

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти-магістр
за освітньо-професійною програмою

«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

*«Автоматизована система керування стрічковим конвеєром з підсистемою
стабілізації тягового фактору»*

Виконав ст. гр.АКІТР-24-2м	_____	<u>Бєлих А.Ю.</u>
Керівник	_____	<u>Тиханський М.П.</u>
Нормоконтроль	_____	<u>Маринич І.А.</u>
Завідувач кафедри	_____	<u>Рубан С.А.</u>

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

«15» липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-2м Белих Андрію Юрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система керування стрічковим конвеєром з підсистемою стабілізації тягового фактору»
затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2005 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3 доц. Тиханський М.П.

Нормоконтроль доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	14.05.25
2	<i>Розділ 1</i>	20.05.25
3	<i>Розділ 2</i>	18.08.25
4	<i>Розділ 3</i>	19.09.25
5	<i>Висновки</i>	15.10.25
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	20.11.25
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	28.11.25
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	01.12.25

6. Дата видачі завдання: 13.05.2025р.

Керівник _____ /Тиханський М.П. /

7. Запевнення: Я, Бєлих Андрій Юрійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету з метою запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти ознайомлена. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Бєлих Андрій Юрійович /

АНОТАЦІЯ

Белих А.Ю. Автоматизована система керування стрічковим конвеєром з підсистемою стабілізації тягового фактору : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно – інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 79 с.

Об'єктом дослідження є процес транспортування матеріалу стрічковим конвеєром та його динамічна поведінка в умовах змінних навантажень..

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматизації керування стрічковим конвеєром, а також підсистема стабілізації тягового фактору та її вплив на ефективність роботи транспортної системи

Метою даної роботи є розробка автоматизованої системи керування стрічковим конвеєром з підсистемою стабілізації тягового фактору, що забезпечує надійний, енергоефективний та безаварійний режим роботи конвеєрної лінії за різних виробничих умов.

Створення автоматизованої системи стабілізації тягового фактора конвеєрів дає змогу усунути прослизання стрічки, продовжити термін її експлуатації та підвищити ефективність роботи обладнання.

Проведено аналіз наукових робіт, присвячених стабілізації тягового фактора двоприводного стрічкового конвеєра, а також розглянуто попередні дослідження, що стосуються моделювання руху конвеєрної стрічки.

В роботі розроблено та проаналізовано математичну модель руху стрічки двоприводного стрічкового конвеєра з урахуванням роботи механізмів натягу; створено алгоритм автоматичної стабілізації тягового фактора за умов нерівномірного навантаження; розроблено автоматизовану систему керування рухом стрічки двоприводного конвеєра із забезпеченням стабільності її натягу.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, НАТЯЖНИЙ ПРИСТРІЙ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, СТАБІЛІЗАЦІЯ, СТРІКОВИЙ КОНВЕЄР, ТЯГОВИЙ ФАКТОР.

ANNOTATION

Belykh A.Yu. Automated belt conveyor control system with traction factor stabilization subsystem: master's thesis: 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 79 p.

The object of the study is the process of transporting material by a belt conveyor and its dynamic behavior under variable load conditions.

The subject of the study is methods, algorithms and technical means of automating belt conveyor control, as well as the traction factor stabilization subsystem and its impact on the efficiency of the transport system

The purpose of this work is to develop an automated belt conveyor control system with a traction factor stabilization subsystem, which ensures reliable, energy-efficient and trouble-free operation of the conveyor line under various production conditions.

The creation of an automated system for stabilizing the traction factor of conveyors makes it possible to eliminate belt slippage, extend its service life and increase the efficiency of the equipment.

An analysis of scientific works devoted to stabilizing the traction factor of a dual-drive belt conveyor was conducted, and previous studies related to modeling the movement of the conveyor belt were also considered.

The paper developed and analyzed a mathematical model of the movement of a dual-drive belt conveyor taking into account the operation of tension mechanisms; an algorithm for automatic stabilization of the traction factor under conditions of uneven loading was created; an automated system for controlling the movement of a dual-drive conveyor belt with ensuring the stability of its tension was developed.

Keywords:

AUTOMATIC SYSTEM, TENSIONING DEVICE, CONTROL SYSTEM, STABILIZATION, BELT CONVEYOR, TRACTION FACTOR.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ	12
1.1 Автоматизація існуючої конвеєрної лінії.....	12
1.2 Аналіз робіт, присвячених способам регулювання тягового фактора конвеєра	16
1.3 Постановка завдання дослідження	23
Висновки до розділу	25
РОЗДІЛ 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	26
2.1 Модель конвеєра з дводвигуновим приводом та натяжним пристроєм.....	26
2.2 Дослідження моделюванням моделі руху стрічки конвеєра з дводвигуновим приводом та натяжним пристроєм	41
Висновки до розділу	45
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	47
3.1 Конструкція натяжних пристроїв	47
3.2 Розробка алгоритму та структури системи автоматичної стабілізації тягового фактора в умовах нерівномірного навантаження	52
3.3 Експериментальні дослідження системи автоматичної стабілізації тягового фактора	55
3.4 Розробка системи керування рухом стрічки стрічкового конвеєра з підсистемою стабілізації тягового фактора	61

3.5 Технічні засоби для автоматичної системи стабілізації тягового фактора стрічкового конвеєра	63
3.6 Основні технічні рішення	68
Висновки до розділу	72
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;

АСКП – автоматизована система керування підприємством;

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ВМ – виконавчий механізм;

ОК – об'єкт керування;

ПІД-регулятор – пропорційний інтегральний та диференціальний регулятор;

ПЛК – програмований логічний контролер;

САР – система автоматичного регулювання;

САК – система автоматизованого керування;

ТЗА – технічні засоби автоматизації;

ТК – технологічний комплекс;

ТП – технологічний процес;

ВСТУП

Стрічкові конвеєри є одним із найпоширеніших видів транспортного устаткування у гірничо-збагачувальній, металургійній, будівельній, хімічній та ряді інших галузей промисловості. Їх широке застосування зумовлене високою продуктивністю, надійністю, простотою конструкції та економічністю експлуатації. У матеріалопотоках великих підприємств конвеєрний транспорт виконує ключову функцію, забезпечуючи безперервність технологічних процесів, мінімізацію ручної праці та стабільність постачання сировини й готової продукції. Водночас розвиток сучасного виробництва висуває нові вимоги до енергоощадності, надійності та точності керування конвеєрними системами.

Одним із найважливіших параметрів роботи стрічкового конвеєра є тяговий фактор, який характеризує співвідношення між тяговим зусиллям приводу та силами опору руху стрічки. Стабільність цього параметра визначає надійність пуску, відсутність пробуксовування, рівномірність руху стрічки, довговічність гумотканинного полотна, зниження аварійності та втрат продукції. Порушення тягового режиму може призвести до найбільш характерних відмов, серед яких – ковзання стрічки на приводному барабані, її перекося, нерівномірне навантаження, підвищене зношування та аварійні зупинки конвеєра.

У традиційних системах керування конвеєрами регулювання виконується за сталими законами або з використанням найпростіших алгоритмів ПІД-регулювання. Такі підходи не враховують змінні режими роботи, зокрема нерівномірний розподіл вантажу на стрічці, зміни опорів руху, обмерзання чи забруднення елементів конвеєра, динамічні процеси під час пуску та гальмування, а також вплив технологічних факторів на величину тягового зусилля. Через це виникає потреба у більш гнучких, адаптивних, інтелектуальних системах автоматизації, здатних стабілізувати тяговий фактор у режимі реального часу.

Сучасні методи автоматизації дозволяють істотно підвищити ефективність роботи конвеєрних ліній шляхом впровадження математичних моделей, систем моніторингу та контролю стану, інтелектуальних регуляторів, оптимізаційних алгоритмів та засобів цифрового діагностування. Використання датчиків натягу стрічки, контролю навантаження, швидкості та моменту дозволяє отримувати більш повну інформацію про режим роботи конвеєра та прогнозувати можливі відмови. Застосування адаптивних регуляторів, алгоритмів стабілізації, логіко-математичних моделей та цифрових фільтрів дає можливість керувати тяговим фактором точно, плавно та енергоефективно.

Особлива увага у сучасних дослідженнях приділяється створенню підсистеми стабілізації тягового фактору, яка враховує динамічні властивості конвеєрної стрічки, інерційність механічної частини, пружні деформації та зміну зовнішніх навантажень. Така підсистема дає змогу забезпечити оптимальні умови пуску та зупинки, запобігти пробуксовуванню, знизити навантаження на привід, підвищити ресурс стрічки та створити умови для безпечної та довговічної експлуатації обладнання.

У зв'язку з цим розробка автоматизованої системи керування стрічковим конвеєром з підсистемою стабілізації тягового фактору є актуальним завданням, що має велике практичне значення для промислових підприємств. Вона дозволяє підвищити енергоефективність транспортних систем, скоротити простої та витрати на технічне обслуговування, а також підвищити загальну продуктивність виробництва. Комплексний підхід до аналізу, моделювання та оптимізації роботи конвеєра створює передумови для впровадження сучасних технологій цифрової автоматизації.

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто процес роботи стрічкового конвеєра, проведено аналіз динаміки тягового режиму, сформовано вимоги до системи автоматизації та розроблено методи стабілізації тягового фактору. Особливе значення приділено математичному моделюванню механічної та електромеханічної частин конвеєрної системи, синтезу регуляторів, вибору датчиків та технічних засобів автоматизації, а також оцінці

ефективності запропонованих рішень шляхом моделювання та експериментальної перевірки.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування стрічковим конвеєром з підсистемою стабілізації тягового фактору, що забезпечує надійний, енергоефективний та безаварійний режим роботи конвеєрної лінії за різних виробничих умов.

Об'єктом дослідження є процес транспортування матеріалу стрічковим конвеєром та його динамічна поведінка в умовах змінних навантажень.

Предмет дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматизації керування стрічковим конвеєром, а також підсистема стабілізації тягового фактору та її вплив на ефективність роботи транспортної системи.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Автоматизація існуючої конвеєрної лінії

Конвеєрна лінія складається із 3 стрічкових конвеєрів. Приводи стрічкових конвеєрів використовують асинхронні двигуни із короткозамкненим ротором. Відповідно до вимог до систем автоматизації конвеєрних ліній прийнято схему автоматизації що, передбачає:

1. Запуск конвеєрів здійснюється у зворотному напрямку відносно руху вантажного потоку. Такий порядок дає змогу запобігти виникненню блокувань у зонах перевантаження. У цьому випадку вмикання наступного конвеєра відбувається лише після того, як попередній повністю розженеться до своєї номінальної швидкості.

2. Решта конвеєрів повинні продовжувати роботу, щоб забезпечити звільнення тягового елемента від залишків вантажу.

3. Необхідно здійснювати контроль тривалості запуску конвеєрів. Якщо процес запуску перевищує допустимий час, конвеєр має автоматично відключатися, одночасно блокуючи запуск інших ліній. Подовжений час розгону може свідчити про несправність електроприводу або прослизання стрічки, що становить потенційну пожежну небезпеку.

4. У випадку аварійної ситуації здійснюється негайна зупинка конвеєра та всіх конвеєрів, що подають матеріал до нього. Така дія необхідна при надмірно довгому пуску, зниженні швидкості, розриві тягових елементів, перевантаженні електродвигунів, перегріві барабанів чи утворенні завалів у місцях перевалки вантажу.

5. Можливість зупинки конвеєрної лінії з будь-якої точки [1].

Кожен конвеєр складається із приводної станції, встановленої на гусеничному ході, секції типових, перехідних та кінцевих самохідних бункерів. Тяговим і несучим органом конвеєрів є стрічка шириною 800 мм. Необхідна попередня сила у стрічці створюється станціями натягу навантаження.

Принцип дії автоматизованої системи подано на рис. 1.2. У схемі використано такі умовні позначення: *КПСВ* – координуючий пристрій стабілізації вантажопотоку; *ДКЛ* – дільнична конвеєрна лінія; *САУКЛ* – система автоматизованого керування конвеєрними лініями; *ПУ* – пульт керування; *БУК* – блок управління конвеєром; *БУБ* – блок управління бункером; *КВ* – конвеєрні ваги. Функціонування системи відбувається наступним чином: сигнал (1) для запуску магістральної конвеєрної лінії надходить із персонального комп'ютера диспетчера підприємства на панель управління (*ПУ*) системи *САУКЛ* №1. Аналогічний сигнал (2) надходить на пульт управління системи *САУКЛ* №2 для запуску дільничної конвеєрної лінії. Потік гірської маси (3), що подається з видобувної ділянки, транспортується секційним конвеєром до бункера-накопичувача для тимчасового зберігання. Під опорами бункерного живильника *БЖ* розміщені тензодатчики *ВДУ*, які перетворюють вагу заповненого бункера в електричний сигнал. Отриманий сигнал, що відображає рівень завантаження бункера, передається до блока керування бункером, де він обробляється разом із сигналом (4) – вага стрічкового бункерного конвеєра щодо стану завантаження стрічки: інформація від блоку (5) управління бункером подається на координуючий пристрій, що стабілізує вантажний потік, де команда (6) аналізується від *КУС* шиберу (Ш) бункера. Потім стабілізований вантажний рух (7) доставляється на станцію завантаження за допомогою магістральної конвеєрної лінії. Якщо рівень сировини в бункері досягає аварійного рівня, і шибер бункера повністю відкритий, то сигнал (8) відправляється з блоку управління цього бункера блок управління *БУК* відповідного дільничного конвеєр, щоб відключити лінію конвеєра секції, а потім повідомити диспетчера підприємства про аварію. Основні відомості про автоматизацію магістральної конвеєрної лінії докладно описані у джерелі [1, 2].

Широке впровадження стрічкових конвеєрів на гірничих підприємствах сприяє підвищенню технічного рівня та ефективності гірничого виробництва та створює сприятливі умови для застосування потокової технології. У механізованому видобувному комплексі стрічковий конвеєр виступає у ролі особливо важливого устаткування. Актуальним останні десятиліття стало питання пошуку способів ефективного використання конвеєрних установок. Підвищити ефективність використання транспортних машин при роботі з подібними сипучими вантажопотоками можна шляхом застосування автоматизованого регулювання швидкості руху вантажонесучого полотна в залежності від величини вантажопотоку, що надходить. При зміні швидкості руху у стрічці виникають додаткові динамічні навантаження, які призводять до пробуксування конвеєрної стрічки на барабанах приводних. Усунення цього несприятливого явища можливе лише шляхом автоматичного спільного керування приводами конвеєра за величиною фактичного вантажопотоку та реального значення тягового фактора.

На сьогоднішній день, як наслідок розвитку промислової мікропроцесорної техніки та частотно-керованого асинхронного приводу з'явилася можливість вирішення багатьох питань управління конвеєрними установками великої потужності.

Першим етапом у досягненні позитивних результатів у цьому напрямі є створення адекватної математичної моделі руху стрічки двоприводного стрічкового конвеєра з урахуванням функціонування механізмів натягу. Наступним кроком виступає розроблення алгоритму автоматичного регулювання тягового фактора в умовах нерівномірного навантаження стрічки. Третій етап передбачає формування автоматизованої системи керування рухом стрічки двоприводного конвеєра з підтриманням стабільності її натягу.

У рамках даної роботи, відповідно до визначеної послідовності етапів, виконано теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на розроблення системи автоматичної стабілізації тягового фактора двоприводного стрічкового конвеєра.

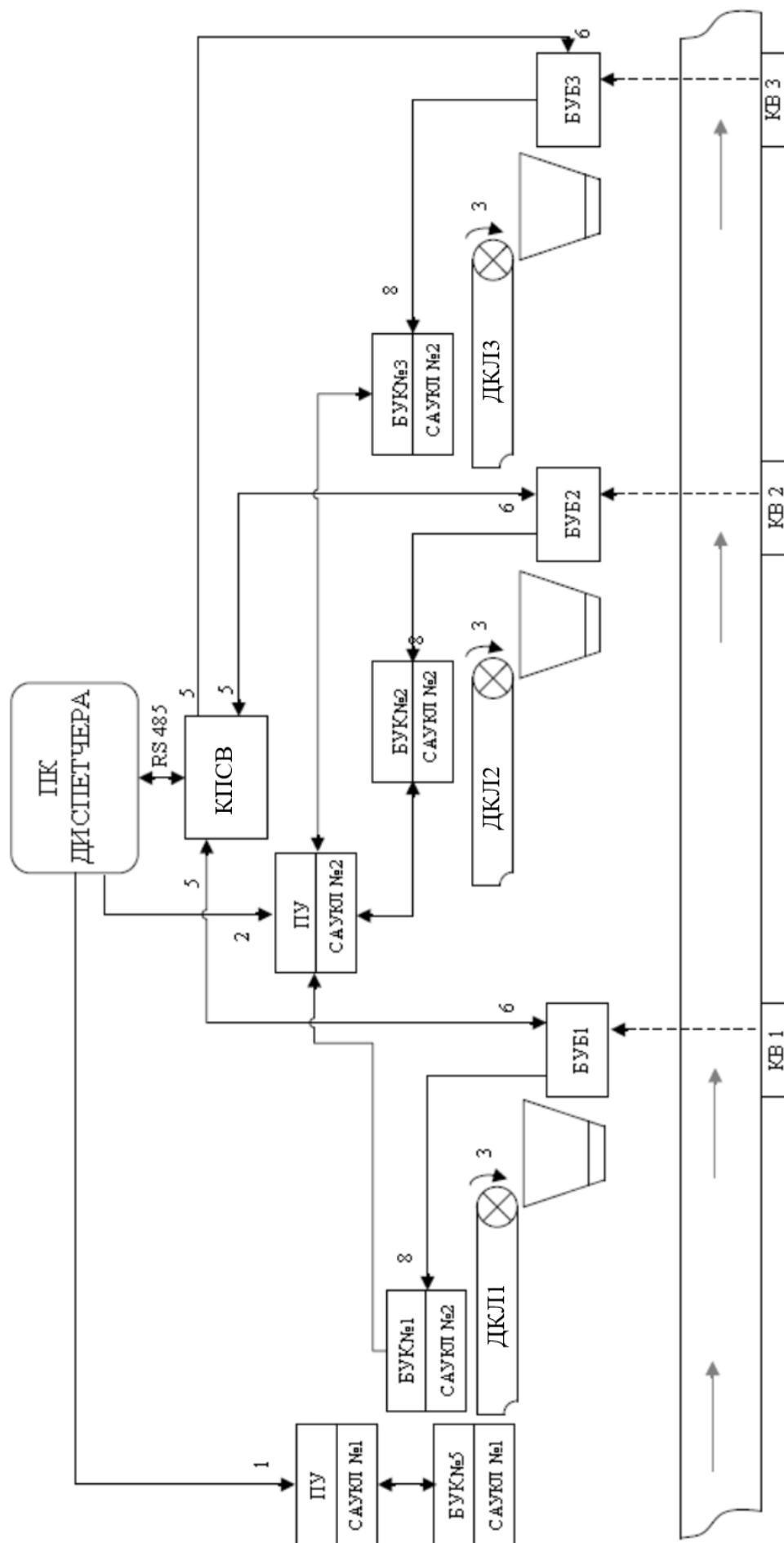


Рисунок 1.1 - Структурна схема системи автоматизації магістральної конвеєрної лінії

1.2 Аналіз робіт, присвячених способам регулювання тягового фактора конвеєра

Для стабілізації завантаження стрічкового конвеєра, слід забезпечити, щоб вантажопотік, що надходить, був безперервним і рівномірним. Тим часом потік, що надходить, не є рівномірним. Виходить, що з поліпшення показників ефективності під час використання стрічкових конвеєрів слід забезпечувати з допомогою безперервності. Досягнення необхідного ефекту можливе шляхом керування інтенсивністю подачі матеріалу чи зміни швидкості руху стрічки конвеєра. Подібного можна досягти двома способами.

