

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри КСУ
_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності

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

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Енергоефективна система керування стрічковим конвеєром
гірничодобувної промисловості»

Здобувача групи СУ.м-31

Давиденко Ілля Леонідович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

Давиденко Ілля Леонідович

Керівник доцент кафедри КСУ, к. т. н. Георгій КУЛІНЧЕНКО.

(підпис)

Консультант _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти
Давиденку Іллі Леонідовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Енергоефективна система керування стрічковим конвеєром гірничодобувної промисловості.

затверджена наказом ректора СумДУ № № 1090 - VI від " 24 " жовтня 2024 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 30 листопада 2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: наукові публікації, звіт з переддипломної практики.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню):

Вступ, Опис технологічного процесу транспортування сипучих матеріалів, Функціональна схема, Методи керування VLDC двигуном, Математична модель об'єкту керування, Впровадження регуляторів швидкості та струму, Побудова двоконтурної моделі об'єкта керування, Оцінка П,ПІ,ПІД регуляторів для впровадження в систему. Розробка SCADA-системи.

5. Перелік графічних матеріалів: робота містить 29 рисунків, функціональну схему автоматизації, технологічна схема, графіки математичного моделювання, інтерфейс SCADA – системи.

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Розглянути існуючі системи керування стрічковим конвеєром гірничодобувної промисловості. Провести аналіз принципів енергозбереження.	22.10.2024 – 27.10.2024
2	Провести розрахунок тягових та основних параметрів конвеєра.	28.10.2024 – 03.11.2024
3	Дослідити методи керування BLDC	04.11.2024 – 10.11.2024
4	Побудувати математичну модель	
5	Провести синтез регуляторів об'єкту керування, промоделювати їх роботу.	11.11.2024 – 17.11.2024
6	Розробити SCADA-систему	18.11.2024 – 24.11.2024
7	Підготувати текст магістерської роботи та супровідні документи	25.11.2024 – 30.11.2024

7. Дата видачі завдання " 22 " жовтня 2024 р.

Керівник проекту:

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

(підпис)

Георгій КУЛІНЧЕНКО

Здобувач:
студент гр. СУ.м-31

(підпис)

Ілля ДАВИДЕНКО

АНОТАЦІЯ

Тема роботи: Енергоефективна система керування стрічковим конвеєром гірничодобувної промисловості.

Автор: Давиденко Ілля Леонідович; Сумський державний університет; Суми.

Керівник: Кулінченко Георгій Васильович; доцент кафедри КСУ; кандидат технічних наук;

Робота містить вступ, чотири розділи та висновки в основному тексті, загальним обсягом 73 сторінки, 31 рисунок, 2 таблиці, 25 джерел інформації.

У роботі досліджено енергоефективні методи керування стрічковими конвеєрами, які використовуються в гірничодобувній промисловості. Проведено детальний аналіз сучасних методів керування електроприводами, розглянуто вплив різних факторів на енергоефективність системи.

Розроблено математичну модель двомасової системи конвеєра з урахуванням пружного зв'язку між масами.

Проведено моделювання одноконтурної системи керування на основі П-, ПІ- та ПІД-регуляторів для контуру швидкості. Аналіз показав, що ПІ-регулятор забезпечує найкращу стабільність, але не досягає необхідної точності регулювання. Для підвищення ефективності розроблено двоконтурну систему керування з додатковим контуром регулювання струму (внутрішній контур).

Проведене моделювання показало, що використання двох ПІ-регуляторів у внутрішньому та зовнішньому контурах забезпечує мінімальні втрати активної потужності та найвищу точність регулювання.

Розроблено SCADA-систему для моніторингу та керування системою конвеєра, що дозволяє забезпечити ефективну взаємодію між апаратною та програмною частинами системи.

Ключові слова: енергоефективність, двоконтурна система, ПІ-регулятор, конвеєр, стрічковий транспортер, електропривод, SCADA-система, пружний зв'язок, математичне моделювання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СТРІЧКОВИМИ КОНВЕЄРАМИ.....	8
1.1. Сучасні задачі автоматизації стрічкових конвеєрів.....	8
1.2. Технологічна схема та схема автоматизації.....	10
1.3. Принципи енергозбереження в стрічкових конвеєрах.....	13
1.4. Висновки до розділу.....	18
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	20
2.1 Технологічний розрахунок конвеєра.....	20
2.1.1 Розрахунок параметрів стрічки	20
2.1.2 Визначаємо параметри роликкоопор.....	21
2.1.3 Визначення натягу стрічки в точках контуру.	22
2.1.4 Розрахунок потужності електродвигуна	23
2.2 Вибір типу електропривода.....	23
2.3 Методи зниження енергоспоживання BLDC двигунів.....	28
2.4 Аналіз стрічкового конвеєру як об'єкта керування	35
2.5 Моделювання системи.....	37
2.5 Фактори стабілізації режимів функціонування	43
2.6 Алгоритми управління.....	46
2.7 Висновки до розділу.....	47
РОЗДІЛ 3. ВИБІР РЕГУЛЯТОРІВ	49
3.1 Типи регуляторів для конвеєрних систем.....	49
3.2 Переваги та недоліки різних регуляторів.....	61
3.3 Висновки до розділу.....	62
РОЗДІЛ 4. SCADA-СИСТЕМА.....	64
4.1 Програмне забезпечення для керування та моніторингу.....	64
4.2 Взаємодія апаратних і програмних компонентів	66
4.3 Висновки до розділу.....	67
ВИСНОВОК	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	71

Скорочення та умовні позначення

АС – асинхронний

ЕП – електропривод

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПІ - пропорційно-інтегральний

ПІД - пропорційно-інтегрально-Диференціальний

BLDC – brushless DC Motor

AI – Artificial Intelligence

ЕРС - електрорушійна сила

SEC - Specific Energy Consumption

ВСТУП

Автоматизація стрічкових конвеєрів є однією з основних складових модернізації виробничих процесів у сучасній промисловості. Впровадження автоматизованих систем управління дозволяє підприємствам значно підвищити ефективність своєї роботи, забезпечуючи високу продуктивність, оптимізацію енергоспоживання та стабільність транспортування матеріалів. Стрічкові конвеєри, завдяки своїй універсальності та можливості працювати в складних умовах, стали ключовим елементом у багатьох промислових галузях..

Сучасні стрічкові конвеєри працюють в умовах змінних навантажень, високих вібрацій і нерівномірного розподілу матеріалів. Це вимагає створення ефективних систем управління, які можуть оперативно адаптуватися до таких умов, компенсувати зовнішні збурення та зменшувати втрати енергії. Основним завданням автоматизації є забезпечення рівномірного і стабільного транспортування матеріалів при мінімальних витратах ресурсів та максимальній довговічності елементів системи.

У межах цієї роботи буде детально розглянуто ключові задачі автоматизації стрічкових конвеєрів, зокрема, питання управління, підтримки натягу стрічки, зниження рівня вібрацій, а також оптимізації пускових і гальмівних режимів.. Особливу увагу приділено енергозбереженню, як одному з ключових напрямків модернізації стрічкових конвеєрів. Розглядаються сучасні методи підвищення енергоефективності, включаючи використання регуляторів, та багатоконтурних систем керування.

Окрім цього, дослідження спрямоване на математичне моделювання динамічних процесів, таких як коливання полотна стрічки, що виникають під час її роботи. Розробка та аналіз моделей дозволить виявити критичні точки системи, які потребують оптимізації, а також сформулювати конкретні рекомендації щодо їхнього вдосконалення. У кінцевому результаті дослідження покликане підвищити загальну ефективність, енергоощадність та довговічність стрічкових конвеєрів, що має важливе значення для промислових підприємств України, які прагнуть відповідати сучасним вимогам до технологій.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СТРІЧКОВИМИ КОНВЕЄРАМИ

1.1. Сучасні задачі автоматизації стрічкових конвеєрів

Автоматизовані конвеєрні системи зарекомендували себе конкурентоспроможними в різних галузях, від виробництва до логістики, оскільки вони можуть ефективно транспортувати матеріали і товари на значні відстані. Однак з появою нових технологій та збільшенням вимог до цих систем виникає низка нових задач, які потребують нових рішень.

Однією з насущних завдань сучасних конвеєрних систем є управління потоком матеріалів з високою точністю. В даний час, коли компанії намагаються автоматизувати свої операції і залишатися максимально ефективними, конвеєрні системи повинні забезпечувати рівномірне та передбачуване надходження матеріалів, щоб виробничий процес не відчував простоїв чи дисбалансів. Це особливо важливо у гірничодобувній промисловості, де ефективне транспортування сипких матеріалів є ключем до забезпечення високої продуктивності.

Ефективне та автоматичне керування швидкістю руху стрічки за умов змінного навантаження є однією з цілей. Цей підхід допомагає зменшити витрати енергії на переміщення невеликих обсягів матеріалу, підтримує постійний рівень потоку, щоб уникнути перевантаження в подальших виробничих етапах, та знижує зношення механічних елементів. Для вирішення такого завдання використовуються частотні перетворювачі, датчики навантаження та розумні алгоритми управління.

Керування та підтримання натягу стрічки також має велике значення, коли йдеться про автоматизацію. Збільшений натяг стрічки може призвести до зношення стрічки та механізмів приводу, тоді як надто слабкий натяг змушує стрічку ковзати і може спричинити її пошкодження. Повідомляється, що сучасні автоматизовані системи гарантують контроль за мірою натягу стрічки, оскільки існують пристрої, які

називаються тензодатчиками, і вони працюють автоматично за певних умов. Дотримання правильних процедур дозволяє уникати аварій, пов'язаних з неправильним натягом стрічки, та продовжити термін служби обладнання.

Зменшення вібрації є, ще однією найзначнішою задачею автоматизованих систем. Наявність вібрації має шкідливий вплив на стан механічних елементів, спричиняючи їх швидше зношення, а також призводить до енергетичних втрат. Цю помилку запобігають впровадженням систем моніторингу, які допомагають визначити, що викликає вібрації, нерівномірний тиск. Ще одним важливим напрямком є оптимізація режимів роботи конвеєра: пуску, розгону та зупинки. Неправильно налаштовані режими роботи можуть спричинити пікове навантаження на приводи, ролики та стрічку з падінням їхнього терміну служби. Для уникнення цього доцільно використовувати технології плавного запуску та контрольованого гальмування. Інтелектуальні алгоритми дозволяють визначати оптимальні параметри цих процесів залежно від довжини конвеєра, рівня завантаження та умов експлуатації.

Сучасні автоматизовані системи також адаптуються до змінних умов роботи, таких як коливання обсягу транспортувального матеріалу. Це досягається за допомогою датчиків та програмного забезпечення, яке аналізує дані й прогнозує можливі зміни в роботі конвеєра [1]. Крім того, інтеграція інтелектуальних систем моніторингу та управління на основі AI дозволяє оптимізувати режими роботи, передбачати несправності й знизити рівень енергоспоживання. Такі системи стають важливою частиною інтегрованого управління підприємством, забезпечуючи його ефективність.

Таким чином, автоматизація стрічкових конвеєрів вирішує широкий спектр завдань, спрямованих на підвищення ефективності. Вирішення цих задач є важливим етапом до створення енергоефективних та енергоощадних транспортних систем.

1.2. Технологічна схема та схема автоматизації

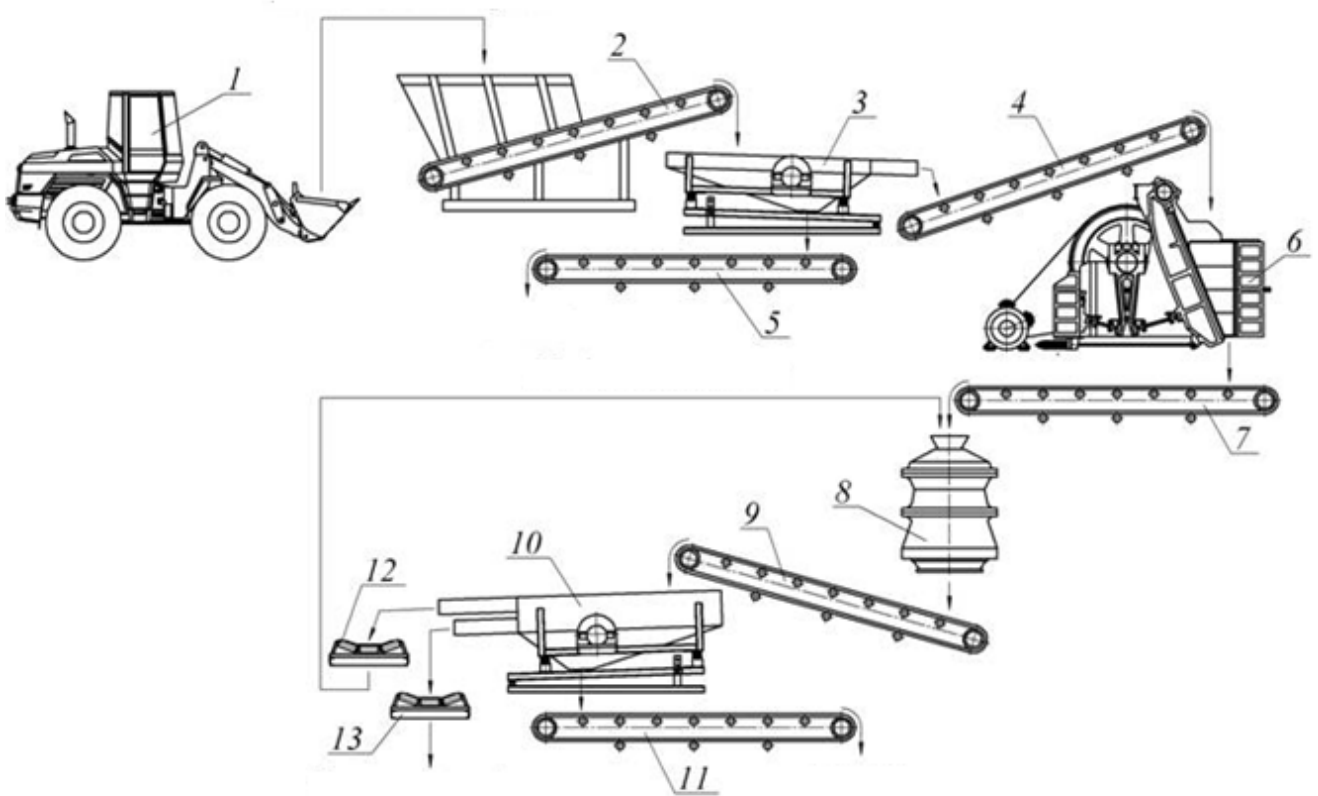


Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва

1 – фронтальний навантажувач; 2 - живильник бункерний; 3, 10 – гуркоти; 4, 5, 7, 9, 11, 12, 13 - конвеєри стрічкові; 6 - дробарка щокова; 8 - дробарка конусна.

Технологічний процес обробки гірничої сировини включає декілька етапів, розглянемо їх. Сировину фронтальним завантажувачем 1 завантажуємо в бункер, після чого бункерним живильником 2 подаємо на стрічковий конвеєр, який транспортуємо на первинне сортування гуркотами 3. На цьому етапі відокремлюють великі шматки матеріалу для подальшого подрібнення. Стрічковими конвеєрами 4, 5 відсортуваний матеріал транспортуємо до щокової дробарки 6, де його подрібнюють до необхідних розмірів. Транспортним стрічковим конвеєром 7 подрібнений матеріал відпрацьовуємо на другий етап обробки, в якому через додатковий гуркіт 10 переробляємо й відсортовуємо. Далі матеріал направляється на конусну дробарку 8, яка подрібнює його до фінальної фракції. Готовим продуктом транспортуємо стрічковими конвеєрами 9, 11, 12, 13 на бункер під заставу або на платформу на відвантаження.

В умовах гірничодобувної промисловості побудова системи управління конвеєром пов'язана з численними труднощами через особливості середовища експлуатації.[2] Однією з основних проблем є підвищений рівень пилу, який впливає на електроніку та механіку системи. Для забезпечення стабільної роботи необхідно використовувати герметичні шафи з високим ступенем захисту та системи фільтрації або закритого охолодження. Пил також ускладнює роботу датчиків, що вимагає застосування спеціальних пилозахисних рішень і регулярного обслуговування обладнання.

Ще одним викликом є високий рівень вібрацій, які виникають через роботу обладнання, що транспортує великі маси матеріалів, або через близькість дробарок. Вібрації негативно впливають на довговічність компонентів системи управління, що потребує спеціального кріплення і використання стійких до механічних навантажень матеріалів. У таких умовах менш надійні ДС-двигуни часто замінюють на АС-двигуни, які краще витримують вібраційні навантаження [3]. Додатково, вібраційна діагностика дозволяє вчасно виявляти проблеми й уникати аварій.

Особливі вимоги висуваються до систем управління в умовах вибухонебезпечного середовища, характерного для гірничодобувної галузі. Наявність вугільного пилу чи вибухонебезпечних газів вимагає використання обладнання з вибухозахистом та спеціальних технологій, які мінімізують ризик іскроутворення. Крім того, вплив зовнішніх чинників, таких як температура, вологість і погодні умови, вимагає додаткових заходів захисту [4]. Усе це ускладнює розробку і впровадження системи управління, вимагаючи інтеграції сучасних технологій для забезпечення безпеки та ефективності виробничих процесів.

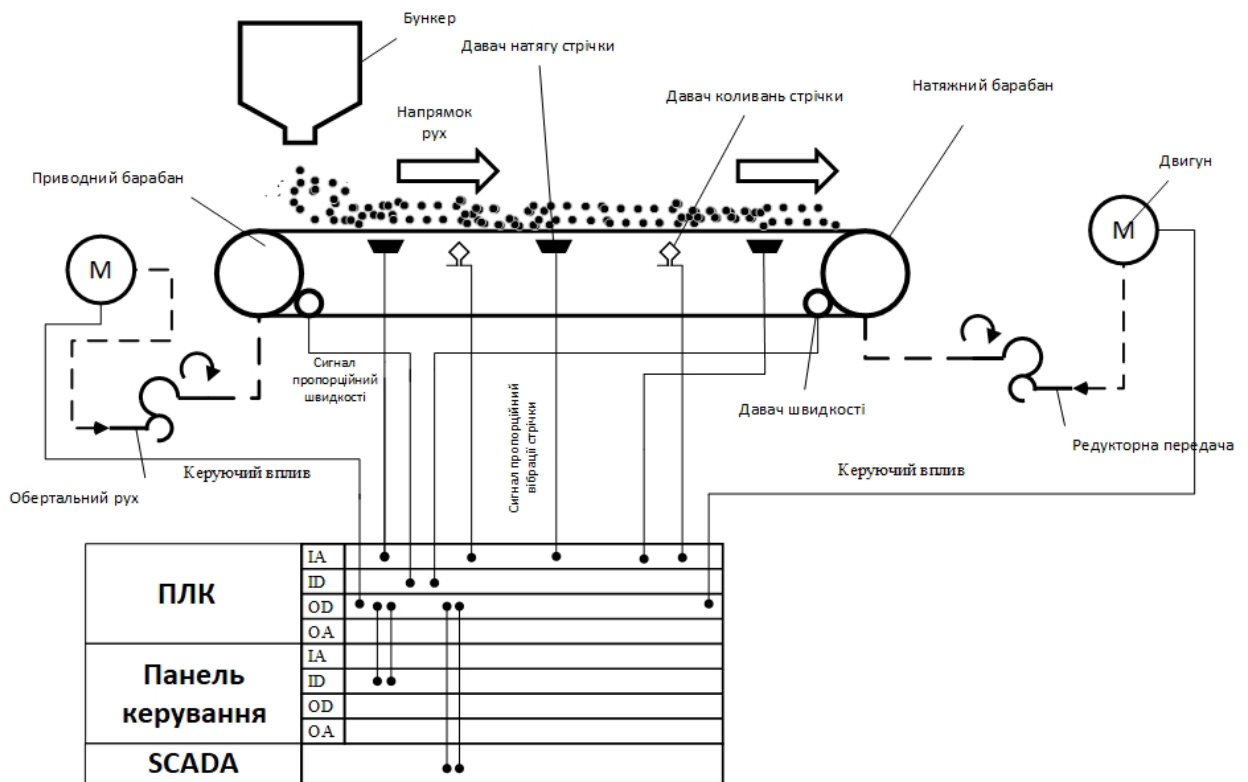


Рисунок 1.2 – Функціональна схема об'єкта керування

Наведена схема ілюструє типову конструкцію стрічкового конвеєра, який широко застосовується в різних галузях промисловості для транспортування сипких матеріалів.

