

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-35.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-2

Андрій Бацяк

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Бацяк Андрій Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5: 621.867.2

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового

(назва роботи)

живильника

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

А.Ю. Бацяк

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Л.І. Фешанич

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Бацяку Андрію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового живильника

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема, статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз технологічного процесу стрічкових конвеєрних систем

2. Розроблення автоматичної системи регулювання продуктивності стрічкового живильника

3. Вибір апаратної частини об'єкта керування

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу стрічкових конвеєрних систем	1.10.2025	
2	Розроблення автоматичної системи регулювання продуктивності стрічкового живильника	1.11.2025.	
3	Вибір апаратної частини об'єкта керування	02.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Бацяк А.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Фешанич Л.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі розглянуто питання розроблення автоматичної системи регулювання продуктивності стрічкового живильника. Проведено аналіз технологічного процесу стрічкових конвеєрних систем, визначено основні фактори, що впливають на стабільність та точність подачі сипких матеріалів. Розглянуто принцип роботи стрічкового живильника та особливості електропривода як об'єкта керування.

Розроблено функціональну та структурну схеми автоматичної системи керування, отримано математичну модель об'єкта та виконано аналіз його динамічних властивостей. Здійснено синтез і налаштування регулятора продуктивності із застосуванням емпіричних методів та програмних засобів середовища MATLAB.

Виконано вибір і обґрунтування апаратних засобів автоматизації, зокрема програмованого логічного контролера, частотно-регульованого привода, датчиків швидкості, вагових систем та пристроїв аварійного контролю. Розроблена система забезпечує підвищення точності регулювання продуктивності, стабільність технологічного процесу, зменшення впливу людського фактора та підвищення безпеки експлуатації обладнання.

Ключові слова

регулювання продуктивності, стрічковий живильник, електропривод, програмований логічний контролер, частотний перетворювач, конвеєрні системи

ANNOTATION

In the master's thesis, the development of an automatic control system for regulating the productivity of a belt feeder is examined. An analysis of the technological process of belt conveyor systems is carried out, and the main factors influencing the stability and accuracy of bulk material feeding are identified. The operating principle of the belt feeder and the characteristics of the electric drive as a control object are considered.

A functional and structural diagram of the automatic control system has been developed, a mathematical model of the object has been obtained, and an analysis of its dynamic properties has been performed. The productivity controller was synthesized and tuned using empirical methods and MATLAB software tools.

The selection and justification of automation hardware have been completed, including a programmable logic controller, a variable-frequency drive, speed sensors, weighing systems, and emergency control devices. The developed system ensures improved productivity regulation accuracy, stability of the technological process, reduced human-factor influence, and enhanced operational safety of the equipment.

Keywords

productivity control, belt feeder, electric drive, programmable logic controller, frequency converter, conveyor systems

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРНИХ СИСТЕМ.....	12
1.1. Короткий опис технологічного процесу.....	12
1.2. Принцип роботи стрічкового живильника	17
1.3. Загальні принципи роботи електропривода стрічкового живильника.....	21
1.4. Постановка завдання магістерської роботи	24
Висновки до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СТРІЧКОВОГО ЖИВИЛЬНИКА	26
2.1. Розробка функціональної та структурної схеми управління	27
2.2. Отримання математичної моделі об'єкта.....	30
2.3. Аналіз динамічних властивостей об'єкта керування.....	39
2.4. Синтез регулятора для керування продуктивністю об'єкта.....	45
2.5. Емпіричний метод налаштування регулятора.....	47
2.6. Метод налаштування командою Tune програми MATLAB.....	33
Висновки до розділу 2.....	48
РОЗДІЛ 3	
ВИБІР АПАРАТНОЇ БАЗИ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	58
3.1. Вибір технічних засобів автоматизації та програмованого логічного контролера.....	50
Висновки до розділу 3.....	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

ВСТУП

Актуальність теми.

У сучасних умовах розвитку промисловості однією з ключових задач є підвищення ефективності, надійності та енергоефективності технологічних процесів транспортування і дозування сипких матеріалів. Стрічкові живильники широко застосовуються в гірничодобувній, металургійній, будівельній, переробній та сільськогосподарській галузях, де від стабільності їх роботи безпосередньо залежить продуктивність усього технологічного комплексу. Нестабільність подачі матеріалу, перевантаження обладнання та значний вплив людського фактора призводять до зниження якості процесу, збільшення енергоспоживання та зростання експлуатаційних витрат.

Традиційні способи керування продуктивністю стрічкових живильників, що базуються на ручному або напівавтоматичному регулюванні, не забезпечують необхідної точності та оперативності реагування на зміну технологічних умов. Це зумовлює потребу у впровадженні сучасних автоматичних систем керування, здатних забезпечити безперервний контроль параметрів процесу, адаптацію до змін навантаження та стабільну роботу обладнання в реальному часі.

Розроблення автоматичної системи регулювання продуктивності стрічкового живильника з використанням програмованих логічних контролерів, частотно-регульованих електроприводів і сучасних вимірювальних засобів є актуальним напрямом, що відповідає тенденціям цифровізації та автоматизації промислових підприємств. Така система дозволяє підвищити точність дозування матеріалу, зменшити аварійність, оптимізувати енергоспоживання та створити умови для впровадження інтелектуальних методів керування.

Отже, обрана тема є актуальною з наукової та практичної точок зору, оскільки спрямована на підвищення ефективності та конкурентоспроможності сучасних виробничих процесів шляхом удосконалення систем автоматичного керування стрічковими живильниками.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Вибір теми дослідження зумовлене практичними потребами сучасної промисловості та актуальними тенденціями розвитку автоматизованих технологічних процесів. Стрічкові живильники є невід'ємною складовою багатьох виробничих ліній, зокрема в гірничодобувній, переробній, будівельній та агропромисловій галузях, де вони забезпечують безперервну та дозовану подачу сипких матеріалів. Від точності та стабільності їх роботи безпосередньо залежить ефективність усього технологічного процесу.

З наукової точки зору обрана тема є обґрунтованою, оскільки поєднує задачі математичного моделювання об'єкта керування, аналізу його динамічних властивостей, синтезу регуляторів та практичної реалізації системи керування з використанням сучасних апаратних і програмних засобів. Дослідження в цьому напрямі дозволяють удосконалити методи керування електромеханічними системами та підвищити ефективність застосування автоматизованих рішень у промисловості.

Крім того, розроблення автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового живильника відповідає сучасним вимогам цифровізації виробництва та концепціям Industry 4.0, оскільки передбачає використання програмованих логічних контролерів, частотно-регульованих приводів, систем збору та аналізу даних і засобів візуалізації процесу. Це робить результати дослідження практично значущими та придатними для впровадження на діючих промислових об'єктах.

Таким чином, вибір теми дослідження є обґрунтованим як з практичної, так і з наукової точок зору та спрямований на розв'язання актуальних задач підвищення ефективності, надійності й безпеки роботи стрічкових живильників.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення та автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового живильника, яка забезпечує стабільну та точну подачу матеріалу, підвищення ефективності технологічного процесу, зниження впливу людського фактора та підвищення надійності й безпеки експлуатації обладнання.

Об'єктом дослідження є технологічний процес транспортування та дозування сипких матеріалів за допомогою стрічкового живильника, включаючи електромеханічну систему привода та процеси керування його продуктивністю.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматичного керування продуктивністю стрічкового живильника, а також динамічні характеристики та математичні моделі системи регулювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання дослідження:

1. Проаналізувати технологічний процес роботи стрічкових конвеєрних систем і визначити основні фактори, що впливають на продуктивність стрічкового живильника.
2. Дослідити принцип роботи стрічкового живильника та особливості електропривода як об'єкта керування.
3. Розробити функціональну та структурну схеми автоматичної системи регулювання продуктивності стрічкового живильника.
4. Отримати математичну модель об'єкта керування та виконати аналіз його динамічних властивостей.
5. Здійснити синтез регулятора продуктивності та виконати його налаштування з використанням емпіричних методів і програмних засобів середовища MATLAB.
6. Виконати вибір і обґрунтування апаратних засобів автоматизації, зокрема програмованого логічного контролера, частотно-регульованого привода та вимірювальних датчиків.

Методи дослідження

У процесі виконання магістерської роботи використано комплекс теоретичних та практичних методів дослідження. Застосовано методи аналізу й синтезу автоматичних систем керування, математичного моделювання електромеханічних систем, теорії автоматичного регулювання та системного аналізу. Для дослідження динамічних властивостей об'єкта керування та налаштування регуляторів використано комп'ютерне моделювання в середовищі

MATLAB/Simulink. Під час вибору апаратних засобів автоматизації застосовано методи техніко-економічного аналізу та порівняння характеристик промислового обладнання.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна роботи полягає в розробленні та обґрунтуванні структури автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового живильника з урахуванням динамічних властивостей електропривода та змінних технологічних навантажень. Удосконалено підхід до налаштування регулятора продуктивності шляхом поєднання емпіричних методів та автоматизованих засобів оптимізації середовища MATLAB, що дозволяє підвищити якість регулювання та стійкість системи. Отримано математичну модель об'єкта керування, придатну для аналізу та подальшого розвитку алгоритмів автоматичного регулювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Магістерська робота виконана відповідно до науково-дослідного напрямку кафедри з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, що спрямований на розроблення та вдосконалення систем автоматичного керування промисловими технологічними процесами. Тематика роботи узгоджується з науковими планами кафедри та відповідає сучасним державним і галузевим програмам розвитку промислової автоматизації, енергоефективності та цифровізації виробництва.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового живильника для проектування, модернізації та впровадження на діючих промислових підприємствах. Запропоновані технічні рішення можуть бути застосовані для підвищення точності дозування матеріалів, зменшення аварійності, оптимізації енергоспоживання та зниження експлуатаційних витрат. Матеріали роботи можуть бути використані в навчальному процесі під час викладання дисциплін з автоматизації та електропривода.

Структура та обсяг магістерської роботи.

Робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків і списку

використаних джерел, що охоплює 68 сторінку основного тексту, включає 32 рисунки, 25 таблиці і 11 літературних джерел .

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРНИХ СИСТЕМ

1.1. Короткий опис технологічного процесу

Конвеєрні системи є основою промисловості й зустрічаються на багатьох підприємствах по всьому світу. Без них виробництво, випробування, збирання та відвантаження зупинилися б.

Стрічковий живильник, або стрічковий конвеєр, — це механічне обладнання, призначене для переміщення різних матеріалів між заданими точками. Його основою є безперервна стрічка, зазвичай виготовлена з гумових чи пластикових матеріалів, яка натягнута на два чи більше шківів та приводиться в рух електродвигуном.

Розглянемо деякі приклади процесів, у яких зазвичай використовуються стрічкові живильники.

У гірничодобувній промисловості стрічкові живильники застосовуються для транспортування вугілля, руди та інших матеріалів із шахти на збагачувальні фабрики або для завантаження на вантажівки для транспортування в інші місця. У виробничих процесах вони застосовуються для переміщення сировини, компонентів і готової продукції між різними етапами виробничої лінії. Наприклад, стрічковий живильник може використовуватися для переміщення пластикових гранул із бункера для зберігання в машину для лиття під тиском.

У будівельній галузі (рисунок 1.1) стрічкові живильники використовують для переміщення таких матеріалів, як пісок, гравій і бетон, з одного місця в інше на будівельних майданчиках. Вони також можуть знадобитися для транспортування матеріалів на будівельні майданчики та назад.

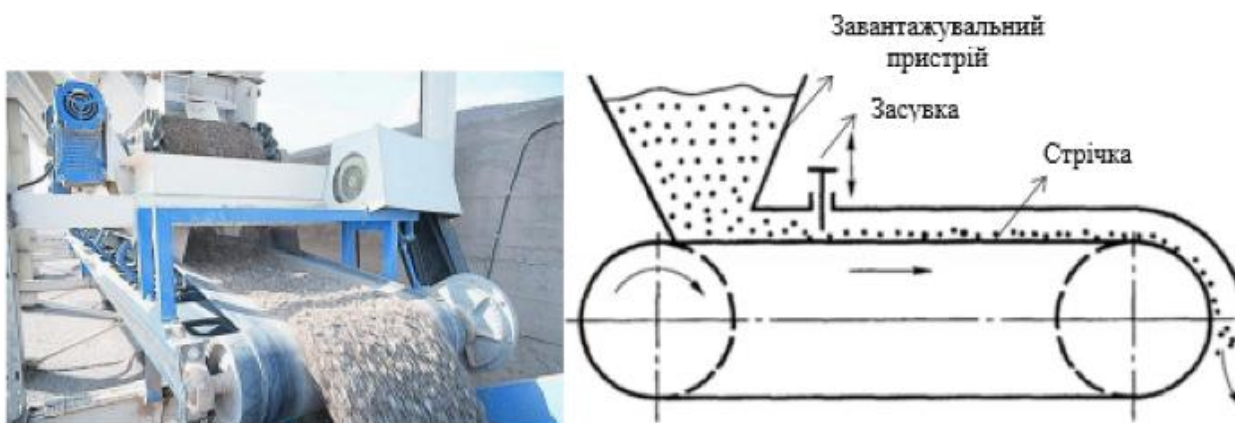


Рис. 1.1. Стрічковий живильник для транспортування щебеню

На підприємствах з переробки відходів вони використовуються для переміщення таких матеріалів, як папір, пластик і метал, з однієї зони підприємства в іншу. Також можливе використання для завантаження й розвантаження матеріалів із вантажівок та інших транспортних засобів. Технологічний процес транспортування корисних копалин (рисунок 1.2) може відрізнятися залежно від виду корисної копалини, відстані транспортування та способу транспортування. Проте наведено загальний огляд основних етапів технологічного процесу транспортування корисних копалин.



Рис. 1.2. Переміщення сировини стрічковим живильником

Добування. Першим кроком цього процесу є вилучення мінералу із землі або шахти. Це може включати буріння, вибухові роботи чи інші методи добування для доступу до родовища корисних копалин. Дроблення та подрібнення: після того як мінерал видобуто, може виникнути потреба в його подрібненні до дрібніших частинок. Це можна зробити за допомогою дробарок і млинів, щоб полегшити транспортування мінералу.

Дробильна установка, у якій встановлено стрічковий живильник із керованим електроприводом постійного струму, наведена на рисунку 1.3.

Розділення: інколи мінерал необхідно відокремити від навколишньої породи або інших матеріалів. Це може передбачати використання гравітаційних, магнітних чи інших методів розділення для ізоляції мінералу від решти матеріалу.

