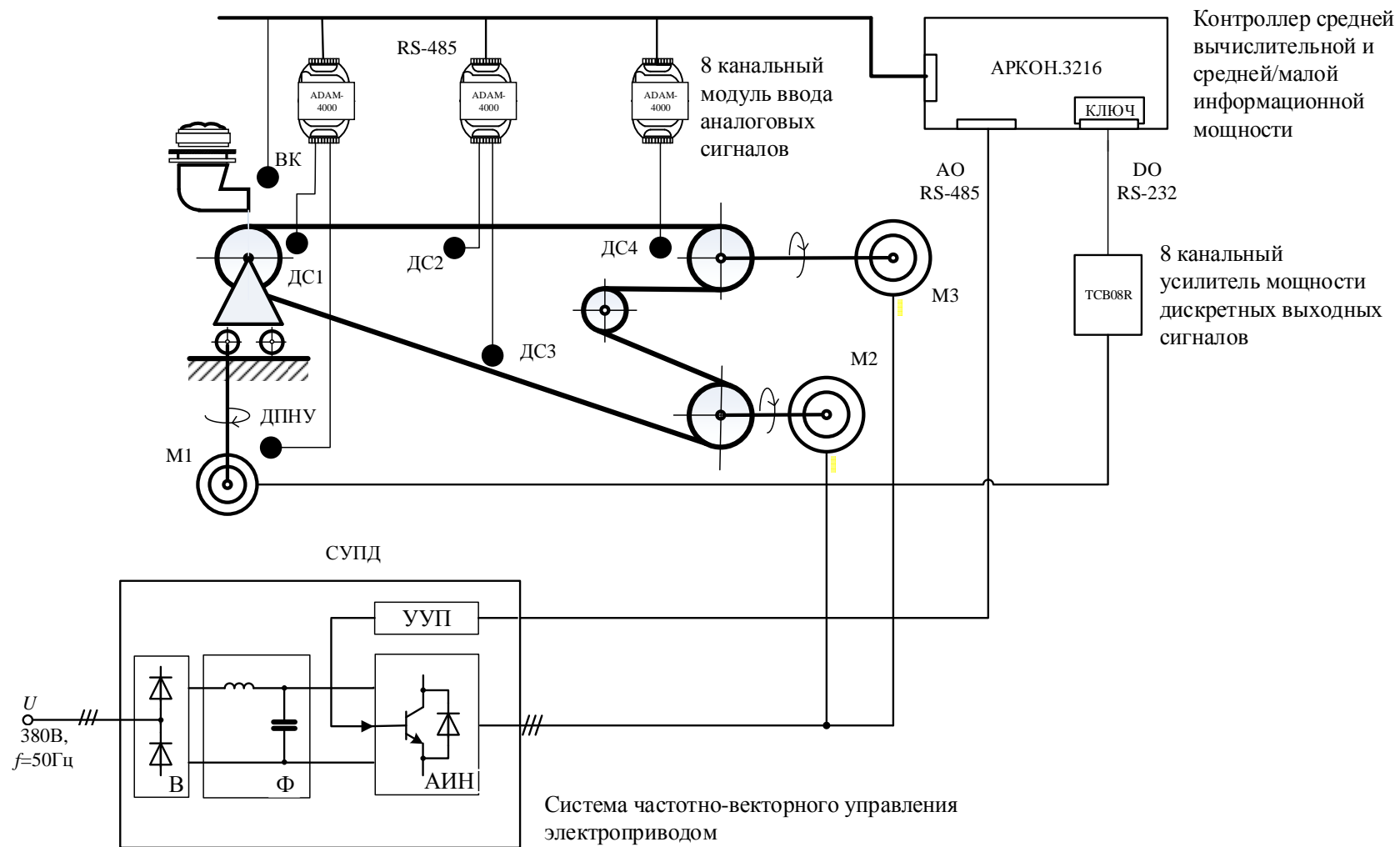


Рисунок 4.2. Схема технического обеспечения системы автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера.

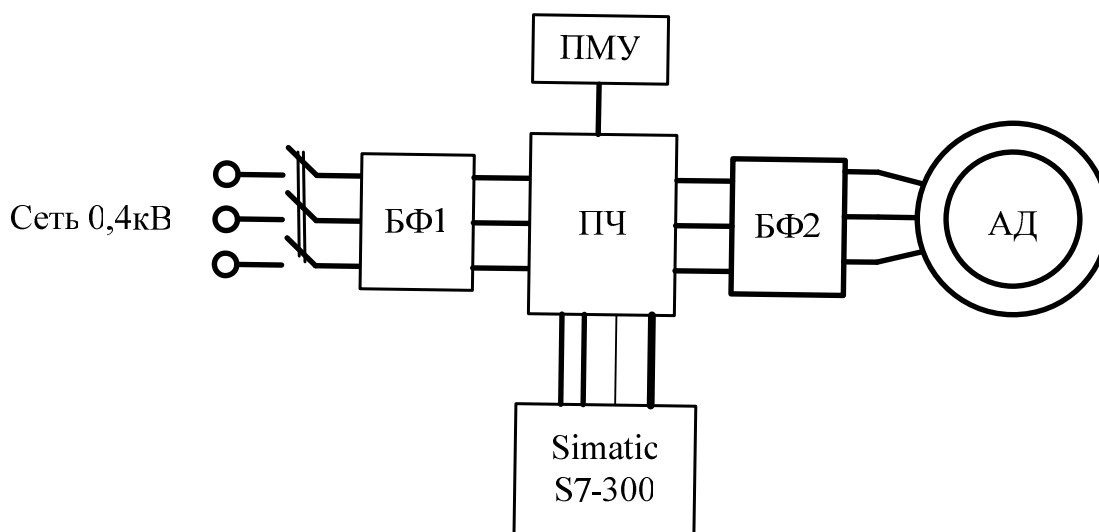


Рисунок 4.3. Функциональная схема ЭП

основе станции ТСУР может быть создан привод конвейера мощностью до 40 кВт.

Частотно управляемый асинхронный привод натяжного устройства выполняется по схеме, представленной на рис. 4.3. В приводе используется асинхронный двигатель (АД) – 4А180S6У3, преобразователь частоты (ПЧ) – АТ04-160, два блока фильтров (БФ), пульт местного управления (ПМУ), контроллер Simatic S7-300 и интерфейс RS-232.

4.3.Рекомендация к внедрению автоматизированной системы автоматической стабилизации тягового фактора на ленточных конвейерах шахты „Калева” в государстве Союз Мьянма

Шахта „Калева” в Мьянме является высокопроизводительным предприятием, ее выработки достаточно протяженные, поэтому для транспортировки угля используются магистральные конвейеры.

Разработанную систему регулирования натяжения ленты конвейера предполагается использовать на шахте „Калева” и угольных разрезах в государстве Союз Мьянма, как один из важных факторов повышения технического уровня и эффективности функционирования горного производства страны.

На кафедре «Автоматизированных систем управления» НИТУ МИСиС выполнены исследования по созданию такой системы управления скоростью движения ленты. Объектом управления в синтезируемой системе является электромеханическая система «управляемый электропривод-лента конвейера с грузом». В настоящее время рост грузопотоков и длин транспортирования обусловил широкое распространение высокопроизводительных конвейерных установок большой длины и мощности с двумя приводами [36,37].

На основе предложенных в диссертационном исследовании научных положений разработана автоматическая система стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера. Система стабилизации тягового фактора приводит к снижению износа движущегося полотна ленточного конвейера за счет поддержания требуемого соотношения между натяжениями в набегающей и сбегаящей ветвях конвейерной ленты, и повышает эффективность эксплуатации, приводит к экономии энергоресурсов в зависимости от фактического грузопотока, поступающего на полотно конвейера.