Основні елементи схеми:

Бункер: Ємність для накопичення та подачі матеріалу на стрічку конвеєра.

Датчик натягу стрічки: контролює натяг стрічки, що є важливим параметром для ефективної роботи конвеєра та зменшення зносу його компонентів.

Натяжний барабан: Служить для регулювання натягу стрічки та забезпечення її оптимального прилягання до приводного барабана.

Приводний барабан: Основний робочий орган конвеєра, який передає рух від електродвигуна до стрічки.

Двигун (М): Електричний двигун, що забезпечує обертання приводного барабана.

Датчик швидкості: Вимірює швидкість руху стрічки, що є важливим параметром для контролю процесу транспортування.

Редукторна передача: Знижує швидкість обертання електродвигуна та збільшує крутний момент на валу приводного барабана.

ПЛК (програмований логічний контролер): який збирає інформацію від датчиків, обробляє її та формує команди для виконавчих механізмів.

Панель управління SCADA: Забезпечує взаємодію оператора з системою, дозволяючи контролювати роботу конвеєра, змінювати параметри та отримувати інформацію про його стан. Принцип роботи: Матеріал з бункера подається на стрічку конвеєра, яка приводиться в рух електродвигуном через редуктор.

Датчики натягу та швидкості передають інформацію про стан конвеєра в ПЛК, який, у свою чергу, коригує роботу двигуна та інших виконавчих механізмів для забезпечення оптимального режиму транспортування. Розуміння роботи кожного елемента схеми є важливим для розробки ефективних заходів енергозбереження. Наприклад, правильне налаштування натягу стрічки, оптимізація швидкості руху, використання енергоефективних електродвигунів та редукторів, а також застосування систем автоматизації дозволяють знизити споживання електроенергії конвеєром [5].

1.3. Принципи енергозбереження в стрічкових конвеєрах

Ефективне використання енергії є одним із найважливіших аспектів сучасних стрічкових конвеєрних систем, які є основними компонентами у багатьох галузях промисловості. Удосконалення таких систем спрямоване на зниження енергоспоживання та підвищення їхньої продуктивності, що особливо актуально в умовах сучасних вимог до екологічності та ефективності виробництва. Серед провідних підходів до досягнення цих цілей можна виділити оптимізацію роботи конвеєра, використання інтелектуальних технологій, регенерацію енергії та модернізацію обладнання [6].

Одним із ключових підходів до енергозбереження є адаптивне регулювання швидкості стрічки залежно від її завантаження. Суть цього підходу полягає в тому, що стрічка працює на оптимальній швидкості, яка визначається поточним обсягом матеріалу, що транспортується. Це стає можливим завдяки використанню частотних перетворювачів і автоматизованих систем керування, що дозволяють

динамічно змінювати параметри роботи конвеєра в реальному часі. Такий підхід забезпечує суттєве скорочення енергоспоживання, знижує механічне навантаження на стрічку та ролики, а також подовжує термін служби обладнання. Проте впровадження цього методу може вимагати значних початкових інвестицій, пов'язаних із придбанням і налаштуванням сучасного обладнання.

Контроль натягу стрічки та усунення вібрацій також є важливими складовими енергозбереження. Надмірний натяг або неконтрольовані вібрації не тільки збільшують витрати енергії, але й спричиняють підвищений знос механічних компонентів конвеєра [7]. Для розв'язання цих проблем використовуються датчики натягу та системи моніторингу вібрацій, які дозволяють автоматизувати контроль за цими параметрами. Оптимальне налаштування натягу стрічки запобігає її прослизанню чи перевантаженню, забезпечуючи стабільність роботи всієї системи. Водночас усунення надлишкових вібрацій сприяє зниженню втрат енергії та подовженню строку служби механізмів. Однак такі системи потребують високоточного обладнання та належного технічного обслуговування, що також збільшує витрати.

Інтелектуальні системи керування на основі штучного інтелекту є ще одним перспективним напрямком для зниження енергоспоживання. Ці технології аналізують великі обсяги даних, отриманих із датчиків, прогнозують можливі перевантаження та адаптують режими роботи конвеєра до поточних умов. Такі системи дозволяють не лише економити енергію, але й знижувати ризик несправностей, покращуючи загальну продуктивність. Впровадження подібних технологій потребує значних капіталовкладень, проте вони швидко окуповуються завдяки зменшенню витрат на енергоресурси та технічне обслуговування.

Ще одним дієвим способом енергозбереження є модернізація обладнання. Використання сучасних енергоефективних асинхронних двигунів, редукторів із високим коефіцієнтом корисної дії та легких конструкційних матеріалів дозволяє зменшити споживання енергії. Крім того, нове обладнання зазвичай має

триваліший строк експлуатації та вимагає менше обслуговування. Хоча витрати на модернізацію можуть бути значними, вони забезпечують суттєве підвищення ефективності системи та економію на енергоресурсах у майбутньому.

Також заслуговує на увагу технологія регенерації енергії, яка дозволяє використовувати кінетичну енергію конвеєра під час гальмування або зниження навантаження. Ця енергія за допомогою регенеративних приводів перетворюється на електричну і може бути використана для живлення інших систем підприємства або повернута до мережі. Хоча конвеєри зазвичай працюють у безперервному режимі, існують ситуації, коли відбувається зміна навантаження або гальмування, наприклад, під час зупинки для технічного обслуговування. У таких випадках система рекуперації забезпечує значну економію енергії. Однак впровадження цієї технології потребує спеціалізованого обладнання та значних початкових вкладень [8].

Комплексний підхід, який включає оптимізацію швидкості, контроль натягу, впровадження інтелектуальних алгоритмів, використання сучасного обладнання та технологій регенерації, є найбільш ефективним шляхом до досягнення енергозбереження. Він дозволяє не лише мінімізувати витрати енергії, але й підвищити надійність та продуктивність стрічкових конвеєрів, що є ключовим фактором успішної роботи промислових підприємств.

Але постає питання за яким критерієм оцінити енергоефективність системи, на цей момент відсутній критерій оцінки енергоефективності двох масового системи стрічкового транспортера з регульованими електроприводами. Загальним способом визначення ефективності СК є питома споживання енергії (Specific Energy Consumption) – SEC, яке виражається як відношення загальної кількості енергії яку спожила система на обсяг виконаної роботи.

$$SEC = \frac{E}{Q} = \frac{N_e}{Q_m \times L} \left[\frac{\text{Вт} \times \text{с}}{\text{кг} \times \text{м}} \right] \quad (1.1)$$

Де

E - загальна кількість спожитої енергії, кВт.

Q — обсяг виконаної роботи або кількість виготовленої продукції, Дж.

N_e - Електрична потужність приводу, що підводиться до конвеєра, Вт.

Q_m - фактична вантажопідйомність, кг/с.

L - Довжина траси конвеєра, м.

Після перетворення отримуємо:

$$SEC = \frac{RTM}{\sum m \times \eta} \left[\frac{H}{\text{кг}} \right] \quad (1.2)$$

Де

RTM - опору руху, Н;

$\sum m$ —загальна маса сипучого матеріалу, що перевозиться, кг;

η - ефективність приводного агрегату.

Отже є декілька шляхів підвищення енергоефективності, перший це зменшення опору руху(RTM), та збільшення обсягу виконаної роботи – отже підвищення швидкості транспортування, що дозволяє переміщати більше матеріалу за одиницю часу, збільшення ширини стрічки для одночасного транспортування більшого обсягу матеріалу. Але такі параметри не завжди можливо та доцільно збільшувати в силу обмежень самого технологічного процесу та ряду обмежень, таких як механічні, економічні, та особливостей виробництва.

Тому детально розглянемо зменшення RTM як спосіб підвищити ефективність системи. В загальному випадку це досягається шляхом оптимізації роликів і підшипників, використання низькотертяних роликів і підшипників із мінімальними втратами на тертя, а також регулярного обслуговування для запобігання зносу [9]. Поліпшення характеристик стрічки передбачає застосування матеріалів із низьким опором коченню, зниженим опором вигину та ковзання, що дозволяє зменшити первинні супротиви. Також оптимізація маршруту конвеєра - включає скорочення довжини траси, мінімізацію кутів повороту та усунення зайвих вигинів. Крім того, модернізація вузлів навантаження і розвантаження, наприклад, через оптимізацію жолобів і використання спеціальних вкладишів, сприяє зниженню вторинного супротиву та покращує загальну ефективність системи.

Коливальний рух полотна стрічкового конвеєра є динамічним процесом, що виникає внаслідок взаємодії між силою натягу стрічки, розподіленим навантаженням і механічними характеристиками тракту. Такі коливання спричиняють стрибкоподібне збільшення або зменшення моменту сили на приводах, що призводить до підвищеного енергоспоживання, зношення компонентів і зниження ефективності системи. Основними причинами виникнення коливань є нерівномірний розподіл матеріалу на стрічці, зміна швидкості приводу, недосконалість роликів опор і резонансні ефекти, коли частота зовнішніх збурень збігається з природною частотою коливань стрічки.

Коливання полотна можна описати рівнянням руху:

$$T(x, t) + \mu \frac{d^2 w}{dx^2} + F = 0 \quad (1.3)$$

де $T(x, t)$ — сила натягу стрічки, μ — маса стрічки на одиницю довжини, $w(x, t)$ — амплітуда коливань, а F — зовнішнє збурення. Коливання виникають через нерівномірний розподіл матеріалу, зміну швидкості приводу, або через резонансні явища, які виникають, коли частота зовнішніх збурень збігається з природною частотою системи. Резонансні явища можна оцінити за формулою природної частоти коливань:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{\mu L^2}} \quad (1.4)$$

де T — натяг стрічки, L — довжина прольоту між роликами, μ — маса стрічки. Зі збільшенням натягу T або зменшенням довжини прольоту L природна частота коливань зростає, що може знизити вплив зовнішніх збурень.

Динамічні процеси мають серйозні наслідки для роботи конвеєра. Стрибкоподібні зміни моменту сили на приводах викликають нестабільність у їх роботі, збільшують енергоспоживання і сприяють зношенню стрічки та роликів. Додаткові сили розтягнення, що виникають під час коливань, можуть спричинити втому матеріалу стрічки, що скорочує її термін служби. Крім того, коливання можуть викликати нестабільність транспортування матеріалів, що може призводити до їх розсипання або нерівномірного руху.

Для зменшення впливу коливань і зниження супротиву руху (RTM) використовуються кілька ефективних підходів. Одним із них є впровадження демпфуючих пристроїв, таких як амортизатори натягу стрічки або гнучкі опори роликів, які поглинають енергію коливань і зменшують їх амплітуду. Іншим важливим методом є використання систем управління приводами, які дозволяють динамічно адаптувати швидкість руху стрічки, використовуючи дані датчиків натягу, і активно компенсувати збурення.

Оптимізація траси конвеєра, включаючи зменшення довжини вільних прольотів, мінімізацію кутів вигину і підвищення жорсткості конструкції, також є важливими заходами для зниження коливань. Для точного прогнозування та розробки ефективних рішень використовують математичне моделювання, яке дозволяє ідентифікувати критичні точки системи, наприклад, резонансні частоти, і адаптувати конструкцію для мінімізації впливу динамічних процесів.

Врахування динамічного характеру коливань дозволяє знизити енергоспоживання, підвищити довговічність обладнання та покращити стабільність транспортування матеріалів. У результаті конвеєрна система стає більш ефективною, надійною і економічною в експлуатації.

1.4. Висновки до розділу

У цьому розділі я проаналізував сучасні задачі та тенденції автоматизації стрічкових конвеєрів, розглянув технологічні схеми їхньої роботи, а також визначив ключові принципи енергозбереження. Сучасні автоматизовані системи конвеєрного транспорту стали невід'ємною частиною промисловості, забезпечуючи ефективність, точність і безперервність виробничих процесів.

Серед основних задач, які постають перед системами автоматизації, я виділив управління матеріальними потоками, контроль натягу стрічки, зниження вібрацій, оптимізацію пускових і гальмівних режимів, а також адаптацію до змінних умов роботи. Ці виклики вирішуються за допомогою інтеграції інтелектуальних систем

моніторингу та управління, апаратних рішень, датчиків і програмного забезпечення, яке дозволяє аналізувати роботу конвеєра в реальному часі [10].

Також я підкреслив значення енергозбереження, яке є ключовим аспектом у сучасних конвеєрних системах. Оптимізація швидкості стрічки залежно від навантаження, контроль натягу та вібрацій, модернізація обладнання та впровадження технологій регенерації енергії сприяють значному скороченню енергоспоживання і підвищенню ефективності.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Технологічний розрахунок конвеєра

Вихідні дані для проектування:

- 1) Продуктивність $Q = 5$ т/год
- 2) Ширина стрічки $H = 0.6$ м
- 3) Довжина конвеєра $L = 10$ м
- 4) Швидкість стрічки $V = 2$ м/с
- 5) Робочий кут $\alpha = 0 - 22$ град
- 6) Тип редуктора барабана – черв'ячний

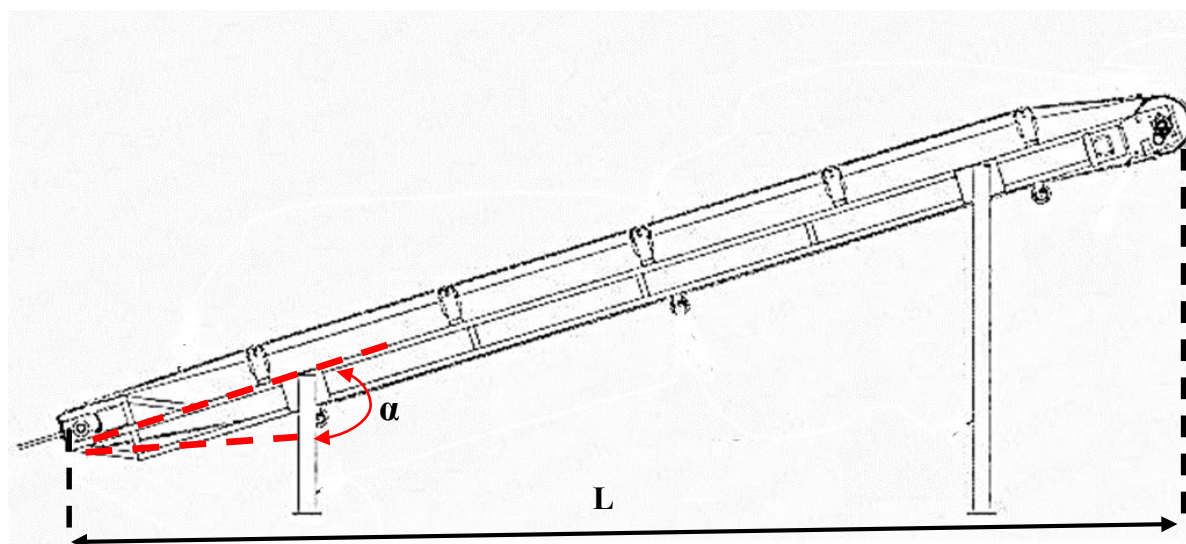


Рисунок 2.1 – Схема конвеєрного тракту

2.1.1 Розрахунок параметрів стрічки

Вибір типу стрічки залежить від умов експлуатації, властивостей матеріалу, що транспортується, і конструкції конвеєра. Гладкі гумові стрічки зазвичай використовуються на горизонтальних конвеєрах або при мінімальному нахилі, оскільки вони забезпечують рівномірне переміщення вантажів без втрат. Для роботи на похилих поверхнях оптимальним вибором є шевронні гумові стрічки, які завдяки виступам (шевронам) ефективно утримують сипучі та кускові матеріали, запобігаючи їх скочуванню. Якщо ж експлуатація відбувається у вологих, хімічно агресивних або екстремальних температурних умовах, краще підійдуть полімерні або модульні пластикові стрічки. Для транспортування

абразивних матеріалів потрібні теплостійкі чи зносостійкі стрічки, які мають підвищену міцність. Шевронні стрічки виділяються універсальністю для транспортування на крутих схилах, але їхня складніша структура потребує більш ретельного обслуговування.

Основні параметри для вибору стрічки:

- 1) Кількість тканиних прокладок $i=3$ при мінімальній міцності $K_p=55$ Н/мм.
- 2) Товщина $\delta_1 = 3$ мм (робочої поверхні), $\delta_2 = 2$ мм (не робочі поверхні), $\delta_3 = 1.35$ мм (прокладки).
- 3) Тип тканини БКНЛ (брезентово-кордний нейлон лінінг)
- 4) Клас міцності А - Висока стійкість до абразивного зношування. Використовується для транспортування матеріалів з високим ступенем абразивності, таких як пісок, щебінь, руди.

Визначаємо вагу всього конвеєрного тракту:

$$M_t = L \times q_{\text{л}} = L \times 1.1B(\delta_1 + \delta_2 + i\delta_3) = 59,73 \text{ кг} \quad (2.1)$$

Де, B - ширина стрічки, L - довжина стрічки, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ - товщини прокладок, мм; i - число тканинних прокладок.

2.1.2 Визначаємо параметри роликоопор

Роликоопора: П650-108 ГОСТ 22645-77

Вибір відстані між роликооперами:

Для насипних вантажів на робочій гілці $l'p = 1-1,5$ м; на холостий гілці $l''p = 2-3$ м.

Визначення погонних мас обертових частин роликоопор:

$$q'_p = \frac{Q'_p}{l'_p} = 13.7 \text{ кг/м} \quad (2.1)$$

$$q'' = \frac{Q''_p}{l''_p} = 12.5 \text{ кг/м} \quad (2.2)$$

Q_p' та Q_p'' - це маси обертових частин роликкоопор, які відповідають робочій і холостій гілкам конвеєра.

2.1.3 Визначення натягу стрічки в точках контуру.

Тяговий розрахунок конвеєра виконується шляхом послідовного підсумовування всіх сил опору руху стрічки по всій довжині траси. Контур траси розділяють на окремі ділянки залежно від виду опору: прямолінійні (горизонтальні або похилі), поворотні (відхилення стрічки на роликах чи барабанах), а також вузли завантаження і розвантаження.

Розрахунок розпочинають з точки, де стрічка сходить із приводного барабана, і поступово продовжують за всією трасою до точки, де стрічка повертається на приводний барабан.

Сили опору руху стрічки на прямолінійних ділянках розраховуються окремо для верхньої (робочої) та нижньої (холостої) гілок конвеєра. Опір для робочої та холостої гілок визначається за відповідними формулами.

$$\begin{aligned} S_2 &= S_1 + W_{1-2} \\ S_3 &= S_2 + W_{3-4} = S_1 + W_{1-2} + W_{2-3} \\ S_4 &= S_1 + W_{3-4} = S_1 + W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Опір на холостій гілці:

$$W_{1-2} = (q + q_p) \times g \times L \times \cos \beta \times W' - q \times g \times L \times \sin \beta = 272.95 \text{H} \quad (2.4)$$

Опір на робочій гілці:

$$W_{3-4} = (q + q_p) \times g \times L \times \cos \beta \times W' + (q + q_p) \times g \times L \times \sin \beta = 732.61 \text{H} \quad (2.5)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння; L - довжина конвеєра, м;

W' - коефіцієнт опору руху стрічки по роликкоопор (менші значення - для прямих роликкоопор, великі - для жолобчастих).