Загрузка: як тільки мінерал оброблено і підготовлено до транспортування, його завантажують у вантажівки, поїзди, кораблі або інші види транспорту. Тип використовуваного транспорту залежить від відстані, необхідної для перевезення корисних копалин, та наявної інфраструктури.

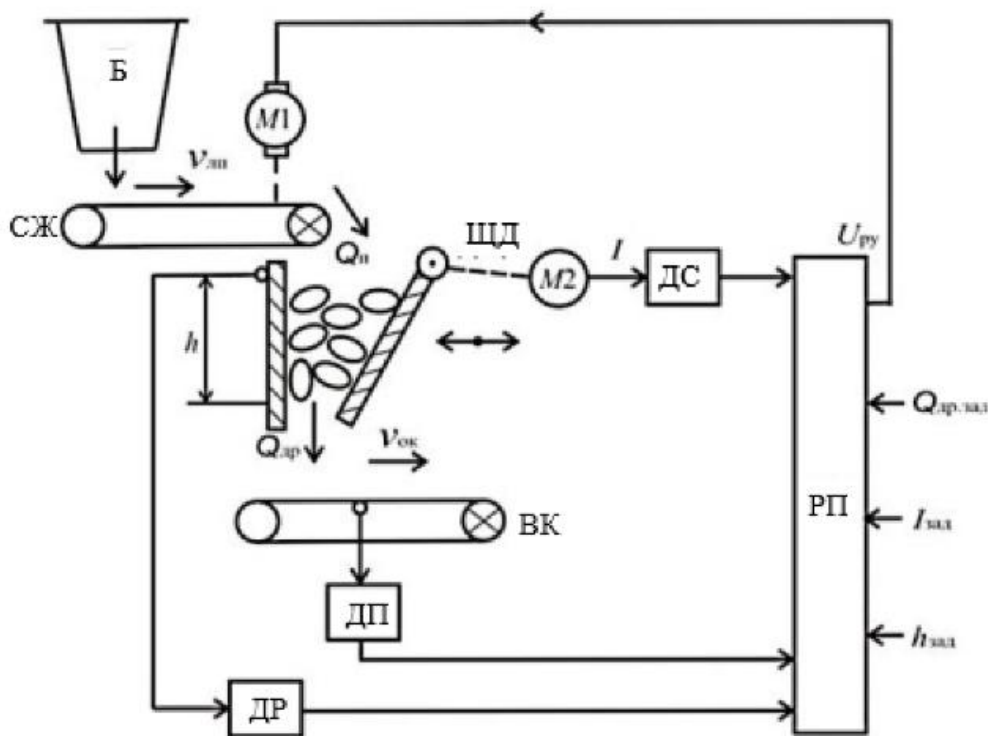


Рис. 1.3. Структурна схема САУ процесу дроблення

Таблиця 1.1

Умовні позначення основних елементів у схемі

Позначення	Найменування
Б	Бункер
СЖ	Стрічковий живильник з регульованим приводом
ЩД	Щокова дробарка
ВК	Відвантажувальний конвеєр
ДП	Давач продуктивності дробарки
ДС	Давач струмового навантаження двигуна
ДР	Давач рівня заповнення камери дробарки
РП	Регулюючий пристрій

Транспортування: під час транспортування мінерал піддається різним небезпекам і ризикам, таким як пошкодження чи розсипання. Щоб знизити ці ризики, застосовуються відповідні заходи безпеки, такі як кріплення вантажу, використання спеціалізованих контейнерів або перевізників і дотримання відповідних норм.

Розвантаження. Після прибуття в пункт призначення мінерал розвантажується з транспортного засобу й переміщується на наступний етап переробки або використання.

Загалом технологічний процес транспортування корисних копалин включає кілька етапів і потребує ретельного планування, виконання й контролю для забезпечення безпечного та ефективного транспортування корисних копалин.

Однак конвеєрне виробництво може також створювати різні фактори ризику для безпеки працівників і обладнання, якщо воно неправильно спроектоване, встановлене, експлуатоване чи обслуговуване. У цій главі викладено матеріал щодо техніки безпеки й передової практики у сфері конвеєрного виробництва.

При конструюванні та встановленні конвеєрних систем необхідно враховувати конкретні вимоги й умови застосування, а також відповідні стандарти

й норми безпеки. Деякі міркування щодо розробки та встановлення конвеєрних систем включають:

- вибір відповідного типу й розміру конвеєра для конкретного застосування;
- забезпечення достатнього вільного простору й відстані для персоналу та обладнання;
- встановлення огорожень, бар'єрів та інших елементів безпеки для запобігання падінням, зіткненням та іншим небезпекам;
- забезпечення належного заземлення та безпеки електричних компонентів конвеєра;
- встановлення кнопок аварійної зупинки, попереджувальних знаків та інших пристроїв безпеки для швидкого й легкого доступу у випадку надзвичайних ситуацій.

Безпечна експлуатація конвеєрних систем потребує належного навчання, контролю та моніторингу з боку персоналу, а також дотримання стандартних робочих процедур і вимог із промислової безпеки. Деякі експлуатаційні міркування для конвеєрних систем включають:

- забезпечення належної підготовки й контролю персоналу, який обслуговує та експлуатує систему;
- контроль за дотриманням належних процедур блокування й контролю під час технічного обслуговування та ремонту;
- регулярний огляд і обслуговування компонентів конвеєра, таких як стрічки, шківни та підшипники, щоб запобігти зношенню та пошкодженням;
- контроль швидкості, навантаження та інших параметрів конвеєра для запобігання перевантаженню й іншим небезпекам;
- упровадження системи своєчасного та ефективного інформування про проблеми безпеки й інциденти та їх усунення.

Належне технічне обслуговування й ремонт конвеєрних систем є необхідними для забезпечення їхньої безпечної та надійної роботи. Деякі рекомендації щодо технічного обслуговування й ремонту конвеєрних систем включають:

- регулярний огляд і очищення компонентів конвеєра для запобігання накопиченню сміття та матеріалів;
- змащування підшипників, ланцюгів та інших рухомих частин для зменшення тертя й зношування;
- своєчасна заміна зношених або пошкоджених компонентів;
- проведення регулярного тестування й калібрування пристроїв безпеки, таких як кнопки аварійної зупинки й датчики;
- забезпечення належного заземлення та захисту всіх електричних компонентів від вологи й інших небезпек.

На завершення слід зазначити, що конвеєрне виробництво може бути безпечним і ефективним, якщо на всіх етапах проектування, встановлення, експлуатації та технічного обслуговування конвеєрної системи дотримуються належні вимоги безпеки й передові методи. Дотримання стандартів і правил безпеки, забезпечення належного навчання й контролю, упровадження

1.2. Принцип роботи стрічкового живильника

Стрічковий живильник — це тип конвеєрної системи (рисунок 1.4), призначений для транспортування та дозування сипучих матеріалів, таких як зерно, пісок або гравій.

Основний принцип роботи стрічкового живильника полягає в тому, що стрічку живильника підтримують ролюкоопори: верхню гілку — прями або жолобчасті, нижню — прями. У рух стрічку приводить приводний барабан, вал якого з'єднується з приводом. Натяжний барабан із гвинтовим натяжним пристроєм відповідає за натяг стрічки. Живильник оснащений завантажувальною воронкою, через яку подається матеріал, а його кількість контролюється за допомогою шибєрного затвора. Вивантаження відбувається в зоні приводної станції. Для очищення стрічки використовується спеціальний скребок. Якщо транспортується пилоподібний матеріал, конструкцію живильника за потреби доповнюють захисними укриттями [3].

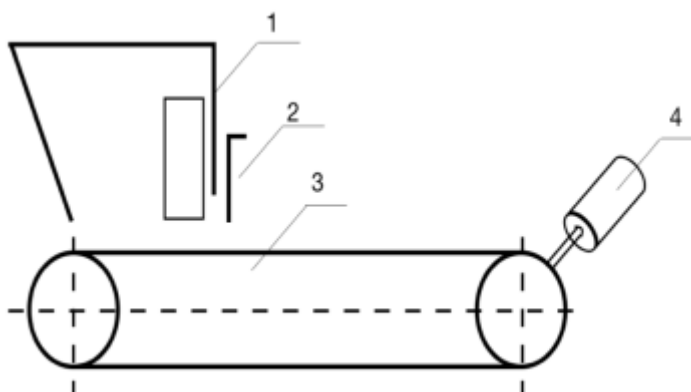


Рис. 1.4. Типова схема стрічкового живильника

Таблиця 1.2

Складові частини конструкції живильника

№	Найменування	Призначення
1	Витратний бункер	Елемент для подачі матеріалу
2	Вертикальний шибер	Механізм, що виконує регулювальні операції
3	Транспортерна стрічка	Забезпечує транспортування матеріалу
4	Частотний привід	Система для регулювання швидкості руху стрічки

Стрічку зазвичай виготовляють із металевих, полімерних, ПВХ-матеріалів або інших зносостійких компонентів, які можуть витримувати значні навантаження та тертя. Живильник зазвичай монтують під накопичувальним бункером, воронкою чи контейнером, звідки матеріал надходить на стрічку самопливом під дією власної ваги. Пристрій працює з постійною швидкістю та переносить матеріал уздовж своєї довжини, доки він не досягне точки розвантаження, де падає на конвеєр або ваги. Швидкість і витрату матеріалу можна регулювати, контролюючи швидкість стрічки та кут нахилу жолоба.

Однією з найчастіших несправностей, що впливають на ефективність транспортування матеріалу, є відхилення стрічки від нормального положення та порушення її траєкторії. Такі збої виникають у випадках, коли стрічка рухається по рамі нерівномірно, через що вона зміщується в один або інший бік.

Для виконання подальших розрахунків буде використано стрічковий живильник (рисунок 1.5). Дані, які будуть потрібні у розрахунках, наведені в таблицях 1.3 та 1.4 відповідно.



Рис. 1.5. Стрічковий живильник

Таблиця 1.3

Технічні характеристики стрічкового живильника

Характеристика	Значення
Верхня межа продуктивності, м ³ /год	55
Ширина стрічки, мм	1000
Кут нахилу живильника по трасі, град.	від 0 до 18
Швидкість руху стрічки, м/с	1,0 до 2,0
Установлена потужність, кВт	від 2,2 до 15

Габаритні розміри

Характеристика	Значення
Довжина стрічки, мм	2000
Ширина (по приводу), мм	3300
Висота (по патрубках), мм	1560
Маса, кг	до 450

Схему роботи стрічкового живильника наведено на рисунку 1.6. Однією з його переваг є використання електродвигуна з мотор-редуктором — це сучасне технічне рішення, яке широко застосовується на різних промислових об'єктах.

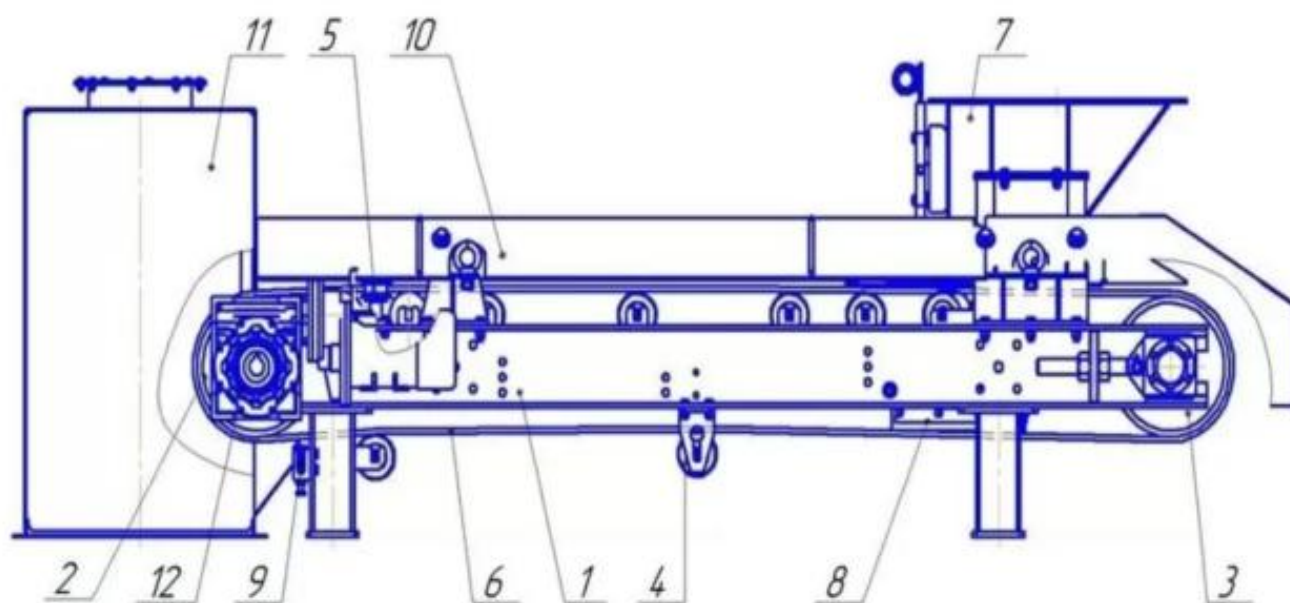


Рис. 1.6. Схема стрічкового живильника

Опис позначень, наведених на схемі рисунка 1.6, можна побачити в таблиці 1.5.

Позначення в схемі

№	Найменування	Призначення
1	Рама	Опорна конструкція обладнання
2	Приводний барабан	Забезпечує рух стрічки
3	Натяжний барабан	Підтримує необхідний натяг стрічки
4	Конвеєрні ролики	Підтримують стрічку під час руху
5	Дефлекторні ролики	Спрямовують стрічку та коригують її положення
6	Стрічка (робочий діапазон –35...+60 °С)	Транспортує матеріал
7	Формувальна воронка	Формує та спрямовує потік матеріалу
8, 9	Очисники стрічки	Видаляють налипання та забруднення зі стрічки
10	Огородження	Забезпечує безпечну експлуатацію
11	Аспіраційний кожух	Відводить пил та покращує умови роботи
12	Мотор-редуктор NMRV	Приводить у рух механізм, поєднуючи двигун і редуктор

1.3. Загальні принципи роботи електропривода стрічкового живильника

Електропривод стрічкового живильника — це найважливіший компонент, який відповідає за переміщення матеріалів по шляху подачі (рисунок 1.7). У більшості випадків електропривод складається з електродвигуна та редуктора, який з'єднаний із валом, що приводить стрічку в рух.