Большинство несчастных случаев на конвейерном транспорте происходит из-за проскальзывания или падения отдельных кусков груза с ленты. При пуске и повышении скорости вращения приводных барабанов может возникать пробуксовка, которая увеличивает износ ленты и даже может привести к возгоранию при трении. Современная техника дает возможность решать эти вопросы. В работе исследования системы

регулирования тягового фактора в режимах пуска, экстренной остановки и штатного торможения показали достаточную работоспособность системы.

Основные технические решения

Повышение эффективности эксплуатации ленточного конвейера в большой степени связано со снижением износа движущегося полотна. При пуске и повышении скорости вращения приводных барабанов может возникать пробуксовка, которая увеличивает износ ленты и даже может привести к возгоранию при трении [36,37].

Из-за неравномерности потока на конвейер меняется нагрузка на привода конвейера, при большой нагрузке на ленте натяжение грузовой ветви существенно оказывается больше натяжения холостой, и поэтому тяговый барабан не в состоянии прокрутить ленту и проскальзывает.

В настоящей диссертции разработана система, которая автоматически поддерживает отношение натяжения грузовой ленты к холостой в допустимых пределах. На рис.4.4. приведена структурная схема разработанной системы.

Известно, что эффект пробуксовки возникает, когда величина тягового фактора превышает значение, которое можно назвать критическим. Величина тягового фактора рассчитывается по формуле [36,37]:

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

Разработанная математическая модель двухприводного ленточного конвейера использована как объект при синтезе системы автоматической стабилизации тягового фактора движения ленты конвейера.

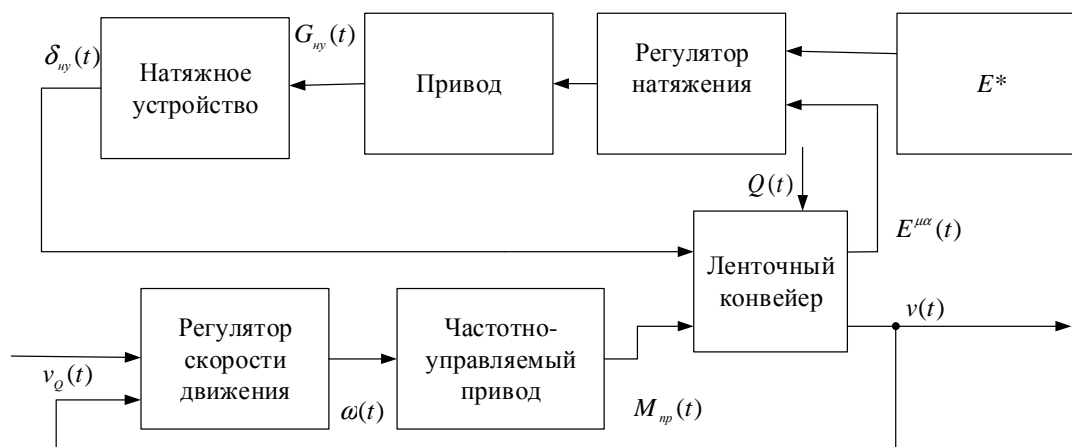


Рисунок 4.4. Структурная схема системы автоматической стабилизации тягового фактора. $M_{np}(t)$ – движущий момент приводов, $v(t)$ – текущая скорость движения ленты, $\omega(t)$ – частота вращения ротора привода, $G_{ny}(t)$ – текущее значение натяжения, создаваемое весом натяжного устройства, $E^{\mu\alpha}(t)$ – текущее значение тягового фактора, $E_0^{\mu\alpha}$ – заданное значение тягового фактора, $\delta_{ny}(t)$ – ход натяжного устройства.

Разработан алгоритм системы автоматической стабилизации величины тягового фактора двухприводного ленточного конвейера. Для разработки алгоритма системы стабилизации тягового фактора используется функциональная связь между значением тягового фактора и усилием, которое создает натяжное устройство конвейера. Разработанный алгоритм и структура системы регулирования тягового фактора позволяют стабилизировать тяговый фактор двухприводного конвейера при штатных и нештатных режимах движения ленты.

Автоматическая стабилизация осуществляется регулированием положения каретки натяжного устройства, служащего на ленточном конвейере для создания на ленте натяжения, необходимого для передачи трением приводными барабанами тяговой силы, а также для ограничения провисания ленты между роlikоопорами, характеризующегося величиной силы натяжения и ходом натяжного барабана.

Выполненные исследования системы регулирования тягового фактора в режимах пуска, различных изменений скорости движения ленты, экстренной

остановки и штатного торможения показали удовлетворительную работоспособность системы. Изменение положения каретки натяжного устройства при изменении скорости движения ленты приводит к тому, что выбирается слабина ленты и величина тягового фактора стабилизируется, что исключает пробуксовку ленты [36,37].

Для работы автоматической системы необходимо использовать тахометрические датчики скорости серии ADAM-4000, расположение которых показано на рис. 4.5, где обозначены: ДС₁... ДС₄ – тахометрические датчики скорости, ВК – весы конвейерные, АЦП – аналогоцифровые преобразователи, ЦАП – цифро-аналоговые преобразователи, В – выпрямитель, Ф – фильтр, АИН – автономный инвертор напряжения, УУП – микропроцессорное устройство управления, ДПНУ – датчик положения натяжного устройства.

В качестве весоизмерителя используем конвейерные стационарные весы, которые предназначены для непрерывного взвешивания свободного насыпного груза преобразователем частоты.

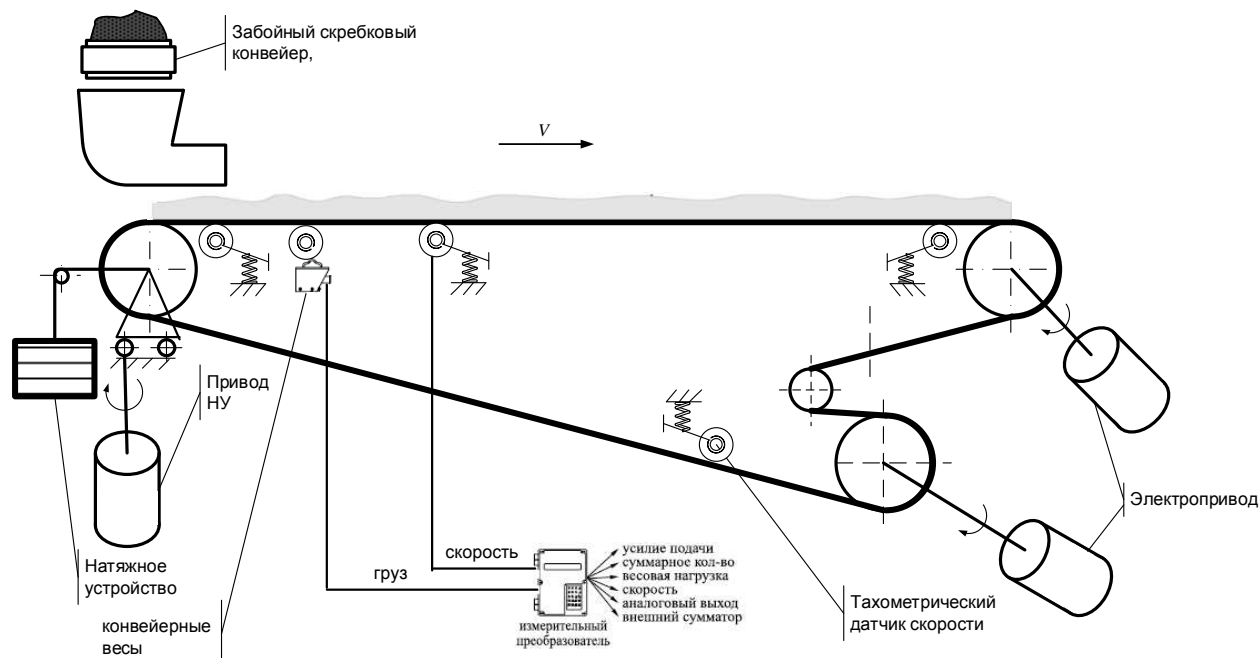


Рисунок.4.5. Схема двухприводного ленточного конвейера с натяжным устройством и конвейерными весами.