Невідомі величини S_1 и S_4 визначаються вирішенням наступної системи рівнянь:

$$\begin{aligned}
S_4 &= S_1 + W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} \\
S_4 &= S_1 e^{i\alpha} \\
W_{2-3} &= 0.05 S_2 = 0.05 (S_1 + W_{1-2}) \\
S_1 e^{i\alpha} - S_1 &= W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} \\
S_1 e^{i\alpha} - S_1 - 0.05 S_1 &= W_{1-2} + 0.05 W_{1-2} + W_{3-4} \\
S_1 (e^{i\alpha} - 1 - 0.05) &= W_{1-2} + 0.05 W_{1-2} + W_{3-4}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

$$S_1 = \frac{W_{1-2} + 0.05 W_{1-2} + W_{3-4}}{0.82} = 4288 \text{ Н} \tag{2.7}$$

$$S_4 = S_1 + W_{3-4} = 4288 + 732,6 = 5020,6 \text{ Н} \tag{2.8}$$

Окружне зусилля на приводному барабані визначається за формулою:

$$F_t = (S_4 - S_1) + 0.03(S_4 + S_1) = 878.62 \text{ Н} \tag{2.9}$$

2.1.4 Розрахунок потужності електродвигуна

$$P_{TP} = \frac{F_t \times V}{1000 \times \eta} = \frac{878,62 \times 2}{1000 \times 0.8} = 2.2 \text{ кВт} \tag{2.10}$$

Де F_t – окружне зусилля на приводному барабані, V – швидкість руху конвеєрного тракту, η – ККД двигуна (береться наближений ккд до реальних двигунів)

2.2 Вибір типу електропривода

У сучасних системах транспортування матеріалів стрічкові конвеєри відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного і безперервного виробничого циклу. Проте, з огляду на зростаючі вимоги до енергозбереження та продуктивності, вибір оптимального електропривода стає критичним завданням. Традиційні асинхронні двигуни та двигуни постійного струму, незважаючи на їхню широку поширеність, мають низку недоліків, які обмежують їхню ефективність в умовах динамічних навантажень.

Асинхронні двигуни характеризуються "м'якою" механічною характеристикою, яка полягає у значній залежності швидкості обертання від навантаження. При

збільшенні навантаження відбувається зниження швидкості через зростання ковзання, що ускладнює підтримання стабільного режиму роботи. Ця особливість, разом із високими енергетичними втратами при змінних режимах, робить їх менш придатними для сучасних конвеєрних систем, які потребують точного регулювання швидкості та моменту.

Двигуни постійного струму, хоча і забезпечують високу точність керування, програють через складність експлуатації в агресивних умовах, характерних для гірничодобувної та важкої промисловості. Їхня схильність до зношування щітково-колекторного вузла та ризик іскроутворення обмежують використання в умовах високої запиленості чи вибухонебезпечного середовища.

У цьому контексті безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) виступають як ефективне рішення. Вони поєднують високу енергоефективність із надійністю, забезпечують стабільну роботу навіть за змінних умов навантаження та мають довгий термін експлуатації завдяки відсутності механічного зносу. Крім того, BLDC-двигуни характеризуються точністю керування швидкістю та моментом, що дозволяє ефективно адаптувати систему до динамічних змін у потоці матеріалів.

Асинхронні двигуни (АД) є одними з найбільш поширених типів електроприводів завдяки простоті конструкції, надійності та відносно низькій вартості. Їхня робота базується на використанні змінного струму, а принцип керування полягає у зміні частоти для регулювання швидкості обертання ротора. Це забезпечує гнучкість в управлінні, але водночас залежність моменту від швидкості обертання може бути недоліком при змінному навантаженні. Асинхронні двигуни мають високу стійкість до механічних пошкоджень та зовнішніх впливів, однак ефективність їх роботи на низьких швидкостях і точність регулювання залишають бажати кращого. У гірничодобувній промисловості такі двигуни широко застосовуються, але потребують додаткових заходів для підвищення їхньої енергоефективності. Через свою "м'яку" механічну характеристику асинхронний двигун має низку обмежень,

які впливають на його ефективність і доцільність використання в певних умовах. Основна проблема полягає в тому, що швидкість обертання ротора помітно залежить від навантаження: зі збільшенням навантаження швидкість зменшується через зростання ковзання. Це ускладнює підтримання стабільної швидкості, особливо у випадках, коли навантаження змінюється динамічно. У гірничодобувній промисловості, де рівномірність транспортування матеріалів конвеєром є критично важливою, такі особливості можуть призводити до збоїв у роботі всієї системи.

Крім того, "м'яка" характеристика двигуна створює складнощі для точного регулювання швидкості. Щоб забезпечити належне управління, необхідно використовувати додаткове обладнання, таке як частотні перетворювачі, що підвищує загальну вартість системи та ускладнює її експлуатацію. Оскільки ковзання двигуна зростає при навантаженні, це також спричиняє збільшення енергетичних втрат, особливо в роторі. Такий режим роботи негативно впливає на енергоефективність, що є критично важливим показником у сучасних промислових системах.

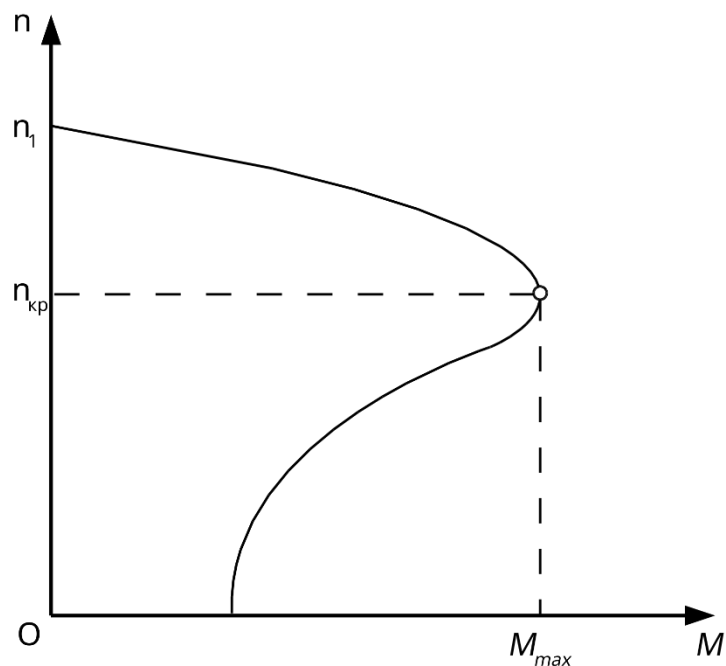


Рисунок 2.2– Механічна характеристика АД

Повільна реакція на зміну навантаження є ще одним недоліком асинхронного двигуна, зумовленим його "м'якою" механічною характеристикою. У складних

умовах роботи, таких як швидка зміна ваги матеріалу на конвеєрі, двигун не може забезпечити необхідний динамічний відгук, що може призвести до нерівномірного транспортування та перевантаження системи. Разом із цим зростає ризик перегріву, оскільки при високому ковзанні двигун починає виділяти більше тепла, а це може спричинити скорочення терміну служби обладнання та підвищення ризику поломок.

Двигуни постійного струму (DC) забезпечують високу точність і керованість, що робить їх привабливими для застосувань, де потрібен точний контроль швидкості та моменту. DC-двигуни відрізняються швидким динамічним відгуком і простотою в налаштуванні. Однак у гірничодобувних умовах їх використання є обмеженим через низьку стійкість до пилу, вібрацій і впливу високих температур. Крім того, необхідність регулярного технічного обслуговування через знос щіток і комутаторів підвищує експлуатаційні витрати. Особливо важливою проблемою є схильність двигунів постійного струму до утворення іскор у щітково-колекторному вузлі, що становить значний ризик у вибухонебезпечному середовищі, характерному для гірничодобувної промисловості. Наявність вугільного пилу чи метану створює умови, за яких навіть незначна іскра може стати причиною займання або вибуху. Це не лише підвищує небезпеку використання DC-двигунів, але й потребує складних і дорогих заходів безпеки, таких як герметизація вузлів чи використання спеціалізованих вибухозахищених конструкцій, що значно знижує їхню економічну ефективність і доцільність у таких умовах.

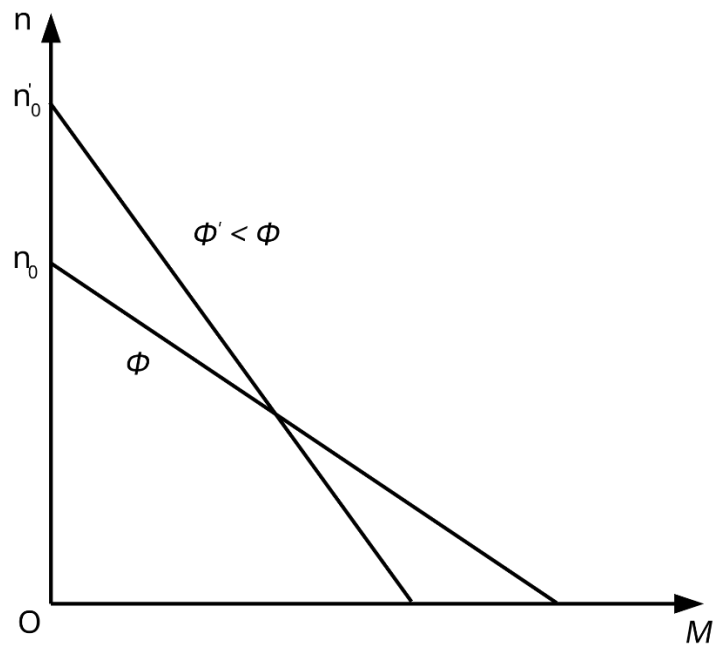


Рисунок 2.3– Механічна характеристика ДПС

Безколекторні двигуни (BLDC) є сучасним типом електроприводів, які використовують електронне комутування замість механічного, що усуває потребу в щітках і комутаторах [11]. Принцип роботи BLDC заснований на взаємодії магнітного поля ротора і струму в обмотках статора, керованого за допомогою електронного блоку. Це дозволяє досягти високої енергоефективності, точності керування та надійності. BLDC-двигуни мають високий коефіцієнт корисної дії, здатність працювати в умовах змінного навантаження та довгий термін служби завдяки відсутності механічного зносу. Водночас основними недоліками є їхня вища вартість і складність електронного керування, що потребує додаткових інтелектуальних пристроїв для розробки системи.

У контексті створення енергоефективної системи керування стрічковим конвеєром гірничодобувної промисловості безколекторні двигуни виявляються найбільш оптимальним вибором. Вони забезпечують необхідну стійкість до агресивного середовища, високу точність регулювання, енергоефективність і довговічність, що робить їх економічно доцільними у довгостроковій перспективі. Хоча початкові витрати на їхню установку можуть бути вищими, ці інвестиції окупаються за

рахунок зниження енергоспоживання, менших витрат на обслуговування та підвищення продуктивності системи загалом.

2.3 Методи зниження енергоспоживання BLDC двигунів

Безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) широко використовуються в сучасній техніці завдяки своїй високій ефективності, надійності та довговічності. Для їх управління існує два основних методи: трапецієве управління та векторне регулювання. Кожен із цих підходів має свої особливості, переваги та обмеження, що визначають їхню сферу застосування [12].

Трапецієподібне управління є найбільш простим методом, що базується на використанні трапецієподібного профілю зворотної електрорушійної сили (ЕРС), характерного для більшості BLDC-двигунів. Основний принцип цього методу полягає в тому, що струм у фазах двигуна комутується відповідно до положення ротора, яке визначається за допомогою датчиків Холла або енкодера. В моменти, коли зворотна ЕРС у фазі досягає оптимального значення, здійснюється комутація, що забезпечує рух ротора. Цей метод характеризується простотою реалізації та низькою вартістю, оскільки не потребує складних алгоритмів або високопродуктивних мікроконтролерів.

Векторне регулювання (Field-Oriented Control, FOC) є складнішим, але значно ефективнішим підходом до управління BLDC-двигунами. Цей метод забезпечує точний контроль моменту і швидкості двигуна шляхом розділення струмів у фазах на дві компоненти: одну, яка відповідає за створення магнітного поля ротора (d-компонента), та іншу, що формує обертальний момент (q-компонента). Векторне регулювання передбачає перехід між фазними координатами (А, В, С) і обертовою системою координат (d, q) за допомогою спеціальних математичних перетворень (Clark-Park Transformation). Хоча цей метод потребує складнішої апаратної та програмної реалізації, а також ретельного налаштування параметрів, він має забезпечувати високий рівень ефективності [13].

Таким чином, далі в роботі буде розглянуті два методи управління BLDC двигунами, з метою оцінки їх енергоефективності.

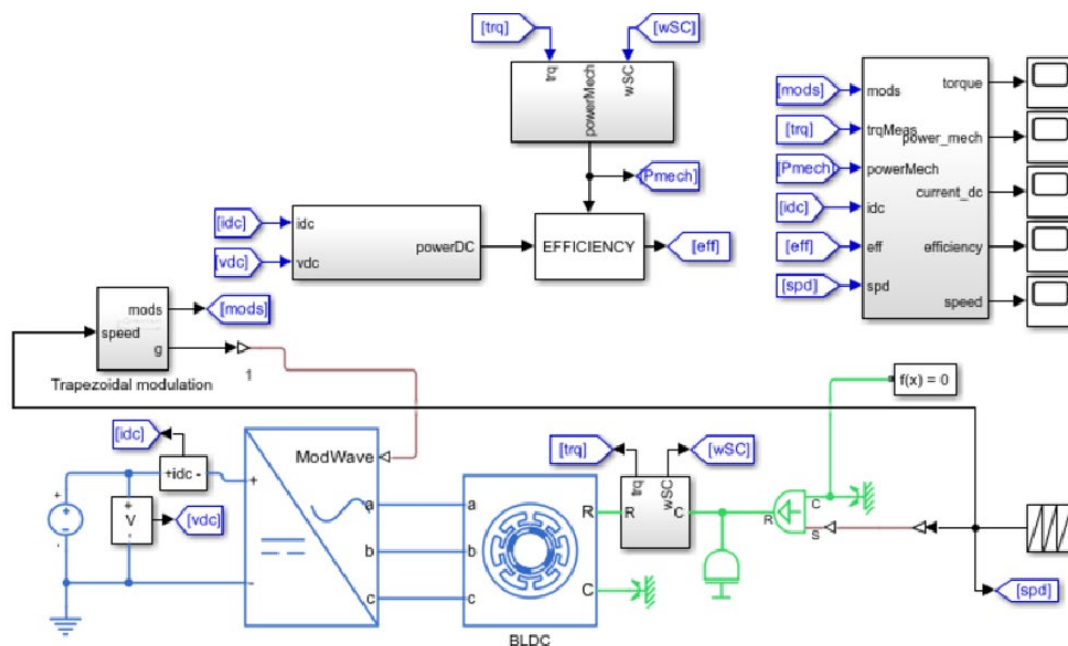


Рисунок 2.4 – Математична модель BLDC - двигуна

На рис 2.5 зображена модель, яка демонструє процес обчислення робочих характеристик безщіткового двигуна постійного струму (BLDC). Ця модель дозволяє аналізувати ключові показники продуктивності двигуна, такі як крутний момент, механічна потужність, струм і ефективність, при різних швидкостях та навантаженнях.

У лівій частині схеми знаходиться джерело постійного струму (DC), яке забезпечує живлення для інвертора і двигуна. Параметри напруги та струму на цьому етапі вимірюються і використовуються для обчислення споживаної потужності, що є важливим для визначення енергоефективності системи.

Блок генерації сигналів на фази моторів дає змогу змінювати форму напруги фаз. Цей блок генерує сигнали керування фазами BLDC-двигуна, такими як трапецієві, та синусоїдні. Сигнали синхронізуються з положенням ротора, що дозволяє максимально ефективно використовувати електричну енергію для створення крутного моменту. Для аналізу продуктивності використовується підсистема

обчислення характеристик, розташована у верхній частині схеми. Цей блок розраховує механічну потужність, крутний момент, споживаний струм та ефективність двигуна. Зокрема, обчислюються пікові значення цих параметрів для різних швидкостей, що дозволяє будувати криві продуктивності. Результати моделювання представлені у вигляді графіків, які демонструють залежність продуктивності від швидкості. Контури керування, реалізовані на схемі, забезпечують стабільну роботу всієї системи. Використання PI-регуляторів та сигналів зворотного зв'язку дозволяє забезпечити точний контроль швидкості та моменту двигуна.

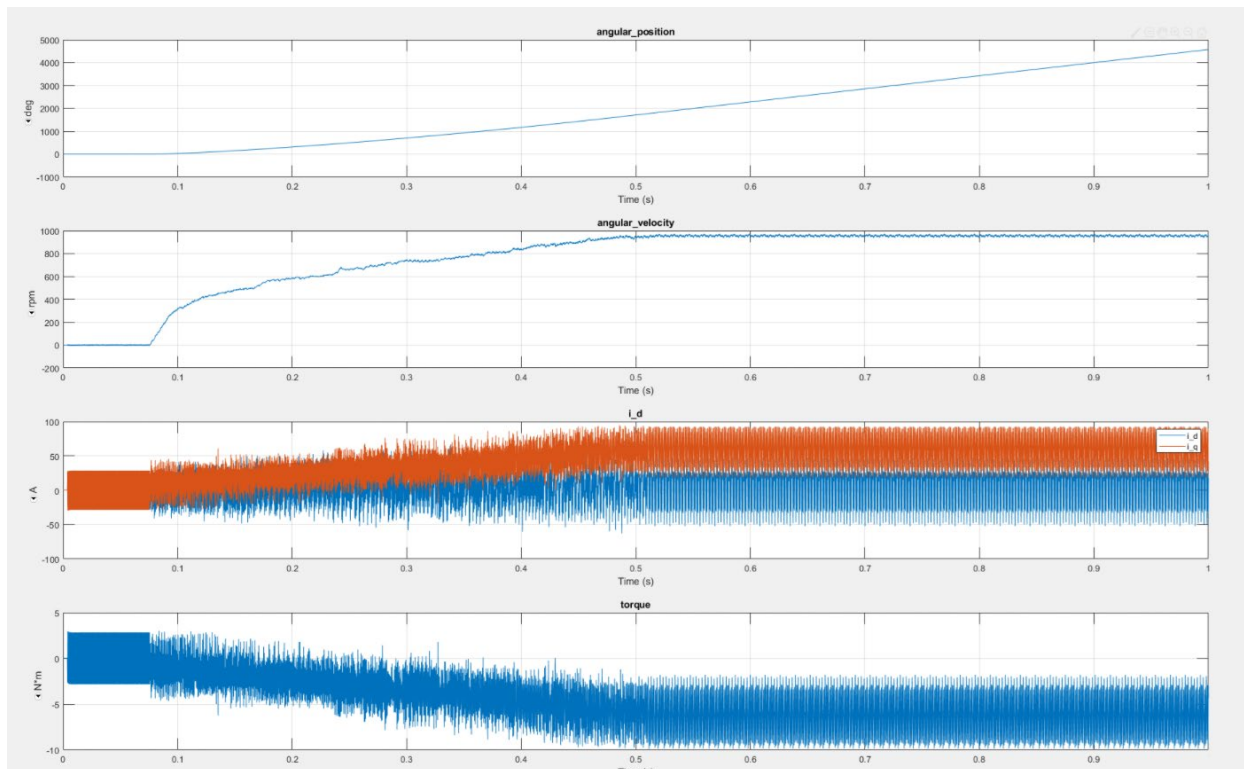


Рисунок 2.5 - Вихідні характеристики моделі BLDC двигуна при трапецієподібному управлінні

На першому графіку показана кутова позиція ротора (angular position) двигуна у функції часу. Графік демонструє постійне зростання кутової позиції, що свідчить про рівномірний обертальний рух ротора. Це відповідає нормальному режиму роботи двигуна, коли його обертання забезпечується стабільними сигналами керування.