Електродвигун є ключовим елементом системи електропривода, оскільки саме він здійснює перетворення електричної енергії на механічну, що забезпечує рух конвеєрної стрічки. У стрічкових живильниках зазвичай використовують двигуни як змінного, так і постійного струму — вибір залежить від умов роботи та технічних вимог конкретного обладнання.



Рис. 1.7. Електричний привід

Для монтажу привода використовується окрема рама, що дає змогу встановлювати та регулювати його незалежно від стрічкового живильника, а також спрощує технічне обслуговування й ремонт. До складу привода входять асинхронний електродвигун і редуктор, змонтовані на спільній основі. Передавання крутного моменту від вала двигуна до вхідного вала редуктора, а далі — до вала привода живильника, здійснюється за допомогою компенсуючих муфт.

Принципова схема зображена на рисунку 1.8.

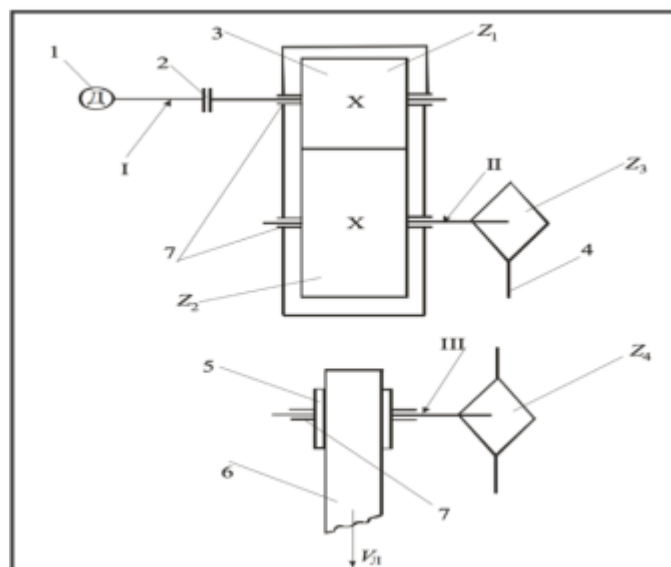


Рис. 1.8. Принципова схема привода стрічкового живильника

Таблиця 1.6

Опис принципової схеми

№	Найменування	Призначення
1	Електродвигун	Приводить у рух систему
2	Муфта	Передає крутний момент і компенсує можливі перекося валів
3	Циліндричний редуктор	Знижує частоту обертання та підвищує крутний момент
4	Ланцюгова передача	Забезпечує передавання руху між валами
5	Барабан	Приймає обертання та приводить у рух стрічку
6	Стрічка	Транспортує матеріал уздовж живильника
7	Підшипники кочення	Забезпечують плавне обертання валів і зменшують тертя
I	Вал шестерні (ведучий)	Передає обертання від привода
II	Вал колеса (ведений)	Приймає рух від ведучого вала
III	Вал приводного барабана	Передає обертання безпосередньо на барабан

Система керування електроприводом стрічкового живильника зазвичай містить датчики, що контролюють швидкість руху стрічки, рівень навантаження та її положення, передаючи отримані сигнали зворотного зв'язку до привода. Однією з ключових переваг електропривода є його висока енергоефективність та економічність у порівнянні з гідравлічними чи пневматичними системами. Такий привод здатний працювати на підвищених швидкостях і забезпечувати точне регулювання руху стрічки та подачі матеріалу, водночас мінімізуючи енергетичні втрати та шкідливі викиди.

Ще однією важливою перевагою електропривода є простота монтажу й технічного обслуговування, а також можливість інтеграції з сучасними системами автоматизації. Він може працювати під дистанційним керуванням і

налаштовуватися на зміну швидкості стрічки чи продуктивності відповідно до вимог технологічного процесу.

Отже, електропривод стрічкового живильника є надійним, ефективним і гнучким рішенням для транспортування та дозування сипучих матеріалів, забезпечуючи високу продуктивність, енергозбереження та зручність експлуатації.

1.4 Постановка завдання магістерської роботи

Головною метою під час проектування системи керування швидкістю стрічкового живильника є забезпечення точного вимірювання інтенсивності потоку матеріалу та відповідного коригування швидкості руху стрічки. Для цього необхідно застосовувати датчики й виконавчі механізми, здатні контролювати переміщення стрічки, а також алгоритми обробки сигналів, які аналізують інформацію від давачів і формують команди для зміни швидкості стрічки.

У межах магістерської роботи необхідно виконати такі основні етапи:

- Розробити систему автоматичного регулювання роботи об'єкта;
- Провести вибір відповідного обладнання;
- Сформувати функціональну схему автоматизації процесу;
- Побудувати математичну модель САР для каналу керування швидкістю стрічки;
- Виконати налаштування регулятора за емпіричними методами та порівняти отримані результати з ручним налаштуванням ПД-регулятора.

Висновки до розділу 1

У першому розділі магістерської роботи проведено аналіз технологічного процесу стрічкових конвеєрних систем, що використовуються для транспортування та дозування сипких матеріалів у промислових умовах. Розглянуто основні особливості технологічного процесу, його роль у загальній

структурі виробництва та вимоги, які висуваються до надійності, точності та стабільності роботи стрічкових живильників.

Досліджено принцип роботи стрічкового живильника, визначено його основні конструктивні елементи та фактори, що впливають на продуктивність, зокрема швидкість руху стрічки, властивості матеріалу та режими навантаження. Показано, що зміна технологічних умов призводить до коливань продуктивності, що знижує ефективність роботи обладнання.

Проаналізовано загальні принципи роботи електропривода стрічкового живильника, зокрема його динамічні характеристики та вплив на якість регулювання продуктивності. Встановлено, що традиційні системи керування не завжди забезпечують необхідну точність та швидкодію в умовах змінного навантаження, що обґрунтовує доцільність впровадження автоматизованих систем керування з використанням сучасних засобів регулювання.

На основі проведеного аналізу сформульовано постановку завдання магістерської роботи, яка полягає у розробленні автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового живильника з метою підвищення стабільності роботи, точності дозування та енергоефективності технологічного процесу.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СТРІЧКОВОГО ЖИВИЛЬНИКА

Для стабільної, ефективної та безпечної роботи стрічкового живильника необхідно здійснювати контроль його продуктивності. Одним із дієвих підходів є створення автоматизованої системи, здатної в реальному часі відстежувати параметри роботи та коригувати подачу матеріалу. Продуктивність як пластинчастих, так і стрічкових живильників можна визначити за таким загальним виразом:

$$Q = kBh\nu\delta\varphi \quad (2.1)$$

де: Q – продуктивність, т/год; k – безрозмірний коефіцієнт, що враховує перехідні величини ($k \approx 3,6$); B – ширина транспортерної стрічки, м; h – висота шару матеріалу на стрічці, м; ν – швидкість руху стрічки, м/с; δ – густина матеріалу, т/м³; φ – коефіцієнт заповнення стрічки ($\varphi = 0,75 \div 0,80$).

Продуктивність пластинчастих і стрічкових живильників можна змінювати за рахунок плавного регулювання швидкості руху стрічки ν або коригування висоти шару матеріалу h на її поверхні. Наприклад, у стрічкових транспортерах швидкість стрічки може змінюватися через реостат, увімкнений у коло обмотки збудження, що забезпечує майже лінійну залежність між подачею матеріалу та швидкістю його транспортування.

2.1. Розробка функціональної та структурної схеми управління

У системах промислової автоматизації та керування технологічними процесами об'єкт керування являє собою фізичний або штучно створений елемент, на який здійснюється керувальний вплив з метою регулювання роботи процесу чи всієї системи. Основним призначенням об'єкта керування є забезпечення заданого рівня продуктивності або вихідних параметрів за умови зменшення втрат, похибок та інших небажаних ефектів.

Проектування функціональної схеми автоматичного керування полягає у створенні наочного графічного відображення, яке демонструє складові системи та взаємозв'язки між ними. Процес розроблення такої схеми включає низку послідовних етапів:

- визначення конкретного об'єкта або технологічного процесу, для якого необхідно реалізувати керування. У разі автоматичного регулювання швидкості стрічкового живильника об'єктом керування виступає сам стрічковий живильник як єдина система;

- встановлення вхідних і вихідних параметрів системи керування. До вхідних сигналів можуть належати задані значення подачі матеріалу, показники його густини або сигнали зворотного зв'язку від вимірювальних пристроїв. Вихідними сигналами, як правило, є команди, що задають швидкість руху стрічки;

- підбір і визначення датчиків, необхідних для контролю параметрів системи. Для забезпечення зворотного зв'язку під час керування швидкістю стрічкового живильника можуть використовуватися датчики витрати, рівня матеріалу чи тензометричні датчики;

- вибір виконавчих пристроїв, які безпосередньо впливають на швидкість руху стрічки. У цьому випадку таким елементом може бути приводний контролер, що регулює частоту обертання двигуна живильника;

- формування стратегії керування відповідно до поставлених вимог і цілей системи. Для регулювання швидкості стрічкового живильника часто застосовують ПІД-регулятори, методи керування з прогнозуванням моделі або більш складні алгоритми;

- визначення структурних блоків системи керування, які відповідають за окремі функції, зокрема обробку вхідної інформації, збір даних із датчиків, формування керувальних сигналів та реалізацію алгоритму керування. Ці блоки з'єднуються між собою для відображення потоків даних і сигналів.

Під час розроблення схеми доцільно передбачити елементи безпеки, такі як аварійні кнопки зупинки, кінцеві вимикачі або системи діагностики несправностей, що забезпечують захист обладнання та персоналу. Функціональну схему слід

перевірити шляхом моделювання або експериментального тестування, щоб упевнитися у відповідності заданим вимогам. За необхідності проєкт коригується з урахуванням результатів перевірок і показників ефективності системи.

Сформована функціональна схема є основою для практичної реалізації системи автоматичного керування та слугує орієнтиром під час вибору й інтеграції апаратних і програмних засобів, необхідних для її впровадження.

Функціональна схема стрічкового живильника з урахуванням усіх вищезазначених вимог представлена на рисунку 2.1.

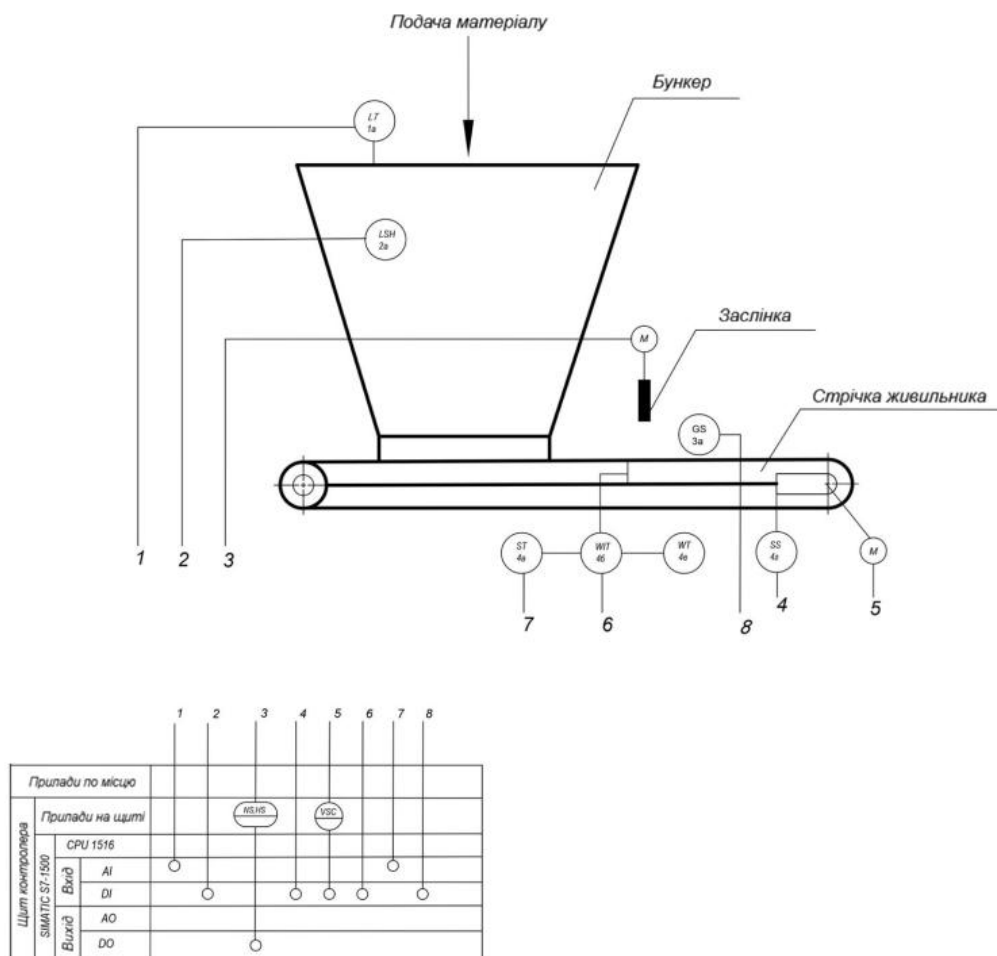


Рис. 2.1. Функціональна схема стрічкового живильника

Розроблення структурної схеми керування передбачає формування ієрархічної моделі, що відображає організацію системи, її функціональні елементи, завдання та взаємозв'язки між ними. Така схема дозволяє наочно показати, як

побудована система керування та яким чином окремі її компоненти взаємодіють між собою.

Під час побудови структурної схеми необхідно передбачити контури зворотного зв'язку, які забезпечують роботу системи в замкненому режимі. Це включає порівняння заданої уставки з фактичними параметрами, отриманими від датчиків, та формування коригувального сигналу на основі виниклої похибки.

Структурна схема стрічкового живильника наведена на рисунку 2.2.