1.2.1 Використання бункерів і дискретне регулювання швидкості стрічки конвеєра

Забезпечення стабільності процесу можливе шляхом використання проміжних бункерів та дискретного регулювання швидкості стрічки. Застосування бункерів дозволяє підтримувати безперервність роботи виїмкової машини, якщо відбувається коротка за часом відмова однієї зі складових транспортної схеми. Роботи Назаренка В.М. розглядають системи керування швидкістю стрічкового контейнера за допомогою бункерів. Вони виконані у 1987-1992 роках на рудних кар'єрах. Автор представив опис кількох можливих режимів управління. Якщо місткість бункера є незначною (приблизно 10 % від маси вантажу, що перебуває на стрічці) і передбачено наявність регулюючого механізму розвантажувальної щілини, найбільш доцільним способом узгодження швидкості руху стрічкового конвеєра з інтенсивністю вантажопотоку є зміна розмірів цієї щілини. [3]. Цей спосіб, а також регулювання приводом дозволяють значно зменшити недовантаження стрічкового конвеєра.

За умов великої ємності бункера для накопичення максимально можливого обсягу матеріалу транспортування вантажу рекомендується здійснювати з навантаженням, близьким до розрахункового. Робота конвеєра відбувається циклічно: після досягнення встановленого рівня заповнення бункера

відбувається розвантаження, після чого цикл повторюється. При цьому важливо не перевищувати допустиму тривалість періодів увімкнення приводів.

Використання дробарок у технологічній лінії спрощує регулювання режиму роботи конвеєра. У процесі подрібнення вони змінюють гранулометричний склад матеріалу, формуючи новий спектр розмірів частинок, що дає змогу передбачати частотні характеристики відповідно до сортності руди.

З метою зменшення частоти пусків і зупинок системи пропонується [3] застосовувати регулятор із зоною нечутливості, ширина якої може коригуватися залежно від статистичних властивостей потоку вантажу. Значення цієї зони визначається спектральною щільністю вантажопотоку.

Дослідження, наведені у джерелі [3], присвячено управлінню швидкістю стрічкового конвеєра в умовах, коли середнє значення вантажопотоку змінюється в часі. Враховуючи статистичні особливості нестационарного потоку, математичне очікування вантажопотоку доцільно розглядати як n дискретних станів, між якими існують незначні відмінності. Кожен стан відповідає певному рівню заповнення бункера та відповідній швидкості руху стрічки.

Місткість бункера у таких умовах визначається з урахуванням можливості плавного переходу між рівнями швидкості — із прискоренням або сповільненням, що становить близько двох порядків менше за пускові.

При значних коливаннях вхідного вантажопотоку конвеєр доцільно утримувати в режимі підвищеної швидкості, поки рівень заповнення бункера не повернеться до попереднього значення. Коли об'єм матеріалу досягає верхньої межі, конвеєр переводять на максимальну швидкість із пусковим прискоренням. Якщо ж спостерігається рівновага між вхідним і вихідним потоками, розвантаження бункера здійснюють шляхом збільшення швидкості стрічки.

Найскладнішим є перехід від мінімальної («повзучої») до максимальної швидкості, тобто з нижнього рівня заповнення бункера на найвищий. За рівноприскореного розгону з прискоренням a , розрахунковою масою q і швидкістю v необхідний об'єм бункера, що гарантує безпечну роботу системи, визначається розрахунковою формулою.

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

Використання таких бункерів забезпечує зниження кількості пуско-гальмівних режимів. Стверджується, що при даному режимі динаміка практично відсутня, при номінальній наповненості стрічкового конвеєра режим постійно статистичний, завдяки чому здійснюється ефективне використання стрічкового конвеєра та приводів.

Іноді виникають складнощі з контролем маси вантажу через відсутність можливості встановити засоби для контролю у місці завантаження. У такому випадку передбачувана кількість вантажу розраховується за допомогою кореляційного аналізу на основі виявленого зв'язку вантажопотоку та активної потужності двигуна, що споживається.

Серед режимів, що забезпечують змінну швидкість транспортування, найпростіший у здійсненні режим, коли рівень швидкості встановлюється залежно від рівня продуктивності живильника на завантаженні.

При використанні бункерів стрічковий конвеєр працює в режимі пуско-гальмування, що тягне за собою збільшення зносу механічного обладнання конвеєра. Крім того, при підземних роботах такий метод не можна застосувати, оскільки простір гірничих виробок обмежений.

А.Б. Філімонов та Є.К. Травкін вирішували завдання керування вантажопотоками на збірній ділянці конвеєрної лінії з кількома бункерами. Враховуючи, що кожен конвеєр має однакову швидкість переміщення вантажу, а кількість вантажу, що надходить на конвеєр, регулюється за допомогою бункерів, що автори, рекомендують керувати вантажопотоками попереджувально, щоб уникнути простою конвеєрів, які викликані перевантаженням збірного конвеєра і переповненістю бункерів.

1.2.2 Регулювання швидкості конвеєрів в залежності від вантажопотоку

У дослідженні [4, 5, 6] наведено метод синтезу системи безперервного та дискретного регулювання швидкості стрічки конвеєра в умовах випадкового шахтного вантажопотоку. При дискретному керуванні швидкість конвеєра буде змінюватися стрибкоподібно після досягнення вантажопотоком певного рівня. Лобачова визначає методику, з допомогою якої встановлюються основні параметри дискретного управління. Такі параметри включають: ефективні рівні перемикання швидкості, раціональне число перемикань, середній час роботи на кожному рівні, погонне навантаження при дискретному регулюванні.

У роботі [7] досліджується синтез оптимальної системи управління частотної області. За розробленою методикою, частотна передатна функція $W(j\omega)$ оптимальної системи регулювання виходить за такою формулою.

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

де $Sh\varphi(\omega)$ – взаємна спектральна щільність, $S\varphi(\omega)$ – спектральна щільність сигналу, пропорційна вантажопотоку, що надходить, $Sh(\omega)$ – спектральна щільність сигналу, пропорційного розрахованій швидкості полотна конвеєра, $\Psi(j\omega)$ та $\Psi^*(j\omega)$ - допоміжні функції, які задовольняють рівності

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

За знайденою оптимальною передатною функцією системи та передавальної функції незмінної частини системи, автором була створена модель коригуючого пристрою. Методи дослідження були графічними і аналітичними. В.В. Солодовников вивчив, яким чином можна підключити коригуючий пристрій, розглянув плюси та мінуси кожного варіанту. Автор встановив припустиму помилку регулювання, що задається геометрією роликів. Крім того,

він розробив рекомендації щодо створення оптимальної системи регулювання при затримках та значних перешкодах. У роботі дано загальний огляд різноманітності регулювання швидкості для двигунів постійного і змінного струму, що застосовуються на конвеєрних лініях.

Автор не застосував у цій моделі величину натягу стрічки, що, на жаль, є значним недоглядом. Натяг стрічки є важливою величиною для стрічкового конвеєра. Таким чином, не було представлено оцінок рівня впливу типу натяжного пристрою та швидкості його дій на перехідні процеси конвеєра. Стабілізація тягової здатності приводів конвеєра також була виключена із поля дослідження. Аналогова модель конвеєра розраховувалася щодо швидкості стрічки, вважалось, що стрічка конвеєра рухалася разом із приводним барабаном, без пробуксовки. Питання стабілізації тягової здатності приводів конвеєра актуальне, оскільки при переході з меншою на велику швидкість може статися пробуксовка приводу, яка небезпечна займанням пилу.

О.М. Петков вивчив вантажопотоки, розрахував їх передбачувані характеристики. Автор показав, що розподіл тривалостей тимчасових відрізків надходження та відсутності вантажопотоку відбуваються експоненційно. Діяльність О.Н. Петкова [8] представлена модель вантажопотоку, виконана обчислювальними засобами МАС. Запропоновано моделі конвеєра та приводу з асинхронним електродвигуном з фазним ротором. Для моделей конвеєра та приводу в роботі отримані коефіцієнти передачі, постійні часу та постійні запізнення. Автор зумів вирішити задачу регулювання швидкості стрічкового конвеєра з метою стабілізації погонного навантаження, проте ці дослідження отримані при сильному спрощенні моделі. Налаштування регуляторів розраховані під певний вантажопотік. Тому наведену в роботі систему не можна використовувати для вантажопотоків інших кар'єрах чи підприємствах.

На рубежі 1990-х років у світ вийшли роботи, в яких досліджувалися системи управління стрічковими конвеєрами. Роботи Мамалиги В.М., Назаренко В.М., Сокотнюка Ю.А. присвячені управлінню асинхронними приводами конвеєрів, встановлених за різними технологічними схемами.

У дослідженні Мамалиги В.М. [9] розроблено методику формування системи автоматичного балансування навантажень у конвеєрі з кількома приводами. Система орієнтована на досягнення рівномірного розподілу зусиль між приводами залежно від їх просторового розташування, кількості та швидкості переміщення стрічки. Це дозволило б знизити статичний запас міцності стрічки. В результаті – вартість стрічки знижується. Додатковою перевагою є те, що розміри конвеєрної лінії подовжуються.

Автор приділив увагу оптимізації динамічних режимів роботи стрічкового конвеєра. У роботі пропонується при запуску конвеєра обмежувати динамічні навантаження, а саме ривок та прискорення. Це забезпечує менший знос стрічки конвеєра, дозволяє знизити міцність стрічки та вартість стрічки. Для конвеєрів, що працюють зі сталою швидкістю, важливо підтримувати високу точність її регулювання, оскільки це безпосередньо впливає на зменшення зношування елементів і подовження строку служби стрічки.

У роботі Мамалиги В.М. [9] представлено підхід до синтезу оптимальної системи автоматичного керування, яка забезпечує плавний запуск конвеєра та стабільність його швидкісних характеристик. Запропоновано метод побудови й налагодження системи керування багатопривідним конвеєром, що гарантує рівномірний розподіл тягових зусиль між приводами незалежно від поточного навантаження стрічки. Водночас питання регулювання швидкості конвеєра з урахуванням змін вантажопотоку залишилося поза межами дослідження.

Сокотнюком Ю.А. [10] розроблено систему автоматичного регулювання похилого конвеєра з регульованим електроприводом, призначену для зниження динамічних навантажень. Її структура передбачає наявність зворотного зв'язку, який враховує різницю швидкостей стрічки на приводному й натяжному барабанах. У системі застосовано інтегрований регулятор швидкості обертання та тягової здатності другого барабана, що реагує на зміни в роботі першого, завдяки чому досягається баланс тягових зусиль між обома приводами.

Розглядаючи систему управління приводами конвеєра, автор [10], робить висновок про неможливість досягти ефективного демпфування коливань

динамічних навантажень на привід, пов'язаних з пружно-жорсткими властивостями стрічки, використовуючи лише регулятор швидкості приводу. При введенні додаткових показників система тільки ускладнюється і можливість її практичного використання дуже мала.

Діяльність Кожубаєва Ю.Н. [11] представлена розроблена модель стрічкового конвеєра, що відображає його основні властивості, яку передбачає автор можна використовувати для розробки, налагодження та дослідження роботи стрічкових конвеєрів у різних режимах. Автор досліджував способи керування багатопривідними стрічковими конвеєрами, які забезпечують:

- мінімальне натяг конвеєрної стрічки;
- раціональний розподіл навантаження між приводами конвеєра;
- рівний запас по тяговій здатності приводних барабанів, незалежно від реалізованої на них потужності.

У роботі [11] не вирішено завдання синтезу алгоритму управління переміщенням каретки натяжного пристрою для підтримки відношення натягу вантажної стрічки до холостої в допустимих межах.

Метою роботи Дмитрієвої В.В. [12] була створення системи автоматичного управління швидкістю руху конвеєрної стрічки, яка дозволяє забезпечити рівномірне завантаження конвеєра. У роботі представлена математична модель багатовимірної системи керування рухом стрічки, з урахуванням роботи частотно-керованого асинхронного електроприводу. Модель [12] дозволяє досліджувати конвеєрну установку як єдиний об'єкт управління, моделювати технологічний процес транспортування випадкового вантажопотоку та шукати рішення задачі стабілізації погонного навантаження конвеєра у класі лінійних оптимальних регуляторів. «Розроблено структуру багатоконтурної автоматичної системи регулювання погонного навантаження одноприводного конвеєра [12], яка дозволяє реалізувати алгоритм раціонального завантаження конвеєра. Розроблено алгоритм управління рухом стрічки, який забезпечує плавну зміну швидкості, що відповідає випадковому вхідному вантажопотоку, зниження

динамічних навантажень у стрічці, зменшення кількості пуско-гальмівних режимів, зменшення холостого пробігу стрічки».

Таким чином, на даний час питання, пов'язані зі стабілізацією тягового фактора стрічкових конвеєрних установок, або досліджені недостатньо повно, або орієнтовані на рішення щодо вузьких прикладних завдань. Зокрема, на сьогодні відсутні узагальнена структура та склад комплексу технічних засобів автоматичної системи стабілізації тягового фактора конвеєра, які б відображали накопичений досвід проведених досліджень. Це свідчить про потребу подальшого удосконалення та розвитку наукових досліджень у даному напрямі.

З розвитком обчислювальної техніки з'явилася можливість вирішувати подібні завдання за допомогою чисельних методів, що дозволяють досить точно визначати натяг стрічки в характерних точках конвеєра в реальному часі.

1.3 Постановка завдання дослідження

Підвищення ефективності експлуатації стрічкового конвеєра за рахунок підвищення потужності приводів та частоти обертання приводних барабанів викликає необхідність додаткового натягу стрічки конвеєра, що веде до появи ефекту пробуксування та різкого зношування стрічки. Стабілізація величини тягового фактора електродвигунів забезпечуватиме безпробукувальну роботу приводів стрічкових конвеєрів, призведе до зменшення динамічних зусиль у стрічці та знизить коефіцієнт запасу міцності конвеєрної стрічки, дозволяючи зменшити витрати на конвеєрній стрічці.

Останніми роками дедалі більше підприємств переходять на потокові та потоково-циклічні системи транспортування корисних копалин. Зростання протяжності транспортних ліній і збільшення обсягів вантажопотоків зумовили необхідність створення високопродуктивних стрічкових конвеєрів великої довжини та потужності, у конструкції яких застосовуються дорогі синтетичні й гумотросові стрічки. Це суттєво підвищує вартість конвеєрних установок.

На сучасному етапі частка використання дорогих конвеєрних систем на гірничих підприємствах близько 50,7 %, при цьому їх середній коефіцієнт завантаження за часом не перевищує 60,7 %. Низька ефективність застосування конвеєрних установок призводить до підвищення холостого пробігу стрічки не виправданими витратами на електроенергію, знос стрічки, роликів. Нерівномірність завантаження є основною причиною прослизання стрічки на приводних барабанах конвеєра, що збільшує зношування та кількість відмов транспортної магістралі.

Створення автоматизованої системи стабілізації тягового фактора конвеєрів дає змогу усунути прослизання стрічки, продовжити термін її експлуатації та підвищити ефективність роботи обладнання. Розроблення такої системи для потужної двоприводної стрічкової конвеєрної установки є актуальним завданням даної магістерської роботи.

Для конвеєрів великої потужності регулювання натягу стрічки виступає необхідною умовою ефективного функціонування цих складних і вартісних машин. Отже, створення автоматичної системи стабілізації тягового фактора для двоприводних конвеєрних установок великої потужності є важливим і своєчасним завданням для сучасних підприємств.

Поставлено такі цілі дослідження:

- розробити та проаналізувати математичну модель руху стрічки двоприводного стрічкового конвеєра з урахуванням роботи механізмів натягу;
- створити алгоритм автоматичної стабілізації тягового фактора за умов нерівномірного навантаження;
- спроектувати автоматизовану систему керування рухом стрічки двоприводного конвеєра із забезпеченням стабільності її натягу.

Висновки до розділу

Проведено аналіз наукових робіт, присвячених стабілізації тягового фактора двоприводного стрічкового конвеєра, а також розглянуто попередні дослідження, що стосуються моделювання руху конвеєрної стрічки.