Другий графік відображає кутову швидкість (angular velocity) двигуна. На

початку спостерігається її різке зростання, що відповідає фазі розгону двигуна. Після цього швидкість стабілізується, що вказує на встановлений режим роботи. Невеликі коливання швидкості у встановленому режимі можуть бути пов'язані з особливостями трапецієподібної модуляції або впливом пульсацій моменту.

Третій графік ілюструє струми фаз обмоток двигуна. Помітно, що струми мають коливальний характер, що є типовим для трапецієподібного управління. Коливання сигналів струмів свідчить про характерний для такого типу управління спосіб комутації фаз. Водночас амплітуда струмів поступово стабілізується, що відповідає встановленому режиму роботи двигуна.

На четвертому графіку представлено електромагнітний момент (torque), створюваний двигуном. У фазі розгону момент різко зростає, досягаючи свого пікового значення, а потім стабілізується у встановленому режимі. Однак спостерігаються пульсації моменту, характерні для трапецієподібного управління, що пов'язано з дискретністю комутації фаз обмоток.

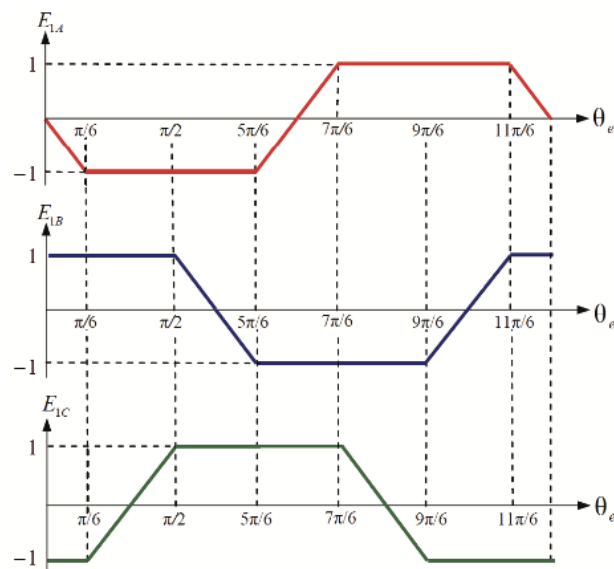


Рисунок 2.6 – Форма ЕРС

На зображенні показані графіки електрорушійних сил (ЕРС) для трьох фаз BLDC-двигуна залежно від електричного кута. Графіки демонструють трапецієподібний характер зміни ЕРС, який є типовим для двигунів з трапецієподібним управлінням.

Кожна фаза має трапецієподібну форму ЕРС. На плоских ділянках значення ЕРС залишається стабільним, а на перехідних ділянках воно змінюється лінійно. Ці перехідні ділянки відповідають моментам, коли магнітне поле двигуна змінюється між фазами. Графіки трьох фаз зміщені одна відносно одної на 120 градусів електричного кута. Таке зміщення забезпечує рівномірний обертальний момент двигуна, дозволяючи мінімізувати пульсації і забезпечити плавну роботу. Це є основою для ефективної роботи BLDC-двигуна. Горизонтальна вісь графіка відображає електричний кут, який змінюється протягом одного електричного циклу. Вертикальна вісь показує значення ЕРС у нормованих одиницях, які коливаються між мінімальним і максимальним рівнем. Ці графіки також показують моменти комутації фаз, які відбуваються у точках, де значення ЕРС переходить через нуль або залишається стабільним. Ці моменти є важливими для визначення алгоритмів комутації фаз і оптимізації роботи двигуна.

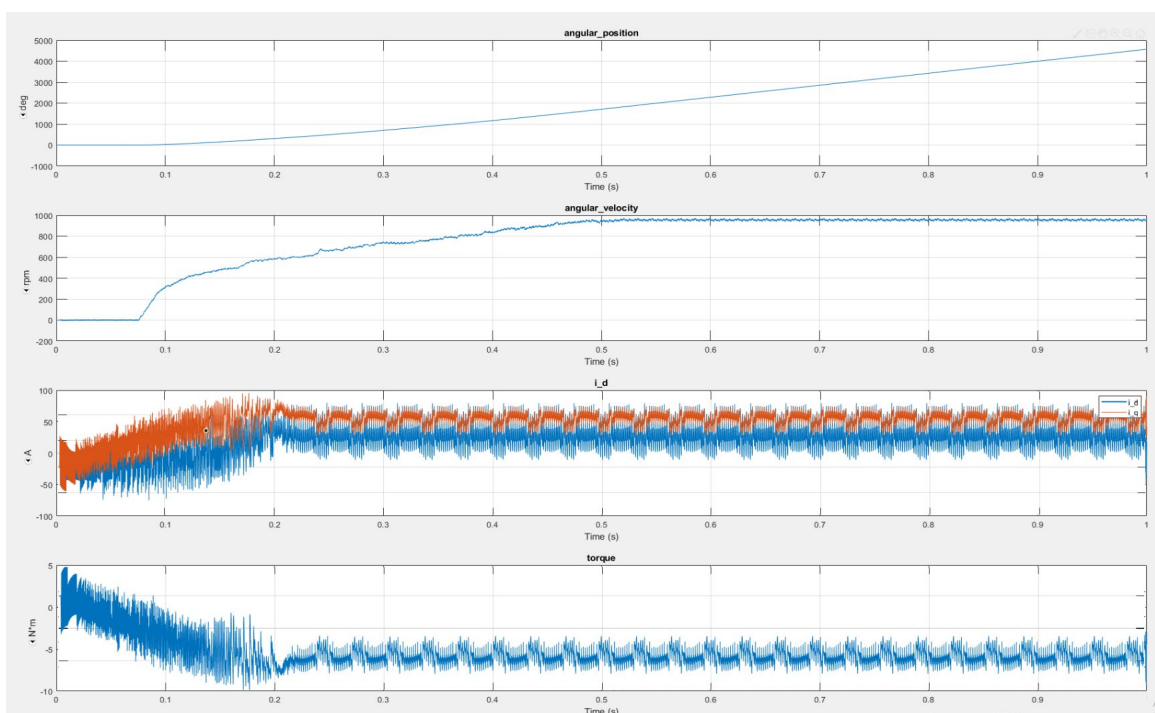


Рисунок 2.7 - Вихідні характеристики моделі BLDC двигуна при векторному регулюванні

Струми у фазах обмоток двигуна. Фазні струми демонструють змінну амплітуду і характерний хвилеподібний профіль, який відповідає роботі двигуна в умовах векторного управління. Стабільна амплітуда струмів після фази розгону вказує на досягнення двигуном робочого режиму. Електромагнітний момент у фазі розгону

різко зростає, а потім стабілізується в робочому режимі. Коливання моменту незначні, що є характерною особливістю векторного управління, яке зменшує пульсації порівняно з іншими методами.

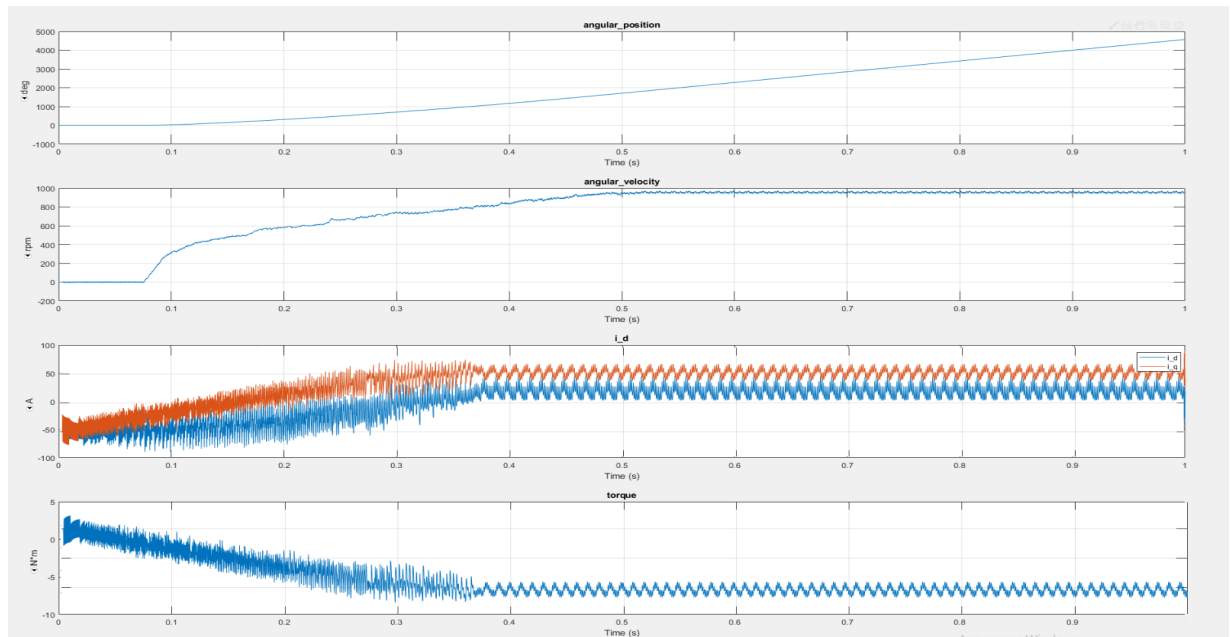


Рисунок 2.8 - Вихідні характеристики моделі BLDC двигуна при векторному регулюванні з ПІ-регулятором

У системі без ПІ-регулятора розгін двигуна супроводжувався значними коливаннями моменту і швидкості, тоді як з регулятором цей процес став значно плавнішим. У стабільному режимі коливання швидкості, моменту та струмів у фазах значно зменшилися при використанні ПІ-регулятора. Фазні струми на графіку без регулятора мали більшу амплітуду коливань, що погіршувало енергоефективність. У свою чергу, з ПІ-регулятором ці коливання суттєво згладжуються, забезпечуючи стабільну роботу двигуна. Але швидкість виходу на робочій режим зменшилась. Таким чином за допомогою математичної моделі був згенерований графік потужностей за 5 секунд роботи двигуна, результати представлено на рис.2.9

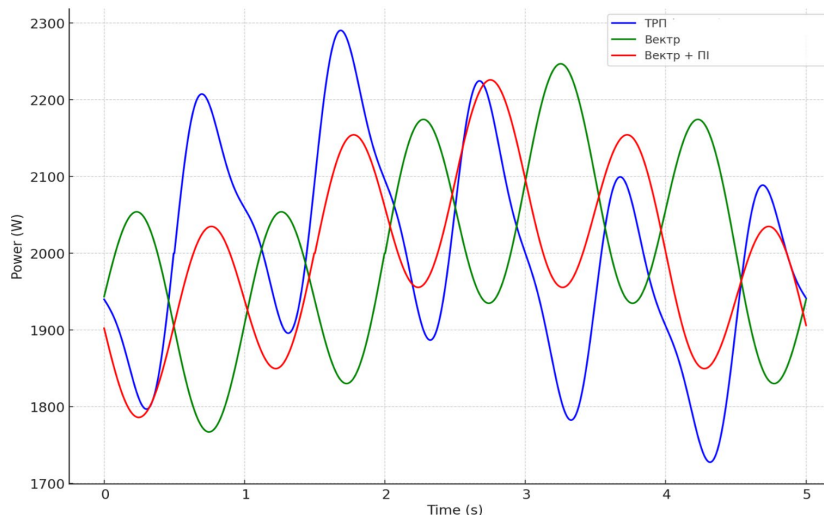


Рисунок 2.9 – Залежність потужності від метода керування

Рисунок 2.9 демонструє залежність потужності двигуна від методу керування при трьох різних сценаріях управління: трапецієподібному, векторному, а також векторному із використанням ПІ-регулятора.

Синя крива ("ТРП"): Потужність при трапецієподібному керуванні має значні коливання. Це свідчить про менш стабільну роботу системи, де потужність змінюється внаслідок дискретної природи комутації фаз. Таке керування характерне для систем із простими алгоритмами, які не оптимізують роботу моменту та потужності [13].

Зелена крива ("Вектр"): Потужність при векторному керуванні демонструє менші пульсації, що вказує на кращу стабільність порівняно з трапецієподібним керуванням. Векторне керування дозволяє ефективніше контролювати фазні струми та електромагнітний момент, забезпечуючи більш стабільний режим роботи.

Червона крива ("Вектр + ПІ"): Потужність при векторному керуванні із застосуванням ПІ-регулятора є найбільш стабільною. Коливання майже зведені до мінімуму, що свідчить про високий рівень компенсації динамічних змін у системі. Це забезпечує максимально ефективну роботу двигуна та мінімізацію енергетичних втрат. У процесі дослідження різних методів керування BLDC-двигуном було виявлено, що кожен метод має свої переваги та недоліки.

Трапецієподібне керування, хоча і є найпростішим в реалізації, супроводжується значними пульсаціями моменту через дискретну природу комутації фаз, що призводить до нерівномірності потужності. Векторне керування демонструє суттєве зменшення пульсацій, забезпечуючи більш стабільний режим роботи двигуна за рахунок точного контролю фазних струмів. Використання ПІ-регулятора додатково знижує амплітуду пульсацій моменту і підвищує енергоефективність системи [14].

Пульсації моменту, які спостерігаються при комутації обмоток, залежать від параметрів двигуна, включаючи опір та індуктивність фаз, а також від співвідношення між напругою живлення та зворотною ЕРС. Ці пульсації впливають на стабільність швидкості, але їхній вплив значною мірою компенсується за рахунок інерції системи. З іншого боку, комутаційні пульсації зростають зі збільшенням струмів і моменту, що потребує ретельного налаштування параметрів керування.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання векторного регулювання з ПІ-регулятором у системах, де важливі точність і стабільність роботи двигуна. Це дозволяє мінімізувати енергетичні втрати та підвищити ефективність приводу навіть у складних умовах експлуатації.

2.4 Аналіз стрічкового конвеєру як об'єкта керування

Двомасова система стрічкового конвеєра є складним динамічним об'єктом керування, який характеризується взаємодією двох основних компонентів: двигунів (активної маси) та стрічки разом із матеріалом, що транспортується (пасивної маси). Основним завданням автоматизованої системи керування є забезпечення ефективного транспортування матеріалів при оптимізації енерговитрат, зниженні динамічних перевантажень та забезпеченні стабільності роботи.

Особливості двомасової системи стрічкового конвеєра

Двомасова система характеризується пружними зв'язками між двигуном і стрічкою, що спричиняє появу коливань у системі. Ці коливання є наслідком нерівномірного завантаження стрічки, змін швидкості руху або інерційних явищ у системі. Такі фактори впливають на стабільність роботи конвеєра, викликаючи нерівномірне транспортування та підвищене зношування механічних компонентів.

Під час аналізу системи керування слід враховувати наступні динамічні параметри(зовнішні впливи):

Пружність стрічки – обумовлює розтягування та скорочення стрічки під навантаженням.

Інерція двигуна та маси вантажу – впливає на час реакції системи на зміну зовнішніх умов.

Амплітуда коливань – впливає на енергоспоживання і довговічність системи.

Стрибокподібне навантаження – сприяє різкої зміни моменту сили на двигунах.

Таким чином, автоматизація двомасової системи стрічкового конвеєра вимагає комплексного підходу до проектування контурів керування, що враховує динамічні особливості системи, такі як пружність стрічки, інерційні навантаження та вплив зовнішніх збурень [15]. Використання сучасних BLDC-двигунів із векторним керуванням та алгоритмами компенсації динамічних процесів забезпечує стабільність транспортування, підвищує енергоефективність і знижує зношування механічних компонентів. Для досягнення максимальної ефективності керування необхідно застосовувати багаторівневу систему регулювання, яка включає зовнішній контур для регулювання швидкості та внутрішній контур для контролю струму. Така структура забезпечує точність управління, швидкість реакції на змінні навантаження та плавність роботи системи, що є ключовими факторами для підвищення продуктивності й надійності конвеєра.

2.5 Моделювання системи

Двомасова модель є узагальненою еквівалентною механічною системою, що описує динаміку обертання валів електроприводу та виконавчого механізму через пружні та демпфуючі з'єднання.

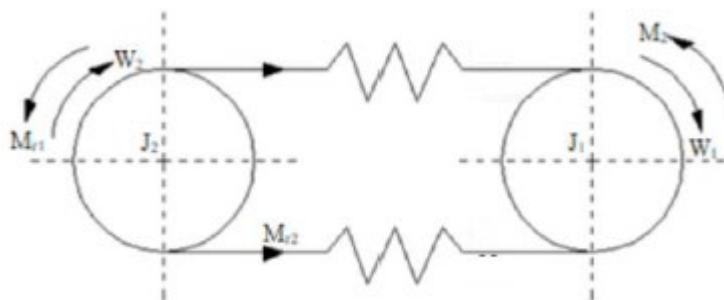


Рисунок 2.10 - Еквівалентна схема стрічкового конвеєра.

Основні рівняння моделі:

Модель враховує як пружні деформації, так і в'язке тертя між двома масами. В результаті отримуємо систему диференціально-інтегральних рівнянь руху, які описують поведінку системи:

$$\begin{cases} J_1 \frac{dw_1}{dt} = M_1 - M_B - M_c \\ J_2 \frac{dw_2}{dt} = M_c - M_B - M_2 \\ M_c = C(\varphi_1 - \varphi_2) \\ M_B = \beta \frac{d}{dt}(\varphi_1 - \varphi_2) \end{cases} \quad (2.11)$$

J_1, J_2 – моменти інерції першої та другої мас.

C – коефіцієнт жорсткості пружного зв'язку між масами.

β – коефіцієнт в'язкого тертя між масами.

φ_1, φ_2 – кути повороту першої та другої мас.

ω_1, ω_2 – кутові швидкості обертання обох мас.

M_1, M_2 – моменти сил, що діють на маси.

M_c – статичний момент на валу двигуна.

Передаточні функції дозволяють перейти до операторного опису системи через оператор Лапласа $p = \frac{d}{dt}$

Передаточна функція за керуючим впливом (момент двигуна $M(p)$) для кутової швидкості другої маси $\omega_2(p)$:

$$W_{w2(p)} = \frac{w_2(p)}{M(p)} = \frac{W_1 W_2 W_3}{1 + W_1 W_2 + W_2 W_3 + W_3 W_1} \quad (2.11)$$

Передаточна функція для першої маси $\omega_1(p)$:

$$W_{w1(p)} = \frac{w_1(p)}{M(p)} = \frac{W_1(1 + W_2 W_3)}{1 + W_1 W_2 + W_2 W_3 + W_3 W_1} \quad (2.12)$$

Передаточна функція за збуренням $M_c(p)$:

$$W'_{w2} = \frac{w_2(p)}{-M_c(p)} = \frac{W_3(1 + W_1 W_2)}{1 + W_1 W_2 + W_2 W_3 + W_3 W_1} \quad (2.13)$$

Де:

$W_1 = \frac{1}{J_1 p}$ – момент інерції першого двигуна

$W_2 = \frac{c}{p} + \beta_{вт}$ – пружний та демпфуючий зв'язок.