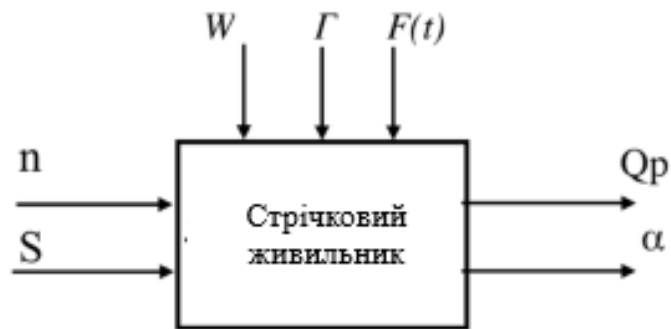


Рис. 2.2. Структурна схема стрічкового живильника як об'єкта управління

Таблиця 2.1

Умовні позначення на схемі

Впливи	Позначення	Опис
Вхідні керуючі впливи	n , об/хв	Частота обертання електродвигуна
	S , мм	Положення заслінки випускного отвору бункера
Вхідні збурюючі впливи	W , %	Вологість вихідного матеріалу
	Γ , %	Наявність глини, що порушують сипучість матеріалу
	$F(t)$	Перешкоди (наприклад, знос обладнання)
Вихідні параметри	Q_p , т/год	Продуктивність стрічкового живильника
	α , %	Вміст контрольного класу крупності в руді

2.2. Отримання математичної моделі об'єкта

Для визначення продуктивності живильника скористаємося даними таблиці 1.3. У технічних характеристиках моделі ПЛ-1000 продуктивність подана в кубічних метрах за годину. Щоб перевести це значення у тонни за годину, застосовують формулу перерахунку, що враховує густину матеріалу.

$$Q_p = \tau/\text{год} = Q(\text{м}^3/\text{год}) \times \delta \quad (2.2)$$

Густина залізородного агломерату δ складає $2(\text{т}/\text{м}^3)$.

$$Q_p = 55 * 2 = 110 \quad (2.3)$$

Спираючись на дані наукових джерел, для подальшого аналізу використаємо підхід, відомий як метод « Q -параметризації» [5]. Нехай вхідним сигналом є витрата матеріалу $p(t)$, а вихідним — маса $m(t)$. Тоді передатну функцію стрічкового живильника можна подати у такому вигляді:

$$W_{\text{тр}}(s) = \frac{M(p)}{P(p)} \quad (2.4)$$

Потік матеріалу, що надходить із бункера, позначимо як $p_1(t)$, тоді як потік, який подається безпосередньо на стрічку — як $p(t)$.

Використовуючи рівність матеріального балансу, обчислимо масу накопиченого матеріалу:

$$\frac{dm}{dt} = p - p_1 \quad (2.5)$$

Швидкість живильника незмінна, отже

$$\begin{cases} p_1(t) = p(t - \tau) \\ \tau = \frac{v}{L} \end{cases} \quad (2.6)$$

де τ — час запізнювання, [с]; L — довжина стрічки, 2[м]; v — швидкість руху стрічки, 2[м/с].

Рівняння матеріального балансу після перетворення має вигляд:

$$\frac{dm(t)}{dt} = p(t) - p(t - \tau) \quad (2.7)$$

Застосуємо перетворення Лапласа:

$$\begin{cases} L\left\{\frac{dm(t)}{dt}\right\} = sM(p), \\ L\{p(t)\} = P(p), \\ L\{p(t-\tau)\} = P(p)e^{-\tau s}, \\ sM(s) = P(s) - P(p)e^{-\tau s} \end{cases} \quad (2.8)$$

Отже:

$$\frac{M(p)}{P(p)} = W_{\text{пл}}(p) = \frac{1-e^{-\tau p}}{p} \quad (2.9)$$

Перетворимо $e^{-\tau p}$, використавши апроксимацію ряду Паде:

$$e^{-\tau p} \approx \frac{1-p\frac{\tau}{2}}{1+p\frac{\tau}{2}} \quad (2.10)$$

На основі отриманих залежностей можна записати номінальну передатну функцію стрічкового живильника:

$$W_{\text{пл}}^0(p) = \frac{\tau}{\frac{\tau}{2}p+1} = \frac{1}{0,5p+1} \quad (2.11)$$

Щоб забезпечити рух стрічки, використовується електропривід, до складу якого входять електродвигун, редуктор і частотний перетворювач.

Характер руху електроприводу описує рівняння моментів:

$$M = M_{\text{ст}} + M_{\text{д}} \quad (2.12)$$

де M — обертовий момент, що розвивається електродвигуном;

$M_{\text{ст}}$ — статичний момент опору, який створює навантаження механізму;

$M_{\text{д}}$ — динамічний момент, пов'язаний із прискоренням або уповільненням рухомих частин.

Таблиця 2.2

Вихідні дані для розрахунку

Q_p	f	L	$\eta_{\text{п}}$
т/год	—	м	%
110	0.7	2	0,8

Під час роботи електродвигуна в усталеному режимі $M = M_{\text{ст}}$, вибір здійснюється, виходячи з виконання умови:

$$P_{\text{ном}} \geq P_p \quad (2.13)$$

де $P_{\text{ном}}$ — номінальна потужність, Вт;

P_p — розрахункове значення потужності, Вт.

Розрахункову потужність, необхідну для роботи горизонтального стрічкового живильника, визначають за відповідною формулою:

$$P_p = \frac{Q_p f L}{\eta_{\pi}} \quad (2.14)$$

де η_{π} – коефіцієнт корисної дії мотор-редуктора; f – коефіцієнт тертя.

Підставивши значення параметрів із таблиці 2.2, визначимо розрахункову потужність живильника:

$$P_p = \frac{110 \times 0.7 \times 2}{0.008} = 19250 \text{ ВТ} \quad (2.15)$$

Згідно з каталогом (таблиця 2.3), для забезпечення необхідної номінальної потужності 2,2 кВт обираємо електродвигун закритого виконання серії 4А, типорозміру 90L4.

Таблиця 2.3

Дані асинхронного двигуна

$P_{\text{ном}}$, кВт	N , об /хв	Енергетичні та механічні параметри				
		ККД, %	$s_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi$, %	s_K , %	m_K
2,2	1500	80	5.1	0.83	33	2.4

Асинхронний електродвигун належить до найбільш поширених типів приводів, що застосовуються у промисловості. Принцип його роботи базується на явищі електромагнітної індукції: у статорі створюється обертове магнітне поле, яке індукуює струм у роторі та змушує його обертатися.

На відміну від синхронних машин, асинхронний двигун не потребує спеціальних засобів для підтримання синхронізму з частотою мережі. Важливою характеристикою є коефіцієнт корисної дії, що визначає, наскільки ефективно електрична енергія перетворюється на механічну. Високий ККД сприяє зменшенню витрат на електроенергію та підвищує економічність експлуатації.

Ще одним ключовим параметром є коефіцієнт потужності, який показує, наскільки раціонально двигун використовує підведену електричну енергію. Низьке значення цього коефіцієнта призводить до додаткових втрат і зниження загальної ефективності електропривода.

Під час запуску двигун повинен розвинути певний пусковий момент — крутний момент, що виникає в момент пуску. Його величина визначається конструктивними особливостями машини, параметрами ротора та рівнем напруги, що подається на обмотки.

Існує кілька способів запуску асинхронних двигунів: пряме підключення до мережі, пуск за схемою «зірка–трикутник», застосування автотрансформатора або використання електронних систем плавного пуску. Такі методи дозволяють зменшити пускові струми та знизити механічні навантаження на обладнання.

Регулювання швидкості асинхронних двигунів здійснюється переважно за допомогою частотно-регульованих приводів, які змінюють частоту та напругу живлення, забезпечуючи точне керування обертами.

Завдяки простоті конструкції, надійності та економічності асинхронні двигуни широко застосовуються у приводах насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів та іншого промислового обладнання.

Коректне розуміння їхніх технічних параметрів є необхідною умовою для правильного вибору двигуна, забезпечення стабільної роботи та досягнення високої продуктивності системи.

У скорочених позначеннях, що використовуються в маркуванні асинхронних двигунів, прийнято застосовувати стандартизовані символи, які відображають основні технічні характеристики машини.

Таблиця 2.4

Скорочення для параметрів асинхронного двигуна

Найменування	Опис
P	номінальна потужність двигуна
ST	пусковий крутний момент
RV	напруга, що подається на ротор
RR	активний опір обмотки ротора
THD	показник рівня гармонічних спотворень у струмі або напрузі

Асинхронні електродвигуни в технічних каталогах зазвичай групують за типорозмірами та основними експлуатаційними параметрами. Типорозмір

відображає габаритні розміри машини та її потужність. Він подається у вигляді буквено-цифрового коду, де літерна частина характеризує конструктивні габарити, а числова — орієнтовну потужність або висоту осі обертання.

Слід враховувати, що система позначень може дещо відрізнятись залежно від виробника чи країни. Типорозмір визначається за зовнішніми розмірами корпусу, розташуванням і параметрами кріпильних отворів. Корпуси двигунів стандартизовані, тому типорозміри часто подаються у вигляді індексів (наприклад: АБ, А, В, Г, 63, 71 тощо), які відповідають певній висоті корпусу, діаметру та допустимій потужності.

У каталогах асинхронних двигунів зазвичай зазначають типорозмір, номінальну потужність, робочу частоту, напругу живлення, швидкість обертання вала, а також додаткові характеристики — ККД, крутний момент, робочий струм та інші параметри. Залежно від конструктивних особливостей і режимів роботи двигуни поділяють на різні класи та виконання.

Неправильно підібране навантаження може негативно впливати на роботу двигуна. Перевантаження призводить до перегрівання, прискореного зношування та можливих відмов. Недовантаження також небажане, оскільки знижує енергоефективність і збільшує питомі витрати енергії.

Контроль навантаження є важливою умовою забезпечення надійної та довготривалої роботи електропривода. Робота в оптимальному режимі сприяє економії енергії, зменшенню викидів і підвищенню загальної ефективності системи. Регулярна перевірка навантаження дозволяє переконатися, що двигун працює в межах допустимих параметрів і не виходить за межі безпечного режиму.

Далі виконаємо перевірку обраного двигуна за навантаженням, приведеним до вала, оцінюючи його здатність витримувати перевантаження як у робочому режимі, так і під час пуску.

Перевірка перевантажувальної здатності полягає у встановленні того, чи виконуються необхідні умови роботи двигуна в режимах підвищеного навантаження:

$$P_{\text{ном}} \leq \frac{P_{\text{мах}}}{\lambda_{\text{м.доп}}} \quad (2.16)$$

де P_{\max} – максимальна потужність двигуна при навантаженні, кВт;

$\lambda_{\text{м,доп}}$ – допустимий коефіцієнт перевантажувальної здатності.

Відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), допустиму перевантажувальну здатність можна оцінити за співвідношенням:

$$\lambda_{\text{м,доп}} \approx 0.64 \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} \quad (2.17)$$

де M_{\max} – максимальний крутний момент двигуна;

$M_{\text{ном}}$ – номінальний момент двигуна.

Згідно з даними каталогу, відношення максимального моменту до номінального становить 2,4. Тоді:

$$\lambda_{\text{м,доп}} = 0.64 \times 2.4 = 1.536. \quad (2.18)$$

Максимальна потужність електродвигуна при навантаженні визначається за формулою (2.19). Далі підставимо значення моментів, отримані у розрахунках (2.20) та (2.21):

$$P_{\max} = \frac{M_{\max} \times n}{9575} \quad (2.19)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \times 9575}{n(1-S_{\text{H}})} \quad (2.20)$$

$$M_{\max} = M_{\text{ном}} \times 1.536 = \frac{2.2 \times 9575}{1500(1-0.051)} \times 1.536 = 22.7 \quad (2.21)$$

$$P_{\max} = \frac{22.7 \times 1423.5}{9575} = 3.3 \quad (2.22)$$

Максимальна потужність двигуна при навантаженні становить $P_{\max} = 3.3$ кВт.

Перевіримо виконання умови перевантажувальної здатності (2.15):

$$2,2 \geq 2,14 \quad (2.23)$$

Отже, електродвигун типу 4A90L4УЗ відповідає вимогам щодо допустимого перевантаження.

Далі побудуємо природну механічну характеристику вибраного асинхронного двигуна, яка використовується для аналізу його статичних і динамічних режимів роботи. Цю залежність також називають «механічною характеристикою момент–швидкість».

На форму природної механічної характеристики впливають конструктивні параметри двигуна, опір і маса ротора, а також характер навантаження, з яким він працює. Крім того, важливу роль відіграють електричні параметри — напруга живлення та частота мережі.

Розуміння цієї характеристики є ключовим для правильного вибору двигуна, його ефективного керування та забезпечення надійної роботи приводу. Вона дозволяє оцінити поведінку двигуна за різних режимів навантаження та є основою для побудови систем автоматичного керування.

Графік залежності $n = f(M)$ що відображає зміну частоти обертання ротора залежно від моменту на валу, будують з урахуванням зв'язку між ковзанням і частотою обертання двигуна.

Формула ковзання має вигляд:

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1} \quad (2.24)$$

де s – ковзання; n_1 – синхронна та номінальна частота обертання, об/хв; n – актична (номінальна) частота обертання, об/хв.

Використовуючи дані таблиці 2.5, можна побудувати механічну характеристику асинхронного двигуна.

Для коректного графічного відображення рекомендується визначити щонайменше десять точок. Значення моменту та частоти обертання, окрім основних робочих режимів, розраховують шляхом варіювання ковзання.

Таблиця 2.5

Розрахункові дані

s	0	0,051	0,2	0,22	0,3	0,33	0,4	0,54	0,8	1
M , Нм	0	14,7	20,12	20,9	22,59	22,7	22,28	20,2	14,4	13,5
n , об/хв	1500	1423,5	1200	1170	1050	1005	900	700	300	0

На рисунку 2.3 наведено чотири характерні робочі точки асинхронного двигуна:

– пусковий режим: $s_{\text{п}} = 1, n = 0$ об/хв, $M = 13,5$ Нм;

- холостий хід: $s = 0, n_1 = 1500$ об/хв, $M = 0$ Нм;
- критичний режим: $s_k = 0,33, n = 1005$ об/хв, $M = 22,7$ Нм;
- номінальний режим: $s = 0,051, n = 1423,5$ об/хв, $M_n = 14,7$ Нм.