Створення автоматизованої системи стабілізації тягового фактора конвеєрів забезпечить усунення прослизання стрічки, збільшення строку її експлуатації та підвищення ефективності роботи обладнання.

Обґрунтовано актуальність задачі автоматичної стабілізації тягового фактора стрічкового конвеєра.

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати такі етапи:

- розробити математичну модель руху стрічки двоприводного стрічкового конвеєра з урахуванням дії механічних натягувачів;
- створити алгоритм автоматичної стабілізації тягового фактора за умов нерівномірного навантаження;
- спроектувати автоматизовану систему керування рухом стрічки двоприводного конвеєра зі стабілізацією її натягу.

РОЗДІЛ 2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1 Модель конвеєра з дводвигунним приводом та натяжним пристроєм

Для вирішення основного завдання дослідження – розробки системи автоматичного регулювання тягового фактора стрічкового конвеєра, потрібно побудувати математичну модель керованого об'єкта – модель руху стрічкового конвеєра з натяжним пристроєм. Стрічковий конвеєр як об'єкт управління є досить складною системою, стрічка – система з розподіленими параметрами, її динаміка руху істотно залежить від її механічних характеристик як твердого тіла. Тому при складанні досить точної математичної моделі руху стрічкового полотна слід використовувати знання про механічні властивості твердих тіл при змінних навантаженнях.

У задачі управління рухом стрічки конвеєра, немає необхідності розглядаючи стрічку як тверде тіло, враховувати її механічні властивості повзучості і релаксації, а достатньо враховувати лише її пружність, що дозволяє розглядати стрічку як механічну систему мас, пов'язаних з пружними елементами. уявлення моделі, що дозволяє використовувати другий метод Лагранжа, коли необхідно і достатньо враховувати потенційну та кінетичну енергію електромеханічної системи конвеєра.

Створювана математична модель враховує факт наявності у стрічкового конвеєра двох приводів і натяжного пристрою. Для складання математичної моделі системи з розподіленими параметрами використали метод кусочно-лінійної апроксимації. Модель руху стрічки представлена системою нелінійних звичайних диференціальних рівнянь.

Модель створюється у середовищі Matlab/Simulink. Simulink є інтерактивним засобом для моделювання, імітації та дослідження динамічних систем. Він забезпечує можливість створювати графічні блок-схеми, відтворювати поведінку систем у часі, перевіряти їхню ефективність та вдосконалювати проєктні рішення. Завдяки високій продуктивності, цей інструмент дозволяє аналізувати рух динамічних систем, описаних звичайними нелінійними диференціальними рівняннями. Використовуючи стандартні елементи Simulink, побудовано структурну модель системи, яка включає модель контуру стрічки конвеєра та модель натяжного механізму. Для моделювання було використано блоки: State Space, Mux та інші, моделювання проводилося для числових значень конкретного конвеєра. Моделювання дозволяє визначати швидкості та натягу в характерних точках стрічкового конвеєра, що необхідно для процедури синтезу системи управління швидкістю руху конвеєрної стрічки з метою виключення пробуксовки на приводних барабанах і автоматично розподіляти рівномірно навантаження між приводами при будь-якій швидкості руху конвеєра.

2.1.1 Модель руху стрічки двоприводного стрічкового конвеєра

Для розробки математичної моделі руху стрічки конвеєра складаємо розрахункову схему руху системи декількох мас, з'єднаних пружними елементами, в якій враховуються інерційні елементи, зв'язки між ними і всі сили, що діють на цю систему.

Для цієї мети приймаються основні припущення:

1. Відсутність впливу провисання стрічки між роликотопорами на її пружні властивості;
2. В'язко-пружні властивості стрічки та опору її переміщенню враховуються відповідно до кінцевої моделі руху стрічки.

Стрічковий конвеєр є системою з розподіленими параметрами, для складання математичної моделі її руху прийнято ідею кусково-лінійної

апроксимації безперервної стрічки у вигляді системи зосереджених мас, запропонованої у шістдесятих роках минулого століття І.В. Запеніним [13].

Користуючись методом шматково-лінійної апроксимації розподілу маси стрічки, згідно зі схемою, представленою на рис. 2.1 [14] складаємо розрахункову схему кінцевого уявлення конвеєрної стрічки.

Приймаємо, що маса вантажної частини стрічки є трьома зосередженими масами m_1 , m_2 , m_3 , а маса порожньої частини стрічки представляється двома зосередженими масами m_4 , m_5 . Маса натяжного пристрою позначено m_6 . У розрахункову схему, представлену на рис.2.1, внесені два приводи M_1 , M_2 на барабани і $M_{\text{нп}}$ привід пристрою натягу (НУ), розташованого в хвостовій частині конвеєра.

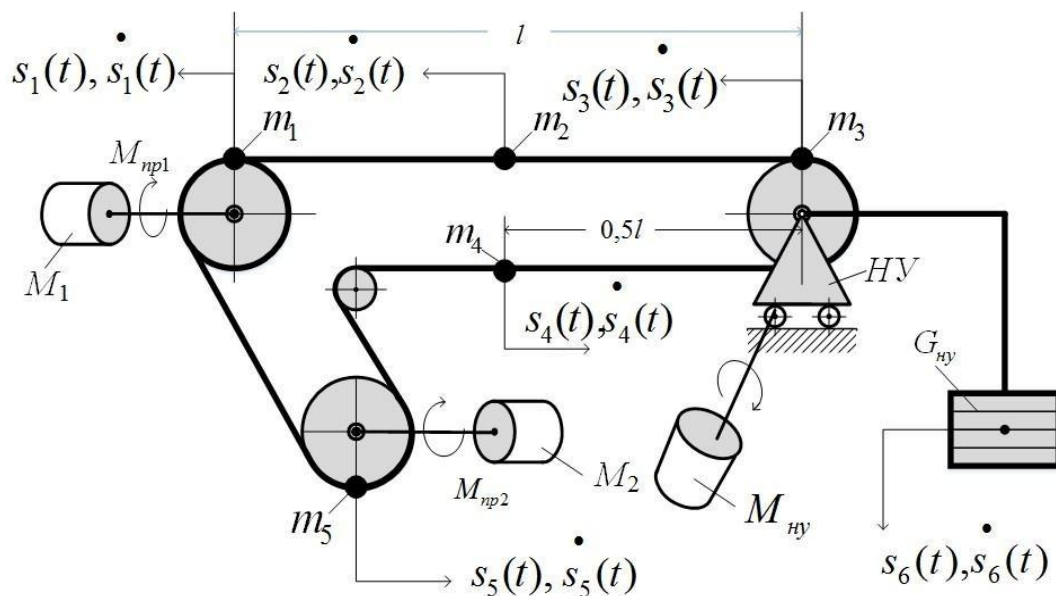


Рисунок.2.1 - Розрахункова схема стрічкового конвеєра з двома приводами

Переміщення та швидкість переміщення відповідної маси слід приймати схеми. $s_i(t)$, $\dot{s}_i(t)$, $i = 1,6$ як змінні координати розрахункової схеми.

Для складання математичної моделі руху конвеєра у вигляді шестимасової системи використали метод Лагранжа другого роду. Звичайна математична модель руху конвеєра з вантажем описується в узагальнених координатах $x_i(t) =$

$s_i(t), \dot{x}_i(t) = \dot{s}_i$ $i=1,6$ - переміщення та швидкості переміщення зосереджених мас відповідно. Модель складена за загальною методологією рівнянь Лагранжа другого роду, але з огляду на те, що для розрахункової схеми системи, представленої на рис. 2.1, кінетична енергія системи є функцією лише узагальнених швидкостей, тому для застосування методу Лагранжа використані рівняння у вигляді

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

де $T(x_i)$ - кінетична енергія i -ї ділянки, $\Pi(x_i)$ - потенційна енергія цієї ділянки, $A(x_i)$ - робота зовнішніх сил на цій ділянці.

Кінетична енергія будь-якої ділянки довжиною l з розподіленою масою G/g визначається, виходячи з диференціального підходу, схема якого показана на рис. 2.2.

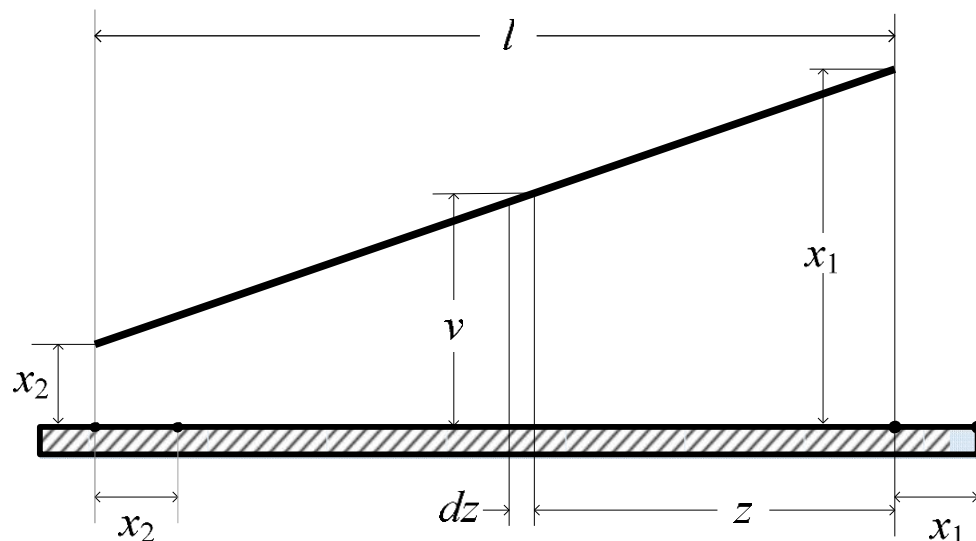


Рисунок 2.2 - Схема заміщення ділянки з розподіленими параметрами зосередженою масою

По-перше, конвеєрна стрічка сприймається як однорідне протяжне тіло, тоді ділянці стрічки x_1, x_2 виділяється елементарний ділянку dz з від початку

відліку. Швидкість переміщення елементарної ділянки дорівнює v , причому $\dot{x}_2 > v > \dot{x}_1$.

З рис. 2.2 видно, що

$$\frac{\dot{x}_2 - v}{z} = \frac{\dot{x}_2 - \dot{x}_1}{l}$$

Звідси

$$v = \dot{x}_2 - \frac{\dot{x}_2 - \dot{x}_1}{l} z$$

Кінетична енергія елементарної ділянки dz довжиною l дорівнює

$$dT = (G_{ij} \cdot v^2 / g^2) \cdot dz$$

Використовуючи в отриманому виразі знайдену вище v , кінетична енергія елементарної ділянки дорівнює:

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

де G_{ij} - вага стрічки, роликкоопор і вантажу на ділянці між точками i і j , l - довжина ділянки, g - прискорення вільного падіння.

Кінетична енергія стрічки та вантажу, рівномірно розподіленого на відповідній ділянці між точками i та j , представлена виразом

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

Потенційна енергія ij ділянки довжиною l складається з енергії пружних деформацій та потенційної енергії замкнутого контуру стрічки з розподіленою масою

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

де c_{ij} - жорсткість ділянки, $\sin \beta$ - кут нахилу конвеєра до горизонту

Робота зовнішніх сил на ij ділянці визначається сумою сил опору руху та рушійної сили приводу, що перебуває з виразів

$$A_{ij}(x_i x_j) = G_{ij} l_{ij} \mu \frac{x_i + x_j}{2} \cos \beta, \quad A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_{61}} x_1 - \frac{M_{np2}}{R_{62}} x_5$$

де μ – коефіцієнт опору руху, M_{np1} і M_{np2} рушійні моменти приводів, наведені до радіусів R_{61} R_{62} приводних барабанів.

Робота сил внутрішнього тертя на ділянці ij визначається з припущення, що сили внутрішнього тертя пропорційні швидкостям деформації:

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

де η – коефіцієнт в'язкості стрічки.

У розрахунковій схемі кінетична енергія системи формується з урахуванням кінетичної енергії замкнутого контуру стрічки з однаково розподіленим на ній вантажем у верхній частині ТК, кінетичної енергії приводних пристроїв ТП і кінетичної енергії натяжного пристрою ТН.

Кінетична енергія замкнутого контуру стрічки:

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

G_n, G_{Γ} - погонна вага рухомих частин відповідно порожньої та завантаженої гілки, $l_{np} = L_{np} / 2$ - довжини ділянок на проміжній гілці.

Кінетична енергія приводних пристроїв:

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

де m_{np1}, m_{np2} - маса частин електродвигуна, редуктора, муфт і приводного барабана, що обертаються, приведена до обода барабана, відповідно першого і другого двигуна.

Кінетична енергія натяжного пристрою визначається виразом

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

G_{ny}, x_6 - відповідно вага та швидкість переміщення натяжного пристрою.

Підсумовуючи знайдені співвідношення, визначаємо вирази для повної кінетичної енергії системи:

$$T_{\Sigma} = \frac{G_{\Gamma} l}{6g} (\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i \dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) + \frac{G_{\Gamma} l}{6g} (\dot{x}_2^2 + \dot{x}_3 \dot{x}_2 + \dot{x}_3^2) + \frac{G_n l}{6g} (\dot{x}_3^2 + \dot{x}_3 \dot{x}_4 + \dot{x}_4^2) +$$

$$\frac{G_n l}{6g}(\dot{x}_4^2 + \dot{x}_4 \dot{x}_5 + \dot{x}_5^2) + \frac{G_n l_{np}}{6g}(\dot{x}_5^2 + \dot{x}_5 \dot{x}_1 + \dot{x}_1^2) + \frac{m_{np1} \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_{np2} \dot{x}_5^2}{2} + \frac{G_{ny} \dot{x}_6^2}{2g},$$

Знайшовши похідні за часом від приватних похідних кінетичної енергії кожної узагальненої координати [15], отримаємо:

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

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

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

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

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

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

Потенційна енергія системи складається з потенційної енергії пружних деформацій системи та потенційної енергії положення натяжного пристрою $П_2$. Потенційна енергія пружної деформації системи при прийнятих припущеннях обчислюється з урахуванням енергії замкнутого контуру ПК стрічки конвеєра та в канаті натяжного пристрою.

Потенційна енергія замкнутого контуру конвеєрної стрічки:

$$\begin{aligned} П_K = & \frac{(x_1 - x_2)^2 C_1}{2} + \frac{(x_2 - x_3)^2 C_{21}}{2} + \frac{(x_3 - x_4)^2 C_3}{2} + \frac{(x_4 - x_5)^2 C_4}{2} \\ & + \frac{(x_5 - x_1)^2 C_5}{2} \end{aligned}$$

де C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 , - коефіцієнти жорсткості відповідних ділянок конвеєрної стрічки. Оскільки ділянки стрічки однорідні, то передбачаються, що всі коефіцієнти жорсткості рівні

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

де C - коефіцієнт жорсткості кожної ділянки.

Потенційна енергія канатів натяжного пристрою:

$$P_H = 0,5 \left(\frac{x_3 - x_4}{2} - x_6 \right)^2 \cdot C_k$$

де C_k - коефіцієнт твердості каната.

Потенційна енергія положення натяжного пристрою:

$$P_G = G_{\text{нп}} x_6$$

Підсумовуючи отримані вирази і здійснюючи алгебраїчні перетворення, знайдемо вирази для повної потенційної енергії системи

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

$$+ 0,5 \left(\frac{x_3 - x_4}{2} - x_6 \right)^2 \cdot C_k + G_{\text{нп}} x_6$$

Знайдено приватні похідні за узагальненими координатами від потенційної енергії:

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_6} \Pi_{\Sigma} = -\frac{x_3}{2}C_k + \frac{x_4}{2}C_k + x_6C_k + G_{\text{кв}}.$$

Робота зовнішніх сил складається з роботи, рушійної сили приводів та сил опору руху гілок стрічки та натяжних вантажів.

Робота рушійних сил приводів:

$$A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_{61}}x_1 - \frac{M_{np2}}{R_{62}}x_5$$

де M_{np1} , M_{np2} – моменти двигунів, наведені до валу їх приводних барабанів; R_{61} , R_{62} - радіуси приводних барабанів. Припустимо, що $R_{61} = R_{62} = R_6$, тоді

$$A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_6}x_1 - \frac{M_{np2}}{R_6}x_5$$

Робота опору руху гілок стрічки

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

де w' , w'' – коефіцієнти опору руху навантаженої та порожньої гілок вважатимемо рівними. Сили опору руху ділянок W_i завжди спрямовані протилежно швидкості $\dot{x}_i$ цих ділянок, тобто

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

Робота сил опору руху натяжних вантажів:

$$A_H = \pm G_{Hy} f x_6$$

де f - наведений коефіцієнт опору руху натяжних вантажів.

Знайдено приватні похідні за узагальненими координатами роботи зовнішніх сил:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} A = -\frac{M_{np1}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) + \frac{1}{2} G_{\varepsilon} l w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + \frac{1}{2} G_n l_{np} w \operatorname{sgn} \dot{x}_1,$$

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_5} A = -\frac{M_{np2}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5) + \frac{1}{2} G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + \frac{1}{2} G_n l_{np} w \operatorname{sgn} \dot{x}_5,$$

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

Робота сил внутрішнього тертя замкнутого контуру

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

де η – наведений коефіцієнт в'язкості.