$W_3 = \frac{1}{J_2 p}$ момент інерції першого двигуна

Розрахунок моменту інерції двигуна

$$J_1 = \frac{Mt}{w} = 0.309 \quad (2.14)$$

Де:

M - момент двигуна 187.9 Н\м

t – час розгону 0.5 сек виходячи з рис(2.5)

w – кутова швидкість

Так як, два двигуна ідентичні за своїми параметрами то приймаємо що у них однаковий момент інерції, відповідно з цього і передатні функції, отже:

$$W_1 = W_3 = \frac{1}{J_1 p} \quad (2.15)$$

Розрахунок передатної функції для тракту

$$W_2 = \frac{C}{P} + \beta_{\text{вТ}} = \frac{0.28}{p} + 0.7 \quad (2.16)$$

Де

C - Жорсткість

$\beta_{\text{вТ}}$ - Коефіцієнт демпфування

Двомасова система стрічкового конвеєра із використанням BLDC-двигунів включає електромеханічні компоненти, механічні зв'язки, а також контури керування [16]. В основі моделювання лежать математичні рівняння, що описують кожен складову системи, та їхня інтеграція у спільну передатну функцію.

Модель BLDC-двигуна Електричну частину двигуна описує рівняння:

$$V_a = R * I + L * di/dt + E_b \quad (2.17)$$

Де, V_a — напруга на обмотках двигуна; R — опір обмоток; L — індуктивність обмоток; I - струм у фазах двигуна; $E_b = K_e * \omega$ - зворотна ЕРС, пропорційна швидкості обертання ротора (ω), де K_e - коефіцієнт зворотної ЕРС.

Ця передатна функція описує перехід від струму до напруги з урахуванням змінних у системі. Механічна частина двигуна: Механічна динаміка моделюється рівнянням другого порядку:

$$J * \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_l - b * \omega \quad (2.18)$$

Де: J — момент інерції ротора двигуна; $T_m = K_t \cdot I$ - момент двигуна (прямо пропорційний струму); T_l - момент навантаження; b - коефіцієнт тертя.

Ця частина передатної функції дозволяє моделювати динамічну поведінку двигуна під час розгону або уповільнення.

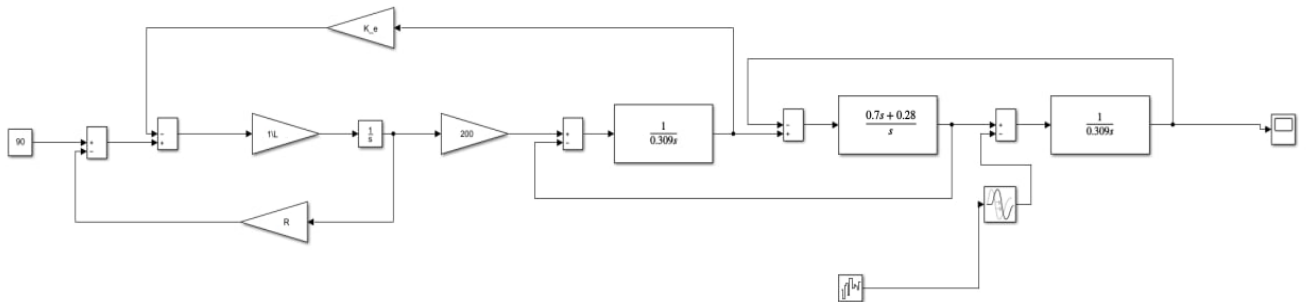


Рисунок 2.11 – Ідеалізована математична модель ОК

На зображенні представлено систему автоматичного управління для ідеалізованої двомасової моделі конвеєра, що складається з зовнішнього контуру регулювання швидкості та внутрішнього контуру регулювання струму. Ліва частина схеми відповідає за регулювання швидкості, тоді як права частина забезпечує регулювання струму. Модель включає механічне м'яке з'єднання між двома масами, що імітує взаємодію електродвигунів із навантаженням через конвеєрний тракт. Вхідний сигнал надходить на блок підсумовування, де обчислюється похибка між заданою швидкістю та поточною швидкістю, отриманою зі зворотного зв'язку. Ця похибка підсилюється регуляторами, що забезпечують пропорційно-інтегральне регулювання швидкості. Отриманий вихідний сигнал передається як завдання для внутрішнього контуру струму, який відповідає за точне виконання струмового керування в системі. У центральній частині моделі реалізована механічна динаміка системи, що включає моменти інерції обох мас і м'який пружний зв'язок із демпфуванням. Ці елементи враховують динамічні властивості механічної системи та вплив інерційних сил на взаємодію двигунів з навантаженням.

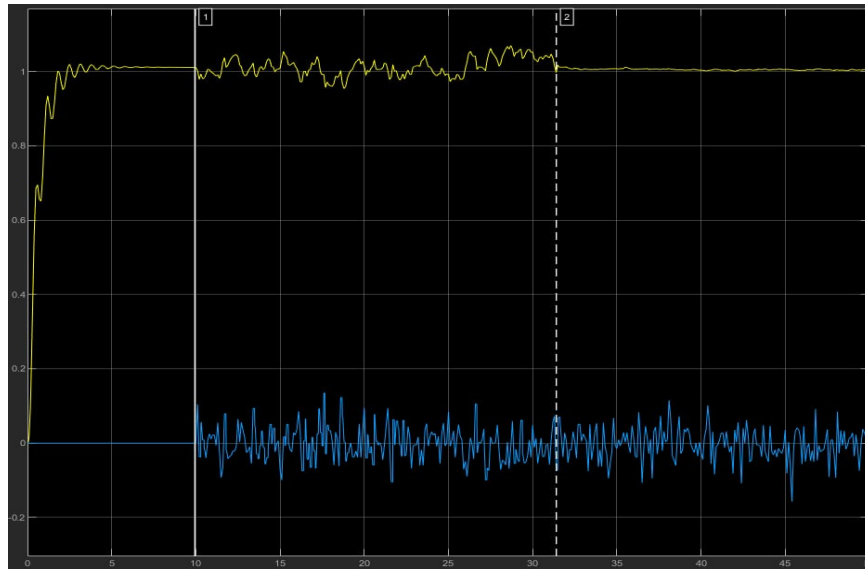


Рисунок 2.12 – Реакція системи на збурення без\та з регулятрами

На представленому графіку проаналізовано динамічну поведінку системи автоматичного управління у трьох характерних режимах. Перший етап (до 10-ї секунди) демонструє перехідний процес системи при запуску без регуляторів і навантаження. У цей момент спостерігається вихід на усталений режим із незначними коливаннями, що обумовлено внутрішніми інерційними властивостями об'єкта керування. На другому етапі (після 10-ї секунди) введено збурення, що моделює навантаження, наприклад, сипучих матеріалів на конвеєрі. Система виявляє нестійкість, що виражається в значних коливаннях вихідного сигналу. Це свідчить про недостатню здатність до саморегулювання та відсутність демпфуючих властивостей для компенсації зовнішніх збурень. На третьому етапі (після 30-ї секунди) активується контур регулювання, що включає регулятори струму і швидкості. Внаслідок їх дії система демонструє стабільний перехідний процес і швидке досягнення усталеного режиму. Відбувається ефективна компенсація збурень, що забезпечує стійкість системи та зменшення амплітуди коливань. Таким чином, графік відображає покращення динамічних характеристик системи після активації регуляторів, що відповідає класичному підходу ТАУ до каскадного керування з внутрішнім і зовнішнім контурами регулювання.

Синхронізація ведучого і веденого двигунів

Блок синхронізації забезпечує узгодження роботи ведучого і веденого двигунів. Він враховує різницю швидкостей ($\omega_{master} - \omega_{slave}$) і формує коригуючий сигнал. Передатна функція блоку:

$$G_{sync}(s) = K * \frac{(\omega_{master} - \omega_{slave})}{(s + \alpha)} \quad (2.14)$$

де: K - коефіцієнт підсилення; α - демпфуючий коефіцієнт.

SimMechanics (тепер відомий як Simscape Multibody) — це інструмент у MATLAB Simulink, який дозволяє моделювати механічні системи без необхідності вручну формулювати математичні рівняння і передатні функції. Замість цього користувачі можуть будувати модель, з'єднуючи готові блоки, що відповідають фізичним елементам системи, як-от двигуни, передачі, пружини, демпфери тощо. Переваги реалізації через SimMechanics Швидке налаштування: параметри компонентів, такі як струм, опір, індуктивність, момент інерції, задаються безпосередньо в налаштуваннях блоків.

Гнучкість: легко додавати нові елементи (наприклад, додаткові демпфери чи пружини) або змінювати параметри без переписування рівнянь.

Візуалізація: SimMechanics дозволяє візуалізувати рух і взаємодію компонентів у реальному часі.

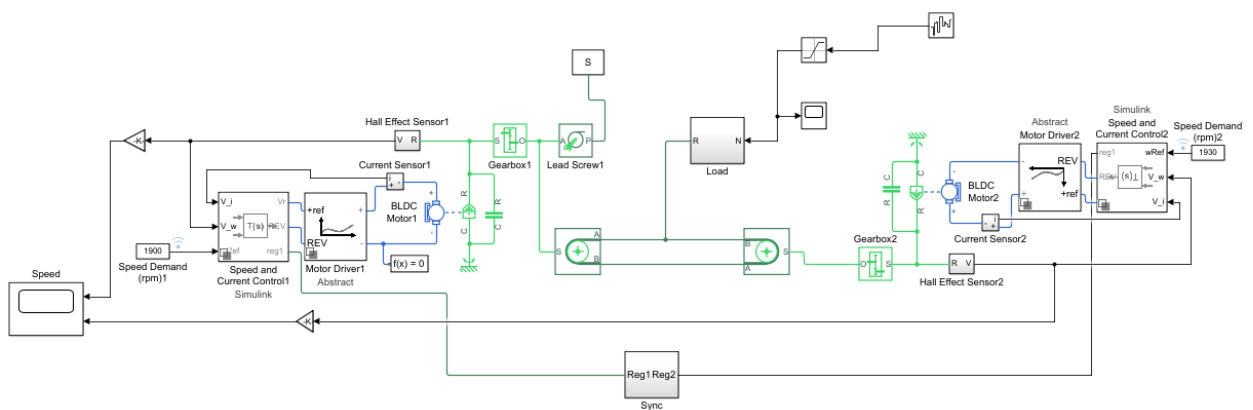


Рисунок 2.13 Математична імітаційна модель системи

Основними компонентами моделі є блоки BLDC-двигунів, які моделюють електричні й механічні процеси, такі як струм, опір, індуктивність, момент інерції та тертя. Кожен двигун має два контури керування: внутрішній контур струму для стабілізації моменту і зовнішній контур швидкості для забезпечення заданої швидкості. Датчики струму і швидкості, реалізовані через блоки Hall Effect Sensor та Current Sensor, забезпечують зворотний зв'язок для регуляторів. Блок синхронізації відповідає за узгодження роботи ведучого і веденого двигунів, використовуючи різницю їх швидкостей для формування коригувального сигналу. Механічна частина системи включає стрічку, модельовану за допомогою пружних і демпфуючих блоків, а також вантаж і передачі, які з'єднані через черв'ячні редуктори. Всі компоненти інтегровані в єдину систему, яка дозволяє вивчати динамічну поведінку стрічкового конвеєра та оптимізувати його роботу.

2.5 Фактори стабілізації режимів функціонування

Режими пуску та гальмування стрічкового конвеєра є критичними з огляду на забезпечення стабільності системи, зниження динамічних навантажень, оптимізації енерговитрат та мінімізації зношування механічних компонентів. Відповідні алгоритми і технології стабілізації дозволяють забезпечити ефективну і безпечну роботу системи [17].

Режим пуску

Режим пуску характеризується максимальними інерційними навантаженнями, оскільки система переходить від стану спокою до руху. Основними факторами стабілізації є:

Плавний старт: Використання алгоритмів плавного розгону дозволяє поступово збільшувати момент і швидкість двигуна, зменшуючи пікові навантаження на механічні компоненти та стрічку.

Обмеження пускового струму: Контроль струму за допомогою регулятора струму запобігає надмірному споживанню енергії та знижує ризик перегріву двигуна.

Контроль натягу стрічки: Для уникнення прослизання чи надмірного розтягування стрічки застосовуються алгоритми, які підтримують рівномірний натяг під час пуску.

Синхронізація роботи двигунів: У системах із двома приводами синхронізація ведучого і веденого двигунів забезпечує рівномірний розподіл навантаження на стрічку.

Наслідки швидкого розгону: Якщо розгін системи буде різким, можуть виникнути такі проблеми:

Надмірне розтягування стрічки, що призводить до її деформації, зниження довговічності та підвищення ризику розриву.

Ковзання стрічки по барабанах через відсутність рівномірного натягу.

Підвищене зношування механічних компонентів, таких як підшипники і ролики.

Режим гальмування

Режим гальмування також потребує особливої уваги, оскільки різке зниження швидкості може призвести до коливань у системі, нерівномірного натягу стрічки та зносу механічних компонентів. Фактори стабілізації включають:

Електродинамічне гальмування: BLDC-двигуни можуть використовуватись у режимі генератора, перетворюючи кінетичну енергію на електричну, що зменшує механічне навантаження.

Контроль гальмівного моменту: Застосування адаптивних алгоритмів дозволяє плавно знижувати момент на двигунах, мінімізуючи динамічні коливання системи.

Демпфування коливань: Використання демпферів у механічній моделі дозволяє гасити коливання стрічки під час уповільнення.

Профілі уповільнення: Гальмування реалізується за допомогою оптимальних профілів, таких як лінійне чи синусоїдальне зниження швидкості, що забезпечує плавність зупинки.

Наслідки швидкого гальмування:

Різке зниження швидкості може викликати виникнення хвиль і коливань у стрічці, що призводить до нерівномірного транспортування матеріалів.

Прослизання стрічки на барабанах під час гальмування, що знижує ефективність передачі руху.

Підвищене зношування стрічки через надмірні сили тертя, що виникають під час різкого уповільнення.

Загальні аспекти стабілізації

Для забезпечення стабільності в обох режимах необхідно:

Моніторинг параметрів: Датчики швидкості, струму і натягу стрічки забезпечують зворотний зв'язок для точного керування системою.

Адаптивні алгоритми керування: Використання інтелектуальних систем керування, які налаштовуються в реальному часі на основі поточного стану системи.

Синхронізація приводів: Забезпечення узгодженості роботи ведучого і веденого двигунів мінімізує дисбаланс навантаження та гарантує рівномірність транспортування матеріалів.

Стабілізація режимів функціонування є ключовим фактором для забезпечення довговічності системи, зниження енерговитрат та підвищення надійності роботи конвеєра.

2.6 Алгоритми управління

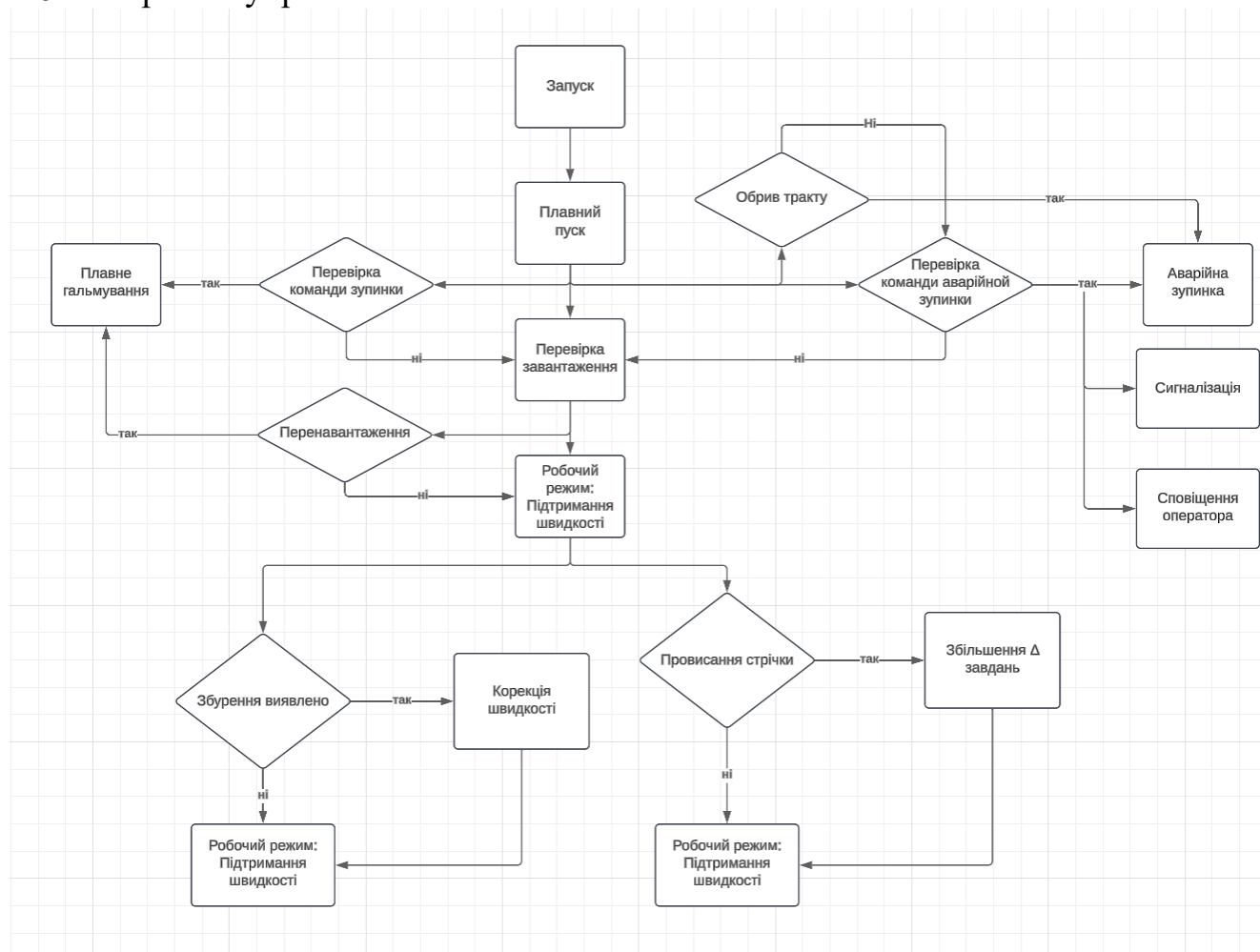


Рисунок 2.14 Блок-схема алгоритму системи

Дана блок-схема алгоритму демонструє управління стрічковим конвеєром з урахуванням основних етапів: пуску, робочого режиму, гальмування та аварійних ситуацій. Вона організована таким чином, щоб забезпечити стабільну роботу системи, мінімізуючи збої, коливання та забезпечуючи реакцію на можливі збурення. Ключовими вузлами є перевірка навантаження, контроль натягу стрічки, реакція на збурення та аварійні дії.

На етапі запуску передбачено плавний пуск, який дозволяє системі поступово нарощувати швидкість, уникаючи перевантажень і ривків. Після пуску перевіряється поточний стан навантаження. Якщо виявлено перевантаження, система реагує шляхом корекції роботи двигунів або переходить до аварійної зупинки. Цей механізм запобігає пошкодженню обладнання та стрічки.

У робочому режимі основний акцент зроблено на підтриманні стабільної швидкості транспортування вантажу. Якщо виявляються збурення (наприклад, нерівномірний розподіл матеріалу чи коливання стрічки), система коригує швидкість і натяг, забезпечуючи стабільність роботи. За відсутності збурень система продовжує працювати в штатному режимі.

В аварійних ситуаціях, таких як обрив стрічки або критичне перевантаження, активується аварійна зупинка. Передбачено блоки сповіщення оператора та сигналізації, щоб своєчасно інформувати про проблему. У разі потреби реалізується плавне гальмування, яке знижує динамічні навантаження на систему, забезпечуючи безпечну зупинку конвеєра. Таким чином, алгоритм забезпечує гнучкість і надійність у роботі конвеєра, враховуючи різні сценарії експлуатації.