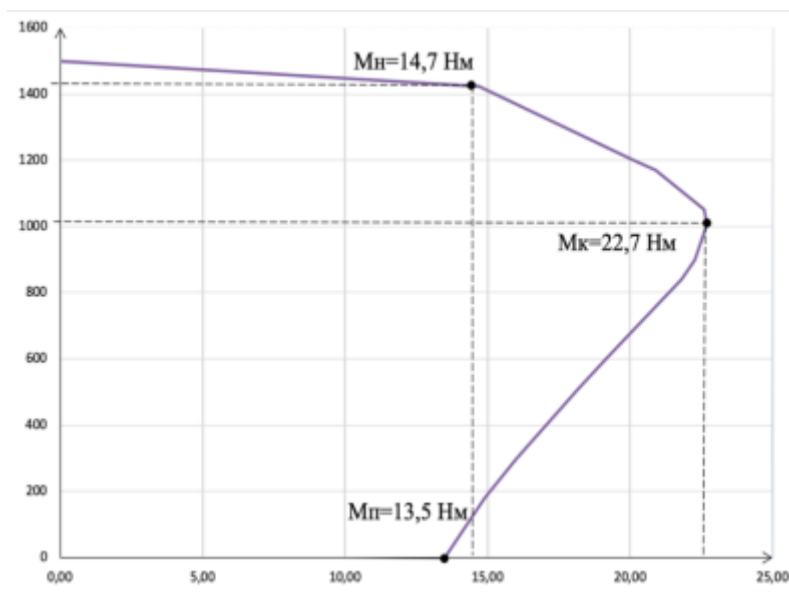


Рис. 2.3. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Продуктивність стрічкового живильника $p(t)$ є величиною, прямо пропорційною кутовій швидкості приводного барабана $\omega(t)$:

$$p(t) = K_{\text{жив}} \times \omega(t) \quad (2.25)$$

Застосувавши перетворення Лапласа, отримаємо:

$$\Omega(s) = L\{\omega(t)\} \quad (2.26)$$

$$P(s) = K_{\text{жив}} \times \Omega(p). \quad (2.27)$$

Кутова швидкість двигуна залежить від величини завдання, що формується керуючою напругою перетворювача частоти $U_{\text{кер}}$, згідно [6,7] ця залежність має інерційний характер:

$$P(p) = K_{\text{жив}} \frac{K_{\text{п}}\beta}{T_s + 1} N_{\text{кер}}(p) \quad (2.28)$$

де $K_{\text{жив}} = 0,32$ кг – коефіцієнт передавання живильника;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт підсилення;

T – механічна стала часу двигуна;

$N_{\text{кер}}$ – керуюча напруга ПЧ.

Параметри двигуна відповідно до [7] визначимо на основі паспортних даних електродвигуна, наведених у таблиці 2.2.

$$T = \frac{1}{\omega_0 s_k} = 0.034c \quad (2.29)$$

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_0 s_k} = 2.2 \text{ Нм/с} \quad (2.30)$$

$$K_{\Pi} = \frac{\omega_0}{U_y} = 15,7c^{-1}V^{-1} \quad (2.31)$$

Номинальна передатна функція електропривода стрічкового живильника має вигляд:

$$W_{\text{жив}}^0(s) = 0.32 \frac{34.54}{0.034s+1} \quad (2.32)$$

У даній роботі застосовано частотний метод регулювання швидкості асинхронного двигуна, який реалізується за допомогою перетворювача частоти (рисунок 2.4).

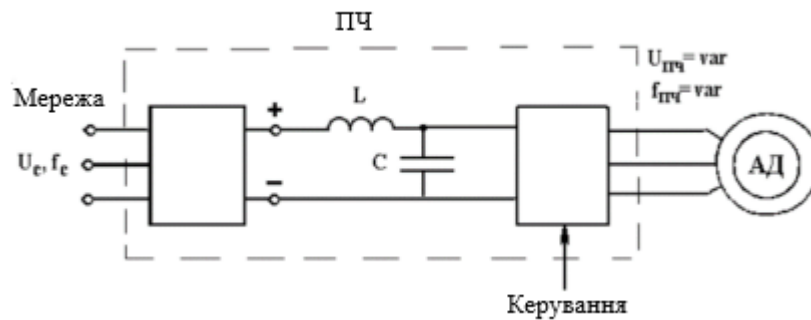


Рис. 2.4. Типова схема перетворювача частоти

Передатну функцію перетворювача частоти можна подати через його коефіцієнт підсилення:

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{f_{\text{макс}}}{U_{3f}} = K_{\text{ПЧ}} \quad (2.33)$$

Коефіцієнт $K_{\text{ПЧ}}$ визначається як відношення максимальної частоти струму статора до максимальної керуючої напруги, що надходить від системи керування:

$$K_{\text{ПЧ}} = \frac{f_{\text{макс}}}{U_{3f}} = \frac{50\text{Гц}}{10\text{В}} = 5\text{Гц/В} \quad (2.34)$$

Модель датчика швидкості приймається у вигляді пропорційної ланки з коефіцієнтом, рівним одиниці:

$$W_{\text{дшв}}(p) = 1 \quad (2.35)$$

Отже, математичну модель системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового живильника можна подати у вигляді узагальненої передатної функції, що враховує передатні функції перетворювача частоти, двигуна та датчика швидкості:

$$\left\{ \begin{array}{l} W(p) = \frac{M(p)}{P(p)} = \frac{1-e^{-p\tau}}{p} \\ W_p(p) = K_{\text{жив}} \times \Omega(p) = K_{\text{жив}} \times \frac{K_n \times \beta}{T(p)+1} \\ W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{f(p)}{U_{3f}} = K_{\text{ПЧ}} \\ W_{\text{дшв}}(p) = K_c \end{array} \right. \quad (2.36)$$

2.3. Аналіз динамічних властивостей об'єкта керування

Математична модель об'єкта керування є фундаментом для проведення аналізу та формування уявлення про динаміку системи. Аналіз системи керування охоплює дослідження її реакції на зовнішні впливи, оцінку стійкості та визначення експлуатаційних характеристик. Основна мета такого аналізу — з'ясувати, як система поводить себе під дією вхідних сигналів, яким чином вона переходить у сталий режим та наскільки ефективно забезпечує досягнення заданих цілей.

На рисунку 2.5 подано структурний склад процесів аналізу та синтезу системи керування.

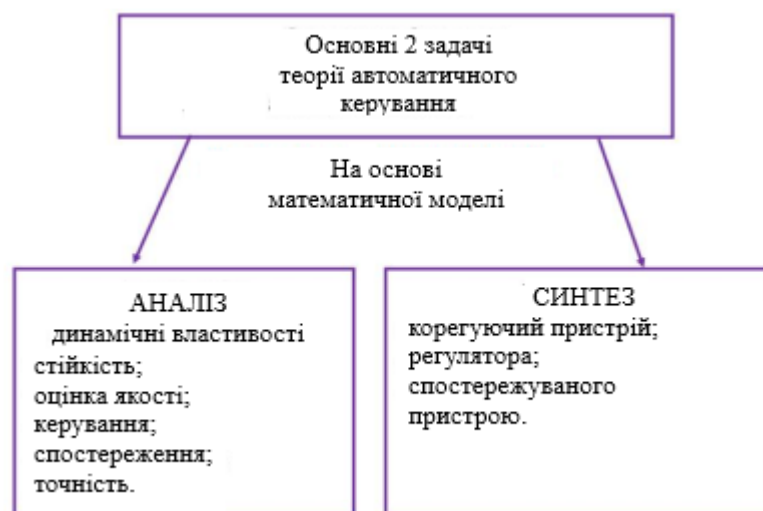


Рис. 2.5. Завдання управління

Структурна схема математичної моделі стрічкового живильника за контуром регулювання швидкості руху стрічки (рис. 2.6).

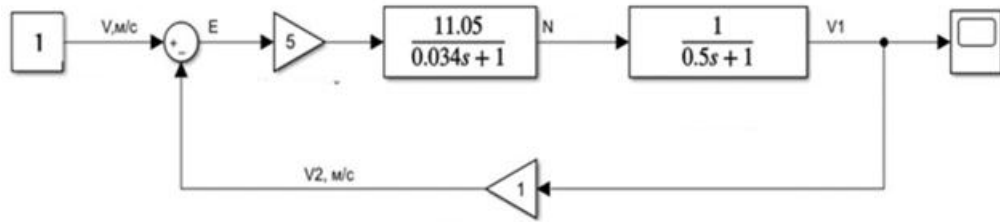


Рис.2.6. Система керування швидкістю стрічки живильника

Передатна функція розімкненої системи стрічкового живильника:

$$G(p) = \frac{55.25}{0.017p^2 + 0.534p + 1} \quad (2.37)$$

Отримаємо результати моделювання розімкненої системи (рисунок 2.7).

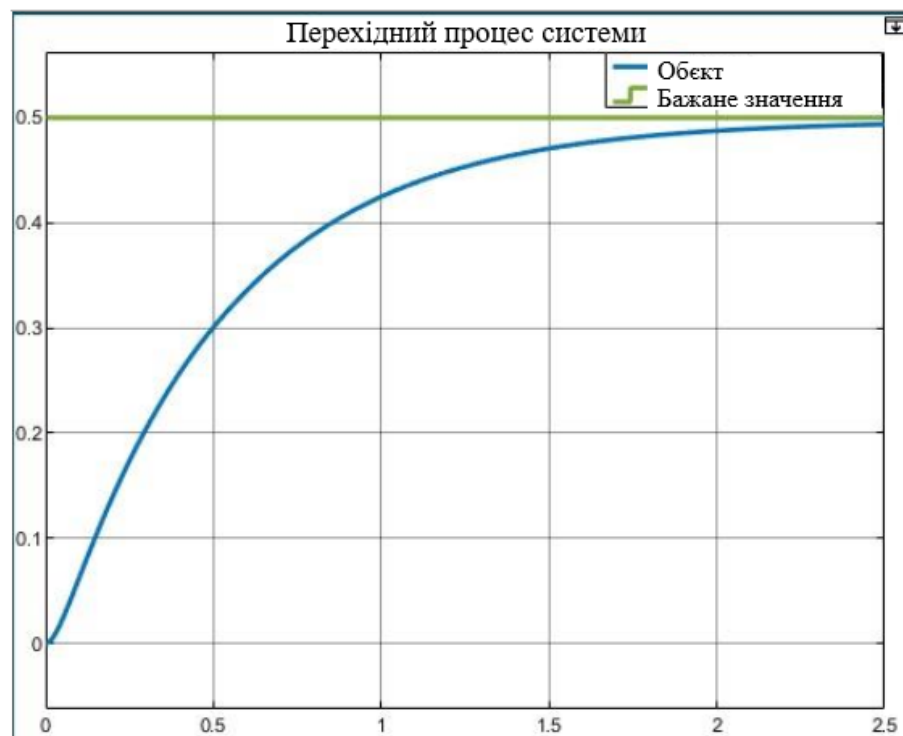


Рис. 2.7. Перехідний процес розімкненої системи

На рисунку 2.7 видно, що за відсутності збурень система демонструє монотонний перехідний процес. Це дає підстави попередньо стверджувати, що система є стійкою.

Для підтвердження цього висновку проведемо аналіз стійкості алгебраїчним методом. Зокрема, дослідимо рівняння системи автоматичного регулювання (2.37) за критерієм Гурвіца.

Алгоритм перевірки стійкості за критерієм Гурвіца

Крок 1. Записуємо характеристичне рівняння системи.

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2) = 0 \quad (2.38)$$

$$0.017p^2 + 0.534p + 1 = 0 \quad (2.39)$$

Зауважимо, що a_0 додатне, n рівне 2.

Крок 2. Матриця Гурвіца (n рядків і n стовпців):

$$H = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.534 & 0 \\ 0.017 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.40)$$

Крок 3. Знайдемо визначники головних діагональних мінорів матриці Гурвіца:

$$\Delta_1 = 0.534 > 0 \quad (2.41)$$

$$\Delta_2 = \det \begin{vmatrix} 0.534 & 0 \\ 0.017 & 1 \end{vmatrix} = 0.534 > 0 \quad (2.42)$$

Крок 4. Формування висновку.

На основі проведених обчислень можна стверджувати, що розімкнена система автоматичного регулювання є стійкою за критерієм Гурвіца, оскільки:

- усі коефіцієнти характеристичного рівняння мають додатні значення;
- визначники головних діагональних мінорів також є додатними.

Окрім критерію Гурвіца, у теорії автоматичного керування широко застосовують перший метод Ляпунова, який ґрунтується на трьох основних теоремах і дозволяє оцінити стійкість системи за поведінкою її розв'язків.

Перейдемо до визначення стійкості системи за першим методом Ляпунова.

Алгоритм застосування методу

Крок 1. На основі характеристичного рівняння (2.39) знаходимо корені відповідного полінома, тобто визначаємо полюси системи.

$$s_1 = -29.4118 \quad (2.43)$$

$$s_2 = -2 \quad (2.44)$$

Крок 2. Формування висновку.

Оскільки всі корені характеристичного рівняння мають від’ємні дійсні частини, то відповідно до першої теореми першого методу Ляпунова розімкнена система автоматичного регулювання є стійкою.

Отже, застосування критерію Гурвіца разом із першим методом Ляпунова підтвердило попередній висновок щодо стійкості системи.

Графічне відображення полюсів розімкненої системи на комплексній площині (рисунок 2.8) можна отримати за допомогою команди `pzmap(G)`, а кореневий годограф будується командою `rlocus(G)`.

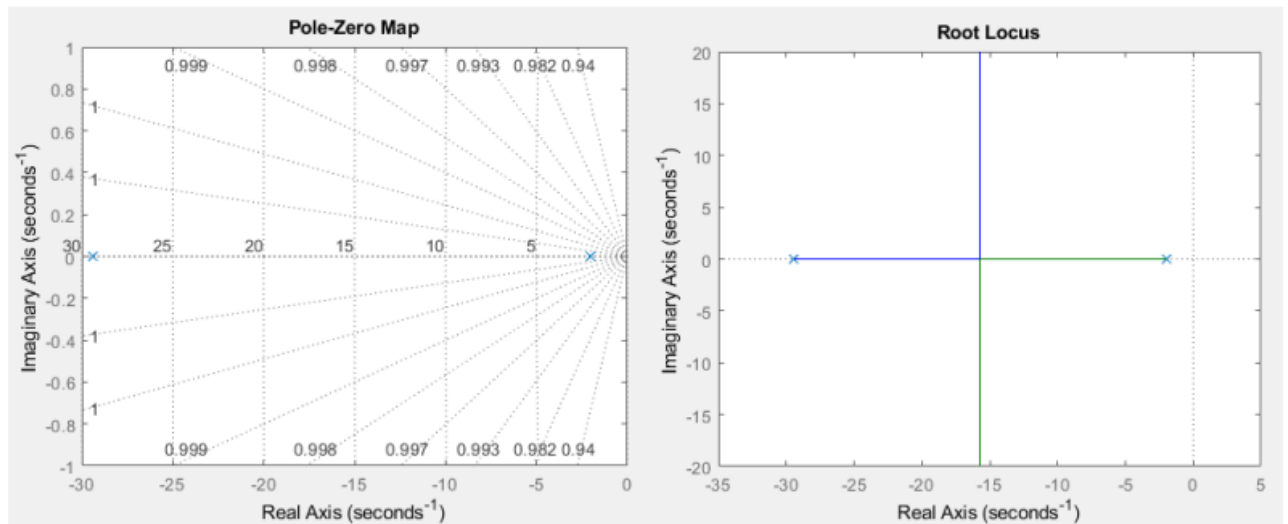


Рис. 2.8. Полюси і нулі РСАР на комплексній площині та кореневий годограф RL

Оскільки розімкнена система виявилася стійкою, можна перейти до визначення її прямих показників якості. Оцінювання цих показників здійснюється на основі аналізу перехідного процесу (рисунок 2.7).