Приватні похідні за координатами від роботи сил внутрішнього тертя:

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_6} A_\varepsilon = 0.$$

Ввівши позначення

$$\frac{G_\Gamma l}{6g} = m_\Gamma, \quad \frac{G_n l}{6g} = m_n, \quad \frac{G_n l_{np}}{6g} = m_m,$$

отримаємо математичну модель конвеєра, що є системою з шести нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку

$$\begin{aligned}
& m_e(2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_m(2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_6) + m_{np1}\ddot{x}_1 + C(2x_1 - x_2 - x_6) + \frac{1}{2}(G_e l + G_n l_{np})w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + \\
& + \eta(2\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_6) = \frac{M_{np1}}{R} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1), \\
& m_e(2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + m_e(2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_3) + C(2x_2 - x_1 - x_3) + G_e w \operatorname{sgn} \dot{x}_2 + \eta(2\dot{x}_2 - \dot{x}_3 - \dot{x}_1) = 0, \\
& m_e(2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_2) + m_n(2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_4) + C(2x_3 - x_2 - x_4) + \frac{1}{4}(x_3 - x_4 - 2x_6)C_k + \frac{1}{2}(G_e + G_n)lw \operatorname{sgn} \dot{x}_3 + \\
& + \eta(2\dot{x}_3 - \dot{x}_2 - \dot{x}_4) = 0, \\
& m_n(2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_3) + m_n(2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_5) + C(2x_4 - x_3 - x_5) + \frac{1}{4}(x_4 - x_3 + 2x_6)C_k + G_n lw \operatorname{sgn} \dot{x}_4 + \\
& + \eta(2\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - \dot{x}_5) = 0, \\
& m_n(2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_4) + m_m(2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_1) + m_{np2}\ddot{x}_5 + C(2x_5 - x_4 - x_1) + \frac{1}{2}(G_n l + G_n l_{np})w \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + \\
& + \eta(2\dot{x}_5 - \dot{x}_4 - \dot{x}_1) = \frac{M_{np2}}{R} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5), \\
& \frac{G_{\mu y}}{g} \ddot{x}_6 + \frac{1}{2}(x_4 - x_3 + 2x_6)C_k + G_{\mu y} + G_{\mu y} f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0.
\end{aligned}$$

Після відповідних перетворень математична модель руху завантаженої стрічки конвеєра з двома приводами та натяжним пристроєм постає системою шести звичайних нелінійних диференціальних рівнянь. Ці рівняння набувають вигляду

$$\begin{aligned}
1. \quad & (2m_e + 2m_m + m_{np})\ddot{x}_1 + m_e\ddot{x}_2 + m_n\ddot{x}_5 + 2\eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_5 + 2Cx_1 - Cx_2 - Cx_5 + \\
& + 0.5(G_e l + G_n l_m)\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_1 = \frac{M_{np1}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1), \\
2. \quad & m_e\ddot{x}_1 + 4m_e\ddot{x}_2 + m_e\ddot{x}_3 - \eta\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_e l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_2 = 0, \\
3. \quad & m_e\ddot{x}_2 + (2m_e + 2m_n)\ddot{x}_3 + m_n\ddot{x}_4 - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 - Cx_2 + (2C + 0.25C_k)x_3 - \\
& - (C + 0.25C_k)x_4 - 0.5C_k x_6 + 0.5(G_e + G_n)l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_3 = 0 \\
4. \quad & m_n\ddot{x}_3 + 4m_n\ddot{x}_4 + m_n\ddot{x}_5 - \eta\dot{x}_3 + 2\eta\dot{x}_4 - \eta\dot{x}_5 - (C + 0.25C_k)x_3 + (2C + 0.25C_k)x_4 - Cx_5 + \\
& + G_n l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_4 = 0
\end{aligned} \tag{2.6}$$

$$5. \quad m_m \ddot{x}_1 + m_n \ddot{x}_4 + (2m_n + 2m_m + m_{np2}) \ddot{x}_5 - \eta \dot{x}_1 - \eta \dot{x}_4 + 2\eta \dot{x}_5 - Cx_1 - Cx_4 + 2Cx_5 + \\ + 0.5(G_n l + G_m l_m) \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_5 = \frac{M_{np2}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5)$$

$$6. \quad \frac{G_{ny}}{g} \ddot{x}_6 - 0.5C_k x_3 + 0.5C_k x_4 + C_k x_6 + G_{ny} + G_{ny} f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0.$$

Матричне представлення цієї математичної моделі щодо узагальненого вектора переміщення:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_6)^T$$

яке має вигляд

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

де

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

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

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

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

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

У цих залежностях: l – довжина конвеєра, G_{ny} – вага натяжного пристрою, M_{np1} , M_{np2} – рушійні моменти приводів і барабанів, M_{ny} – рушійний момент приводу натяжного пристрою, η – коефіцієнт в'язкості стрічки, C – коефіцієнт жорсткості кожної ділянки, μ – коефіцієнт опору для руху, C_k – коефіцієнт жорсткості каната натяжного пристрою [16, 17].

З метою зручності складання схеми моделювання програмними засобами при вирішенні задачі аналітичного синтезу системи управління виконано перетворення моделі (7) у внутрішню модель руху конвеєрної стрічки, яке відповідаючи виду рівнянь Коші, у скалярному поданні є системою дванадцяти нелінійних диференціальних рівнянь

$$\dot{\tilde{X}} = -M^{-1} \left((N + C) \tilde{X} + S \text{sgn} \tilde{X} + V G_{ny} + P_1 \text{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) M_{np1} + P_2 \text{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_5) M_{np2} \right),$$

у цій моделі

1. вектор стану, зовнішніми впливами є рушійні моменти, що розвиваються двома приводами

$$\tilde{X} = (X, X_1)^T, \quad X = (x_1, x_2, \dots, x_6), \quad X_1 = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_6),$$

2. сили опору руху конвеєрної стрічки

$$u_1(t) = M_{np1}(t), \quad u_2(t) = M_{np2}(t), \quad u_3(t) = \text{sgn} \dot{x}(t),$$

3. вага натяжного пристрою

$$u_4(t) = G_{ny}(t).$$

Модель руху стрічки конвеєра (8) є внутрішньою з матрицею стану - $M^{-1}(N + C) = A$, а матриці $M^{-1}P_1 = B_1$, $M^{-1}P_2 = B_2$, $M^{-1}S = B_3$, $M^{-1}V = B_4$ є складовими матриці управління.

Матричне представлення математичної моделі руху стрічкового конвеєра набуває вигляду

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

в якій

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

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

2.2 Дослідження моделюванням моделі руху стрічки конвеєра з дводвигуновим приводом та натяжним пристроєм

Дослідження складеної математичної моделі руху стрічки двоприводного конвеєра з метою перевірки її адекватності реальним процесам проводилося моделювання руху стрічки з вантажем для конвеєра 2Л100У-01 (табл. 2.1) програмними засобами.

Моделювання проводилося для числових значень параметрів конвеєра стрічкового 2Л100У-01:

Таблиця 2.1 – Технічні дані моделі

Найменування характеристики	Значення
Довжина стрічки $L, \text{м}$	1500
Маса ділянки вантажної гілки $m_g, \text{кг}$	1518,5
Маса ділянки порожньої гілки $m_p, \text{кг}$	352,5
Маса ділянок на проміжній галузі $m_m, \text{кг}$	2,4
Маса першого приводу $m_{пр1}, \text{кг}$	3000
Маса другого приводу $m_{пр2}, \text{кг}$	2000
Момент, створюваний першому приводному барабані $M_{пр1}, \text{Н} \cdot \text{м}$	20900
Момент, створюваний на другому приводному барабані $M_{пр2}, \text{Н} \cdot \text{м}$	20900
Вага вантажу натяжного пристрою $G_{ну}, \text{Н}$	52000
Радіус приводних барабанів $R_b, \text{м}$	0,5
В'язкість стрічки з вантажем $\eta, \text{Н/м}$	4000
Жорсткість стрічки $C, \text{Н/м}$	10000
Жорсткість канатів натяжного пристрою $C_k, \text{Н/м}$	1010
Коефіцієнт опору руху μ	0.03
Коефіцієнт опору руху натяжних вантажів f	0,3

Був використаний блок, що дозволяє задати внутрішню модель руху конвеєрної стрічки, блок, що об'єднує керуючі впливи у вектор $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)$ Т, для моделювання приводів використовуються готові моделі асинхронних короткозамкнутих приводів з частотно-векторним управлінням [16, 17]. Схема моделювання наведено на рис.2.3.

Матриці $M, N, C, S, R, V, P1, P2$ системи рівнянь математичної моделі набувають вигляду

$$M = \begin{bmatrix} 6040 & 1518.5 & 0 & 0 & 352 & 0 \\ 1518.5 & 6072 & 1518.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1518.5 & 3740 & 352 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 352 & 1408 & 352 & 0 \\ 2.4 & 0 & 0 & 352 & 2708 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5200 \end{bmatrix}$$

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

$$C = \begin{bmatrix} 20000 & -10000 & 0 & 0 & -10000 & 0 \\ -10000 & 20000 & -10000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10000 & 2500020000 & -2500010000 & 0 & -5000000000 \\ 0 & 0 & -2500010000 & 2500020000 & -10000 & 5000000000 \\ -10000 & 0 & 0 & -10000 & 20000 & 0 \\ 0 & 0 & -5000000000 & 5000000000 & 0 & 1000000000 \end{bmatrix}$$

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

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

Моделювання проводилося для числових значень параметрів стрічкового конвеєра 2Л100У-01:

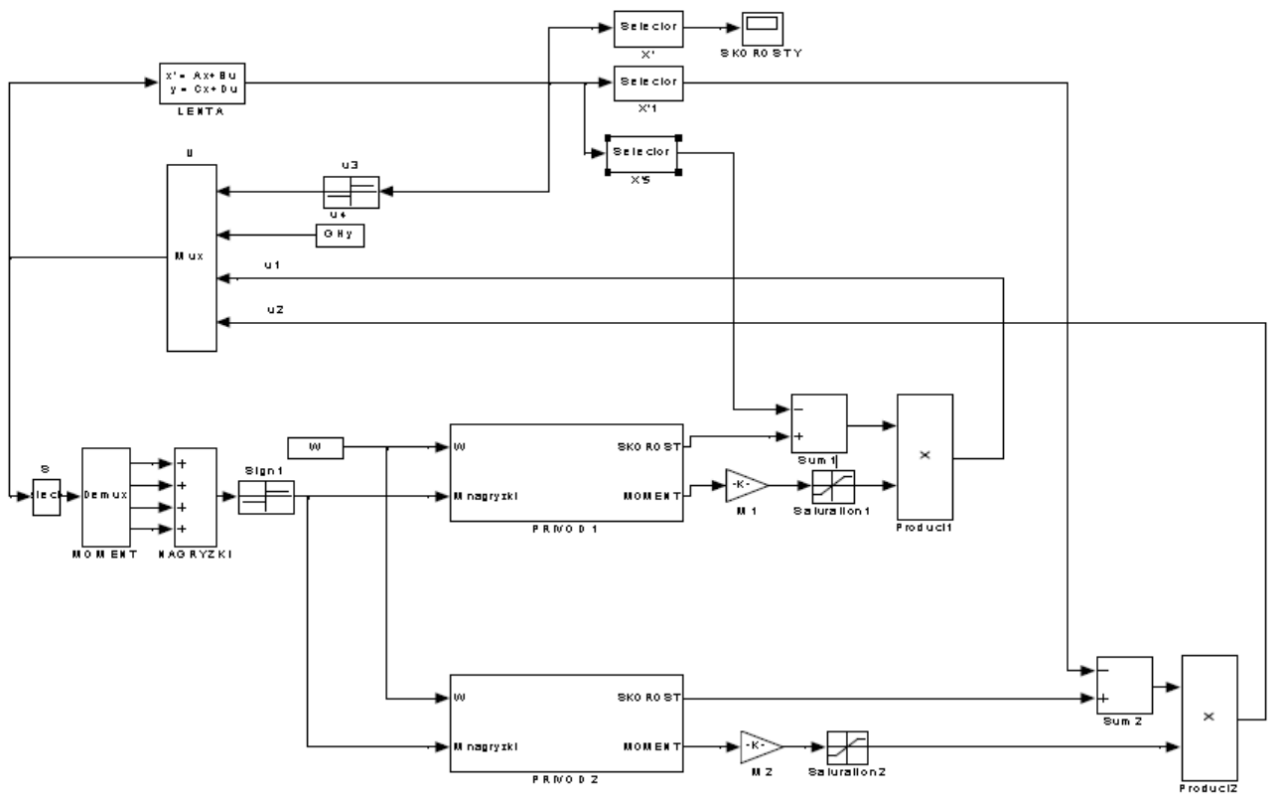


Рисунок 2.3 - Схема моделювання руху стрічки двоприводного конвеєра

Отримані в результаті модельного дослідження криві зміни швидкостей руху відповідних мас моделі при розгоні та русі з постійною швидкістю, представлені на рис. 2.4, порівнювалися якісно та кількісно з перехідними процесами пуску та рівномірного руху реального конвеєра того ж класу [16, 17].

Близькість зазначених кривих визначалася як інтегральний квадрат різниці цих кривих на тривалому інтервалі часу, і не перевищила 8-10%, що підтверджує висновок про адекватність розробленої моделі руху стрічки двоприводного конвеєра.

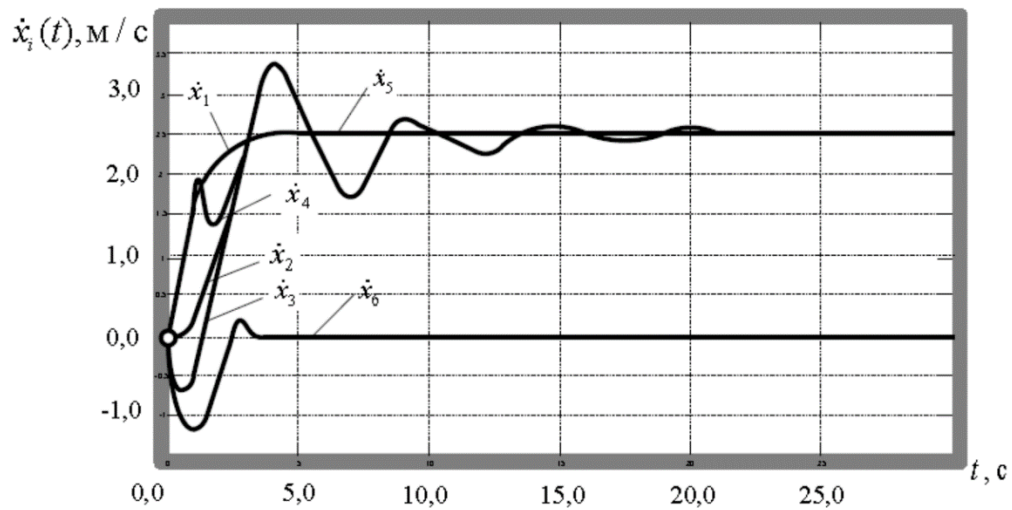


Рисунок 2.4 - Перехідні процеси за швидкостями узагальнених координат при запуску конвеєра до швидкості 2,5 м/с.

Розроблена модель руху стрічки дозволяє визначати значення швидкості руху та натягу стрічки в характерних точках конвеєра, що дає можливість використовувати ці координати при розробці системи автоматичного керування рухом конвеєрної стрічки для виключення пробуксовування на приводних барабанах і рівномірного розподілу навантаження на стрічці за будь-якої швидкості руху конвеєра.

Висновки до розділу

Аналіз робіт, присвячених математичним моделям руху стрічки конвеєра, показує, що ці моделі не повною мірою враховують особливості руху двоприводного конвеєра з натяжним пристроєм.

Створено математичну модель руху стрічки магістрального конвеєра з двома приводами та пристроєм натягу стрічки. Цю модель можна використовувати за різних умов подальшого вивчення двухприводного стрічкового конвеєра як і об'єкт системи управління рухом конвеєра.

Розроблена модель руху стрічки дозволяє визначати значення швидкості руху та натягу стрічки в характерних точках конвеєра, що дає можливість використовувати ці координати при розробці системи автоматичного керування швидкістю руху конвеєрної стрічки для виключення пробуксовки на приводних барабанах та рівномірного розподілу навантаження на стрічці за будь-якої швидкості руху конвеєра.

Результатами комп'ютерного моделювання стали перехідні процеси за швидкостями узагальнених координат руху стрічки та переміщення натяжного пристрою. Отримані криві порівнювалися якісно та кількісно з перехідними процесами пуску та рівномірного руху реального конвеєра того ж класу. Величина відмінності визначалася як інтегральний квадрат різниці цих кривих на тривалому інтервалі часу, і не перевищила 8-10%, що підтверджує висновок про адекватність розробленої моделі руху стрічки двоприводного конвеєра.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Конструкція натяжних пристроїв

Передавання тягового зусилля від приводних барабанів до конвеєрної стрічки відбувається завдяки силам тертя, що виникають на їхніх контактних поверхнях. Для забезпечення надійного зчеплення стрічка повинна щільно охоплювати барабани, інакше виникає ризик прослизання, що призводить до втрати ефективності та підвищеного зносу елементів приводу. Зазвичай необхідний контакт досягається за рахунок попереднього натягу, який створюється спеціальними натяжними пристроями.

Однак надмірне підвищення натягу має негативні наслідки: воно збільшує статичне навантаження на стрічку, прискорює її зношування, а також підвищує навантаження, а значить скорочує ресурс електродвигунів приводу. Тому важливо не лише створити початковий натяг, а й підтримувати його на оптимальному рівні орієнтуючись на умови роботи і ступінь завантаження конвеєра. Це завдання вирішується шляхом контролю тягового коефіцієнта, який визначає здатність системи передавати зусилля без пробуксовування.

Приводи забезпечують рух конвеєрної системи, а натяжні пристрої створюють необхідний рівень натягу для реалізації цього процесу. Величина тиску (N/m^2), що чинить стрічка на поверхню приводного барабана, залежить від натягів на вході та виході із зони контакту, ширини стрічки, діаметра барабана та кута його охоплення.

Конструкція натяжного пристрою розробляється таким чином, щоб забезпечити:

- достатній натяг для ефективної передачі тягових зусиль;
- запобігання прослизанню між барабанами та роликоопорами;

– компенсацію залишкового видовження стрічки під час експлуатації (яке може досягати 2% довжини траси).