Для приема аналоговых сигналов от датчиков в системе используются гальванически развязанные модули аналогового ввода серии ADAM-4000, которые представляет собой устройства обработки сигналов датчиков. В качестве цифрового процессора предлагается использовать ARCON-3216 – контроллер средней вычислительной и информационной мощности, для выполнения нормализации сигналов, операции аналогового и дискретного ввода-вывода, отображения данных и их передачу или прием по промышленному интерфейсу RS-485. Питание модулей осуществляется нестабилизированным напряжением 10...30 В постоянного тока.

На рис. 4.6 представлен дисплей контроллера, предназначенного для управления технологическими процессами на горных предприятиях. Контроллер имеет операторскую панель с цветным графическим экраном и сенсорным управлением. Он работает совместно с блоками ввода-вывода (аналоговый вход), (дискретный вход), (аналоговый выход) и (дискретный выход), посредством интерфейса RS-485. Сенсорный экран позволяет производить программирование и ручное управление процессами непосредственно с передней панели, а также использовать контроллер в качестве регистратора параметров.

Для обеспечения работы технологических процессов, которые требуют высокоскоростных входов-выходов, производятся специализированные блоки дискретного ввода-вывода.

На дисплей выводятся текущие основные параметры:

- Ток двигателя
- Расход
- Отгруженный уголь
- Нагрузка на погонный метр

ДВУХПРИВОДНЫЙ ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР 2Л100У



Рисунок. 4.6. Дисплей контроллера

- Скорость
- Натяжение на грузовой ветви
- Натяжение на порожней ветви
- Количество угля, поступающего на ленточный конвейер

Система автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера предназначена для автоматической стабилизации нагрузки конвейера, повышения безопасности при эксплуатации конвейерного транспорта, предотвращения возникновения аварийных ситуаций, вызванных техническими неисправностями отдельных элементов конвейерной линии.

Система обеспечивает:

- Измерение и контроль скорости ленточного полотна конвейеров;
- Измерение и контроль скорости вращения приводного барабана конвейеров;
- Контроль силы натяжения конвейерной ленты;
- Контроль бокового схода ленточного полотна в грузовой и хвостовой части конвейера;
- Контроль кабель-тросовых выключателей;
- Контроль пересыпа на разгрузочной секции конвейера;

4.4. Выводы по главе

Разработана структура и состав комплекса технических средств автоматической системы стабилизации тягового фактора конвейера. В приводе натяжного устройства используется частотно управляемый асинхронный двигатель, преобразователь частоты, два блока фильтров, пульт местного управления, контроллер Simatic S7-300 и интерфейс RS-232.

Описаны рекомендации к внедрению автоматизированной системы автоматической стабилизации тягового фактора на ленточных конвейерах шахты „Калева” в государстве Союз Мьянмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований в диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи разработки и исследования системы автоматической стабилизации величины тягового фактора двухприводного ленточного конвейера, что позволяет снизить износ движущегося полотна ленточного конвейера и уменьшить вероятность возникновения пробуксовки на каждом приводном барабане.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором:

1. Создана математическая модель движения ленты магистрального конвейера с двумя приводами и устройством натяжения ленты, обладающая достаточной адекватностью (сумма квадратов отклонений модельных и реальных параметров при переходных процессах на достаточно длительном интервале времени не превышают 10%), может быть использована как объект системы управления движением конвейера.

2. Разработана структура и алгоритм системы автоматической стабилизации тягового фактора, которые обеспечивают требуемое при эксплуатации натяжение ленты, исключая ее проскальзывание на приводных барабанах.

3. Создана структура комплекса технических средств, позволяющая автоматизировать процесс корректировки натяжения конвейерной ленты в зависимости от загрузки для стабилизации тягового фактора конвейера.

4. Выполнены исследования путем математического моделирования системы регулирования тягового фактора в режимах пуска, экстренной остановки, штатной работы и торможения, показавшие достаточную работоспособность системы.

5. Разработанный алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки, используемый в Едином диспетчерском аналитическом центре АО «СУЭК-Кузбасс», показал востребованность полученных теоретических результатов в горной промышленности.

6. Создана и внедрена на шахте «Калева» Республики Союз Мьянма система автоматической стабилизации тягового фактора, предотвращающая проскальзывание ленты на приводных барабанах конвейера в шахтных условиях неравномерной загруженности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация конвейерных линий [Электронный ресурс] : Режим доступ: <http://mydocx.ru/8-5102.html> (Дата обращения 25.10.2016)
2. Андреев А.В. Транспортные машины и автоматизированные комплексы открытых разработок : учебник для студ. вузов, обуч. по спец. "Горные машины и комплексы"[Текст] / А. В. Андреев, В. А. Дьяков, Е. Е. Шешко . – М. : Недра, 1975 . – 464 с.
3. Акастелов А.И. Исследование абразивного износа и пути повышения срока службы конвейерных лент. [Текст], Пчелкин Г.Д., – «Производство шин, резинотехнических и асбестотехнических изделий» 1971, No8, с. 26-28.
4. Андреев А.В. Транспортные машины и комплексы для открытой добычи полезных ископаемых. [Текст]/ Шешко Е.Е., М., «Недра», 1970, 430 с.
5. Андриевский Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами из MATLAB. Санкт-Петербург: [Текст]/ Фрадков А.П., Наука 1999. 471с.
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: [Текст]/ в 3 т. Т.1./ В.И.Анурьев. – М.: Машиностроение, 1982.-301с.
7. Бабенко А.Г. Цифровые системы управления: [Электронный ресурс]/ учебное пособие для вузов / Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2005. – 325 с.
8. Бельфор В.Е. Исследование переходных процессов в многоприводных ленточных конвейерах для горнорудных предприятий. Диссертация, представленная на соискание ученой степени канд. тех. наук. [Текст]/ М., 1968.-147с.
9. Бернштейн А.И. Об одной задаче оптимизации работы шахтного конвейерного транспорта. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. [Текст]/ 1988, №5.
10. Бишеле И.В. Выбор рациональных ступеней регулирования скорости конвейера по грузопотоку. [Текст]/ Горные машины и автоматика- 1969, №2. С. 52-54.
11. Белоусенко И.В. Шварц Г.Р., Великий С.Н. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности. [Электронный ресурс]/М.: Недра, 2002. -300с.