Для монотонного перехідного процесу розглядають два основні параметри: час регулювання та час наростання. На їх основі визначимо якісні характеристики розімкненої системи.

Характеристика 1. Час регулювання T_{set} – Це інтервал часу, необхідний системі для досягнення усталеного значення y_{ss} :

$$T_{set} = 1.99c \quad (2.45)$$

Характеристика 2. Час наростання, цей показник визначає, за який час вихідна величина вперше досягає свого номінального рівня. Розраховане значення:

$$T_R = 1.1c \quad (2.46)$$

Згідно з критерієм Найквіста, система вважається стійкою, якщо амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) розімкненої САР не охоплює критичну точку $(-1, j_0)$. Для перевірки цього умови проаналізуємо графік АФЧХ розімкненої системи (рисунк 2.10), який будується за допомогою команди `nyquist(G)`.

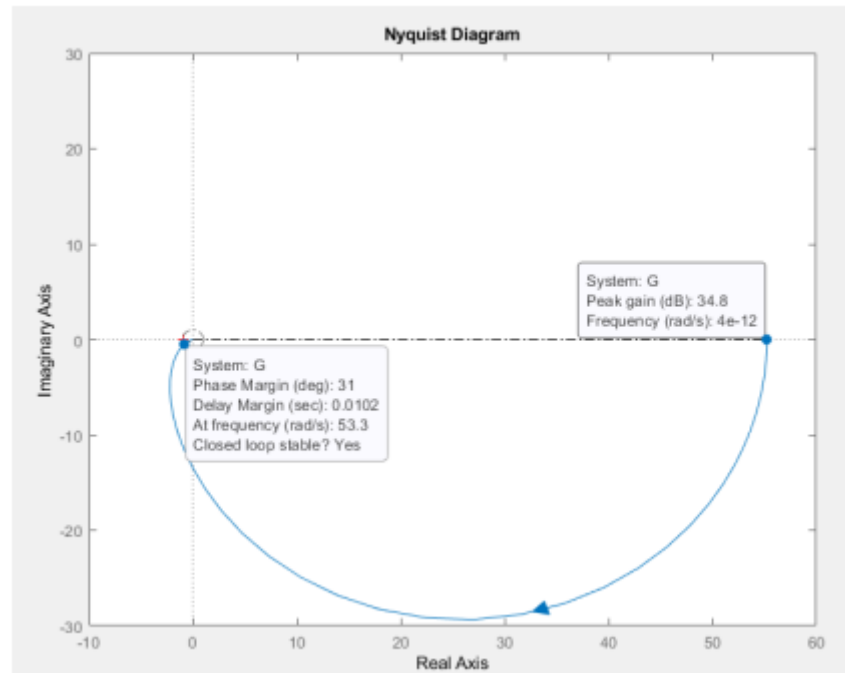


Рис. 2.9. АФЧХ розімкненої системи

Графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ подано на рисунку 2.10. На основі їх аналізу можна зробити висновок, що система є стійкою. Запас стійкості за амплітудою становить 0.086 дБ, а за фазою – мінус 149 градусів.

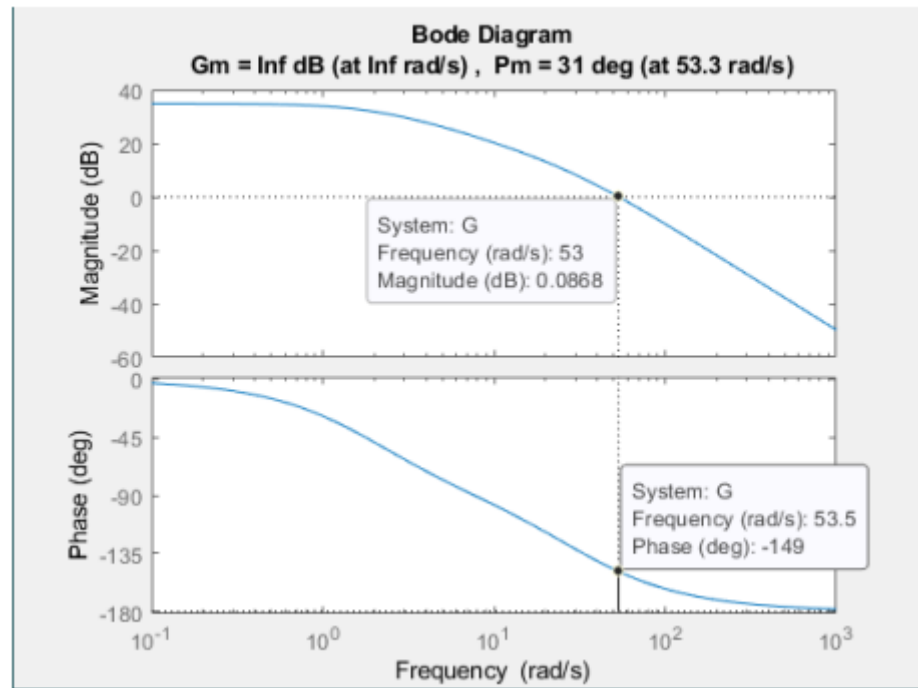


Рис. 2.10. ЛАЧХ і ЛФЧХ із запасами стійкості за амплітудою і фазою
 Передатна функція замкненої системи керування:

$$T(s) = \frac{55.25}{0.017s^2 + 0.534s + 56.25} \quad (2.47)$$

Побудуємо графік перехідного процесу (рисунок 2.11), на основі якого можна визначити основні прямі показники якості та виконати подальший аналіз роботи системи.

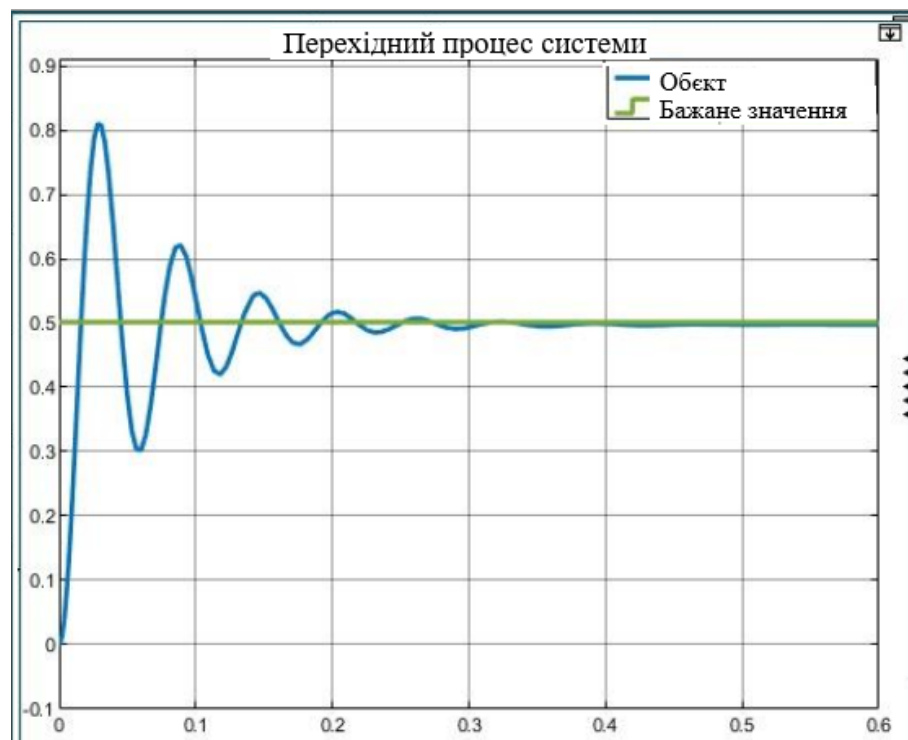


Рис. 2.11. Замкнена система об'єкта без регулятора

Таблиця 2.6

Прямі показники якості перехідного процесу

Оцінка якості	Позначення	Значення	Норма	Відповідність вимогам
Час регулювання	T_{set}	0.25 с	–	–
Перерегулювання	P_{ov}	40.1s4%	10– 20%	Не відповідає
Число коливань	M	3	0–1	Не відповідає
Коливальність	μ	15.7%	–	–
Період коливань	T	0.13 с	–	–
Усталена помилка	ε_{ss}	0	0	Відповідає
Час досягнення першого максимуму	T_p	0.06	–	–
Час наростання	T_R	0.028 с	–	–
Декремент затухання	χ	6.33	–	–

2.4. Синтез регулятора для керування продуктивністю об'єкта

У системах автоматичного керування регулятор відіграє центральну роль, оскільки саме він забезпечує підтримання необхідного значення вихідної величини та стабільну роботу об'єкта.

Основна функція регулятора полягає у безперервному відстеженні фактичного виходу системи та його порівнянні із заданим значенням. На основі цієї різниці регулятор формує коригувальний вплив, змінюючи вхідні сигнали або параметри об'єкта, щоб повернути вихід у потрібний діапазон і утримувати його там.

Для забезпечення швидкості руху стрічки живильника на рівні 0,5 м/с можуть застосовуватися П-, ПІ- та ПІД-регулятори. Це один із найпоширеніших підходів

до керування, який дозволяє постійно компенсувати похибку між заданою та фактичною швидкістю. Нижче наведено принцип дії ПД-регулятора у такій системі.

Пропорційна складова (P). Пропорційний канал формує керуючий сигнал, пропорційний миттєвій похибці між уставкою та виміряною швидкістю. Він забезпечує швидку реакцію системи на відхилення та дозволяє оперативно зменшити похибку. Зміна коефіцієнта підсилення P-ланки впливає на чутливість регулятора до відхилень.

Інтегральна складова (I). Інтегральний компонент враховує накопичену з часом похибку. Він усуває сталу складову похибки, яка може залишатися після дії пропорційного регулятора. Налаштування інтегрального коефіцієнта визначає швидкість компенсації довготривалих відхилень.

Похідна складова (D). Похідна частина реагує на швидкість зміни похибки. Вона прогнозує майбутню поведінку системи та зменшує ймовірність перерегулювання, приглушуючи різкі зміни. Регулювання коефіцієнта D-ланки впливає на здатність системи згладжувати коливання.

Щоб забезпечити швидкість стрічки 0,5 м/с, ПД-регулятор постійно вимірює фактичну швидкість, визначає похибку та формує відповідний керуючий сигнал. На початковому етапі домінує пропорційна дія, яка швидко зменшує відхилення. Згодом інтегральна складова компенсує залишкову похибку, а похідна — стабілізує процес, зменшуючи коливання та покращуючи плавність перехідного процесу.

За умови правильного налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора (шляхом моделювання або експериментального підбору) система може досягти необхідної швидкості 0,5 м/с із мінімальним перерегулюванням, швидким відгуком і високою стабільністю.

Постановка задачі синтезу регулятора:

а) Виконати налаштування типових регуляторів для даного об'єкта керування за емпіричними методами, придатними для перехідного процесу розімкненої системи (методи ZN1, CHR).

б) Провести порівняльний аналіз якості перехідних процесів: без регулятора та з різними типами регуляторів.

в) Обґрунтувати вибір оптимального типу регулятора та методу його налаштування, який забезпечує найкращий режим роботи системи.

2.5. Емпіричний метод налаштування регулятора

На основі перехідної характеристики розімкненої системи можна визначити параметри, необхідні для налаштування типових регуляторів за емпіричними методами Ціглера–Нікольса (варіант №1) та Чіна–Хронеса–Ресвіка.

Алгоритм методу ZN №1

Крок 1. Для монотонного перехідного процесу будемо дотичну до кривої (рисунок 2.12). Це дозволяє визначити основні параметри, які будуть використані в подальших розрахунках налаштування регулятора:

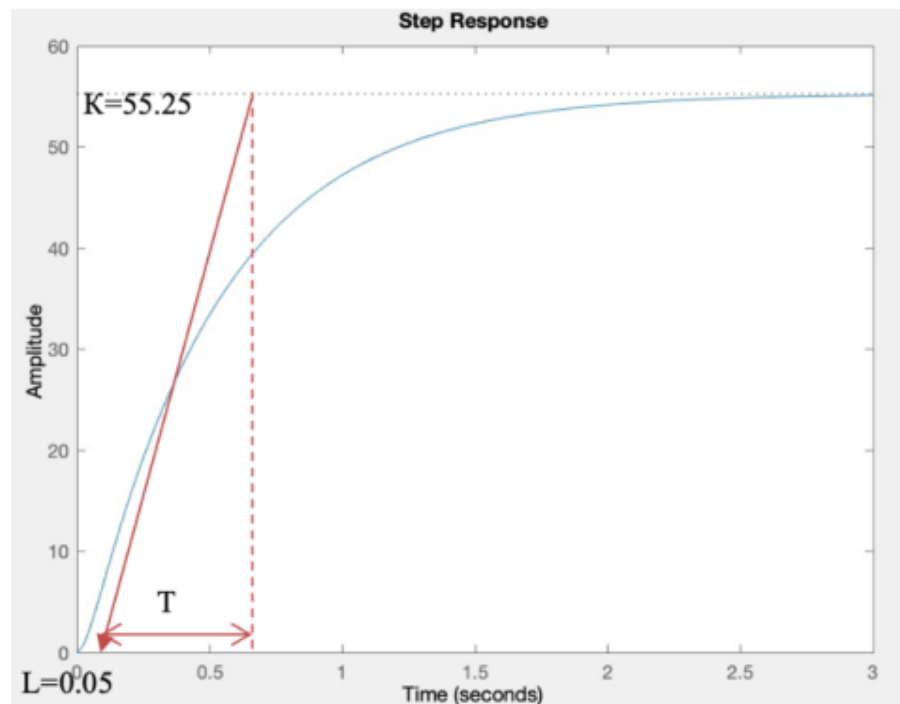


Рис. 2.12. Пошук параметрів для розрахунку

У результаті побудови дотичної та аналізу перехідної характеристики отримано параметри, необхідні для подальших розрахунків:

$$K = 55.25, \quad (2.48)$$

$$L = 0.05, \quad (2.49)$$

$$T = 0.6 \quad (2.50)$$

Крок 2. На основі визначених параметрів виконаємо обчислення коефіцієнтів ПІД-регулятора за методом Ціглера–Нікольса №1. Результати розрахунків будуть зведені до таблиці 3.1.