Для автоматичного регулювання натягу застосовують лебідкові натяжники, що працюють від електродвигунів. Сучасні системи автоматизованого контролю натягу використовують різні типи сенсорів: динамометричні, тензометричні, п'єзоелектричні тощо. У спеціалізованій літературі [5, 6] детально описано принципи побудови таких систем та особливості їх експлуатації.

Крім того, для контролю швидкості руху стрічки, моменту на валі приводного барабана та визначення маси вантажу застосовуються датчики швидкості, вагові системи, дозатори, автоматизовані бункери та прилади для вимірювання крутного моменту.

Натяжні пристрої призначені для формування та збереження потрібного натягу стрічки у визначених точках конвеєра, а також для компенсації подовжень, що з'являються під час роботи нової стрічки чи при перехідних режимах. Основною складовою таких механізмів виступає натяжний барабан, який може бути змонтований на візку або встановлений у напрямних стаціонарної рами.

Для потужних стрічкових конвеєрів, зокрема кар'єрних, до натяжних систем висувається ще одна вимога – здатність регулювати натяг відповідно до змін опорів руху та рівня завантаження стрічки. Це має особливе значення під час пуску конвеєра, коли виникають значні динамічні сили опору і зростає ризик втрати зчеплення стрічки з приводними барабанами, що може призвести до її пробуксовування.

Вантажні натяжні системи, призначені для підтримання сталого рівня натягу стрічки (що є їхньою експлуатаційною перевагою), не призначені для випадків, коли потрібне регулювання натягу. У таких ситуаціях використовують механічні, зокрема лебідкові, пристрої (рис. 3.1).

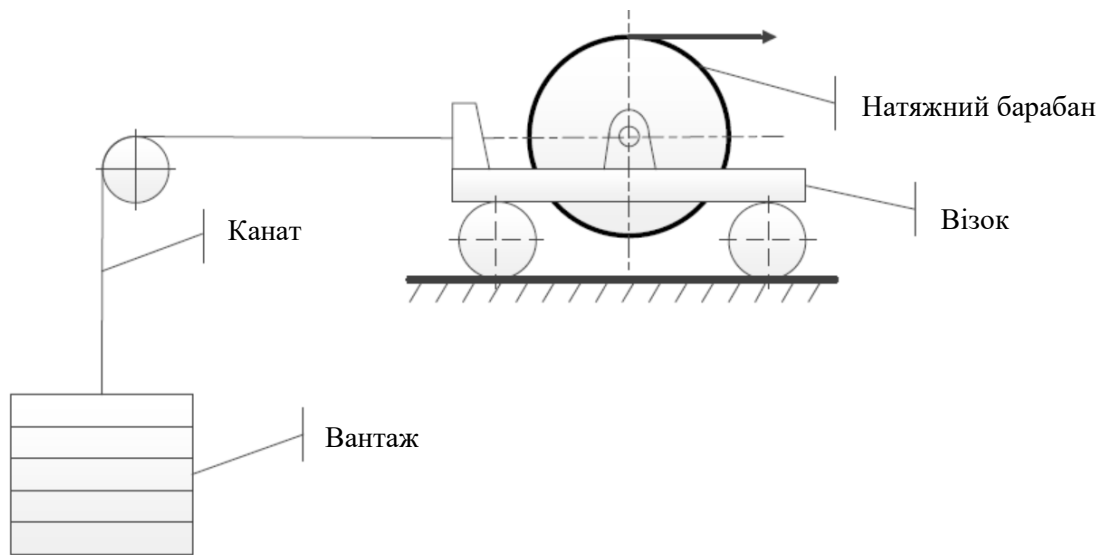


Рисунок 3.1 - Схема натяжного пристрою

Регулювання може виконуватися в автоматичному режимі: на етапі запуску конвеєра лебідка створює підвищене натягнення, а після виходу стрічки на сталу швидкість натяг знижується до номінального рівня. Керування лебідкою відбувається на основі сигналів динамометра, який вимірює натяг, або за показниками швидкості стрічки, кутової швидкості барабана чи ролика, що перебувають у контакті зі стрічкою. Крім того, під час перехідного періоду управління може здійснюватися за допомогою реле часу, налаштованого на стандартну тривалість пускового режиму.

Увімкнення лебідки для збільшення натягу слід проводити під час роботи двигуна на попередньому ступені. Якщо її запускати до старту основного приводу, відбувається передпусковий перерозподіл натягів, що призводить до зростання першої амплітуди динамічних навантажень у стрічці. Для підвищення «чутливості» системи до змін натягу рекомендується зменшувати приведену масу та внутрішні втрати в блоках поліспастів і механізмах натяжного пристрою. Автоматичне регулювання натягу доцільно застосовувати й під час сталого руху залежно від рівня завантаження: при частковому заповненні стрічки натяг може зменшуватися, що сприяє продовженню терміну служби.

Напіваавтоматичні системи працюють за принципом порівняння зусиль у набігаючій та збігаючій гілках стрічки. Їхню роботу можна описати алгоритмом (рис. 3.2). Спочатку лебідка забезпечує попереднє натягнення стрічки. Під час запуску або завантаження конвеєра натяг у гілці S_4 збільшується, порушується співвідношення S_4/S_1 , і рухома каретка з відхиляючим барабаном зміщується в бік приводного барабана, тягнучи канат, який через зубчасту передачу приводить у рух барабан вирівнювального механізму. Обертання триває доти, доки співвідношення S_4/S_1 не повернеться до заданого значення. При зменшенні навантаження чи під час розвантаження відбувається зворотнє обертання барабанів вирівнювального механізму. Натяг забезпечується за рахунок різниці переміщень рухомої каретки з відхиляючим барабаном та натяжної каретки з натяжним барабаном, при цьому хід натяжного барабана в k_6 разів перевищує хід відхиляючого барабана. [18].

На конвеєрах типу 2Л100У, де застосовується синтетична стрічка з досить значним коефіцієнтом подовження, встановлюється напіваавтоматичний натяжний пристрій, змонтований у хвостовій частині конвеєра. Такий пристрій забезпечує підтримання оптимального рівня натягу в процесі роботи та компенсує подовження стрічки, яке виникає під час експлуатації. Принцип його дії ґрунтується на автоматичному регулюванні зусилля натягу залежно від навантаження на стрічку та умов роботи конвеєра, що дозволяє зменшити ймовірність прослизання і збільшити строк служби як самої стрічки, так і приводних елементів.

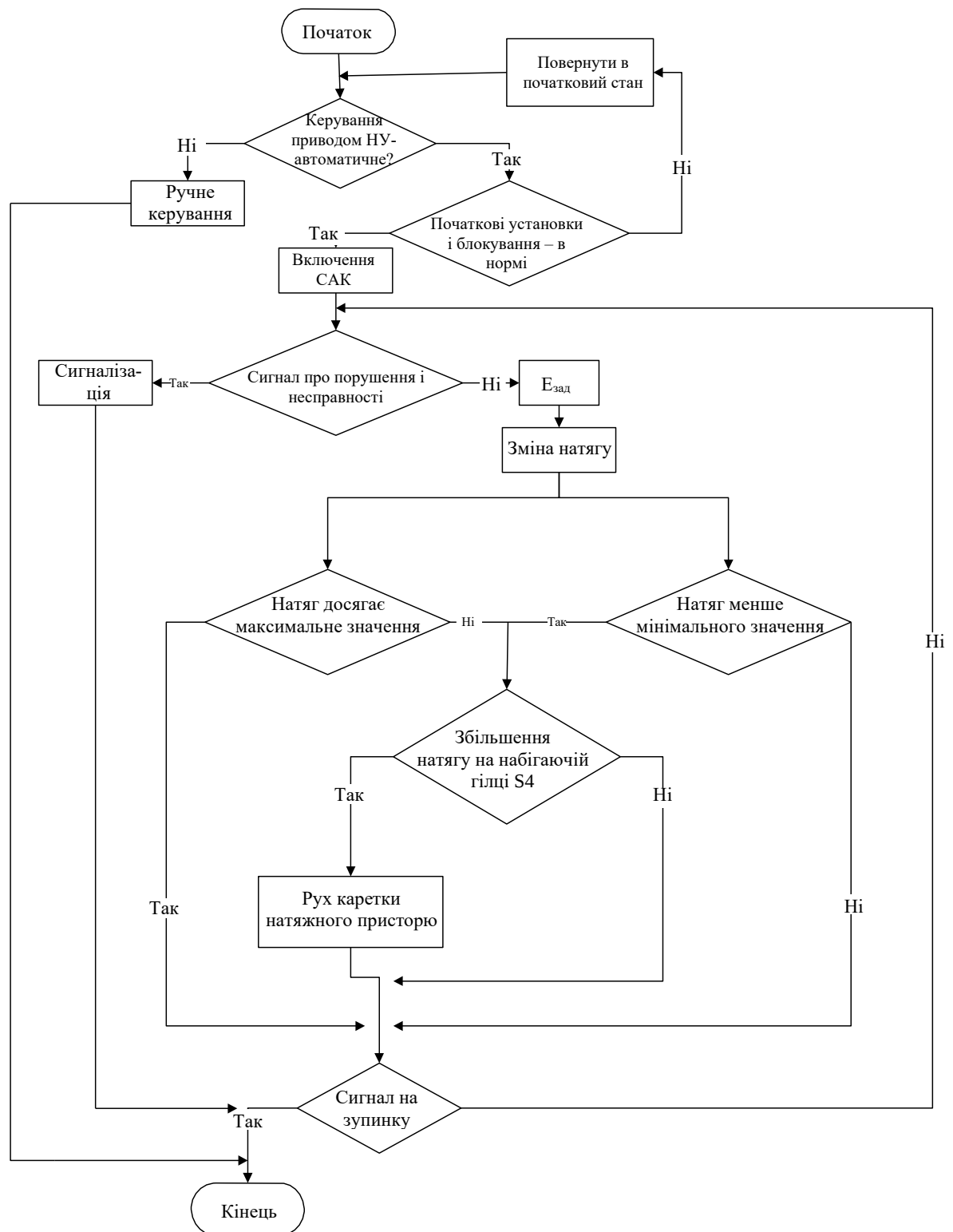


Рисунок 3.2 - Алгоритм керування електроприводом натяжного пристрою

3.2 Розробка алгоритму та структури системи автоматичної стабілізації тягового фактора в умовах нерівномірного навантаження

Натяжний механізм конвеєра 2Л100У розташований у хвостовій частині установки, що конструктивно спрощує доступ до вузла і зменшує довжину гнучких комунікацій. Початкове натягнення формується лебідкою, після чого функції регулювання переходять до електроприводу натяжного пристрою. У міру завантаження конвеєра зростає натяг вантажної (робочої) гілки, що призводить до відхилення тягового фактора від оптимуму. Для оперативної компенсації цього відхилення у коло керування вводиться реле тиску з гідродатчиком: коли натяг зменшується до нижньої допустимої межі — електродвигун автоматично активується, а при досягненні верхнього порогу — вимикається. Такий двопороговий принцип забезпечує підтримання натягу близько до розрахункової «робочої полиці» без частих вмикань/вимикань приводу.

Ефективність керування прямо залежить від здатності оцінювати натяги в режимі реального часу. Запропонована математична модель дає змогу відстежувати зусилля у п'яти характерних точках траси, відповідних зосередженим масам у розрахунковій схемі. Це дозволяє синтезувати лінійні алгоритми регулювання зі зворотним зв'язком за керованою змінною (оцінкою тягового фактора), завдяки чому система зберігає тягову спроможність не лише в ustalених режимах, але й під час переходів між різними швидкостями руху стрічки.

Поточне значення тягового фактора визначається за формулою

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

де $S_4(t)$ натяг у набігаючій гілці, $S_1(t)$ — натяг у збігаючій гілці (рис.3.3).

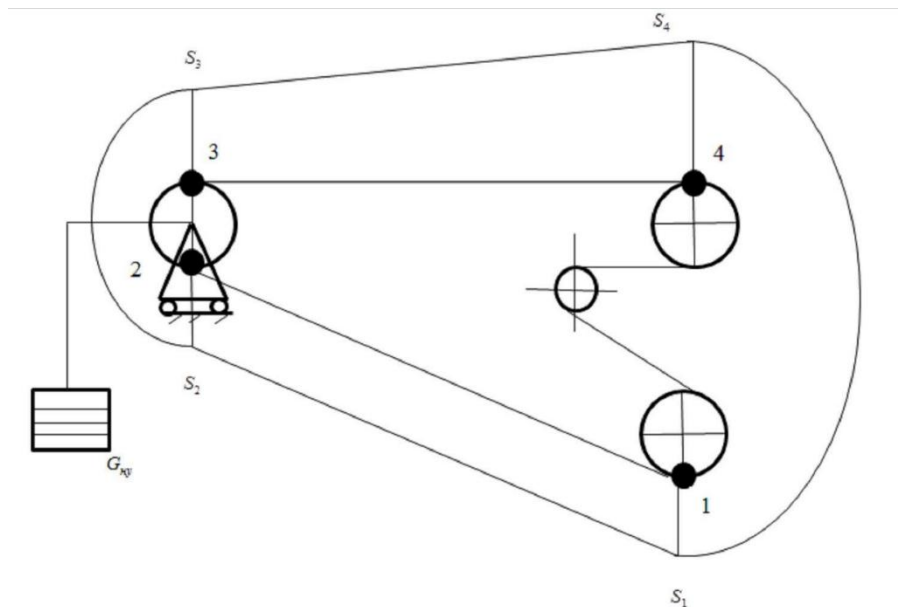


Рисунок 3.3 - Діаграма натягу в характерних точках конвеєра з натяжним пристроєм

Подальший синтез алгоритму спирається на функціональну залежність між величиною фактора та зусиллям натяжного пристрою.

Щоб урахувати вплив деформацій стрічки, вводяться поточні видовження $\Delta l(t)$ (порожня гілка) та $\Delta l(t)$ (вантажна гілка). Для чотирьох характерних перерізів приймаємо зв'язки:

- у точці 1: $S_1(t)$;
- у точці 2: $S_2(t) = S_1(t) + W_{2,1}(t)$;
- у точці 3: $S_3(t) = k_6 S_2(t)$;
- у точці 4: $S_4(t) = S_3(t) + W_{4,3}(t)$,

де $W_{2,1}(t)$ та $W_{4,3}(t)$ — опори руху відповідно порожньої й вантажної гілок, а коефіцієнт $k_6 = 1,05$ враховує зростання натягу під час обгинання відхиляючого барабана. Зміни зусилля натяжного пристрою викликають зміни $\Delta l(t)$ та $\Delta l(t)$, що, своєю чергою, призводить до перерозподілу натягів $S_1(t)$ і $S_4(t)$. Ці самі натяги можна перерахувати альтернативно за співвідношеннями, у яких явно присутні опори $W_{1,2}(t)$ і $W_{4,3}(t)$

$$\Delta_1(t) = x_4(t) - x_5(t), \quad \Delta_4(t) = x_1(t) - x_2(t),$$

Для встановлення надійної функціональної залежності між натягом і деформацією було проведено експеримент: систематично змінювали «вагу» натяжного пристрою $G_{нт}$ паралельно обчислювали натяги і знімали зразки деформацій стрічки. За результатами обробки даних методом найменших квадратів отримано лінійні апроксимації залежностей натягів від деформацій — співвідношення.

$$S_1(t) = 0,5G_{\text{ну}} - W_{2,1}(t), \quad S_4(t) = 0,5G_{\text{ну}} - W_{4,3}(t),$$

Хоча лінеаризація вносить деяку похибку, її точності достатньо для оцінювання $E_{\mu a}(t)$ за формулою, що виступає керованою змінною у контурі.

Похибка подається на ПІД-регулятор, передавальну функцію якого наведено в документі поряд з алгоритмом.

$$E_{\text{зад}}^{\mu a} - E^{\mu a}(t) = \varepsilon^{\mu a}(t)$$

Обчислену похибку подають на вхід регулятора стабілізаційного контуру, що виконує керування тяговим фактором за законом із передавальною функцією типу ПІД

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

Алгоритм задає послідовність дій, яка забезпечує автоматичну підтримку тягового фактора на рівні, що гарантує надійну роботу конвеєра без пробуксовування стрічки та перевантаження електроприводу

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

Таким чином формується замкнена система, що автоматично компенсує відхилення тягового фактора, забезпечуючи роботу без пробуксовування та без перевантаження електроприводів навіть за несталих умов і варіацій механічних параметрів стрічки.

Структурна схема підсистеми стабілізації тягового фактора (рис. 3.4) відображає взаємозв'язки між основними елементами: датчиками вимірювання деформацій, обчислювальним блоком оцінки тягового фактора за (3.1), регулятором із передавальною функцією $WPID(s)$ та виконавчим механізмом натяжного пристрою.