12. Брагин В.В., Шевелев А.Л., Ларичкин Л.Д. Формирование грузопотоков угля из комплексно-механизированных забоев Сб. [Текст]/ Шевелев А.Л., //Научных трудов ассоциации "Кузбасуглетехнология"-1992, №5, С. 16-29.
13. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. Высш. Учеб. заведений / М.П.Белов, В.А.Новиков, Л.Н.Рассудов. [Электронный ресурс]/ – 3-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
14. Беляев В.П. Типовой электропривод [Текст] : учеб. пособие / В. П. Беляев ; Белорус. гос. политехн. акад. (Минск). - Минск : БГПА, 1991.-69с.
15. Биличенко Н.Я., Высочин Е.М., Завгородний Е.Х. Эксплуатационные режимы ленточных конвейеров. [Текст]/ Высочин Е.М.// М., Гостехиздат, 1964. 173 с.□
16. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Электронный ресурс]/ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2008. 298 с.
17. Волотковский В.С. Износ и долговечность конвейерных лент [Текст] / В.С. Волотковский, Е.Г. Нохрин, М.Ф. Герасимова. - Москва : Недра, 1976. - 176 с.
18. Васильев К.А. Транспортные машины и грузоподъемное оборудование обогатительных фабрик [Текст] : учеб. пособие / К. А. Васильев, А. К. Николаев, К. Г. Сазонов. - СПб. : Наука, 2006 (Ульяновск). - 359 с.
19. Высокодинамичные энергоэффективные электроприводы горных машин [Текст] / Б. З. Дробкин [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. - 2011. - N 4. - С. 34-39.
20. Васильев К.А. Транспортные машины [Текст] : учеб. пособие / К.А.Васильев, А.К.Николаев. - СПб. : [б. и.], 2003. - 121 с.
21. Васильев К.А. Транспортные машины и оборудование шахт и рудников [Текст] : учеб. пособие / К. А. Васильев, А. К. Николаев, К. Г. Сазонов. - СПб. [и др.] : Лань, 2012. - 537 с.
22. В.П.Дунаев. Конвейеры с подвесной лентой [Текст] : монография / В. И. Аверченков [и др.]; Под общ. ред. В.И. Аверченкова, В.Н. Ивченко. - М. : Машиностроение-1, 2004. - 255 с.

23. В.Н. Фролов. Развитие тягового расчета мощных ленточных конвейеров на основе РТМ 24.093. 04 - 80 [Текст] / В.Н. Фролов, Г.В. Аляпкин, С.В. Ковтун //Конвейеры. Канатные дороги: сб. науч. тр. - М.: ВНИИПТМАШ, 1985. - с. 29-36.
24. ГОСТ Р 51984-2002. Конвейеры шахтные ленточные. Общие технические условия. [Электронный ресурс]/ – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. -17с.
25. Галкин В.И. Методы расчета и оценка показателей надежности ленточных конвейеров горных предприятий : диссертация. доктора технических наук : 05.05.06. [Текст] / - Москва, 2000.- 421 с.
26. Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Запенин И.В., Шешко Е.Е. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. [Текст] / Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Запенин И.В., Шешко Е.Е. //– М.: Изд. МГГУ, 2005, 543с.
27. Гливанский А.А. Методы управления шахтным подземным конвейерным транспортом//Средства и аппаратура горной автоматики для угольных предприятий. [Текст] / Коновалова И.П., Ротенберг В.М., Травкин Е.К. // Труды института. Гипроуглеавтоматизация – Москва, 1978. Вып.29. . – С. 38-44.
28. Глянь Д.В. Исследование и разработка системы мониторинга и управления конвейерным транспортом шахты [Электронный ресурс] : реферат / Оголобченко А. С. .- Режим доступ: <http://masters.donntu.org/2015/fkita/glian/diss/index.htm> (Дата обращения 10.06.2016)
29. Гончаров К.А. Обоснование выбора систем приводов протяженных ленточных конвейеров со сложной трассой. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.. [Текст] / - Брянск.2011. -149с.
30. Гончаревич И.Ф.Динамика горных машин с упругими связями [Текст] / И. Ф. Гончаревич, А. В. Докукин ; Акад. наук СССР// М-во угольной промышленности СССР, Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского. - М. : Наука, 1975. - 211 с. -Библиогр.: с. 208 - 210.
31. Дмитриева В.В. Математическая модель магистрального конвейера как объекта управления и автоматизации. [Текст] / Горные машины и автоматика. 2001, №7. С. 37-40.
32. Дмитриева В.В. Модель «магистральный конвейер - асинхронный

привод» и анализ ее динамических процессов. [Текст] / - Издательство МГГУ, депозит №348/05-04,25 марта 2004.□

33. Дмитриева В.В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / В. В. Дмитриева. - М., 2005. - 22 с. : ил. - Библиогр.: -22 с.

34. Дмитриева В.В. Разработка математической модели ленточного конвейера с двухдвигательным приводом/ Гершун С.В.// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. № 8. С. 295-303.

35. Дмитриева В.В. Автоматическая стабилизация погонной нагрузки магистрального ленточного конвейера, [Текст] / Певзнер Л.Д.// Издательство МГГУ, препринт, октябрь 2004. -26с.

36. Дмитриева В.В. Поддержание величины тягового фактора ленточного конвейера с двухдвигательным приводом. [Текст] /Куанг Пьей Аунг, Вин Зо Хтэй // Современные наукоемкие технологии (научный журнал). – 2015. - № 10. – С. 20-28.

37. Дмитриева В.В. Поддержание величины тягового фактора ленточного конвейера с двухдвигательным приводом. [Текст] / Каунг Пьей, // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. - № 6. – С. 189-198.

38. Давлюк И.М. Осипенко А.В. Совершенствование оборудования непрерывного действия для открытых горных работ. [Текст] / – Горный журнал, 1983, №1, с. 45-46.

39. Дьячков В.К. Транспортирующие машины. – М.: Наука. 1982. – 191 с., [Текст] / Спиваковский А.О., Потапов М.Г. // Транспортные машины и комплексы открытых горных разработок. М.: Недра. 1983.- 383 с.

40. Дьячков В.К. SIMULINK 4. Специальный справочник. [Электронный ресурс] Санкт-Петербург: Питер, 2002. -528с.

41. Егоров Ю.Н. Приводы автоматизированных систем. Электроприводы и управление в технологичих машинах[Электронный ресурс]: учеб. пособие/ Ю.Г.Егоров, И.М.Семенов.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 342 с.

42. Запенин И. В. Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров [Текст] / И. В. Запенин, В. Е. Бельфор, Ю. А. Селищев. - Москва

: Недра, 1969. - 56 с.

43. Зарецкий О.М. Исследование неравномерности грузопотоков из очистных забоев угольных шахт и разработка методики расчета и выбора параметров привода выравнивающих бункер-конвейеров. [Текст] : автореферат диссертации на соискание ученой степени. канд. техн. наук : 05.05.06 - Горные машины / О.М. Зарецкий; рук. М.А. Котов ; ИГД им.А.А.Скочинского. - М., 1979. - 22 с.

44. Иванов Г.М. Электропривод в химической и целлюлозно-бумажной отраслях промышленности[Электронный ресурс]: Монография / Иванов А.Г., – М.: МГИУ.2008. – 480с.

45. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации[Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/ [Белов М.П., Зементов О.И., Козярук А.Е. и др.] и Под ред. В.А.Новикова, Л.М.Чернигова. - М.: Издательский центр "Академия", 2006. - 368 с.

46. Ключев В. И. Теория электропривода. [Текст] -М.: Энергоиздат, 1985. - 560 с.

47. Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов[Текст]: Учебник для вузов. /Терехов В.М. – М.: Энегррия, 1980. - 360 с.

48. Катушко Г.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния резиноканевых конвейерных лент в линейной части конвейера.[Текст]/Изв. вузов, Горный журнал. 1976. No2. с. 117-126.

49. Кильчевский Н.А. Основы теоретической механики [Текст] : учебное пособие / Н.А. Кильчевский. - 2-е изд.,перераб. и доп. - К. : Вища школа, 1986. - 296 с.

50. Квакернаак Х. Линейные оптимальные системы управления. [Текст]/ Сиван Р. -М.: Мир, 1977. -656с.

51. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. [Текст]-М.:Высшая школа, 2001. -327с.

52. Кравчик А.Э. Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели. Справочник. [Электронный ресурс] М.: Энергоиздат,1982. -504с.