Таблиця 2.7

Коефіцієнти для налаштування регулятора

	P	I	D
P		0.22	0
PI		0.198	0.16
PID		0.264	0.1

Крок 3. Виконаємо моделювання роботи типових регуляторів у середовищі MATLAB. Структурна схема, що використовується для моделювання, подана на рисунку 2.13. Саме за цією схемою будуть реалізовані всі варіанти налаштування регулятора відповідно до обраних методик.

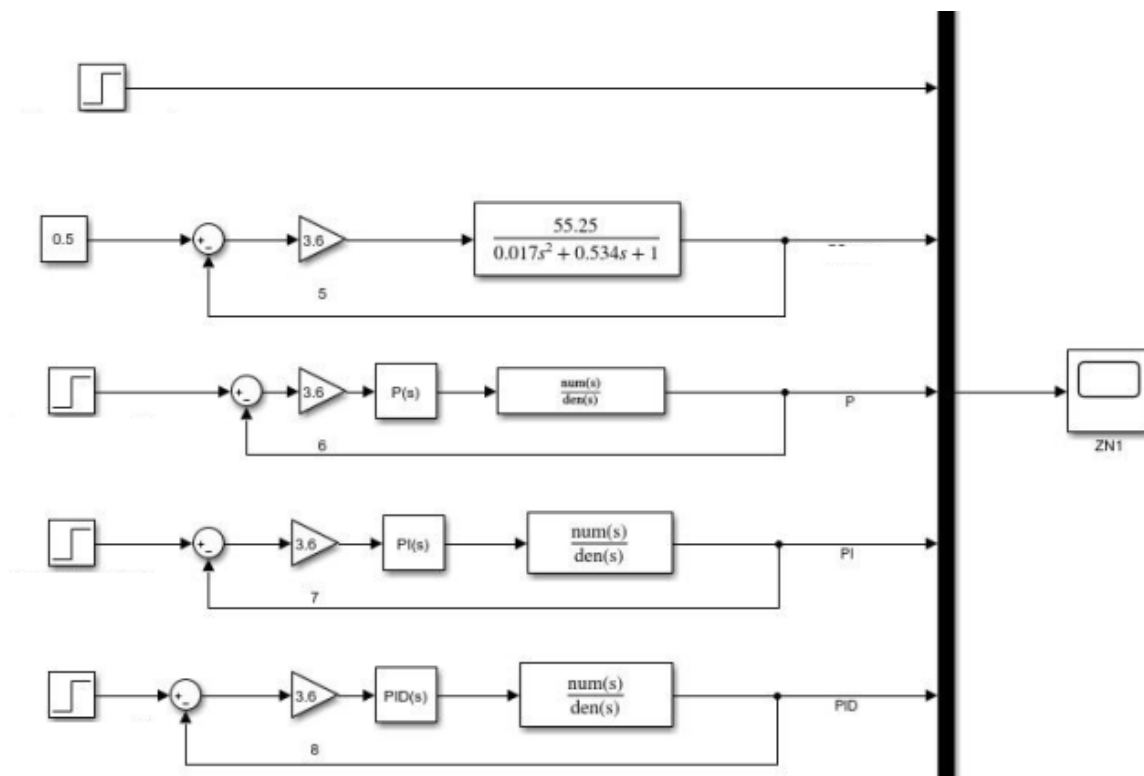


Рис. 2.12. Модель схеми

Крок 4. Аналіз результатів моделювання.

З отриманого графіка (рисунок 2.14) видно, що налаштування за класичним методом Ціглера–Нікольса №1 забезпечує кращі показники перехідного процесу порівняно з ПІ-регулятором. Такий ПІД-регулятор формує більш точну та стабільну реакцію системи.

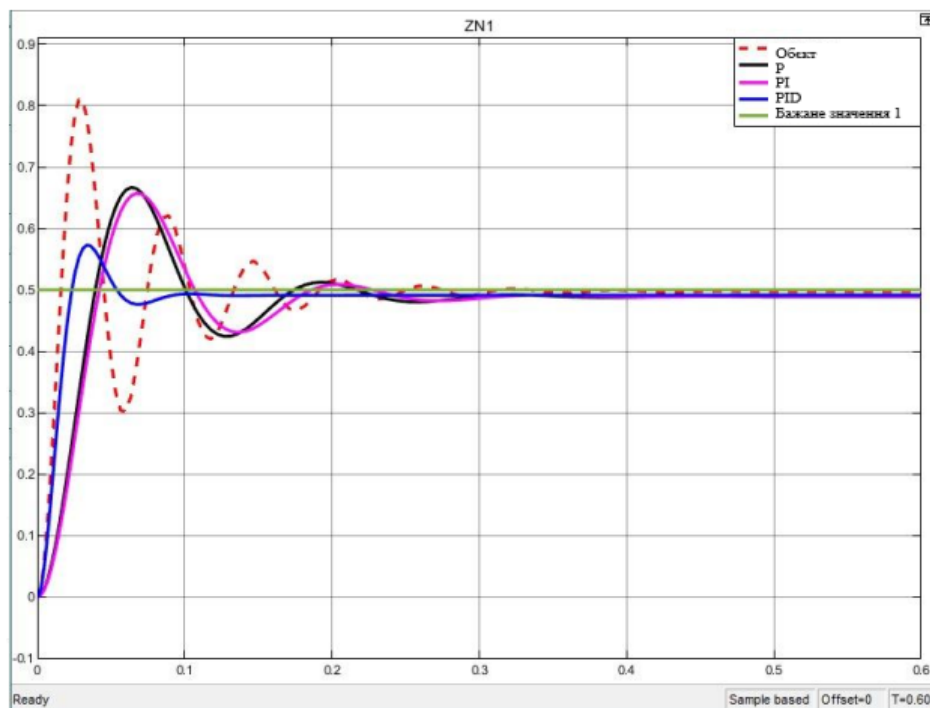


Рис. 2.13. Отримання результатів моделювання в середовищі MATLAB

Таблиця 2.8

Прямі оцінки якості

Оцінки якості	Без регулятора	P-регулятор	PI-регулятор	PID-регулятор
Час регулювання	0.25 с	0.32 с	0.28 с	0.55 с
Перерегулювання	40.14%	11.7%	1.53%	—
Кількість коливань	3	1	1	1
Установлена похибка	0	0.1	0	0.1

Висновок. На основі результатів, наведених у таблиці 2.8, можна стверджувати, що PI-регулятор, налаштований за методом Ціглера–Нікольса №1,

забезпечує необхідні показники якості. Перерегулювання становить лише 1.53%, що дозволяє досягти встановленої швидкості стрічки 0.5 м/с. Таким чином, застосування цього типового регулятора позитивно вплинуло на продуктивність системи.

Алгоритм налаштування регулятора за методом CHR.

Крок 1. Використовуючи параметри, отримані за формулами (2.48), (2.49) та (2.50), виконуємо розрахунок коефіцієнтів регулятора відповідно до методики Чіна–Хронеса–Ресвіка. Результати розрахунків будуть занесені до таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

Розрахунок коефіцієнтів регулятора

Тип регулятора	P	I	D
P	0.066	0	0
PI	0.132	0.2	0
PID	0.209	0.1	0.021

Крок 2. Моделювання системи.

Для проведення моделювання необхідно відкрити вікно параметрів регулятора у відповідному блоці Simulink (рисунок 2.14). Після встановлення потрібних налаштувань результати роботи системи знімаються за допомогою блока *Scope*, що дозволяє отримати графічне відображення перехідного процесу (рисунок 2.15).

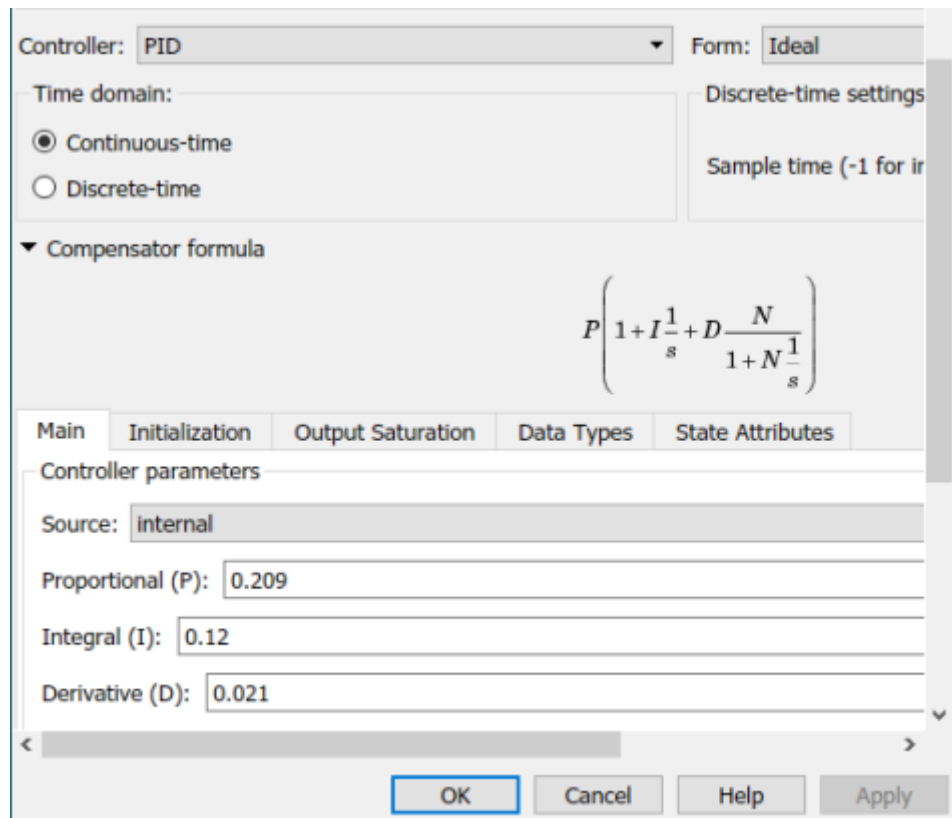


Рис. 2.14. Вікно налаштувань параметра ПІД-регулятора

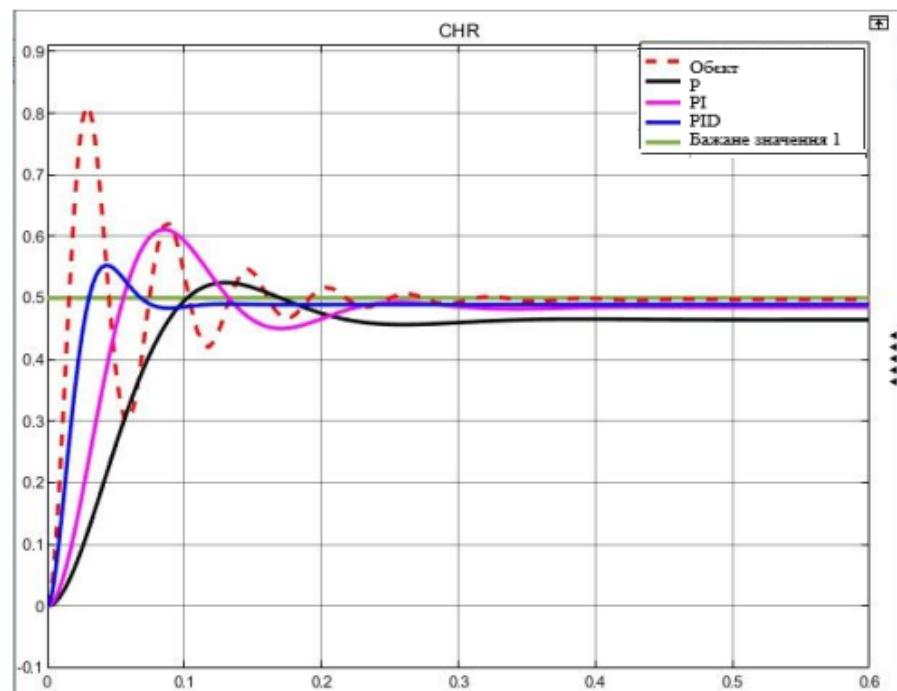


Рис. 2.15. Результати моделювання

Крок 3. Оцінювання результатів за прямими показниками якості.
На цьому етапі проводиться аналіз отриманого перехідного процесу з

використанням основних прямих показників якості — часу наростання, часу регулювання, перерегулювання та статичної похибки. Порівняння цих параметрів дає змогу визначити, наскільки ефективно налаштований регулятор забезпечує бажану динаміку системи.

Таблиця 2.10

Прямі оцінки якості

Оцінки якості	Без регулятора	P-регулятор	PI-регулятор	PID-регулятор
Час регулювання	0.25 с	0.47 с	0.3 с	0.25 с
Перерегулювання	40.14%	23.1%	1.3%	17.6%
Кількість коливань	3	1	1	1
Установлена помилка	0	0.02	0	0.01

PI-регулятор, налаштований за методом CHR, повністю задовольняє поставлені вимоги. У цьому випадку дана методика забезпечує найменшу чутливість системи до випадкових збурень, ефективно зменшуючи їх вплив на вихідну величину.

2.6. Метод налаштування командою Tune програми MATLAB

Для налаштування регулятора в середовищі MATLAB використовуються різноманітні вбудовані функції та інструменти, що входять до складу Control System Toolbox. Цей інструментарій підтримує кілька підходів до проєктування контролерів — від ручного підбору параметрів до класичних методів та сучасних оптимізаційних алгоритмів. Завдяки цьому значно спрощується отримання необхідних динамічних характеристик і забезпечення стабільності системи.

Для ручного налаштування за допомогою інструмента Tune можна скористатися розрахованими коефіцієнтами типового регулятора, задавши їх через командний рядок MATLAB.

Після запуску відповідного алгоритму MATLAB автоматично формує результати моделювання системи з регулятором. Отримані значення будуть занесені до таблиці 2.11.

Таблиця 2.11

Коефіцієнти регулятора методом Tune

	P	I	D
P	0.234	0	0
PI	0.0225	0.104	0
PID	0.029	0.0972	0.00123

Графік моделювання представлено на рисунку 2.16.