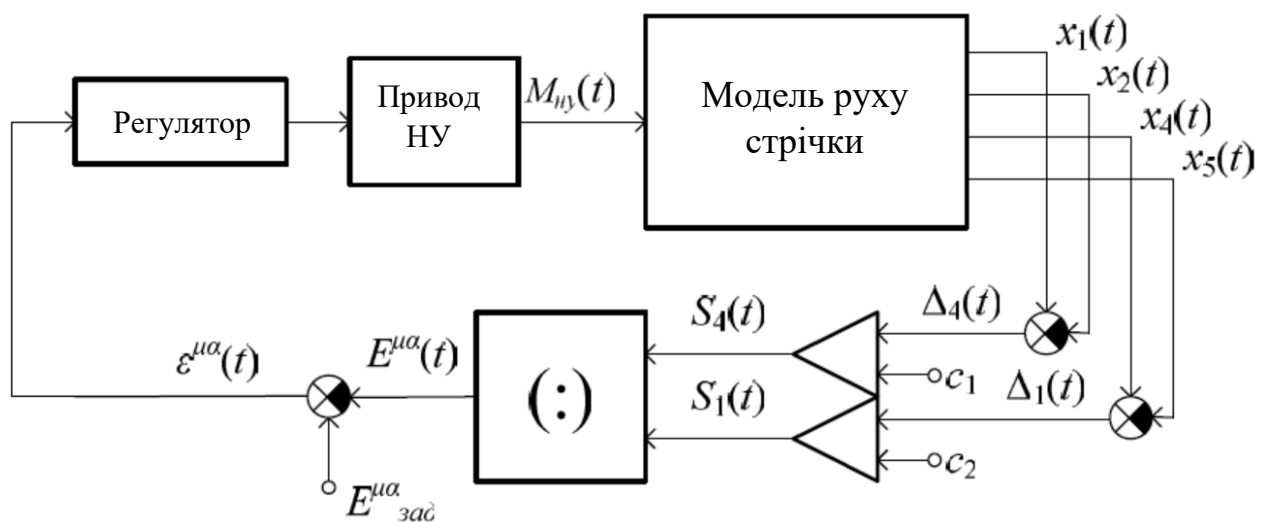


Рисунок 3.4 - Структурна схема підсистеми автоматичної системи стабілізації тягового фактора

3.3 Експериментальні дослідження системи автоматичної стабілізації тягового фактора

З метою валідації методики та налаштування параметрів регулятора було виконано тарування конвеєрної стрічки. Експериментальна процедура передбачала поступове змінювання величини зусилля натяжного пристрою G_{nn} у

межах 3–11 т із паралельною реєстрацією модельних деформацій $\Delta(t)$. Отримані результати подано в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Результати тарування конвеєрної стрічки

Вага натяжного пристрою $G_{\text{ну}}$, Н	Деформація Δ_1 , м	Деформація Δ_4 , м	Натяг в збегаючій гілці S_1 , Н	Натяг в набігаючій гілці S_4 , Н
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

Цей етап потрібен для: (1) ідентифікації коефіцієнтів лінійних апроксимацій; (2) перевірки чутливості моделі до змін $G_{\text{ни}}$; (3) первинного узгодження шкал деформацій і натягів.

Для оцінювання динамічної ефективності алгоритму стабілізації було проведено імітаційні дослідження з зовнішніми збуреннями: змінювали вантажопотік та, як наслідок, швидкість руху стрічки. На рис. 3.5 наведено криву зміни тягового фактора у режимі запуску без активного регулювання. Близько 54 і секунди зафіксовано різке зниження швидкості, що викликало помітні коливання фактора, провисання полотна і пробуксовування на барабанах протягом приблизно 11 секунд. Відновлення до розрахункового рівня сталося лише завдяки інерційній дії механічної системи натягнення, що підтверджує необхідність активної стабілізації.

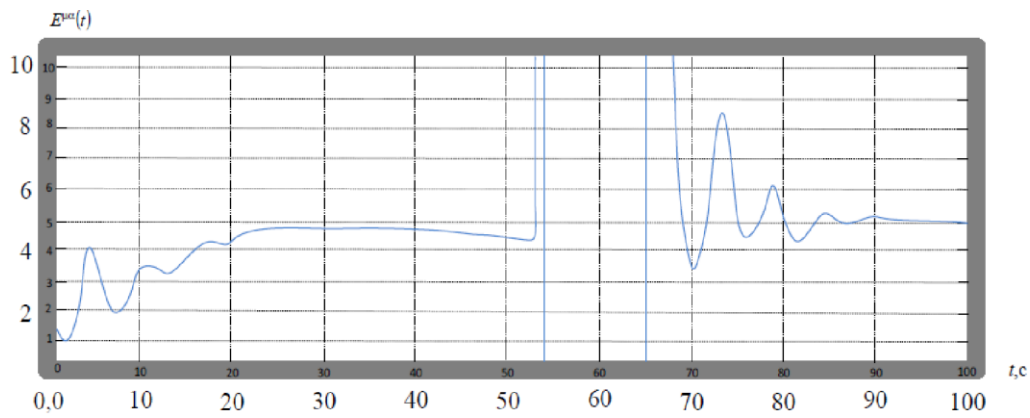


Рисунок 3.5 - Динаміка тягового фактора без застосування регулювання

Для реалізації стабілізації через регулювання положення каретки натяжного механізму встановлено функціональні залежності між поточним значенням тягового фактора та силою G_{nn} . Ці залежності, отримані методом найменших квадратів, стали основою розробленого закону керування: зусилля натяжного пристрою $G_{nn}(E_{\mu a})$ має масштабуватися пропорційно зміні швидкості стрічки — така пропорційність дозволяє уникати затримок і компенсувати вплив пружності матеріалу стрічки на натяги.

$$G_{ny}(E^{\mu a}) = 250 \cdot (E^{\mu a})^2 - 9980 \cdot E^{\mu a} + 113380$$

Після обчислення похибки фактора формується відповідна похибка переміщення каретки s_6 . Кількісні співвідношення між дією G_{nn} і переміщенням s_6 подано в табл. 3.2. Далі, використовуючи співвідношення (3.4),

$$s_6(G_{ny}) = -1.61 \times 10^{-5} G_{ny} - 0.663$$

визначають необхідне коригування положення каретки; фізичне виконання цього переміщення забезпечує повернення фактора до заданого діапазону. На рис. 3.6 і рис. 3.7 наведено структурну схему системи та модель її функціонування

Таблиця 3.2 - Кількісні співвідношення

Вага натяжного пристрою G_{ny} , Н	Переміщення каретки натяжного пристрою 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

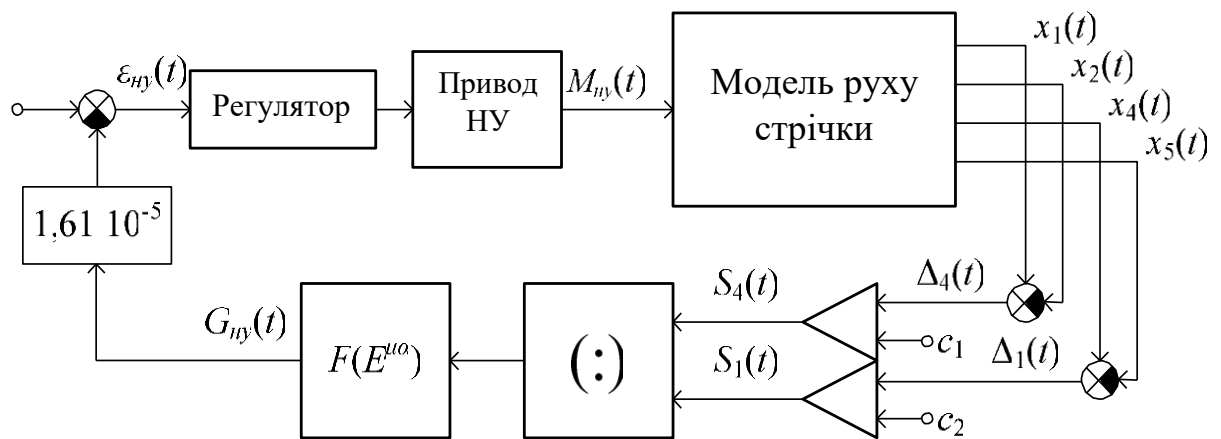


Рисунок 3.6 - Структурна схема системи автоматичної стабілізації тягового фактора регулювання положення каретки натяжного пристрою

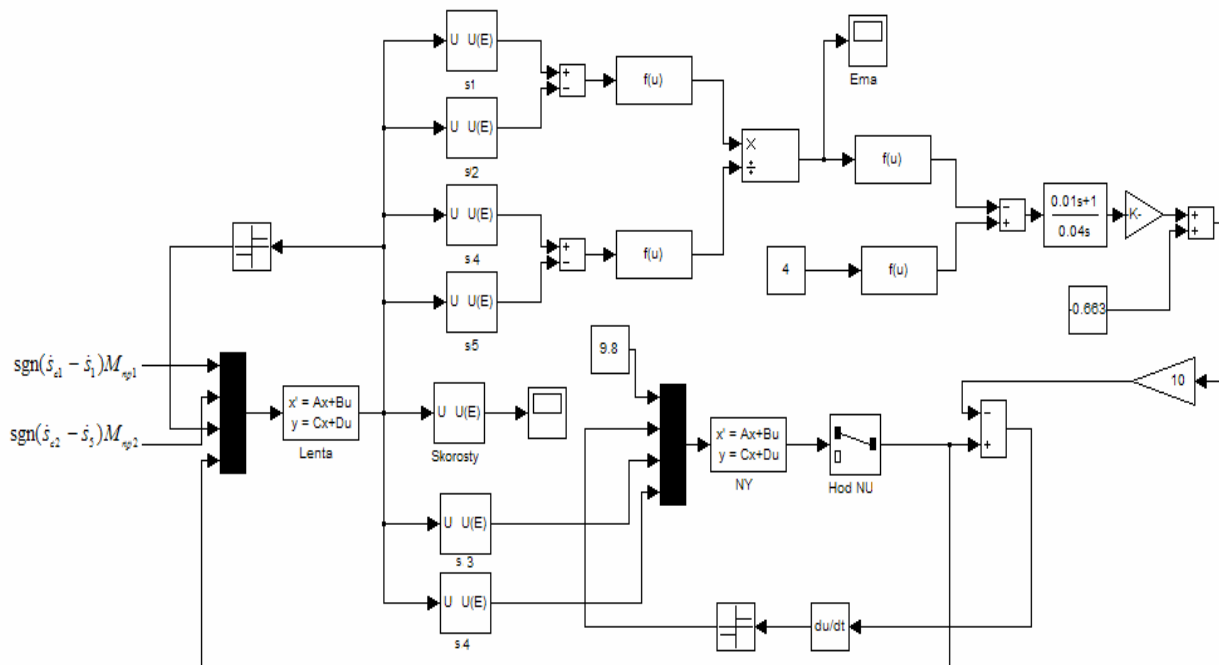


Рисунок 3.7 - Модель системи автоматичної стабілізації тягового фактора регулювання положення каретки натяжного пристрою

Моделювання, результати якого наведено на рис. 3.8, показало: після зниження швидкості на 56-й секунді система відновлює розрахункове значення тягового фактора без перерегулювання та аперіодичних коливань.

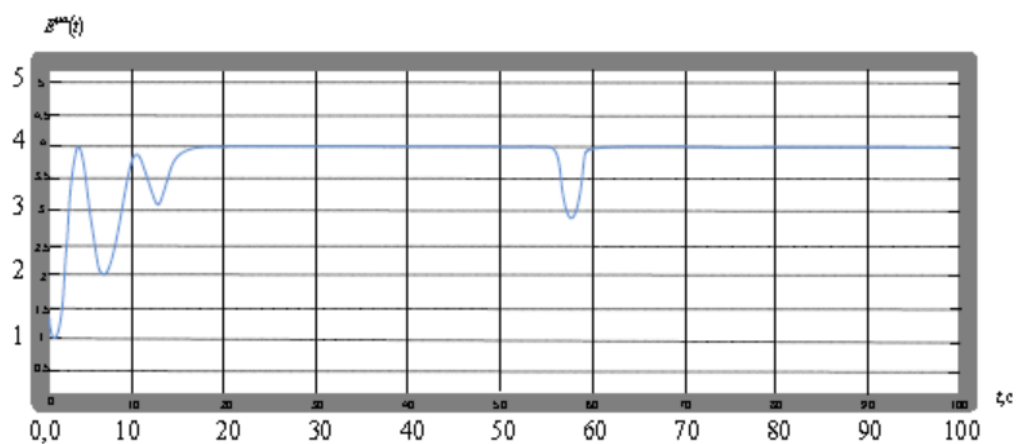


Рисунок 3.8 - Динаміка тягового фактора під час регулювання положення каретки натяжного пристрою

Така поведінка характерна для коректно налаштованого ПД-регулятора з адекватними коефіцієнтами пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Водночас переміщення каретки відбувається саме у моменти переходів між швидкостями, гарантуючи оптимальний натяг і безпробуксовий режим обертання приводних барабанів.

Додатково проаналізовано перехідні процеси швидкостей зосереджених мас стрічки (див. рис. 3.9): на 50-й секунді моделювання швидкість руху стрічки зростає майже вдвічі, але задіяна система стабілізації швидко вирівнює динаміку всіх зосереджених мас до значень, близьких до пускових профілів, що свідчить про добру демпфувальну здатність контуру керування. Рис. 3.10 ілюструє переміщення натяжного пристрою у процесі регулювання. Сукупність цих результатів підтверджує коректність прийнятих припущень і вибраної структури керування.

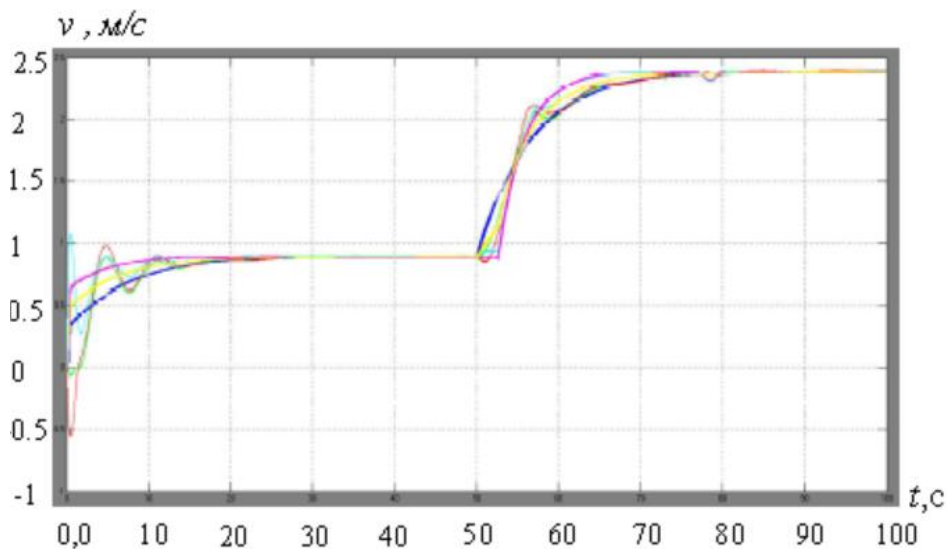


Рисунок 3.9 - Перехідні процеси за швидкостями зосереджених мас стрічки конвеєра під час здійснення регулювання

На рис.3.10 показано переміщення натяжного пристрою під час здійснення регулювання.

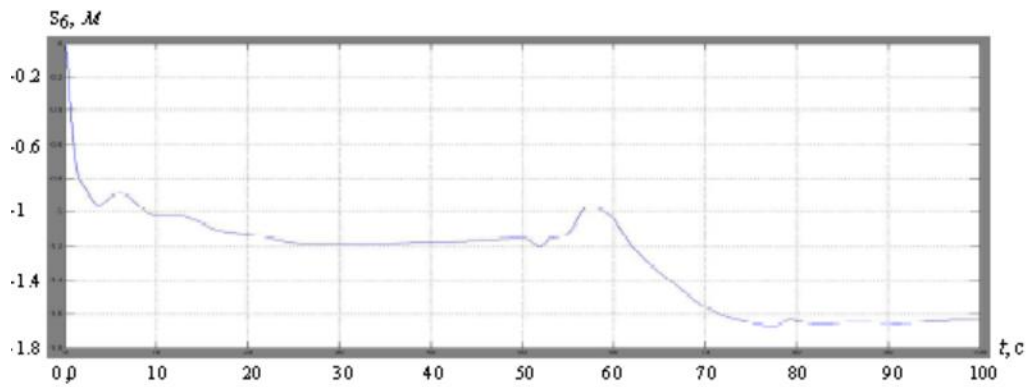


Рисунок 3.10 - Переміщення натяжного пристрою під час здійснення регулювання

3.4 Розробка системи керування рухом стрічки стрічкового конвеєра з підсистемою стабілізації тягового фактора

Синтезований закон керування дозволяє підтримувати натяг на рівні, що виключає пробуксовування стрічки при коливаннях швидкості та нерівномірній подачі матеріалу. Архітектура системи побудована на взаємодії двох замкнених контурів:

- контур швидкості — підтримує задану $\omega_{зад}$ стрічки, коригуючи рушійні моменти приводів $M_{дв1}(t)$ і $M_{дв2}(t)$;
- контур натягу/тягового фактора — стабілізує $E^{\mu a}(t)$ через зміну зусилля натяжного пристрою $G_{нт}(t)$ та координати положення каретки.

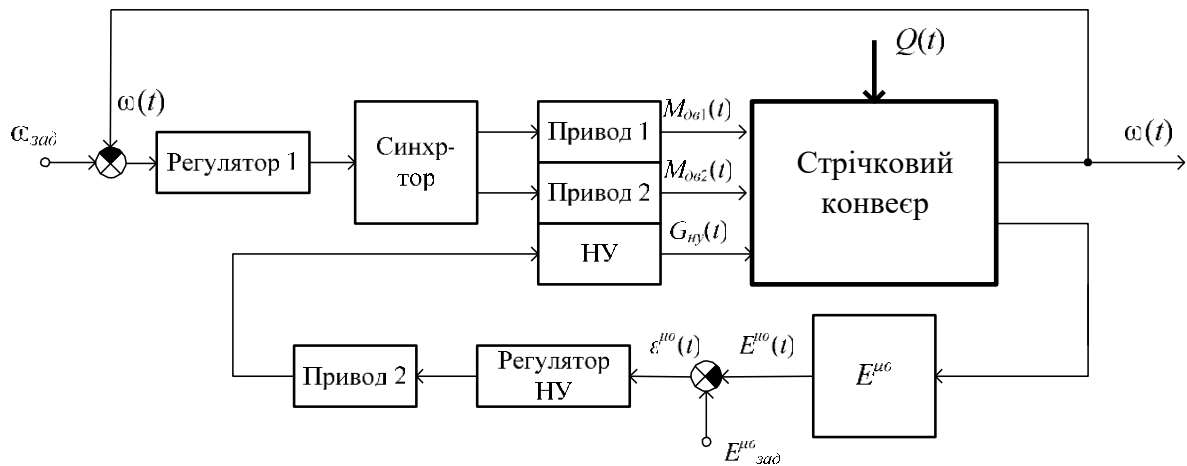


Рисунок 3.11 - Структурна схема узагальненої системи автоматичної стабілізації тягового фактора

Структурна схема узагальненої системи (залишити без змін) відображає взаємодію між вимірювальними ланками, обчислювальним блоком оцінки тягового фактора, ПІД-регуляторами та виконавчими механізмами. За прийнятою нотацією:

- $M_{дв1}(t)$, $M_{дв2}(t)$ – рушійні моменти приводів,
- $\omega(t)$ – поточна встановлена швидкість стрічки,
- $\omega_{зад}$ – її задане значення,
- $G_{нп}(t)$ – еквівалентна «вага», яку створює натяжний пристрій
- $E^{\mu\alpha}(t)$ – оцінка тягового фактора в реальному часі,
- $E^{\mu\alpha}_{зад}$ – значення, що потрібно підтримувати,
- $\varepsilon^{\mu\alpha}(t)$ – відхилення поточної оцінки від заданої.