53. Ковчин С.А. Теория электропривода[Текст]: Учебник для вузов/ Сабинин Ю.А. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1994. – 496 с.

54. Кожевников В.Ю. Автоматизация производственных процессов в условиях ОАО «Шахта «Большевик»[Текст]: Дипломный проект по специальности «Электромеханика». Режим доступ: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=97726> (Дата обращения 25.06.2016) – Новокузнецк, 2007. – 147 с.
55. 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.
56. 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. : УГТУ, 2007. – С. 32-35.
57. 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.
58. 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.
59. Кожубаев Ю.Н. Нечеткие регуляторы в системах управления ленточным конвейером[Текст] / 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.
60. Кожубаев Ю.Н. Рациональное распределение нагрузки в многоприводных ленточных конвейерах [Текст]/ 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.
61. Кожубаев Ю.Н. Системы управления ленточным конвейером [Текст] / Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 2 (195). – С. 181-186.

62. Кожубаев Ю.Н. Управление активными устройствами ленточного конвейера в целях обеспечения его безаварийной работы[Текст] / 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.
63. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. [Текст]– СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.: ил.
64. Лобачева А.К. Исследование и установление параметров и способов регулирования скорости ленточных конвейеров в зависимости от забойного грузопотока. Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. [Электронный ресурс] М.,1970. -249с.
65. Ленточные конвейеры в горной промышленности. [Текст]/ В.А.Дъяков, Л.Г.Шахмейстер, В.Г.Дмитриев и др. Под редакцией чл. кор. АН СССР А.О.Спиваковского, М. Недра, 1982, 349 с.
66. Меклер А.Г. Электрооборудование машин непрерывного транспорта. [Текст]-М.: Машиностроение. 1973. -296с.
67. Мамалыга В.М. Взаимосвязанная система управления многодвигательными ленточными конвейерами. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. [Электронный ресурс] Киев; 1988. С. 10- 120.
68. Материал о ленточных конвейерах [Электронный ресурс].- Режим доступ: <http://www.zaoplatov.ru/equipment/miner?n=154> (Дата обращения 20.06.2017)
69. Мерцалов Р.В. Исследования подземных грузопотоков и установление способов повышения эффективности использования шахтных конвейеров. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н.[Электронный ресурс] М.,1968. 159с.
70. Мягков С.Д. Теоретическое определение сил сопротивления движению от деформирования груза и ленты мощных ленточных конвейеров. [Электронный ресурс] /Шахтный и карьерный транспорт, вып.3.-М.: Недра, 1977, С. 33-36.
71. Новиков В.А. Электропривод в современных технологиях [Текст] : учеб. для вузов по направлению подгот. "Электроэнергетика и электротехника" [Электронный ресурс] / В. А. Новиков, С. В. Савва, Н. И. Татаринцев и ., под ред. В. А. Новикова. - М. Академия, 2014. - 399, [1] с.

72. Назаренко В.М. Режимы работы автоматизированных ленточных конвейеров рудоподготовительного производства. [Текст] : Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук : 05.05.06 - Горные машины 05.13.07 -. Автоматизация технологических процессов и производств (отрасль - пром-сть) / В.М. Назаренко ; Ан УССР. Ин-т геотехн. механики. - Днепропетровск, 1990. - 35 с.
73. Натяжные устройства. Тяговый расчет наклонного и магистрального конвейеров [Электронный ресурс] : Режим доступ: <http://vunivere.ru/work17560/page3> (Дата обращения 21.01.2017)
74. Прокуда В.М. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» [Текст]/В.М.Прокуда, Ю.А.Мишанский, С.Н.Проценко//Горная электромеханика. – 2012. - №88. –107-111 с.
75. Певзнер Л.Д. Теория систем управления: СПб : Из-во Лань, 2013. -424с.
76. Петков О. Н. Разработка и исследование системы автоматического управления скоростью ленточного конвейера по входному грузопотоку Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. [Текст] -М.,1984. -145с.
77. Пономаренко В.А. Научные основы определения резервов пропускной способности и оптимизация систем подземного транспорта угольных шахт. Диссертация, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук. [Текст] .Донецк, 1965. -601с.
78. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x. М.: Диалог-МИФИ, 1999.-366с.
79. Полунин В.Т. Эксплуатация мощных ленточных конвейеров/ В.Г.Полунин, Г.Н.Гуленко – М.: Недра, 1986. – 344 с.
80. Полунин В.Т., Исследование удельного износа рабочих обкладок конвейерных лент на роlikоопорах и в месте загрузки [Текст]/ Гуленко Г.Н., Фролов В.И.- Изв. вузов. Горный журнал. 1974. - № 5. - 100-103 с.
81. Полунин В.Т., Эксплуатация мощных конвейеров. [Текст]/ Гуленко Г.Н. – М: Недра, 1986. – 344 с.
82. Печук В.И. Современное состояние и перспективы развития тензорезисторных силоизмерительных датчиков. – В кн.: Контроль усилий бесклеевых тензорезисторными датчиками[Текст]/ Под ред. В.И.Печука: – Киев: Киевский институт автоматики, 1971, 5-17 с.
83. Панкратов С.А. Динамика машин для открытых горных и земляных

работ. [Текст]– М., Машиностроение, 1977. 448 с.

84. Переверзева О.В. Распределение теплоты между трущимися телами [Текст]/ Балакин В.А. -Трение и износ. 1992. Т. 13,. No 3. С. 507–516с.

85. Подпорин Т.Ф. Моделирование переходных режимов ленточных конвейеров[Текст]: Учеб. пособие: в 2 ч./ Гос. учреждение Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2002. – ч.1. Моделирование процессов изменения натяжения ленты при загрузке и разгрузке конвейеров. – 164 с.

86. Реутов А.А. Автоматизированное проектирование барабанов ленточных конвейеров в среде T-Flex [Текст]/ А.А.Реутов, А.П.Ларкин // Горный информационно- аналитический бюл. – М.: Изд-во МГГУ, 2006. - No11. 120-122с.

87. Реутов, А.А. Моделирование приводов ленточных конвейеров[Текст]: монография / А.А. Реутов. - Брянск: БГТУ, 2011. - 152 с.

88. Реутов, А.А. Моделирование асинхронного электропривода с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» [Текст]/ А.А. Реутов, А.А. Мясников // Горный информационно-аналитический бюл.- М.: Изд- во МГГУ, 2006. - No9. - С. 306-309.

89. Реутов А.А. Оптимизация приводов типовых ленточных конвейеров при неопределенности трассы [Текст]/ А.А.Реутов // Горный информационно-аналитический бюл. – М.: Изд-во МГГУ, 2008. - No7. – С.338-341.

90. Реутов, А.А. Формализация выбора концепции проектирования технического объекта[Текст]/ А.А. Реутов// Вестник БГТУ, 2009. - No2.-С. 53-56.

91. Рыжикова А.Г. Обоснование способов обеспечения устойчивой работы двухбарабанного привода мощных ленточных конвейеров для горной промышленности: диссертация канд. техн. наук. [Текст] -Москва, 1985. - 235 с.

92. Рощин А.С. Исследование коэффициента сцепления ленты с приводными барабанами конвейера в условиях горнорудных предприятий. Автореферат диссертационной работы, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук. [Текст] -Днепропетровск. 1977. 25с.

93. Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. [Текст]/ Столяров И.М., Дартау В.А. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 136с.

94. Рытов М.Ю. Автоматизация параметрического проектирования ленточных конвейеров с подвесной лентой : диссертация кандидата

технических наук : 05.13.12. [Текст]- Брянск, 2002.- 218 с.