2.7 Висновки до розділу

У даному розділі було проведено комплексний аналіз об'єкта керування — стрічкового конвеєра, який включає технологічний розрахунок, вибір параметрів стрічки, роликкоопор, натягу стрічки та типу електропривода. Особливу увагу приділено моделюванню системи з урахуванням її динамічних характеристик, таких як інерційні навантаження, пружність стрічки та взаємодія з транспортувальним вантажем.

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано доцільність використання BLDC-двигунів, які забезпечують високий рівень енергоефективності, точність керування та надійність у складних умовах експлуатації. Було розглянуто їх переваги у порівнянні з традиційними асинхронними та двигунами постійного струму, які мають низку недоліків, що обмежують їхнє застосування в сучасних системах транспортування.

Завдяки використанню SimMechanics для побудови математичної моделі конвеєра вдалося значно спростити процес моделювання та забезпечити точність розрахунків, враховуючи всі фізичні параметри системи. Особливу увагу було

приділено моделюванню динамічної взаємодії двигунів і стрічки, використанню багаторівневих контурів керування та синхронізації роботи ведучого і веденого двигунів.

Розроблені алгоритми управління дозволяють мінімізувати динамічні коливання, забезпечити стабільність роботи системи та адаптацію до зовнішніх збурень.

РОЗДІЛ 3. ВИБІР РЕГУЛЯТОРІВ

Метою цього розділу є визначення оптимального типу регулятора, який забезпечить стабільну та енергоефективну роботу двомасової конвеєрної системи. Для досягнення цієї мети необхідно з'ясувати, який регулятор найкраще підходить для управління складною динамікою системи, враховуючи її ключові особливості, такі як пружні зв'язки між двигунами і стрічкою, змінні навантаження та необхідність компенсації зовнішніх збурень. У ході аналізу буде оцінено різні типи регуляторів з точки зору їх ефективності, простоти реалізації та здатності підтримувати стабільність системи у реальному часі [18].

3.1 Типи регуляторів для конвеєрних систем

Аналізуючи існуючі системи автоматичного керування та роботи на цю тему, можна зробити висновок, що вибір типу регулятора є важливим етапом для забезпечення стабільної, енергоефективної та надійної роботи стрічкових конвеєрів. Існує широкий спектр підходів до регулювання, серед яких виділяються пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори, адаптивні регулятори, регулятори на основі нечіткої логіки, а також методи, які базуються на алгоритмах штучного інтелекту. Вибір конкретного типу регулятора обумовлений як динамічними характеристиками системи, так технологічним процесом виробництва [19].

У проаналізованих роботах наголошується на тому, що для забезпечення стабільності роботи конвеєра важливо враховувати особливості системи, такі як змінне навантаження, динамічні коливання, а також необхідність синхронізації роботи двигунів у багатоприводних установках. Наприклад, пропорційні регулятори забезпечують швидку реакцію системи, але не завжди достатню точність за умов змінних навантажень. Водночас, ПІ та ПІД-регулятори добре підходять для керування такими параметрами, як швидкість стрічки, натяг і момент двигунів, завдяки їхній здатності враховувати як поточні, так і минулі відхилення [20].

3.1.1 Контур регулювання швидкості

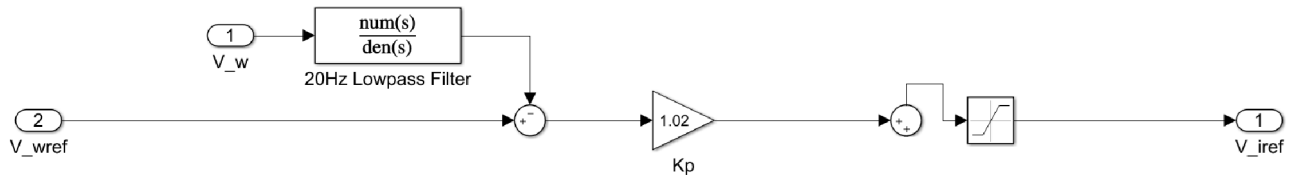


Рисунок 3.1 – Контур регулювання швидкості (П – регулятор)

Контур регулювання швидкості з П-регулятором представлений на рисунку 3.8. У цьому контурі використовується пропорційний регулятор, який виконує основну функцію забезпечення стабільності та реагування системи на зміни у швидкості руху конвеєра [21]. Контур включає вхідні сигнали, такі як задане значення швидкості (V_{ref}) та поточне значення швидкості (V_w), яке зчитується за допомогою датчиків Холла. Для зменшення шумів у вимірюванні швидкості використовується фільтр низьких частот (Lowpass Filter). Після цього, у контурі обчислюється похибка як різниця між заданою та реальною швидкістю. Пропорційний регулятор (K_p) забезпечує посилення сигналу похибки на основі коефіцієнта пропорційності, що дозволяє забезпечити швидку реакцію системи на зміни. Останнім елементом є обмеження вихідного сигналу, яке запобігає перенасиченню системи та можливим коливанням. Вихідний сигнал (V_{iref}) формується для забезпечення точного регулювання швидкості.

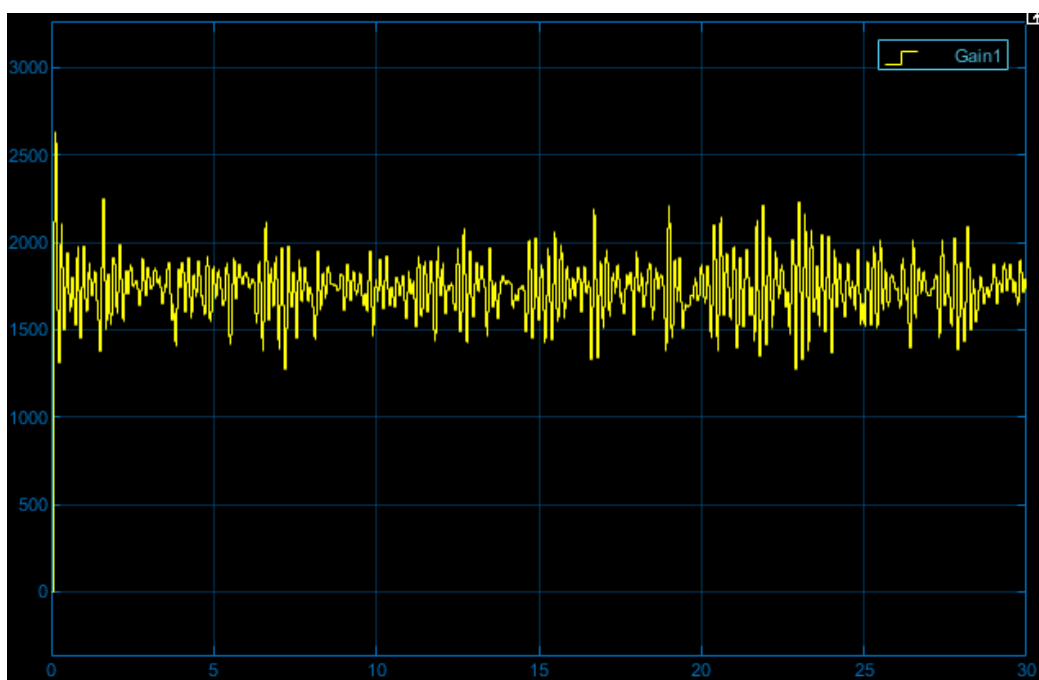


Рисунок 3.2 – Результат моделювання для П- регулятора

На графіку зображена динаміка швидкості моторів протягом 30 секунд роботи моделі. Аналізуючи графік, можна помітити певні коливання швидкості. Це може бути спричинено тим, що контур регулювання з П-регулятором має швидку реакцію на зміни похибки, але не враховує її інтегральну або диференціальну складову. Такі коливання є типовими для пропорційного регулятора, оскільки відсутність інтегрального компонента не дозволяє повністю компенсувати залишкову похибку, а відсутність диференціального компонента не згладжує швидкі зміни. Однак у межах стабільного режиму система демонструє допустимий рівень стабільності, що дозволяє ефективно виконувати завдання транспортування.

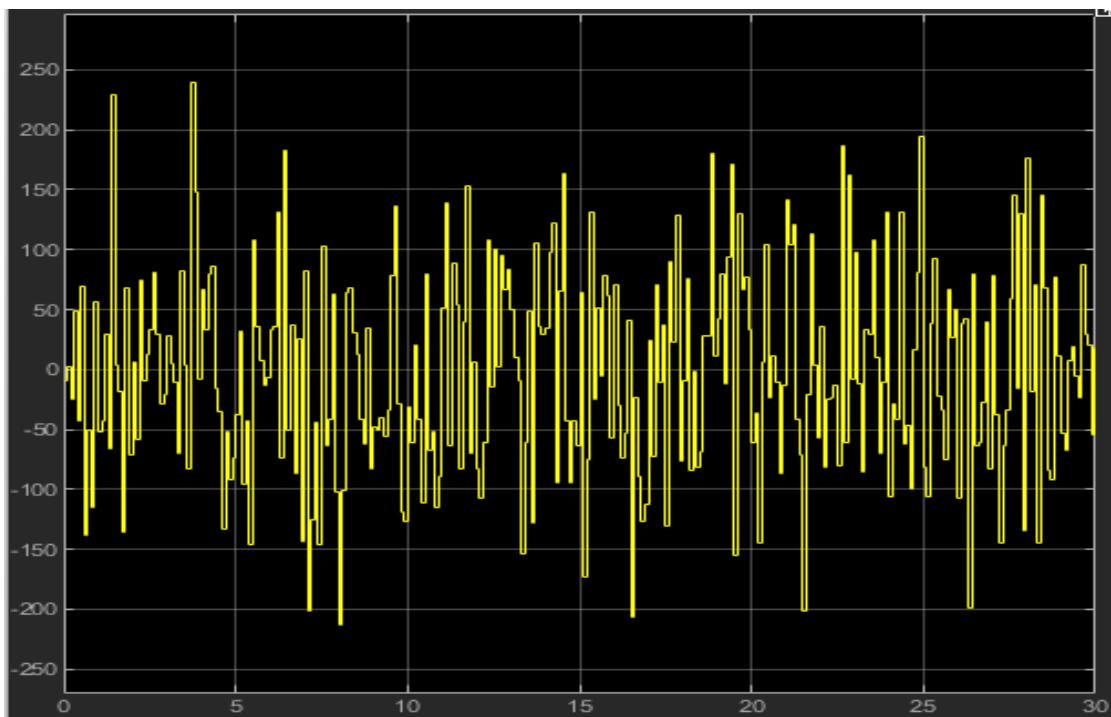


Рисунок 3.3 – Графік збурень(навантаження)

Рисунок 3.3 - коливання збурень у системі, які представлені у вигляді змінного навантаження на стрічковий конвеєр. Амплітуда коливань відображає рівень навантаження, а горизонтальна вісь відповідає часу у секундах. Така поведінка є характерною для роботи конвеєра, де транспортований матеріал може розподілятися нерівномірно, створюючи додаткові збурення на системі. Пік навантаження відображає моменти, коли стрічка конвеєра переносить найбільшу масу матеріалу, а спади свідчать про розвантаження або нерівномірність розподілу. Частота коливань може залежати від швидкості руху стрічки, особливостей транспортованого матеріалу та характеристик системи керування.

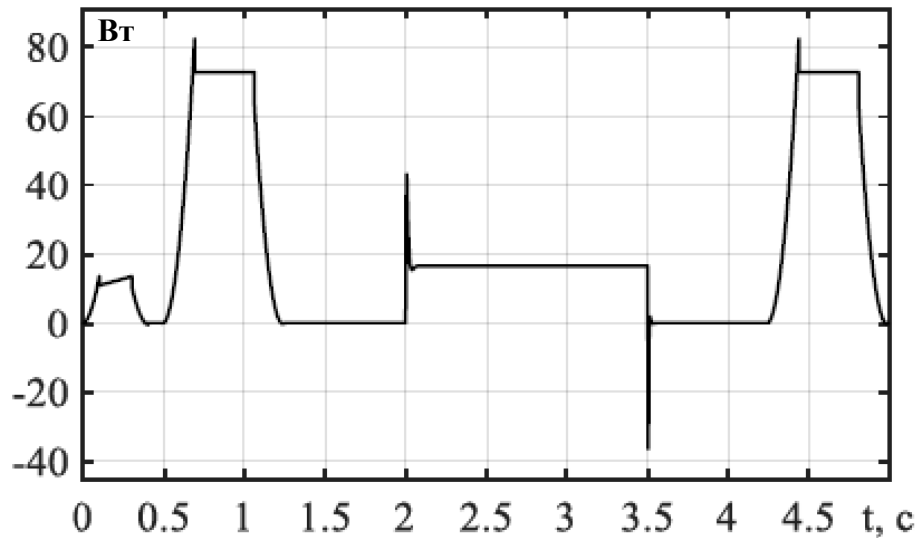


Рисунок 3.4 – Графік втрат потужності з П-регулятором

На графіку зображено залежність втрат активної потужності (ΔP , Вт) від часу (t , с) під час роботи системи з П-регулятором. Графік демонструє характерні коливання втрат потужності, що виникають у процесі регулювання системи.

На початку графіка ($t = 0$) спостерігається різке зростання втрат потужності, що вказує на початковий перехідний процес у системі, коли П-регулятор намагається компенсувати похибку між заданим і поточним значеннями керованого параметра (швидкість, натяг тощо). Після цього втрати стабілізуються на певному рівні, але залишаються коливання, що свідчить про неповну компенсацію похибок через особливості П-регулятора.

У проміжках часу видно зміну рівнів втрат потужності, що пов'язано із реакцією системи на зовнішні збурення або зміну режиму роботи. Періодичне різке збільшення втрат ($t = 0.5$, $t = 4.5$) вказує на активне втручання регулятора для стабілізації системи.

Різкі спади втрат ($t = 3.5$) свідчать про можливе зменшення впливу збурень або вихід системи в більш стабільний режим роботи. Однак, через використання П-регулятора, система не досягає ідеального нульового рівня втрат, що свідчить про недостатню компенсацію динамічних змін і наявність залишкових похибок.

Графік ілюструє, що втрати активної потужності залишаються значними через особливості П-регулятора, який не враховує похідну та інтегральну складові сигналу похибки, і тому не може повністю стабілізувати систему в умовах змінного навантаження [22].

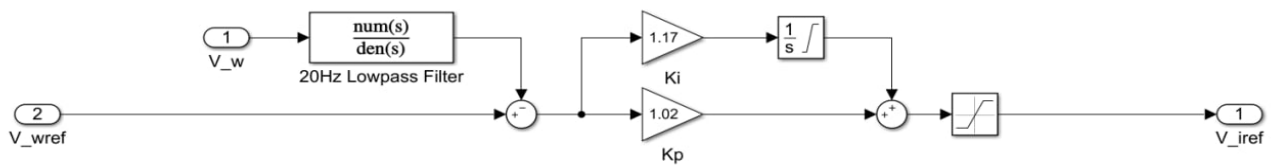


Рисунок 3.5 – Контур регулювання швидкості (ПІ – регулятор)

На рисунку 3.5 зображено контур регулювання швидкості з використанням ПІ-регулятора. Основною відмінністю цього контуру від контуру з П-регулятором є наявність інтегральної складової, яка додається через блок інтегрування. Ця складова дозволяє компенсувати статичну похибку регулювання, яка присутня у випадку використання тільки пропорційного регулятора. В контурі реалізовано два паралельних шляхи: пропорційний (з коефіцієнтом K_p) і інтегральний (з коефіцієнтом K_i), сигнал з яких підсумовується і передається на вихід. Це забезпечує більш плавне та точне регулювання швидкості, особливо за умов динамічних змін навантаження, порівняно з П-регулятором.

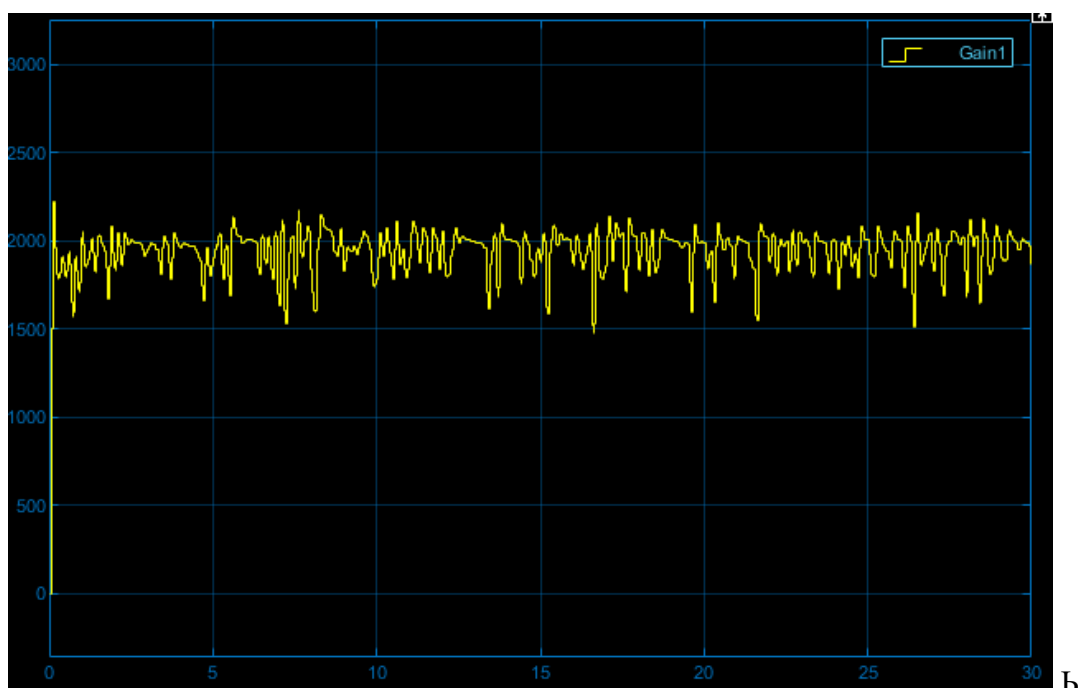


Рисунок 3.6 – Результат моделювання для ПІ- регулятора

На рисунку 3.6 представлено результат моделювання системи регулювання швидкості з використанням ПІ-регулятора [23]. Графік демонструє стабільність роботи системи: значення вихідної швидкості двигуна (позначене як Gain1) коливається у вузькому діапазоні навколо заданого значення. Порівняно з результатами для П-регулятора, спостерігається значне зменшення амплітуди коливань, що свідчить про ефективність інтегральної складової у згладжуванні залишкової похибки регулювання. Це підтверджує, що ПІ-регулятор забезпечує більш плавну роботу системи за рахунок компенсації статичних похибок і стабілізації вихідного сигналу навіть за наявності динамічних змін у навантаженні.