Верифікаційні випробування (у режимах пуску, зміни швидкості, екстреного гальмування та штатної зупинки) показали, що система зберігає стійкість і забезпечує швидке згасання перехідних без перерегулювання. Внесок підсистеми натягу проявляється у підтриманні достатнього запасу зчеплення між стрічкою і приводними барабанами та у зменшенні пікових крутних моментів на валах приводів, що позитивно позначається на довговічності як електромеханічної частини, так і стрічкового полотна.

3.5 Технічні засоби для автоматичної системи стабілізації тягового фактора стрічкового конвеєра

Представлено розрахункову схему автоматизованої системи стабілізації тягового фактора, що слугує основою для вибору та обґрунтування необхідних технічних компонентів на рис. 3.12. Відповідно до цієї моделі передбачається встановлення чотирьох вимірювальних перетворювачів натягу: у привідній головці конвеєра на вантажній та зворотній гілках стрічки, а також у його хвостовій частині – на відповідних гілках.

Функціонування натяжного пристрою потребує визначення характеристик виконавчого механізму з електроприводом. Привід натяжного вузла стрічкового конвеєра доцільно реалізувати на основі асинхронного електродвигуна змінного струму. Обробка даних та синтез алгоритмів керування здійснюються за допомогою контролера із середнім рівнем обчислювальної продуктивності. Інформаційна взаємодія між датчиками, процесором та виконавчими елементами відбувається через цифрову мережу з використанням інтерфейсу RS-232.

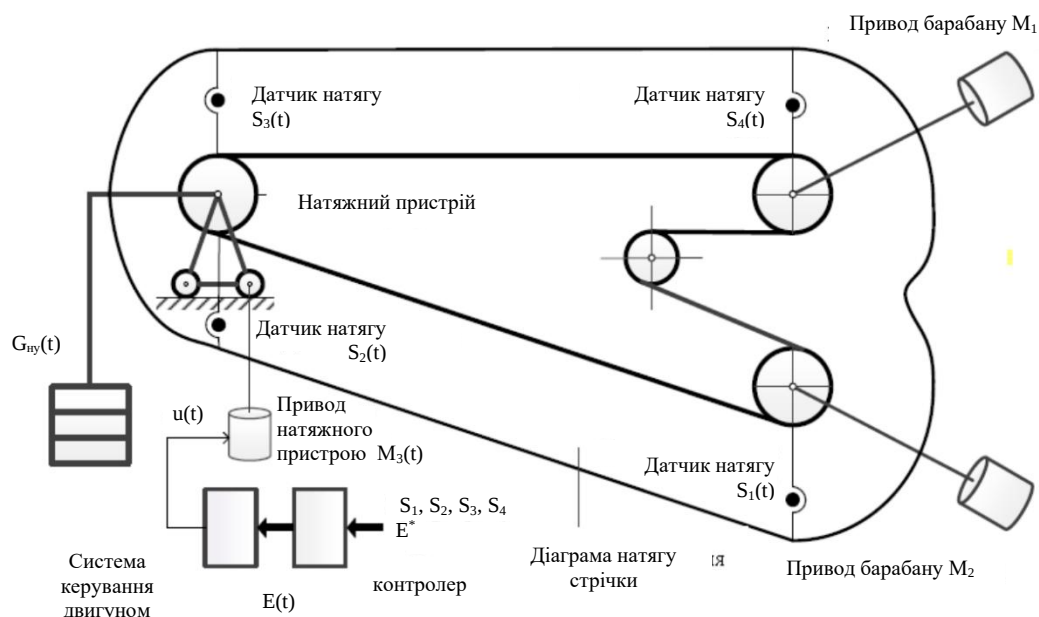


Рисунок 3.12- Компонівка елементів системи керування кареткою натяжного пристрою

Часті пуски стрічкового конвеєра та необхідність регулювання швидкості його руху обумовлюють потребу у впровадженні автоматизованої системи керування швидкістю. Застосування такої системи дозволяє знизити інтенсивність зношування найбільш вартісних елементів обладнання — стрічки та роликоопор, які складають близько половини та однієї третини вартості конвеєра відповідно.. Оскільки ступінь зношування стрічки прямо залежить від її швидкості, регулювання руху в залежності від величини вантажопотоку забезпечує подовження строку її експлуатації. У цьому випадку номінальна швидкість підтримується лише за умови номінального вантажопотоку, що відповідає пропускній здатності транспортера.

Зміна швидкості руху стрічки дозволяє підтримувати стабільність погонного навантаження та забезпечити оптимальне заповнення робочої поверхні конвеєра. Завдання на швидкість подається у вигляді сигналу на вхід тиристорного перетворювача електроприводу. За необхідності формується команда на зниження швидкості, а при перевищенні номінального рівня — на її підвищення.

На рис. 3.13 наведено схему інтеграції апаратного комплексу узагальненої автоматизованої системи стабілізації тягового фактора стрічкового конвеєра. Згідно з розробленим алгоритмом керування, у процесі роботи системи слід визначати швидкості руху стрічки в критичних точках розташування зосереджених мас. Для цього у склад апаратного комплексу системи входять: *ДШ1...ДШ4* — тахометричні датчики швидкості; *АЦП* — аналого-цифрові перетворювачі; *ВК* — конвеєрні ваги; *ЦАП* — цифро-аналогові перетворювачі; *В* — випрямляч; *АІН* — автономний інвертор напруги; *МБК* — мікропроцесорний блок керування, *Ф* — фільтр.

У системі автоматичної стабілізації тягового фактора передбачено застосування тахометричних датчиків швидкості серії ADAM-4000, розташування яких наведено на рис. 3.13. Ці датчики забезпечують точне

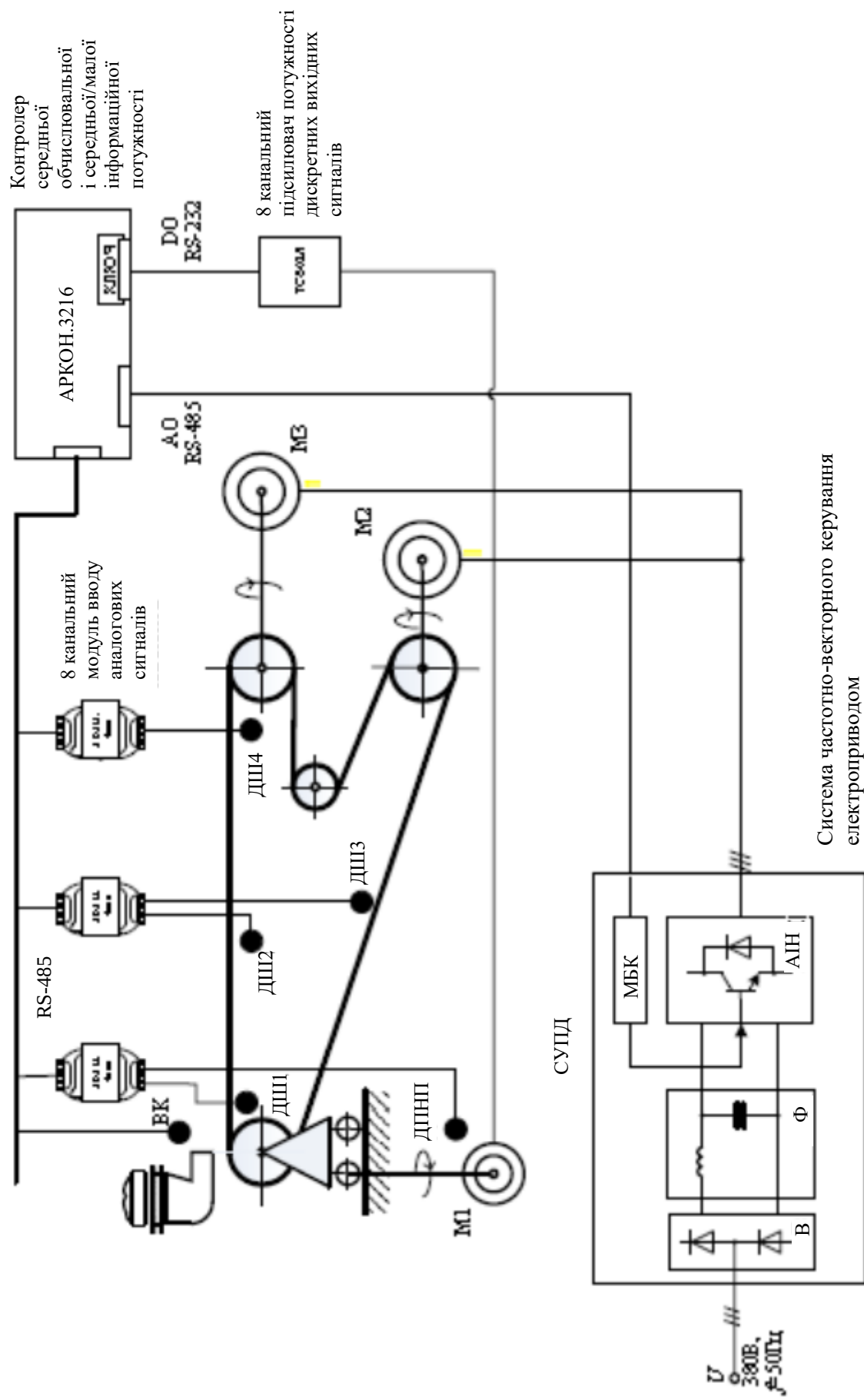


Рисунок 3.13 - Схема інтеграції технічних засобів у системі керування тяговим фактором конвеєра

визначення швидкостей руху стрічки у контрольних точках, що є необхідною умовою для ефективного регулювання тягового фактора.

Для безперервного вимірювання маси вантажу у транспортній стрічці використовуються стаціонарні конвеєрні ваги, які дозволяють здійснювати безперервне зважування сипучого вантажу за допомогою перетворювача частоти. Контроль положення натяжного пристрою здійснюється датчиком ДПНП, що дозволяє забезпечувати точне позиціонування каретки та підтримку оптимального натягу стрічки.

Прийом аналогових сигналів від сенсорів забезпечують модулі аналогового введення серії ADAM-4000 з гальванічною розв'язкою. Мікропроцесорний блок системи виконує нормалізацію сигналів, обробку операцій аналогового та дискретного вводу-виводу, а також відображення та архівування даних. Передача та прийом інформації між модулями та контролером здійснюється через промисловий інтерфейс RS-485, що забезпечує надійний обмін даними у режимі реального часу та інтеграцію всіх елементів апаратного комплексу в єдину систему керування. Усі модулі мають гальванічну розв'язку та підтримують живлення від нестабілізованого джерела постійної напруги 10...30 В.

Як центральний цифровий процесор у системі пропонується застосувати контролер ARCON-3216, що належить до пристроїв середнього рівня обчислювальної та інформаційної продуктивності. Робочий температурний діапазон експлуатації комплексу становить від -10 до $+70$ °С. Для приймання сигналів від тахометричних датчиків швидкості та конвеєрних ваг інтегровано універсальний 8-канальний модуль ADAM-4019. Даний модуль оснащений 16-розрядним аналого-цифровим перетворювачем та має вісім диференціальних каналів введення, параметри яких можуть встановлюватися індивідуально. Підтримуються як вхідні сигнали напруги, так і струму. Модулі мають гальванічну розв'язку з напругою ізоляції до 3000 В постійного струму та підключаються до контролера через промисловий інтерфейс RS-485.

Під час вибору електроприводу для натяжного пристрою в розробленій системі стабілізації тягового фактора враховано доцільність використання керованих електроприводів стрічкових конвеєрів, які дають змогу змінювати швидкість руху стрічки залежно від реального вантажопотоку. Регулювання швидкості здійснюється шляхом зміни напруги, що подається на статор, під час фазового керування пуском асинхронного короткозамкненого електродвигуна. Такий принцип забезпечує плавний запуск конвеєра, роботу з пониженою швидкістю та безперервний перехід між різними режимами роботи.

Як технічну основу системи можна застосувати серійну тиристорну станцію керування типу ТСУР, призначену для роботи з електродвигунами номінальним струмом від 10 до 100 А. Це забезпечує можливість створення конвеєрного приводу потужністю до 40 кВт.

Асинхронний привід натяжного пристрою, що підлягає частому керуванню, реалізується за схемою, наведеною на рис. 3.14. У його складі використано асинхронний електродвигун типу 4А180S6У3, частотний перетворювач АТ04-160, два блоки (БФ) фільтрів, пульт (ПЛУ) локального управління, контролер Simatic S7-300, інтерфейс RS-232.

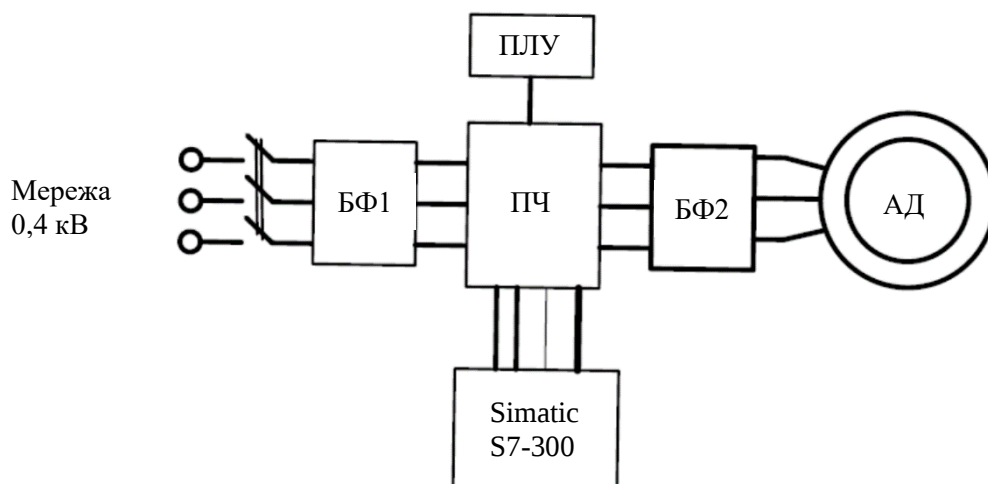


Рисунок 3.14 - Функціональна схема ЕП

3.6 Основні технічні рішення

Підвищення ефективності експлуатації стрічкового конвеєра великою мірою пов'язане зі зниженням зносу полотна, що рухається. При пуску та підвищенні швидкості обертання приводних барабанів може виникати пробуксовка, яка збільшує зношування стрічки і навіть може призвести до займання при терті.

Через нерівномірність потоку на конвеєр змінюється навантаження на приводу конвеєра, при великому навантаженні на стрічці натяг вантажної гілки істотно виявляється більше натягу холостий, і тому тяговий барабан не в змозі прокрутити стрічку і прослизає.

На рис.3.15. наведено структурну схему розробленої системи.

Ефект пробуксовки виникає, коли величина тягового фактора перевищує значення, яке можна назвати критичним. Розмір тягового фактора розраховується за формулою [16, 17]:

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

Математична модель двоприводного стрічкового конвеєра була застосована як об'єкт для розробки системи автоматичної стабілізації тягового фактора.

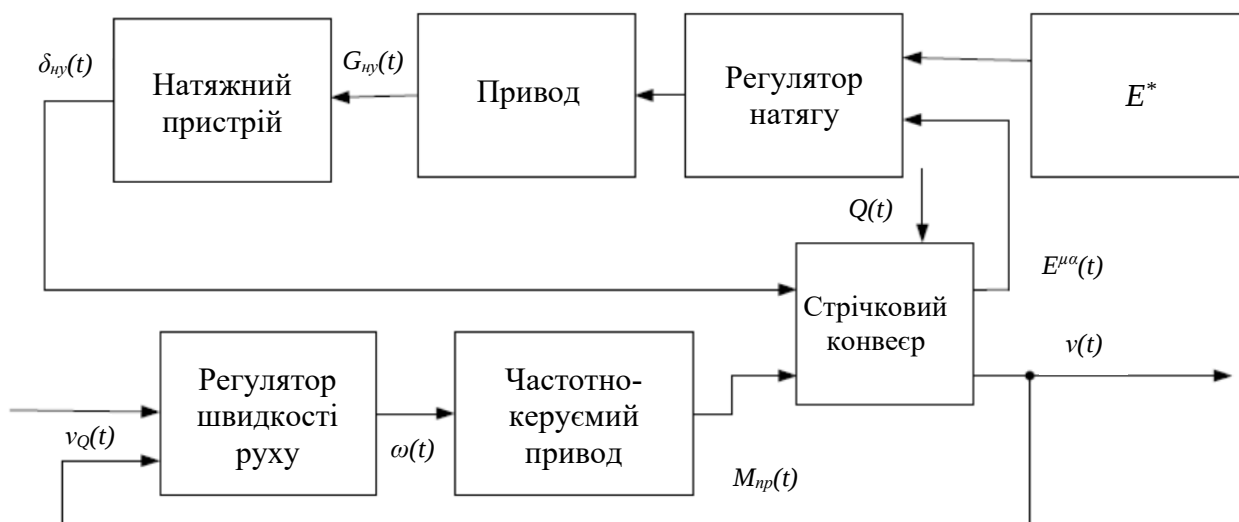


Рисунок 3.15 - Структурна організація системи автоматичного регулювання тягового фактора

На рисунку 3.15 прийняті наступні позначення: $M_{np}(t)$ – рушійний момент приводів, $v(t)$ – поточна швидкість руху стрічки, $\omega(t)$ – частота обертання ротора приводу, $G_{ny}(t)$ – поточне значення натягу, створюване вагою натяжного пристрою, $E^{\mu a}(t)$ – поточне значення тягового фактора, $\delta_{ny}(t)$ – хід натяжного пристрою.