95. Ромакин Н.Е. Машины непрерывного транспорта[Текст]: учеб.пособие для студ. Высш. Учеб.заведений/Н.Е.Ромакин. – М.:Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.

96. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. [Текст]/ Сарбатов Р.С. -М.: 1974.

97. Спиваковский А.О., Дьячков В.А. Транспортирующие машины. [Текст]: Учебное пособие для машиностроительных вузов. – 3-е изд. перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.

98. Спиваковский А.О., Дмитриев В.Г. Теоретические основы расчета ленточных конвейеров. – М.: Наука, 1977. – 208с.

99. Спиваковский А.О. Теоретические основы расчета ленточных конвейеров[Текст]/ А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев. -М.: Наука, 1982. - 154с.

100. Справочник по автоматизации шахтного конвейерного транспорта [Текст]/ Стадник Н.И., Ильюшенко В.Г., Егоров С.И. и др. - К.: Техника, 1992. - 438с.

101. Справочник по электрическим машинам[Текст]: в 2 т. Т.1/под общ.ред. И.П.Копылова, Б.К.Клюкова. – М.:Энергоатомиздат, 1988.-456с.

102. Справочник по электрическим машинам[Текст]: в 2 т. Т.2/ под общ.ред. И.П.Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.

103. Сокотнюк Ю.А. Система автоматического управления наклонным ленточным конвейером/ диссертация на соискание ученой степени к. т. н., [Текст]. Днепропетровск, 1990.230с.

104. Солод Г.И. О технологических предпосылках автоматизации конвейеров и конвейерных линий в горнодобывающей промышленности. [Текст], Сб. "Транспорт горных предприятий" МГИ, 1963.

105. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием[Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведения/ Г.Г. Соколовский. - М.: Издательский центр "Академия", 2006. - 272 с.

106. Солод Г.И. Основные технические и технологические предпосылки автоматизации шахтных конвейеров с регулируемой скоростью[Текст]/ Папоян Р.Л.. Сб. "Механизация и автоматизация рудничного транспорта." № 17, Недра.120-126с.

107. Солод, Г.И. Основы теории передачи тягового усилия трением на

длинных контактирующих площадках[Текст]: сб. науч. тр. / Г.И. Солод // Горная механика. - М.:МГИ, 1970.- 16 с.

108. В. В. Солодовников. “Синтез корректирующих устройств следящих систем при помощи оптимальных и типовых логарифмических частотных характеристик”,[Текст]. Автомат. и телемех., 14:5 (1953), –555 с.

109. Спиваковский□ А.О. Теория ленточных конвейер□еров [Текст]/ А. О. Спиваковский□, В. Г. Дмитриев. - М. : Наука, 1982. - 190 с.□

110. Сухарев И.А. Управление конвейерными линиями на базе асинхронного электропривода в рамках АСУТП : диссертация кандидата технических наук : 05.09.03. [Текст] - Воронеж, 2003.- 178 с.

111. Ткач В.М. Опыт разработки и внедрения систем автоматического управления конвейерными линиями. [Текст]. Горный журнал. 1994, №5. 47-50 с.

112. Терехов В.М. Системы управления электроприводов[Текст]: Учебник/ Осипов О.И. – М.: Академия, 2005. – 304с.

113. Технологии и оборудованию Горного производства [Текст] – Лекция для АКиТ./ Кухарь В.Ю. – Украина. г. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2005. – 13с.

114. Тихомиров В.П. Проектирование машин[Текст]: учеб. Посо / В.П.Тихомиров, А.Г.Стриженок. – Брянск: БГТУ, 2005. – 310 с.□

115. Ткачев А.П. Микропроцессорная система управления конвейерным транспортом[Текст]/ Чернышев. М.Н., Козарь Н.К.. Горная электромеханика и автоматика, 1988, №53.

116. Теория механизмов и машин[Текст]: учебник для втузов / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов [и др.] / под ред. К.В. Фролова. - М.: Высш. шк., 1987. - 496с.

117. Толпежников Л.И. Автоматизация подземных горных работ. [Текст]. М.: Недра, 1976. 30-65 с.

118. Тарасов Ю.Д. Транспортные машины непрерывного действия [Текст] : учеб. пособие / Ю. Д. Тарасов. - СПб. : [б. и.], 2009 (СПб.). - 144 с.

119. Тарасов Ю. Д. Горно-транспортные машины периодического действия [Текст] : учеб. пособие / Ю.Д. Тарасов, А.К. Николаев. - СПб. : [б. и.], 2005. - 115 с.

120. Уханов В.С. Изучение устройства и определение основных параметров ленточных конвейер□еров [Текст]: методические указания к

выполнению практических и лабораторных работ для студентов инженерно-технических специальностей. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. – 30 с.

121. Фадеев А.Г./ Проектирование системы управления электроприводом конвейерной установки[Электронный ресурс] : Режим доступ: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-33622.html> (Дата обращения 27.03.2017)

122. Филимонов А.Б. Спектральная декомпозиция динамических систем с запаздываниями: теория и применение [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / А. Б. Филимонов. - М., 2003. - 42 с.

123. Хачатрян С.А. Обоснование методов повышения надежности эксплуатации конвейерных систем угольных шахт. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.05.06[Текст]. Санкт-Петербург, 2004. – 280 с.

124. Хачатрян С.А. Проблемы надежности конвейерного транспорта угольных шахт[Текст]. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2004. 182 с.

125. Чиликин М. Г., Теория автоматизированного электропривода. [Текст]/ Ключев В. И., Сандлер А.С. -М: Энергия, 1979. 616 с.

126. Черемушкина М.С. Совершенствование систем электропривода конвейерного транспорта[Текст]/ Черемушкина М.С., Козярук А.Е. // Сборник трудов XXXVII Неделя науки СПбГПУ: материалы всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008, Ч.V., стр.167-168.

127. Шахмейстер Л.Г. Расчет ленточных конвейеров для шахт и карьеров. [Текст]/ Дмитриев В.Г.- М.: издательство МГИ, 1982.

128. Шахмейстер Л.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. [Текст]/ Дмитриев В.Г. -М.: Машиностроение, 1978. 392 с.

129. Шахмейстер Л.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. [Текст]/ Дмитриев В.Г. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. 336 с.

130. Шахмейстер Л.Г. Элементы статистической динамики транспортных машин. [Текст]/ Дмитриев В.Г. -М.: издательство МГИ, 1970.

131. Шахмейстер Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточного конвейера [Текст]/ Дмитриев В.Г., Лобачева А.К. -М.: издательство МГИ. 1974.

132. Шахмейстер Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости

ленточных конвейеров [Текст] : Учеб. пособие / Л. Г. Шахмеев, В. Г. Дмитриев, А. К. Лобачева ; М-во высш. и сред. спец. образ. СССР. Моск. горный ин-т. - Москва : [б. и.], 1972. - 163 с.

133. Щеглов О.М. Совершенствование конструкции натяжных устройств транспортирующих машин[Текст]/ О. М. Щеглов, П.А. Гринько // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2010. – Вып. 12. – С. 93 – 95.

134. Шахмеев Л.Г., Подземные конвейерные установки. [Текст]/ Солод Г.И. Под ред. Чл. – кор. АН СССР А.О.Спиваковского, М., «Недра», 1976. 432 с.

135. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. [Текст]– М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 288 с.

136. Электрические машины[Текст]: учеб. для электромех. спец. Вузов/ В.И.Раин, Д.Э.Брускин, А.Е.Зорохович / под ред. И.П.Копылова. – М.: Высш. Шк., - 1988. – 328 с.

137. Электромеханические системы контроля и управления натяжением ленточных материалов[Текст]/Н.И.Бондарев, Г.Г.Лисовская, В.В.Михайлов, О.П.Мартыненко. – М.: 1980. – 96 с.