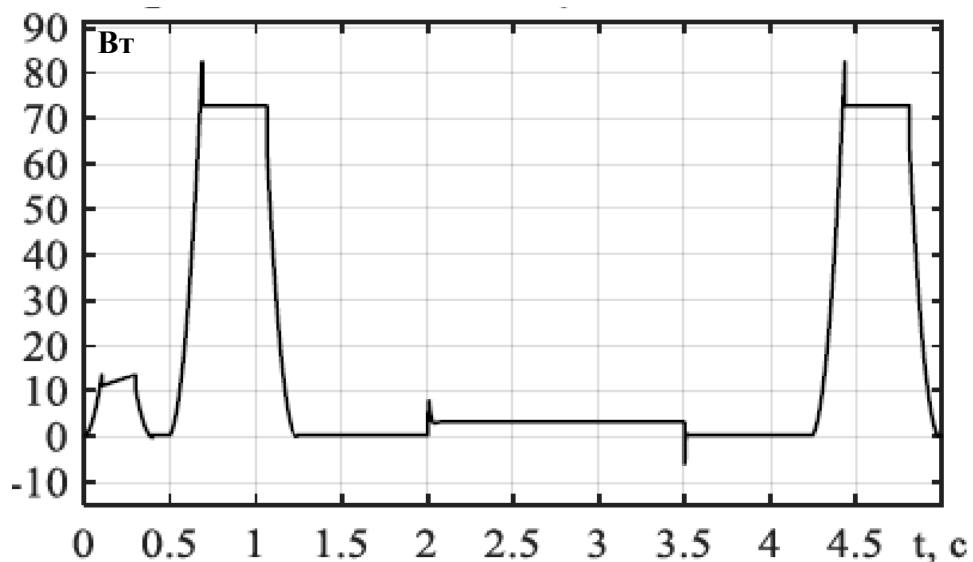


Рисунок 3.7 – Графік втрат потужності з ПІ-регулятором

На рисунку 3.7 зображено графік втрат активної потужності системи з використанням ПІ-регулятора. Аналіз графіка показує, що втрати потужності значно знижуються порівняно з іншими типами регуляторів, особливо в стабілізованому режимі роботи системи. У перехідних процесах, таких як запуск чи зміна навантаження, втрати активної потужності зростають, досягаючи пікових значень у моменти різких змін параметрів. Однак ці втрати швидко компенсуються завдяки інтегральній складовій регулятора, яка забезпечує плавну адаптацію системи до змінних умов роботи. У результаті використання ПІ-регулятора дозволяє мінімізувати енергетичні втрати та покращити загальну ефективність системи.

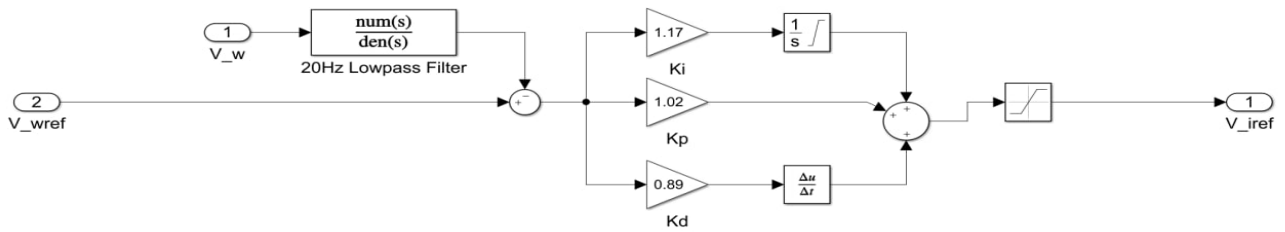


Рисунок 3.8 – Контур регулювання швидкості (ПІД– регулятор)

Аналогічний контур регулювання швидкості, тільки з ПІД-регулятором. Параметри збудження залишаються тими ж самими як і на рисунку (3.3)

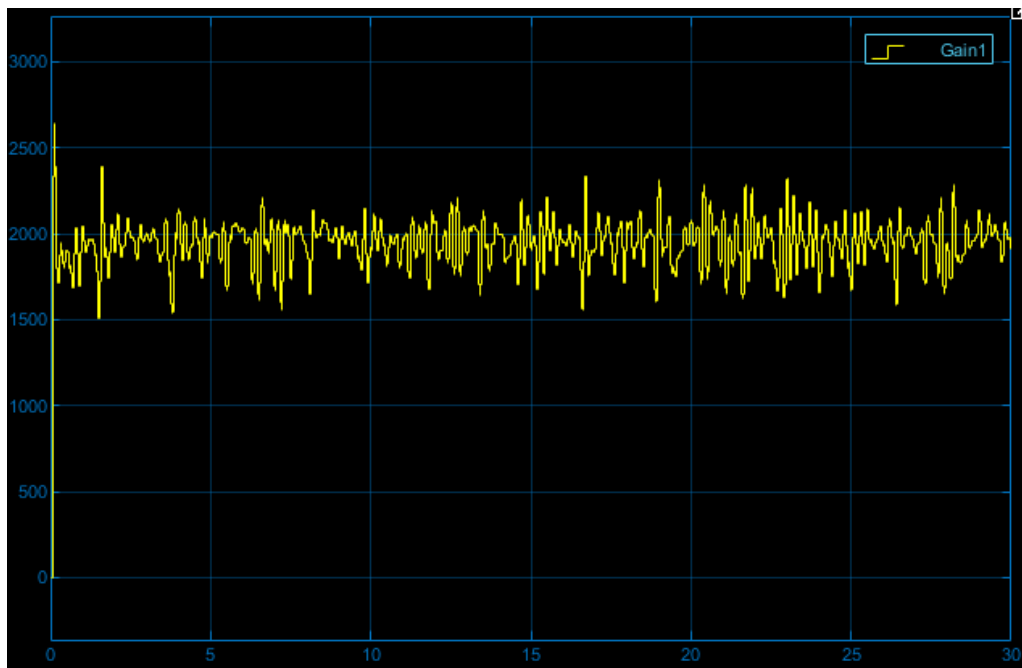


Рисунок 3.9 – Результат моделювання для ПІД- регулятора

Особливістю представленого графіка є наявність більш виражених коливань швидкості порівняно з результатами для ПІ-регулятора. Це пояснюється внеском диференційної складової (D-складової) у процес регулювання. D-складова забезпечує реакцію регулятора на зміну похибки, зокрема на її швидкість. У системах, де присутні високочастотні шуми чи значні перехідні процеси, D-складова може призводити до переналаштувань регулятора, збільшуючи амплітуду і частоту коливань вихідного сигналу.

На цьому графіку помітно, що робота ПІД-регулятора характеризується підвищеною чутливістю до зовнішніх збурень і внутрішніх перехідних процесів системи. Це призводить до меншої стійкості регулятора у порівнянні з ПІ-

регулятором, де відсутність диференційної складової сприяє більш плавній роботі системи. ПІ-регулятор, реагуючи лише на пропорційну і інтегральну складові похибки, краще справляється зі стабілізацією швидкості та мінімізацією пульсацій.

Таким чином, хоча ПІД-регулятор має перевагу в адаптивності до динамічних змін, у даному випадку його D-складова викликала погіршення стабільності роботи системи. Це свідчить про важливість врахування характеристик конкретної системи при виборі оптимального типу регулятора.

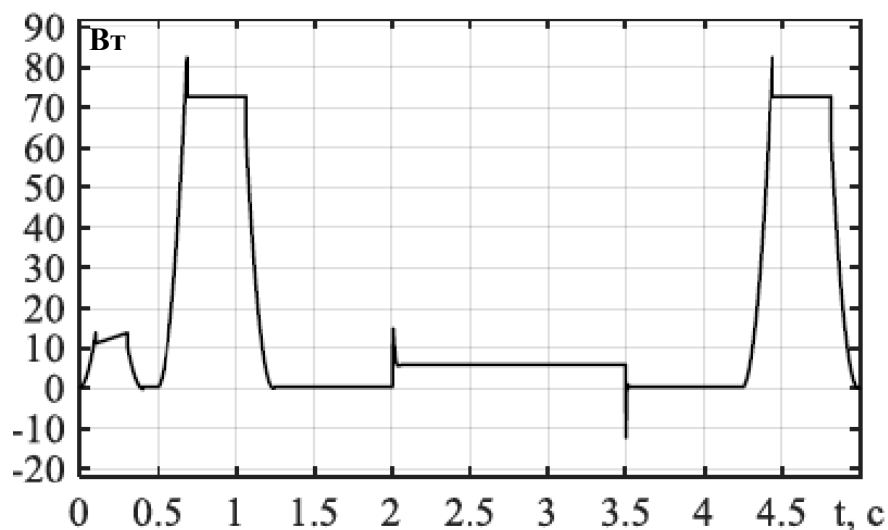


Рисунок 3.10 – Графік втрат потужності з ПІД-регулятором

В порівнянні з ПІ – регулятором показники втратити потужності ПІД регулятора, не значно більші. Отже можна прийти до висновку що для конкретно цієї системи ПІ-регулятор буде більш ефективнішим ніж порівняні в цьому розділі регулятори.

3.1.2 Контур регулювання струму

Контур регулювання струму є ключовою складовою сучасних систем автоматичного керування електроприводами. Основна мета цього контуру — забезпечення швидкого і точного реагування на зміни навантаження, підтримуючи задане значення струму. Через високу швидкість динамічних процесів у контурі струму, його регулятор має забезпечувати миттєву реакцію на будь-які зміни, мінімізуючи похибки. Це особливо важливо в електроприводах із високими

динамічними вимогами, наприклад, у BLDC-двигунах або синхронних двигунах із постійними магнітами.

Використання лише пропорційного (П) регулятора для контуру регулювання струму є недоцільним через обмеження цього типу регулятора в умовах швидких змін. П-регулятор може забезпечити лише часткову компенсацію похибки, яка залежить від коефіцієнта підсилення. Однак це призводить до виникнення статичної похибки в регулюванні, що є критичним для швидких і точних систем, які працюють у реальному часі. Крім того, П-регулятор не може ефективно враховувати накопичені похибки або компенсувати швидкі перехідні процеси, які є характерними для роботи струмових контурів.

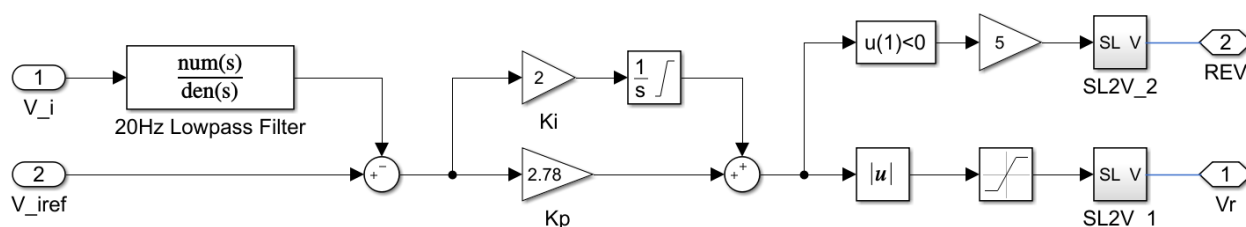


Рисунок 3.11 – Контур регулювання струму (ПІ- регулятор)

Контур регулювання струму, зображений на схемі, реалізує управління струмом за допомогою комбінованого підходу з використанням ПІ-регулятора (пропорційно-інтегрального регулятора) для точного та швидкого коригування струму в системі. На вході схеми присутній сигнал похибки, який отримується шляхом порівняння поточного значення струму (V_i) з опорним значенням (V_{ref}). Далі похибка проходить через ПІ-регулятор, який складається з пропорційної складової (K_p) та інтегральної складової (K_i). Пропорційна складова дозволяє швидко реагувати на зміну струму, а інтегральна компенсує статичну похибку та забезпечує стабільність у тривалих процесах.

Передбачено низькочастотний фільтр (20Hz Lowpass Filter), який усуває високочастотні шумові компоненти сигналу, що покращує стабільність роботи регулятора. Вихід регулятора подається на блоки порівняння та лімітації. Блок

" $u(1)<0$ " використовується для визначення напрямку руху (REV), а через модуль обчислюється абсолютна величина вихідного сигналу, який надалі обмежується, щоб запобігти перевищенню граничних значень системи. Завдяки такій структурі, контур регулювання струму дозволяє забезпечувати ефективне регулювання навіть у системах із високими динамічними характеристиками. Він мінімізує похибки, запобігає перенапрузі і стабілізує роботу системи в умовах динамічних змін навантаження.

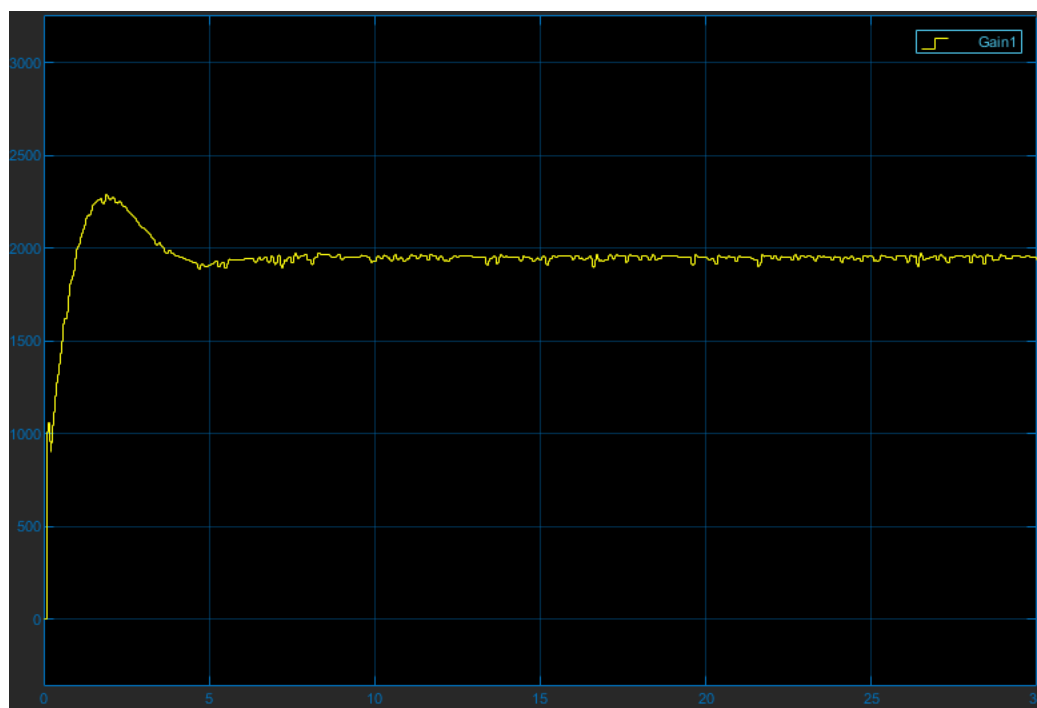


Рисунок 3.12 – Результат моделювання двоконтурної системи

Графік демонструє динаміку швидкості обертання вала двигуна у часі, що є результатом роботи двоконтурної системи керування: внутрішнього контуру регулювання струму та зовнішнього контуру регулювання швидкості. На графіку видно, як система реагує на встановлення швидкості та стабілізує її після початкових перехідних процесів. На початку (0–5 секунди) помітний швидкий розгін двигуна. Внутрішній контур регулювання струму забезпечує плавне збільшення струму, що дозволяє двигуну набрати необхідний момент і досягти заданої швидкості без перевищення допустимих струмових параметрів. Після цього, близько 5 секунди, швидкість стабілізується, і перехідний процес завершується.

У стабільному режимі (від 5 секунд і далі) швидкість залишається постійною, з мінімальними коливаннями навколо заданого значення. Це свідчить про ефективність зовнішнього контуру регулювання швидкості, який компенсує можливі відхилення, що виникають через змінні навантаження або зовнішні збурення.

Графік підтверджує, що двоконтурна система керування забезпечує швидкий вихід на заданий режим роботи та стабільну підтримку швидкості в умовах зміни параметрів системи. Внутрішній контур за струмом відіграє ключову роль у забезпеченні динамічної стабільності, а зовнішній контур за швидкістю гарантує відповідність заданому режиму роботи.

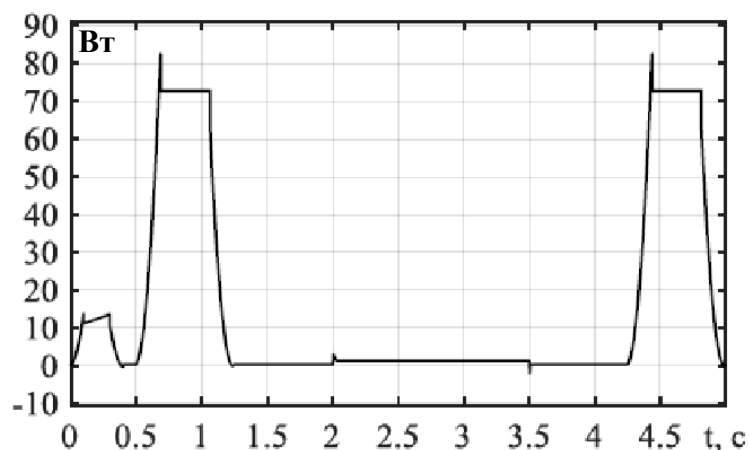


Рисунок 3.13 - Графік втрат потужності двоконтурної системи

На рисунку 3.13 в порівнянні з рисунками (3.4),(3.7),(3.10), найменші втрати потужності цей факт є наслідком швидкого регулювання двоконтурної системи яка не входить в коливальний процес при різкій зміні впливу навантаження на стрічку.

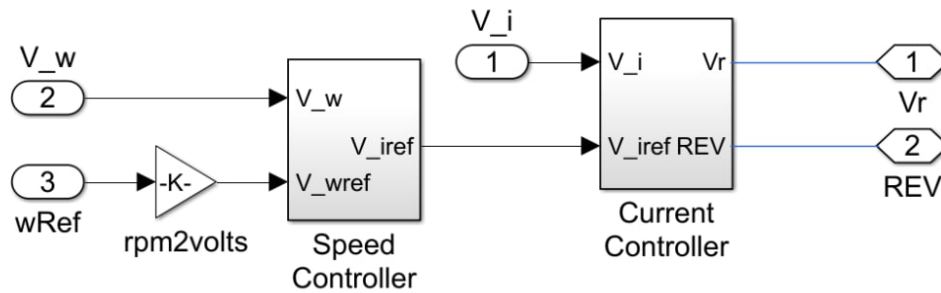


Рисунок 3.14 - Схема двоконтурної системи регулювання

На малюнку представлена схема двоконтурної системи регулювання, що включає два ключових рівні: контур регулювання швидкості та контур регулювання струму

Контур регулювання швидкості (Speed Controller):

Цей блок порівнює задану швидкість обертання ($wRef$) із фактичною (V_w). Похибка, яка виникає внаслідок цього порівняння, перетворюється у вихідний сигнал керування швидкістю (V_ref) для передачі на внутрішній контур регулювання струму. Перетворення значень швидкості в напругу здійснюється за допомогою блока "rpm2volts", що забезпечує відповідність електронній системі керування.

Контур регулювання струму (Current Controller):

Цей контур отримує сигнал V_ref від зовнішнього контуру швидкості та фактичний струм двигуна (V_i). На основі різниці між цими сигналами формується керуючий сигнал напруги (V_r) та напрямку обертання двигуна (REV). Контур струму забезпечує стабільну передачу струму на двигун, швидко реагуючи на зміни навантаження.

Ця система двоконтурного регулювання дозволяє забезпечити високоточне керування швидкістю та моментом двигуна. Зовнішній контур швидкості виконує функцію стабілізації системи, працюючи повільніше, тоді як внутрішній контур струму має високу динамічну швидкодію, забезпечуючи миттєву реакцію на

зовнішні збурення. Такий підхід оптимізує точність і ефективність роботи електроприводу.

3.2 Переваги та недоліки різних регуляторів

Вибір регуляторів для систем автоматичного керування залежить від багатьох факторів, серед яких точність регулювання і стійкість системи займають ключові позиції. На основі представлених результатів моделювання для П-, ІІ-, ІІІ-регуляторів та двоконтурної системи можна оцінити ефективність їх роботи.

Результати моделювання для ІІ-регулятора показали, що ця система є найпростішою, однак вона демонструє помітні недоліки при зміні збурень. Як видно з графіка (Рисунок 3.3), ІІ-регулятор не забезпечує достатньої точності регулювання. Його реакція на динамічні зміни є досить повільною, а залишкова похибка значна. Це пояснюється тим, що ІІ-регулятор враховує лише пропорційну складову похибки, без компенсації впливу інтегральної та диференційної складових.