Автоматичне підтримання стабільного тягового фактора здійснюється шляхом регулювання положення каретки натяжного механізму, що служить на стрічковому конвеєрі для створення на стрічці натягу, необхідного для передачі тертям приводними барабанами тягової сили, а також обмеження провисання стрічки між ролюкоопорами, що характеризується величиною сили натягу і ходом натяжного барабана.

Аналіз функціонування системи стабілізації тягового фактора в режимах старту, регулювання швидкості, аварійної зупинки та штатного гальмування продемонстрували задовільну працездатність системи. Зміна положення каретки натяжного пристрою при зміні швидкості стрічки дозволяє компенсувати слабкість стрічки та стабілізувати величину тягового фактора, що виключає ймовірність пробуксування.

Для ефективної роботи автоматизованої системи передбачено застосування тахометричних датчиків швидкості серії ADAM-4000 (рис. 3.16).

У якості ваговимірювального пристрою використовуються стаціонарні конвеєрні ваги, призначені для безперервного зважування сипучого вантажу з використанням перетворювача частоти.

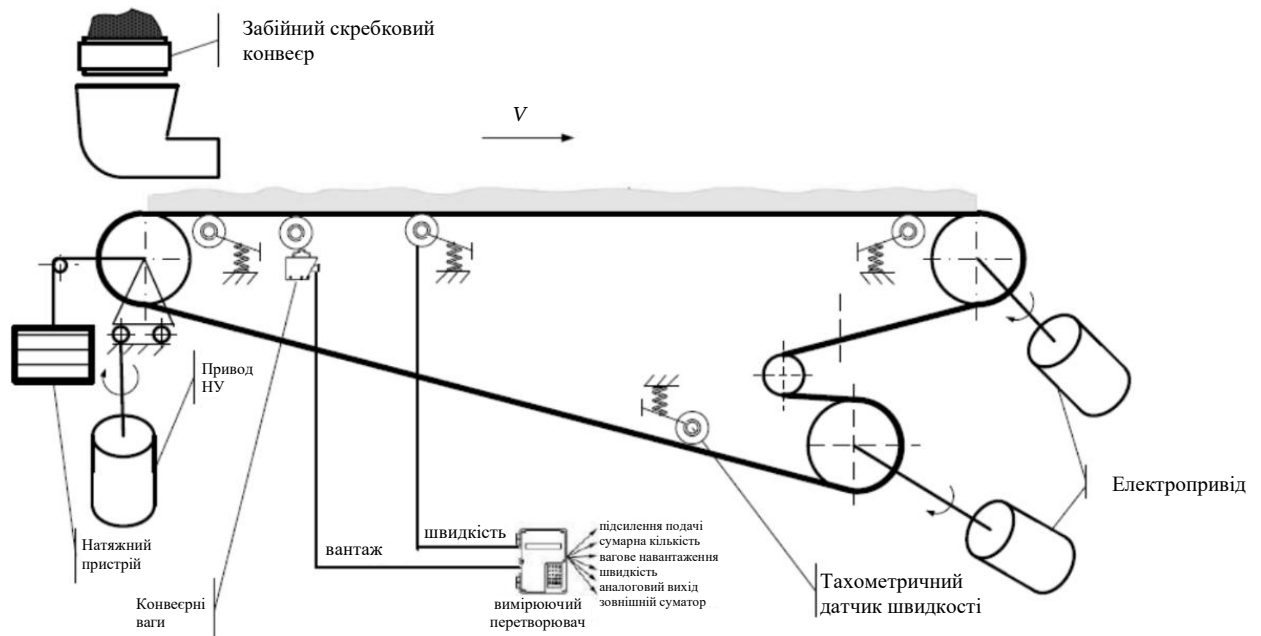


Рисунок 3.16 - Схема двоприводного стрічкового конвеєра з натяжним пристроєм та конвеєрними вагами

У системі автоматичної стабілізації тягового фактора для прийому та обробки аналогових сигналів від датчиків застосовуються модулі серії ADAM-4000 з гальванічною розв'язкою. Ці модулі виконують первинну обробку сигналів, забезпечуючи їхню ізоляцію та підготовку для подальшого аналізу контролером.

Центральним цифровим пристроєм системи є контролер ARCON-3216, який належить до апаратури середнього рівня обчислювальної та інформаційної потужності. Він відповідає за нормалізацію сигналів від датчиків, реалізацію операцій аналогового та дискретного вводу-виводу, відображення інформації на операторській панелі, а також за передачу та прийом даних через промисловий інтерфейс RS-485. Така архітектура забезпечує надійну інтеграцію всіх

елементів апаратного комплексу, дозволяє контролювати ключові параметри роботи конвеєра в реальному часі та забезпечує гнучке керування процесами з високою точністю. Живлення модулів здійснюється нестабілізованою постійною напругою 10...30 В.

Контролер забезпечено операторською панеллю з кольоровим графічним сенсорним екраном, що дозволяє програмувати та здійснювати ручне керування процесами безпосередньо з передньої панелі, а також використовувати його як реєстратор параметрів. Пристрій працює у взаємодії з блоками введення-виведення (аналогові входи, дискретні входи, аналогові виходи, дискретні виходи) через інтерфейс RS-485, забезпечуючи комплексне керування та моніторинг процесів системи.

Для забезпечення роботи технологічних процесів, що вимагають високошвидкісних входів-виходів, виготовляються спеціалізовані блоки дискретного вводу-виводу.

На дисплеї відображаються поточні основні параметри: струм двигуна, витрата, відвантажений матеріал, навантаження на погонний метр, швидкість, натяг на вантажній гілці, натяг на порожній гілці, кількість матеріалу, що надходить на стрічковий конвеєр.

Система автоматичної стабілізації тягового фактора стрічкового конвеєра призначена для автоматичної стабілізації навантаження конвеєра, підвищення безпеки під час експлуатації конвеєрного транспорту, запобігання виникненню аварійних ситуацій, спричинених технічними несправностями окремих елементів конвеєрної лінії.

Система забезпечує:

- вимірювання та контроль швидкості стрічкового полотна конвеєрів;
- вимірювання та контроль швидкості обертання приводного барабана конвеєрів;
- контроль сили натягу конвеєрної стрічки;
- контроль бічного сходу стрічкового полотна у вантажній та хвостовій частині конвеєра;

- контроль кабель-тросових вимикачів;
- контроль пересипу на розвантажувальній секції конвеєра.

Висновки до розділу

У розділі розглянуто призначення натяжного пристрою, який формує необхідний натяг стрічки та компенсує залишкове видовження під час експлуатації. Показано, що існуючі конструкції натяжних вузлів за мінімальних модифікацій можуть бути інтегровані в автоматичні підсистеми стабілізації натягу й тягового фактора.

Розроблено математичну модель двоприводного стрічкового конвеєра, яка використана як об'єкт керування при синтезі системи автоматичної стабілізації тягового фактора. На основі експериментальних даних встановлено лінійні залежності між натягами та деформаціями стрічки (метод найменших квадратів), що дало можливість формувати онлайн оцінку $E^{\mu a}(t)$ і застосувати її як керовану змінну в контурі з ПД регулятором.

Запропонована структура керування забезпечує стабілізацію тягового фактора як у штатних, так і в позаштатних режимах руху стрічки. Автоматична компенсація відхилень реалізується через переміщення каретки натяжного пристрою, що дозволяє:

- формувати на стрічці натяг, необхідний для передавання тяги тертям на приводних барабанах;
- обмежувати провисання прольотів між роликоопорами;
- контролювати силу натягу та хід натяжного барабана в заданих межах.

Імітаційні дослідження підтвердили: у режимах пуску, зміни швидкості, екстреної зупинки та штатного гальмування система працює задовільно, повертаючи $E^{\mu a}(t)$ до цільового діапазону без перерегулювання. Переміщення каретки відбувається переважно в моменти переходів між швидкостями, що

гарантує безпробуксовий режим та сприяє підвищенню ресурсу стрічки й приводів.

Розроблено структуру та склад комплексу технічних засобів автоматичної системи стабілізації тягового фактора конвеєра. У приводі натяжного пристрою використовується частотно керований асинхронний двигун, перетворювач частоти, два блоки фільтрів, пульт місцевого управління, контролер Simatic S7-300 та інтерфейс RS-232.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз наукових робіт, присвячених стабілізації тягового фактора двоприводного стрічкового конвеєра, а також розглянуто попередні дослідження, що стосуються моделювання руху конвеєрної стрічки.

Аналіз робіт, присвячених математичним моделям руху стрічки конвеєра, показує, що ці моделі не повною мірою враховують особливості руху двоприводного конвеєра з натяжним пристроєм.

Створено математичну модель руху стрічки магістрального конвеєра з двома приводами та пристроєм натягу стрічки. Цю модель можна використовувати за різних умов подальшого вивчення двухприводного стрічкового конвеєра як і об'єкт системи управління рухом конвеєра.

Розроблена модель руху стрічки дозволяє визначати значення швидкості руху та натягу стрічки в характерних точках конвеєра, що дає можливість використовувати ці координати при розробці системи автоматичного керування швидкістю руху конвеєрної стрічки для виключення пробуксовки на приводних барабанах та рівномірного розподілу навантаження на стрічці за будь-якої швидкості руху конвеєра.

Результатами комп'ютерного моделювання стали перехідні процеси за швидкостями узагальнених координат руху стрічки та переміщення натяжного пристрою. Отримані криві порівнювалися якісно та кількісно з перехідними процесами пуску та рівномірного руху реального конвеєра того ж класу. Величина відмінності визначалася як інтегральний квадрат різниці цих кривих на тривалому інтервалі часу, і не перевищила 8-10%, що підтверджує висновок про адекватність розробленої моделі руху стрічки двоприводного конвеєра.

Розроблено математичну модель двоприводного стрічкового конвеєра, яка використана як об'єкт керування при синтезі системи автоматичної стабілізації тягового фактора.

Запропонована структура керування забезпечує стабілізацію тягового фактора як у штатних, так і в позаштатних режимах руху стрічки. Автоматична компенсація відхилень реалізується через переміщення каретки натяжного пристрою, що дозволяє:

- формувати на стрічці натяг, необхідний для передавання тяги тертям на приводних барабанах;
- обмежувати провисання прольотів між роlikоопорами;
- контролювати силу натягу та хід натяжного барабана в заданих межах.

Імітаційні дослідження підтвердили: у режимах пуску, зміни швидкості, екстреної зупинки та штатного гальмування система працює задовільно, повертаючи $E^{\mu a}(t)$ до цільового діапазону без перерегулювання. Переміщення каретки відбувається переважно в моменти переходів між швидкостями, що гарантує безпробуксовий режим та сприяє підвищенню ресурсу стрічки й приводів.

Розроблено структуру та склад комплексу технічних засобів автоматичної системи стабілізації тягового фактора конвеєра. У приводі натяжного пристрою використовується частотно керований асинхронний двигун, перетворювач частоти, два блоки фільтрів, пульт місцевого управління, контролер Simatic S7-300 та інтерфейс RS-232.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматизація конвеєрних ліній. К. 2000. 215 с.
2. Ельперін І.В. Автоматизація виробничих процесів. Київ. 2017. 378 с.
3. Дунаєв В.П. Конвеєри з підвісною стрічкою : монографія / За заг. ред. В.І. Аверченкова, В.М. Івченко. К. , 2004. 255 с.
4. Кожубаєв Ю.М., Семенов І.М. Управління активними пристроями стрічкового конвеєра з метою забезпечення безаварійної. К, 2010. С. 54-57.
5. Шахмейстер Л.Г. Розрахунок стрічкових конвеєрів для шахт та кар'єрів. К, 1998. 392 с.
6. Солодівників В.В. Синтез коригуючих пристроїв стежать за допомогою оптимальних і типових логарифмічних частотних характеристик. 555 с.
7. Автоматизація виробничих процесів : підручник / О. І. Черевко, Л.В. Кіптела, В.М. Михайлов, О.Є. Загорулько. Харків, 2014. 186 с
8. Мамалига В.М. Взаємопов'язана система керування багаторуховими стрічковими конвеєрами. Дисертація на здобуття наукового ступеня к. т. зв. URL: Київ; 1988. С. 10-120.
9. Сокотнюк Ю.А. Система автоматичного управління похилим стрічковим конвеєром/дисертація на здобуття наукового ступеня к. т. н.,. Дніпропетровськ, 1990. 230с.
10. Кухар В.Ю. Технології та обладнання Гірського виробництва. Лекція для АКІТ. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2005. 13с.
11. Дмитрієва В.В. Розробка та дослідження системи автоматичної стабілізації погонного навантаження магістрального конвеєра: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / В. В. Дмитрієва. 2005. 22 с. : іл. Бібліогр.: 22 с.
12. Запенін І.В., Бельфор В.Є., Селіщев Ю.А. Моделювання перехідних процесів стрічкових конвеєрів. К., 2000. 56 с.
13. Бельфор В.Є. Дослідження перехідних процесів у багатоприводних стрічкових конвеєрах для гірничорудних підприємств. Дисертація, представлена на здобуття наукового ступеня канд. тех. наук. 2000. 147с.

14. Дмитрієва В.В. Математична модель магістрального конвеєра як об'єкта управління та автоматизації. *Гірські машини та автоматика*. 2001 №7. С. 37-40.
15. Дмитрієва В.В. Підтримка величини тягового фактора стрічкового конвеєра з дворуховим приводом. / Куанг П'єй Аунг, Він Зо Хтей. *Сучасні наукомісткі технології*. 2015. № 10. С. 20-28.
16. Дмитрієва В.В. Підтримка величини тягового фактора стрічкового конвеєра з дворуховим приводом. *Гірський інформаційно-аналітичний бюлетень*. 2015. № 6. С. 189-198.
17. Натяжні пристрої. Тяговий розрахунок похилого та магістрального конвеєрів. URL: <http://vunivere.ru/work17560/page3>
18. Білоусенко І.В. Шварц Г.Р., Великий С.М. Нові технології та сучасне обладнання в електроенергетиці газової промисловості. К., 2002. 300с.
19. Белов М.П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів та технологічних комплексів: підручник для студ. ВНЗ. К., 2007. 576 с.
20. Модернізація системи керування електропривода стрічкового конвеєра / І.С. Білюк та ін. // Scientific Collection «InterConf+». 2024. № 48 (213). Р. 238–250.
21. Високодинамічні енергоефективні електроприводи гірничих машин. *Гірське обладнання та електромеханіка*. 2011. N 4. С. 34-39.
22. Васильєв К.А., Миколаїв А. К., Сазонов К. Г. Транспортні машини та обладнання шахт і рудників : навч. посіб. 2012. 537 с.
23. Галкін В.І. Методи розрахунку та оцінка показників надійності стрічкових конвеєрів гірничих підприємств: дисертація. д. тех. наук: 05.05.06. 2000. 421 с.
24. Сучасна теорія стрічкових конвеєрів гірничих підприємств. / Дмитрієв В.Г. та ін. 2005, 543с.
25. Кірзенко, О. В. Автоматизована система оптимального керування режимами роботи електропривода стрічкового конвеєра насипних вантажів :

магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Київ, 2020. 97 с.

26. Дмитрієва В.В. Розробка математичної моделі стрічкового конвеєра з дворухомим приводом. *Гірничий інформаційно-аналітичний бюлетень* 2008. № 8. С. 295-303.

27. Дмитрієва В.В. Автоматична стабілізація погонного навантаження магістрального стрічкового конвеєра, 2004. 26с.

28. Modelowanie komputerowe i obliczenia współczesnych układów automatyzacji / R. Tadeusiewicz, G. Piwniak, W. Tkaczow, W. Szaruda, K. Oprędkiewicz. Kraków, 2004. 335 p

29. Ткачов, В.В. Технічні засоби автоматизації : навч. посіб. / В.В. Ткачов, В.П. Чернишев, М.М. Одновол. Д.: НГУ, 2008. 174 с.

30. Автоматизація виробничих процесів : підручник / О.І. Черевко, Л.В. Кіптела, В.М. Михайлов, О.Є. Загорулько. Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Харків, 2014. 186 с

31. Пономаренко В.А. Наукові засади визначення резервів пропускної спроможності та оптимізація систем підземного транспорту вугільних шахт. Дисертація, представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Донецьк, 601с.

32. Печук В.І. Сучасний стан та перспективи розвитку тензорезисторних силовимірювальних датчиків. – У кн.: Контроль зусиль безклеєвих тензорезисторними датчиками. Київ: Київський інститут автоматики, 5-17 с.

33. Щеглов О.М., Гринько П.А. Удосконалення конструкції натяжних пристроїв транспортуючих машин. *Захист металургійних машин від поломок*. Маріуполь, 2010. Вип. 12. С. 93 - 95.

34. Dmitrieva V.V. Maintaining traction factor value of belt conveyor with twoengine 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.

35. Kaung Pyae Aung. Development of a mathematical model of belt conveyor with twin-engine drive. / 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.

36. Маринич І.А., Тронь В.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

37. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

38. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

39. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація).

40. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).