138. Dmitrieva V.V. Maintaining traction factor value of belt conveyor with two-engine drive [Text]/ Kaung Pyae Aung// Third International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2015 , Rome, Italy, ISBN: 978-1-63248-080-4 DOI: 10.15224/ 978-1-63248-080-4-73 p. 45 – 48.

139. Kaung Pyae Aung. Development of a mathematical model of belt conveyor with twin-engine drive. [Text]/ Dmitrieva V.V, Pevzner L.D.// International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI-2016), Beijing, China. ISBN: 978-93-86291-05-9 Page(s): 5-8.

140. Kozhubaev Y.N. Fuzzy control system for belt conveyor[Text]/ 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.

141. Miller Robert H. The shading coil displacement. [Text]/ IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 1979, vol 17, p. 188-194.

142. Qing Lu , Research and Design of Monitoring System for Belt Conveyor. [Text]/ Xiaohui Wang , Liyun Zhuang// 2012 International Conference on

Computer Science & Service System (CSSS), Nanjing, China, DOI: 10.1109/CSSS.2012.485, p. 1943-1945.

143. Springer Handbook of Automation[Text], Publisher: Springer, ISBN: 978-3-540-78830-0, DOI 10.1007/978-3-540-78831-7, 2009. p. 154-168.

144. U Myint Kyaw Thura, Report (Environmental and social impact Assessment for Max Myanmar Coal Mine Kalaywa), [Text]/ U Ye Linn Aung, Daw May Thae Lwin, Saw Han Shein, 2015. p. 154-168. 13-26.

145. Viren, E. A. A Comparison of Drive Starting Mechanisms for Aggregate Belt Conveyors [Text]/ E.A. Viren // SME Cincinnati. - Ohio, USA, 2003. -10 p.

146. Zade L.A. Fuzzy sets. – Information and Control[Text], vol. 8, 1965, pp. 338-353.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПКОН РАН)

111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4
ИНН 7722013467/ КПП 772201001
Тел., факс: +7 (495) 360-89-60

« 18 » 12 2017 г.

Исх. № 13116 2412/510

В отдел регистрации программ для
ЭВМ,
баз данных и топологий ИМС
Федерального института
промышленной собственности
РОСПАТЕНТа
Бережковская наб., 30, корп. 1,
Москва,
Г-59, ГСП-5, 123995

Направляю Вам на регистрацию программу для ЭВМ "Автоматическая стабилизация тягового фактора ленточного конвейера", правообладателем всех имущественных прав, на которую является Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской Академии наук. и прошу выдать *одно* свидетельство.

Комплектность заявки указана в приложении.

Приложение:

1. Заявление (форма РП и РП/ДОП)	на	л.	в	1	экз.
2. Листинг	на	л.	в	1	экз.
3. Реферат	на	л.	в	2	экз.
4. Доверенность	на	л.	в	1	экз.
5. Платежный документ об уплате рег. сбора	на	л.	в	1	экз.
6. Экранные формы	на	л.	в	1	экз.
7. Ходатайство об ускорении	на	л.	в	1	экз.
8. Платежный документ об уплате тарифа	на	л.	в	1	экз.

Не нужное убрать

Всего на ___ листах + ___ платежный документ.

Свидетельство прошу выдать на руки

Директор ИПКОН РАН

Член-корр. РАН **ПОЛУЧЕНО К-ВО**

19 ЯНВ 2018

ФИПС 01Д:17

В.Н. Захаров

2017 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

To whom it may concern

It is my great pleasure to write this letter for supporting the PhD thesis results of **Kaung Pyae Aung**, who is a graduate student at National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia. His thesis is about the development and research for automatic stabilization system of the value traction factor of a two-drive belt conveyor.

The scientific task of developing and researching of this system, solved by Kaung Pyae Aung in his PhD research, is highly topical. The results of the studies are the development of the algorithm and structure of the traction factor control system, which allows stabilizing the traction factor of the two-drive conveyor under normal and abnormal modes of belt motion.

The results of the work are implemented as a part of the automatic stabilization system at the underground coal mine. The practical application of this system is aimed at increasing the efficiency of mining enterprises and ensuring the safety of mining operations.

His thesis describes a method of developing a mathematical model for a two-drive belt conveyor. This model is a tool for algorithm development and settlement system of automatic stabilization of the traction factor. Computer simulation of the developed system was carried out using MATLAB software. The simulation results confirm the validity of the theoretical calculations.

In summary, I highly recommend PhD thesis of Kaung Pyae Aung for increasing the efficiency of mining enterprises and ensuring the safety of mining operations.



NAY ZAR LIN, Ph.D.

Manager (Mining)

No.1 Mining Enterprise

Ministry of Natural Resources and Environmental Conservation

Republic of the Union of Myanmar.



Recommendation Letter (or)

*Reference Letter for results implementation of the PhD thesis of Kaung Pyae Aung on the topic
“Development and research for automatic stabilization system of the value traction factor of a
two-drive belt conveyor”*

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Перевод с английского языка на русский язык

Рекомендательное письмо (или)

*Справка об использовании результатов кандидатской диссертации Каунга Пьей Аунг на тему:
«Разработка и исследование системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера»*

Для представления по месту требования

Я очень рад написать это рекомендательное письмо в поддержку кандидатской диссертации Каунга Пьей Аунга, который является аспирантом Национального технологического университета «МИСиС», Москва, Россия. Его диссертационная работа посвящена разработке и исследованию системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера.

Научная задача разработки и исследования системы автоматической стабилизации величины тягового фактора двухдвигательного ленточного конвейера, решаемая Каунгом Пьей Аунгом в диссертационном исследовании, является актуальной. Результатами проведенных исследований является разработка алгоритма и структуры системы регулирования тягового фактора, позволяют стабилизировать тяговый фактор двухприводного конвейера при штатных и нештатных режимах движения ленты.

Результаты работы внедрены в составе системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера на шахте. Практическое применение системы автоматической стабилизации тягового фактора направлено на повышение эффективности горно-добывающих предприятий, обеспечение безопасности проведения горных работ.

В диссертации описывается метод разработки математической модели двухприводного ленточного конвейера. Эта модель представляет собой инструмент разработки алгоритмов и расчетной системы автоматической стабилизации тягового фактора. Компьютерное моделирование разработанной системы осуществлялось с использованием программного обеспечения МАТЛАБ. Результаты моделирования подтверждают основательность теоретических расчетов.

В заключение я настоятельно рекомендую одобрить кандидатскую диссертацию Каунга Пьей Аунга для повышения эффективности горнодобывающих предприятий и обеспечения безопасности проведения горных работ.

- подпись -

Нэй Зар Лин

Директор (Разработка месторождений)

Горнодобывающее предприятие №1

Министерство национальных ресурсов и защиты окружающей среды
Республика Союз Мьянма

Оттиск печати

Перевод выполнен переводчиком английского языка
Железняк Анной Эдуардовной

Дипломированный переводчик

Железняк Анна Эдуардовна

ИП Железняк Анна Эдуардовна

ИНН 77321192164

ОГРНИП 306770000375120

115419, Москва, ул. Орджоникидзе 7

Тел.: (495) 363-73-01

Веб-страница: www.lingvohaus.ru

эл. почта: lingvohaus@gmail.com



Бюро Переводов «ЛИНГВОХАУС»

Переводчик:

ИП Железняк Анна Эдуардовна

ИНН 77321192164

ОГРНИП 306770000375120

119415, Москва, ул. Орджоникидзе 7

Тел.: (495) 363-73-01

www.lingvohaus.ru lingvohaus@gmail.com

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



Jianxin Machinery

High-performance concrete mixing plant



ISO9000质量管理体系认证



国家专利产品



欧盟CE认证

To whom it may concern

It is our great pleasure to write this letter for supporting the PhD thesis results of **Kaung Pyae Aung**, who is a graduate student at National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia.