ІІІ-регулятор, на відміну від ІІ-регулятора, демонструє значно кращі показники за критерієм точності регулювання (Рисунок 3.9). Завдяки інтегральній складовій, яка дозволяє зменшувати статичну похибку, система стає більш стабільною. Водночас графік показує, що ІІІ-регулятор зменшує вплив динамічних збурень, забезпечуючи плавність регулювання. Проте, інтегральна складова може впливати на швидкість реакції системи, що є потенційним недоліком.

ІІІІ-регулятор, зображений на Рисунку 3.12, додає до системи диференційну складову, що покращує реакцію на швидкі зміни збурень. Проте результати моделювання вказують, що ІІІІ-регулятор, незважаючи на його універсальність, може створювати певну нестабільність у системі через надмірну чутливість до швидких змін. Це може призводити до пульсацій вихідного сигналу. Таким чином, для систем, які вимагають високої точності регулювання, застосування ІІІІ-регулятора потребує ретельного налаштування параметрів.

Особливо слід виділити двоконтурну систему керування, результати якої наведено на Рисунку 3.12. Ця система об'єднує переваги зовнішнього контуру швидкості та внутрішнього контуру струму. Внутрішній контур регулювання струму швидко реагує на змінні навантаження, тоді як зовнішній контур забезпечує стабільну підтримку заданої швидкості. Як видно з графіка, двоконтурна система значно перевершує всі попередні типи регуляторів за критеріями точності регулювання та стійкості. Вона забезпечує мінімальну похибку навіть при великих збуреннях та стабільний вихідний сигнал.

Величина	П-регулятор	ПІ-регулятор	ПІД-регулятор	Двоконтурна система (ПІ/ПІ)
ΔP, Вт	112	48	69	26

Таблиця 3.1 – Порівняльна таблиця втрати потужності різних методів регулювання

3.3 Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено порівняльний аналіз різних типів регуляторів (П-, ПІ-, ПІД-регулятори та двоконтурна система керування) з точки зору точності регулювання та стійкості системи. Для оцінки ефективності кожного з них були виконані моделювання роботи двомасової конвеєрної системи в умовах змінного навантаження та динамічних збурень.

На основі результатів моделювання, представлених у вигляді графіків та таблиці, було виявлено, що:

1. П-регулятор продемонстрував низьку точність регулювання, значні залишкові похибки та високі втрати потужності. Через це його застосування для систем із динамічними збуреннями є недоцільним.
2. ПІ-регулятор забезпечив кращі результати завдяки інтегральній складовій, яка зменшує статичні похибки. Його використання дозволяє досягти стабільнішої роботи системи, знижуючи енергетичні втрати.

3. ПІД-регулятор продемонстрував більш високу чутливість до швидких змін, що призвело до коливань у роботі системи. Хоча він забезпечує швидку реакцію на динамічні збурення, у розглянутій системі його надмірна чутливість стала причиною зниження стабільності.
4. Двоконтурна система керування виявилася найбільш ефективною. Вона об'єднує переваги зовнішнього контуру регулювання швидкості та внутрішнього контуру регулювання струму. Цей підхід дозволив досягти мінімальної похибки, зменшення втрат потужності та стабільності роботи навіть за умов різких змін навантаження.

Найбільш ефективним рішенням для забезпечення стабільної та енергоефективної роботи двомасової конвеєрної системи є використання двоконтурної системи регулювання із застосуванням ПІ-регуляторів у кожному контурі. Двоконтурна система забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, стійкістю та енергетичною ефективністю.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що для даної системи найкраще підходять комбіновані системи управління, які використовують багаторівневу структуру контурів регулювання, зокрема ПІ регулятори у внутрішньому контурі струму, та ПІ-регулятор для зовнішнього контуру за швидкістю.

РОЗДІЛ 4. SCADA-СИСТЕМА

4.1 Програмне забезпечення для керування та моніторингу

Сучасні SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) є невід’ємною частиною автоматизованих конвеєрних комплексів. Вони забезпечують ефективний моніторинг, управління та аналіз роботи технологічного обладнання, дозволяючи операторам своєчасно реагувати на зміни та збої у системі.

Програмне забезпечення SCADA-системи включає кілька основних компонентів, кожен із яких відповідає за певний аспект управління та моніторингу [24]. У випадку стрічкового конвеєра використовується спеціалізоване програмне забезпечення для відображення параметрів роботи двигунів, натягу стрічки, рівня навантаження та інших критично важливих характеристик.

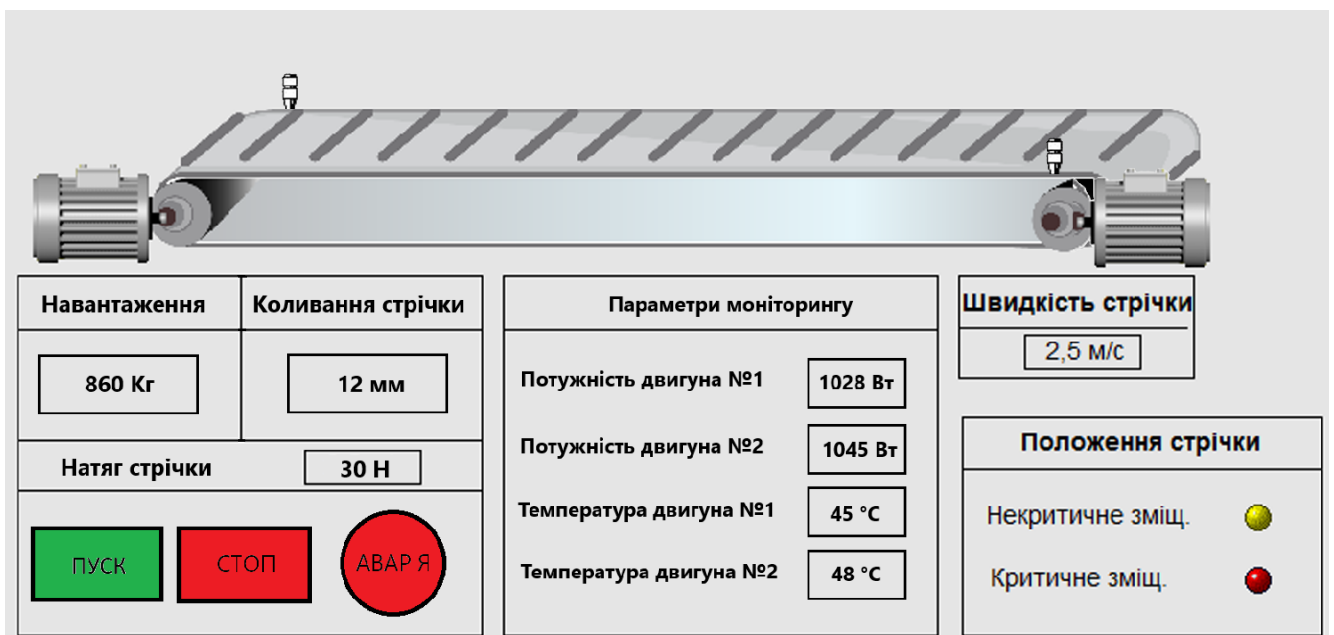


Рисунок 4.1 Інтерфейс SCADA- системи

Основні функції SCADA-системи

Моніторинг параметрів роботи системи:

Візуалізація основних параметрів, таких як швидкість стрічки, навантаження, натяг, температура двигунів та їх потужність.

Відображення даних у реальному часі, що дозволяє оператору контролювати стан системи.

Управління режимами роботи:

Забезпечення дистанційного керування запуском, зупинкою та аварійним вимкненням обладнання.

Можливість вибору автоматичного або ручного режиму роботи.

Сигналізація та оповіщення:

Виявлення збоїв і попередження оператора за допомогою візуальної та звукової сигналізації.

Автоматичне реагування системи на критичні події, наприклад, відключення двигунів у разі перевантаження або обриву стрічки.

Архівування даних:

Запис історичних даних про параметри роботи системи для подальшого аналізу.

Ведення журналів подій та аварій, що дозволяє оцінювати ефективність роботи системи і виконувати діагностику.

Аналіз продуктивності:

Побудова графіків і трендів на основі даних з датчиків для оцінки стабільності роботи конвеєра.

Оптимізація режимів роботи на основі аналізу історичних даних.

Програмне забезпечення, яке використовується:

У реалізації SCADA-системи для стрічкового конвеєра можуть використовуватися різні платформи, такі як Siemens WinCC, Wonderware InTouch, Ignition або альтернативні рішення. Залежно від обраної платформи, система забезпечує гнучке налаштування, що дозволяє інтегрувати датчики, регулятори та виконавчі пристрої в єдину систему управління.

Платформи надають зручний графічний інтерфейс НМІ, який дозволяє не лише моніторити стан системи, але й оперативно вносити зміни в її роботу. Для інтеграції використовуються стандарти обміну даними, такі як OPC-UA, що забезпечує швидкий і надійний зв'язок між компонентами системи.

Особливості візуалізації:

Графічний інтерфейс SCADA-системи включає зображення конвеєрного тракту з позначенням основних елементів, таких як двигуни, стрічка, роликкоопори, датчики. На основі цих елементів відображаються поточні значення параметрів роботи системи, а також індикатори стану (наприклад, нормальний режим роботи, попередження або аварія).

Колірна індикація допомагає швидко оцінити стан системи: зелений колір позначає нормальну роботу, жовтий — попередження, червоний — аварійну ситуацію. Це мінімізує час реагування оператора на проблеми та підвищує загальну безпеку системи.

4.2 Взаємодія апаратних і програмних компонентів

Взаємодія апаратного та програмного забезпечення у SCADA-системах, які керують конвеєрними лініями, є важливим компонентом для забезпечення їх стабільної та продуктивної роботи. Апаратна частина включає такі елементи, як програмовані логічні контролери (ПЛК), датчики для вимірювання фізичних параметрів (швидкість стрічки, натяг, температура), приводи для руху стрічки, а також комунікаційне обладнання, яке забезпечує передачу даних між пристроями. Програмне забезпечення виконує роль інтелектуального центру керування, який моніторить показники, здійснює обробку даних, передає команди на апаратні елементи та надає оператору візуалізовану інформацію через інтерфейс НМІ.

Алгоритм взаємодії полягає в тому, що датчики збирають інформацію про параметри системи, яку потім передають у контролери. Контролери обробляють ці дані і взаємодіють із програмним забезпеченням SCADA, яке на основі аналізу

приймає рішення щодо необхідних змін у роботі системи. Команди, які формуються програмним забезпеченням, передаються контролерам, які керують виконавчими механізмами, такими як приводи чи гальмівні системи. Інформація про виконані дії знову передається у SCADA-систему для забезпечення зворотного зв'язку [25].

Інтеграція апаратних та програмних компонентів надає численні переваги. Це підвищує точність і швидкість управління, забезпечує автоматизацію процесів, дозволяє прогнозувати можливі несправності завдяки аналізу даних у реальному часі. Крім того, оптимізація режимів роботи дозволяє знижувати енергоспоживання, а гнучкість системи полегшує її адаптацію до змінних умов експлуатації. Така взаємодія дозволяє створювати сучасні, ефективні та надійні системи управління конвеєрними лініями.

№	Етап	Опис дій
1	Збір даних датчиками	Датчики вимірюють фізичні параметри (швидкість, натяг, температуру двигунів, навантаження тощо) та фіксують їх у реальному часі.
2	Передача даних до контролерів	Отримані дані надсилаються до програмованого логічного контролера (ПЛК) для обробки.
3	Обробка даних у контролері	Контролер аналізує отриману інформацію, порівнює її із заданими параметрами та визначає необхідність коригування роботи.
4	Передача даних у SCADA-систему	Контролер надсилає оброблені дані в програмне забезпечення SCADA для моніторингу та подальшого аналізу.
5	Аналіз у SCADA-системі	Програмне забезпечення аналізує отриману інформацію, візуалізує її на графічному інтерфейсі (HMI) та виявляє відхилення або тривожні сигнали.
6	Формування команд SCADA-системою	SCADA-система генерує команди для зміни параметрів роботи (швидкість стрічки, натяг тощо) на основі аналізу даних.
7	Передача команд до контролера	Сформовані SCADA-системою команди передаються до контролера для виконання.

Таблиця 4.1 -Взаємодія апаратних і програмних компонентів

4.3 Висновки до розділу

У цьому розділі проведено аналіз SCADA-систем, які використовуються для управління та моніторингу стрічкових конвеєрів. Розглянуто програмне

забезпечення SCADA, його основні функції, особливості візуалізації, а також взаємодію апаратних і програмних компонентів. Було визначено ключові етапи інтеграції апаратної частини, що включає датчики, контролери, приводи та виконавчі механізми, з програмною частиною, яка забезпечує моніторинг, аналіз та керування.

Особливу увагу було приділено алгоритму роботи SCADA-системи, який забезпечує збирання даних, їх обробку, формування команд для виконання, а також зворотний зв'язок для забезпечення надійного управління всіма компонентами конвеєрної системи. Наведена таблиця дозволяє зрозуміти послідовність дій та зв'язок між апаратною і програмною частинами системи. Також розглянуто функціональні можливості SCADA-систем для забезпечення стабільної роботи конвеєрного комплексу. Виявлено, що інтеграція SCADA систем сприяє зниженню експлуатаційних витрат, покращенню продуктивності та забезпеченню надійності роботи. Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення існуючих конвеєрних систем та створення нових високоефективних рішень у галузі транспортування матеріалів.

ВИСНОВОК

В роботі було проведено аналіз сучасних систем керування стрічковими конвеєрами, розглянуті можливі фактори які впливають на зниження енергоефективності систем. Проведений технологічний розрахунок та тяговий розрахунок стрічкового конвеєра. Обрано тип електропривода, досліджені та промодельовані методи керування BLDC двигуном, результатом досліджень є оцінка ефективності методів керування.

Розроблено математичну модель двомасової конвеєрної стрічки. Проведено аналіз динамічних характеристик системи та дослідження одноконтурної системи на основі регулятора швидкості. Отримані результати моделювання свідчать про ефективність використання різних підходів до регулювання в залежності від складності системи та вимог до її роботи.

Система з одним контуром регулювання швидкості показала найкращі результати при використанні ПІ-регулятора. Пропорційний регулятор (П) продемонстрував високу швидкість реакції, але виявив значну залишкову похибку та недостатню стабільність у випадках змінного навантаження. Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД) виявився надто чутливим до перехідних процесів і збурень, що призводило до появи коливань у системі. Натомість, ПІ-регулятор забезпечив оптимальний баланс між швидкістю реакції та точністю регулювання, проте навіть із ним одноконтурна система не досягла бажаної якості регулювання, особливо в умовах змінного навантаження та коливальних процесів в тракті.

Для отримання бажаного результату регулювання була розроблена двоконтурна система регулювання з додатковим внутрішнім контуром регулювання струму. Внутрішній контур забезпечує швидку стабілізацію струму, що дозволяє компенсувати динамічні збурення та підтримувати стабільність зовнішнього контуру регулювання швидкості. У ході моделювання були досліджені різні комбінації регуляторів для обох контурів. Найкращі результати отримано при використанні ПІ-регуляторів як для контуру швидкості, так і для контуру струму.

Двоконтурна система з двома ПІ-регуляторами продемонструвала найкращу якість регулювання, забезпечивши мінімальну амплітуду коливань швидкості, високу стабільність. Крім того, при такому підході вдалося досягти мінімальних втрат активної потужності, що підтверджує енергоефективність розробленої системи. Це свідчить про доцільність використання двоконтурної структури регулювання для стрічкових конвеєрів із пружним зв'язком і високими вимогами до точності та стабільності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Давиденко І. Л. Автоматизація дозування компонентів при виробництві цементу : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. Г. В. Кулінченко. Суми : Сумський державний університет, 2023. 55 с.
2. Свешніков, Валерій Вікторович. "Автоматизована система керування стрічковим конвеєром гірничовидобувного підприємства." (2019).
3. Кірзенко, Олександр Володимирович. "Розроблення автоматизованої системи оптимального керування режимами роботи електропривода стрічкового конвеєра насипних вантажів." (2020).
4. Зозуля, Яків Олександрович. "Дослідження режимів роботи електроприводу магістрального стрічкового конвеєру." (2020).
5. Дмитрієв, Олександр Сергійович. "Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра." (2023).
6. Фоменко, О. "Електропривод системи конвейерного переміщення технологічних виробів." (2019).
7. Кочнева, О. А., & Ткачук, С. В. (2018). Усовершенствование конструкции конверного дозатора для гранулированных материалов. Bond V.N. A piecewise-linear moment-matching approach to parameterized model order reduction for highly nonlinear systems / V.N. Bond, L. Daniel // *IEEE Trans. Computer-Aided Design.* – 2007. – № 26(12). – С. 2116–2129.
8. Савеленко О.К., Якименко Н.М., Колодочкіна А.В., Сорокін В.В. Технології проектування комп'ютерних систем: Навчальний посібник. - Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2017. - 308 с.
9. Wen, Liang, et al. "Power balance control strategy of permanent magnet synchronous motor of belt conveyor." *IEEE Access* 10 (2022): 117045-117052.
10. Поволоцький, Павло Борисович. "Оптимізація динамічних режимів роботи конвеєрної установки з урахування пружності стрічки." (2019).
11. Тимошенко, Сергій Вікторович. "Метод підвищеної ефективності керування BLDC-двигуном." (2020).

12. Мельник, О. М., et al. "ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СУДНО-ВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ БЕЗЩІТКОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ."
13. Latif, Abdul, et al. "Motor DC PID system regulator for mini conveyor drive based-on MATLAB." *Journal of Robotics and Control (JRC)* 1.6 (2020): 185-190.
14. Хроменко, А. Г. "Дослідження векторного методу керування безколекторним електродвигуном у системах електроприводу." (2022).
15. Mathaba, Tebello, and Xiaohua Xia. "Optimal and energy efficient operation of conveyor belt systems with downhill conveyors." *Energy Efficiency* 10 (2017): 405-417.
16. Кожевников, Георгій Костянтинович. *Управління конвейерними транспортними системами в умовах цифровизації виробничих процесів*. Diss. ТОВ "Планета-Прінт", 2021.
17. Приходько, В. О. "Моделювання пускових режимів роботи стрічкового транспортера." (2023).
18. Іванюк, О. О. "Експрес-методика параметричного синтезу і аналізу систем з (ПІ-ПД) алгоритмом регулювання." (2008).
19. Денисова, А. М. "СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ УЗАГАЛЬНЕНОГО ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО ПОЛІНОМА." *Студентський вісник ДДМА: тематичний збірник наукових праць.–Краматорськ: ДДМА, 2011.–292 с.* (2011)
20. Маліборський, Станіслав Олександрович. "Дослідження енергоефективних режимів роботи електромеханічної системи конвеєра автоматизованого комплексу металообробки." (2023).
21. Глянь, Д. В., and Р. В. Ешан. "Автоматизоване регулювання швидкості стрічкового конвеєру." *Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих*. 2014.
22. Kawalec, Witold, et al. "Specific energy consumption of a belt conveyor system in a continuous surface mine." *Energies* 13.19 (2020): 5214.
23. Bebic, Milan Z., and Leposava B. Ristic. "Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations." *Advances in electrical and computer engineering* 18.1 (2018): 51-60.

24. Pang, Yusong. *Intelligent belt conveyor monitoring and control*. No. T2010/12. Netherlands TRAIL Research School, 2010.
25. Маринич, І. А., and О. Ю. Сердюк. "Система контролю технічного стану обладнання конвеєра з візуалізацією основних параметрів." (2021).