His thesis is about the development and research for automatic stabilization system of the value traction factor of a two-drive belt conveyor. The scientific task of developing and researching of this system, solved by Kaung Pyae Aung in his PhD research, is highly topical. The results of the studies are the development of the algorithm and structure of the traction factor control system, which allows stabilizing the traction factor of the two-drive conveyor under normal and abnormal modes of belt motion.

The simulation results confirm the validity of the theoretical calculations. The results of the work are implemented as a part of the automatic stabilization system at the underground coal mine. The practical application of this system is aimed at increasing the efficiency of mining enterprises and ensuring the safety of mining operations.

In summary, I highly recommend PhD thesis of Kaung Pyae Aung for increasing the efficiency of mining enterprises and ensuring the safety of mining operations.

Stamped & Signed

郑州市建新机械制造有限公司
ZHENGZHOU JIANXIN MACHINERY CO., LTD.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Перевод с английского языка на русский язык

«Цзяньсинь Машинери» / Jianxin Machinery
Установки высокой мощности

Для представления по месту требования

Мы рады предоставить настоящее рекомендательное письмо в поддержку кандидатской диссертации Каунга Пьей Аунга, который является аспирантом Национального технологического университета «МИСиС», Москва, Россия.

Его диссертационная работа посвящена разработке и исследованию системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера. Научная задача разработки и исследования системы автоматической стабилизации величины тягового фактора двухдвигательного ленточного конвейера, решаемая Каунгом Пьей Аунгом в диссертационном исследовании, является актуальной. Результатами проведенных исследований является разработка алгоритма и структуры системы регулирования тягового фактора, позволяют стабилизировать тяговый фактор двухприводного конвейера при штатных и нештатных режимах движения ленты.

Результаты моделирования подтверждают основательность теоретических расчетов. Результаты работы внедрены в составе системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера на шахте. Практическое применение системы автоматической стабилизации тягового фактора направлено на повышение эффективности горно-добывающих предприятий, обеспечение безопасности проведения горных работ.

В заключение я настоятельно рекомендую кандидатскую диссертацию Каунга Пьей Аунга к защите для повышения эффективности горнодобывающих предприятий и обеспечения безопасности проведения горных работ.

Штамп и подпись:

«Чжэнчжоу Цзяньсинь Машинери Ко., ЛТД» / Jianxin Machinery Co., LTD

Штамп:

«Чжэнчжоу Цзяньсинь Машинери Ко., ЛТД»

Тел.: +8637186598800 веб: www.chinaconcretemixer.com Адрес: 900 М Ист оф Хянганг Зюс Бас, город Чжэнчжоу, Хенан про, Китай

Перевод выполнен переводчиком английского языка
Железняк Анной Эдуардовной

Дипломированный переводчик

Железняк Анна Эдуардовна

ИП Железняк Анна Эдуардовна

ИНН 77321192164

ОГРНИП 306770000375120

115419, Москва, ул. Орджоникидзе 7

Тел.: (495) 363-73-01

Веб-страница: www.lingvohaus.ru

эл. почта: lingvohaus@gmail.com



Бюро Переводов «ЛИНГВОХАУС»

Переводчик:

ИП Железняк Анна Эдуардовна

ИНН 77321192164

ОГРНИП 306770000375120

119415, Москва, ул. Орджоникидзе 7

Тел.: (495) 363-73-01

www.lingvohaus.ru lingvohaus@gmail.com

ПРИЛОЖЕНИЕ 6



АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО
«СУЭК-КУЗБАСС»

РОССИЯ, 652507, КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛ.,
г. ЛЕНИНСК-КУЗНЕЦКИЙ
УЛ. ВАСИЛЬЕВА, 1
ТЕЛ: (38456) 9-33-11
ФАКС: (38456) 3-32-19, 3-15-18
E-MAIL: suek-kuzbass@suek.ru

28.02.18 № 02.-1/1931

на № _____ от _____

Справка

об использовании результатов диссертационной работы Каунга Пьей Аунга
«Разработка и исследование системы автоматической стабилизации
тягового фактора двухприводного ленточного конвейера».

Большой объем и неравномерность загрузки являются основными причинами износа ленты на конвейерном транспорте шахты. Поэтому разработанная в диссертационной работе «Разработка и исследование системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера», автоматическая система стабилизации тягового фактора конвейерной ленты при неравномерной её загрузки представляет интерес для практического использования на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс». Расчетные схемы, разработанные Каунгом Пьей Аунгом для регулирования натяжения ленточного полотна конвейерного транспорта планируется использовать в работе Единого диспетчерского аналитического центра АО «СУЭК-Кузбасс»

Первый зам. Генерального директора
Технический директор АО «СУЭК-Кузбасс»



А.А. Мешков

Исп. Харитонов И.Л.
Тел. 8(38456)93-250

ПРИЛОЖЕНИЕ 7
Дипломы, полученные на научных конференциях

Министерство образования и науки Российской Федерации
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

ДИПЛОМ

22-я Всероссийская межвузовская
научно-техническая конференция студентов и аспирантов
"Микроэлектроника и информатика - 2015"

Награждается
аспирант (МГИ) НИТУ "МИСиС", Москва

КАУНГ ПЪЕЙ АУНГ

занявший 3-е место в конкурсе работ аспирантов
по секции
"Информационно-управляющие и вычислительные
системы и устройства"

Председатель конкурсной комиссии,
проректор по научной работе



С.А. Гаврилов



Москва, апрель 2015 года



ДИПЛОМ

НАТРАЖДАЕТСЯ

Каунг Пъей Аунг
(ИПКОН РАН, г. Москва)

за лучший доклад, представленный
на 13 Международной научной школе молодых ученых
и специалистов
«Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых»

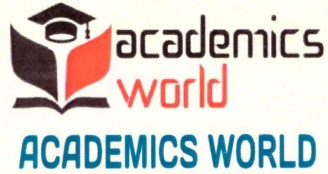
Российская академия наук
Институт проблем комплексного освоения недр

21-25 ноября 2016 г.
МОСКВА, РОССИЯ

Директор Института,
член-корреспондент РАН

В.Н. Захаров

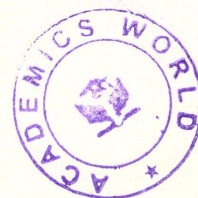




International Academic Conference on
Engineering, Technology and Innovations

Certificate

This is to certify that *Kaung Pyae Aung* has presented a paper
entitled “ *Development of a Mathematical Model of Belt
Conveyor With Twin-Engine Drive*” at the International
Academic Conference on Engineering, Technology and
Innovations (IACETI) held in Beijing, China
on 9th-10th October 2016.



Labein
Chairman
Academics World

D

E

R

I

3rd INTERNATIONAL CONFERENCE on
Advances In Mechanical and Automation Engineering

MAE'15

10-11 December (Thursday & Friday), 2015

the **RED**



Certificate

This is to certify that Dr./Mr./Ms. **KAUNG PYAE AUNG** from **RUSSIA** has presented a paper titled as “**MAINTAINING TRACTION FACTOR VALUE OF BELT CONVEYOR WITH TWO-ENGINE DRIVE**” in the Third International Conference on “**ADVANCES IN MECHANICAL AND AUTOMATION ENGINEERING**” Organized by **INSTITUTE OF RESEARCH ENGINEERS AND DOCTORS** at **HOTEL NOVOTEL ROMA LA RUSTICA, ROME, ITALY.**

Organizing Secretary

Chairman