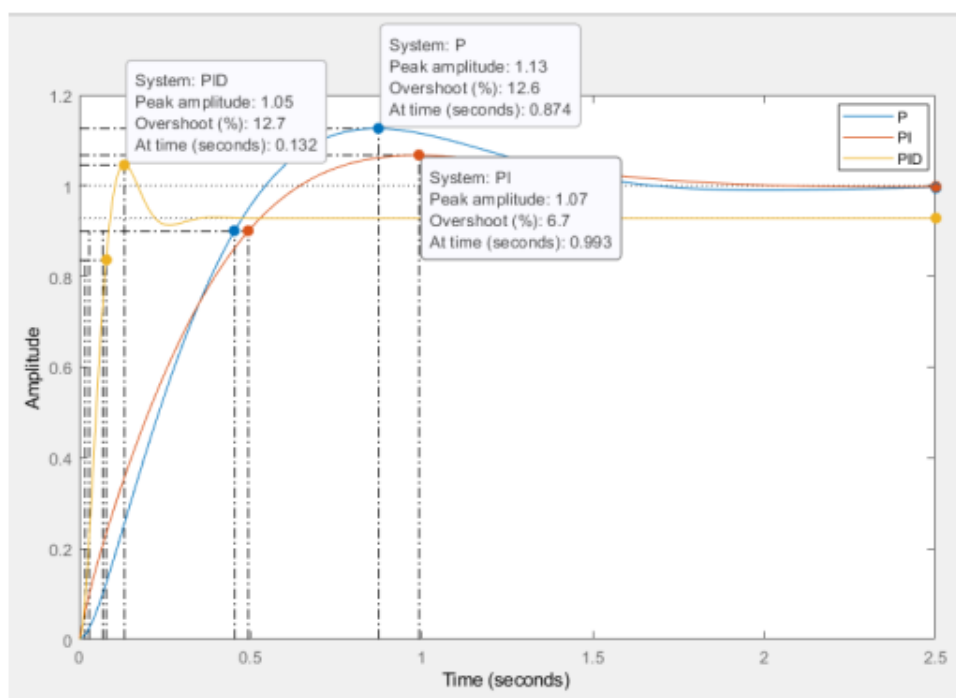


Рис. 2.16. Результат моделювання регуляторів

Аналіз системи з регуляторами занесемо в таблицю 2.12.

Таблиця 2.12

Прямі оцінки якості

Оцінки якості	P- регулятор	PI- регулятор	PID- регулятор
Час регулювання	2.2 с	1.5 с	0.35 с
Перерегулювання	12.6%	6.7%	12.7%
Число коливань	1	1	1
Час наростання	0.385	0.464	0.16
Установлена помилка	0	0	0.02

Оскільки стандартні засоби програми не враховують необхідну швидкість руху стрічки живильника, модель системи потрібно зібрати вручну. Після цього виконується налаштування вже отриманих коефіцієнтів регулятора з подальшим удосконаленням їхніх якісних показників.

Варто зазначити, що параметри, отримані за емпіричними методами, визначаються для ідеалізованої моделі, тоді як інструмент Tune потребує використання паралельної структури регулятора.

Вікно параметрів ПІ-регулятора наведено на рисунку 2.17.

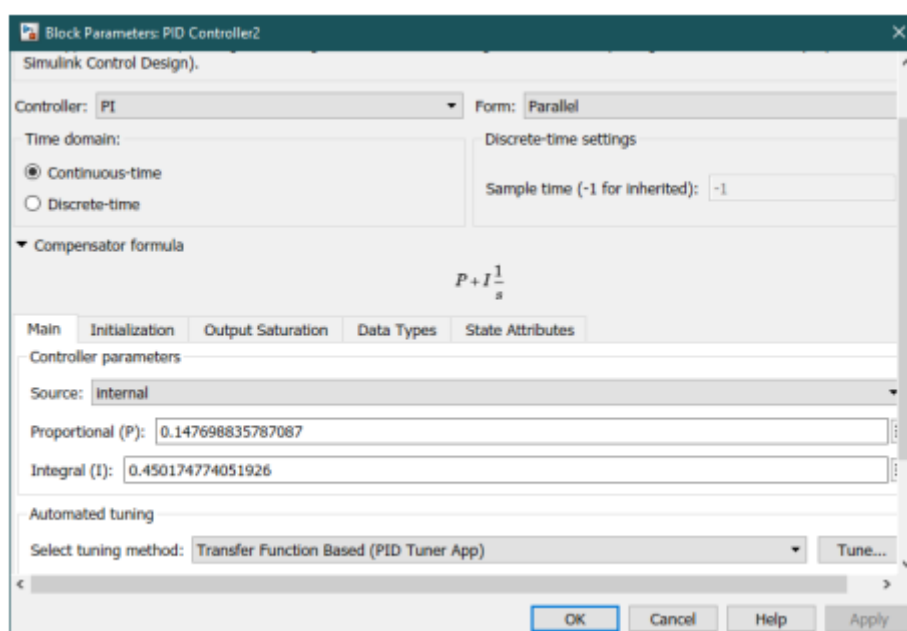


Рис. 2.17. Налаштування ПІ-регулятора

У результаті ручного налаштування за допомогою інструмента Tune на графіку моделювання (рисунок 2.18) видно, що всі типові регулятори забезпечують вихід системи на уставку 2 м/с. Серед них найкращі динамічні характеристики демонструє саме ПІ-регулятор.

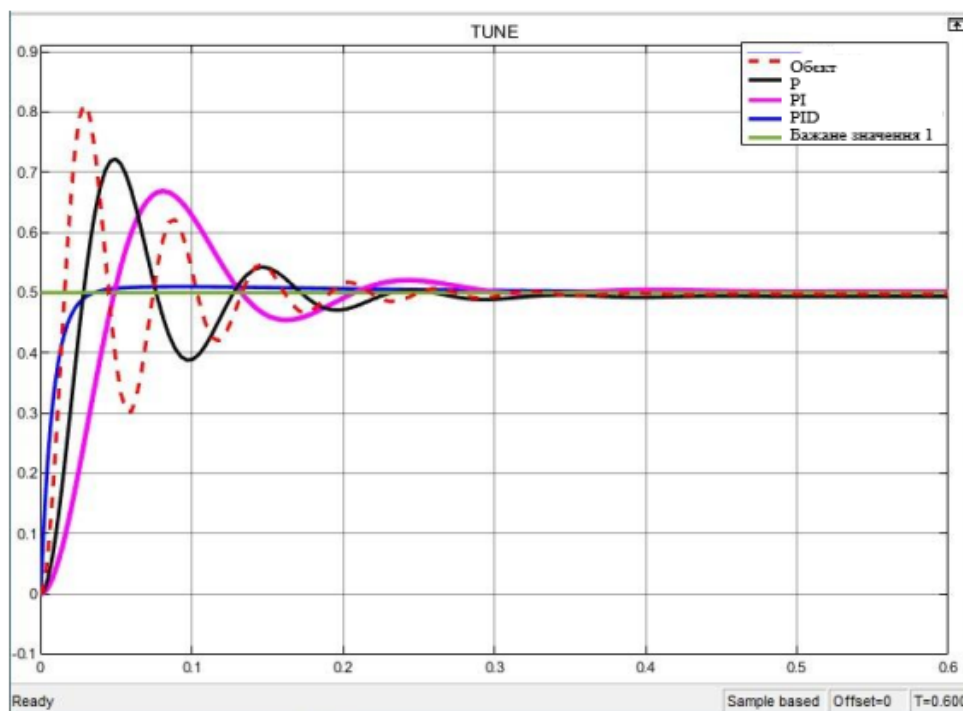


Рис. 2.18. Результати ручного налаштування

Таблиця 2.13

Прямі оцінки якості регулятора методом Tune

Оцінки якості	Без регулятора	P-регулятор	PI-регулятор	PID-регулятор
Час регулювання	0.25 с	0.45 с	0.81 с	0.73 с
Перерегулювання	40.14%	32.6%	11.7%	5.8%
Число коливань	3	2	1	—
Установлена помилка	0	0.02	0	0.02

Для того щоб визначити, який із розглянутих методів налаштування найкраще відповідає вимогам до якості перехідного процесу, необхідно виконати

порівняльний аналіз усіх отриманих ПІ-регуляторів. З цією метою формується загальна схема моделювання, у якій одночасно представлені ПІ-регулятори, налаштовані за методами ZN №1, CHR та Tune. Графічне зображення результатів моделювання системи (рис. 2.19).

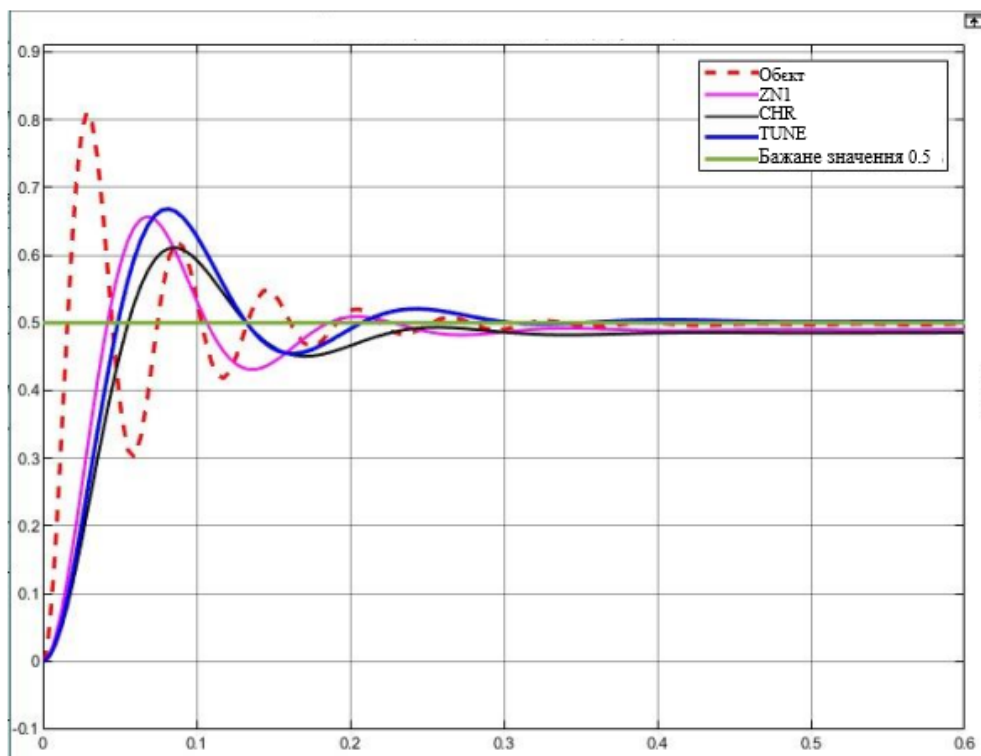


Рис. 2.19. Графік порівняння налаштувань

Порівняльні результати оцінювання якості перехідних процесів для всіх розглянутих ПІ-регуляторів подано в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14

Оцінки якості

Прямі оцінки якості	Система без регулятора	Tune	CHR	ZN №1
T_{set}	0.28 с	0.37 с	2.1 с	1.9 с
P_{ov}	40.14%	1.798%	14.1%	10.05%
T_R	0.022 с	0.04 с	0.037 с	0.05 с
e_{ss}	0	0	0	0
M	3	1	1	1

Найрезультативнішим методом налаштування виявився підхід Tune. Його ключова перевага полягає в простоті підбору параметрів регулятора та інтуїтивності процесу налаштування. Завдяки цьому вдалося реалізувати задачу лінійного керування стрічковим живильником: застосовуючи ПІ-регулятор, оператор може забезпечити вихід швидкості стрічки на задану уставку 2 м/с, що безпосередньо підвищує продуктивність системи.

Висновок до розділу 2

У другому розділі магістерської роботи здійснено розроблення автоматичної системи регулювання продуктивності стрічкового живильника. На основі аналізу технологічного процесу сформовано функціональну та структурну схеми системи керування, які відображають взаємозв'язок між об'єктом керування, вимірювальними елементами, регулятором та виконавчим механізмом. Визначено основні канали керування та збурення, що впливають на роботу живильника.

Отримано математичну модель об'єкта керування, яка описує динамічні властивості стрічкового живильника та електропривода з урахуванням інерційності системи та змінного навантаження. Побудована модель дала змогу виконати подальший аналіз перехідних процесів і оцінити стійкість та якість регулювання.

Проведено аналіз динамічних характеристик об'єкта керування, за результатами якого визначено основні параметри, що впливають на швидкодію та точність системи. Виявлено необхідність застосування регулятора, здатного забезпечити стабільну роботу системи за умов змінних технологічних режимів.

Виконано синтез регулятора для керування продуктивністю стрічкового живильника та здійснено його налаштування із застосуванням емпіричного методу. Отримані параметри регулятора забезпечили задовільні показники якості перехідного процесу, зокрема допустимий час встановлення та мінімальні статичні похибки.

Для підвищення точності налаштування регулятора використано команду Tune середовища MATLAB, що дозволило автоматизувати процес оптимізації параметрів та покращити динамічні показники системи керування. Порівняльний аналіз результатів показав доцільність застосування програмних засобів MATLAB при проектуванні автоматичних систем керування.

Отримані в розділі результати є основою для подальшого моделювання та оцінки ефективності розробленої системи регулювання в різних режимах роботи.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

3.1. Вибір технічних засобів автоматизації та програмованого логічного контролера

Під час вибору обладнання для автоматизації системи регулювання продуктивності стрічкового живильника доцільно розглянути апаратні рішення компанії Siemens. Нижче наведено перелік основних пристроїв, що можуть бути використані в подібних системах.

Програмований логічний контролер (ПЛК). ПЛК (рисунок 3.1) виконує роль центрального елемента керування в системі автоматизації. Siemens пропонує широкий спектр контролерів, зокрема серію SIMATIC S7, яка охоплює моделі для різних рівнів складності. Під час вибору конкретного ПЛК враховують такі параметри, як кількість входів/виходів, продуктивність процесора та можливості інтеграції в мережеву інфраструктуру.

Людино-машинний інтерфейс (НМІ). НМІ-панелі забезпечують оператору зручний доступ до керування стрічковим живильником і моніторингу його роботи. Siemens пропонує панелі SIMATIC HMI та програмне середовище WinCC. Під час вибору НМІ враховують розмір і тип дисплея, наявність сенсорного керування, варіанти підключення та зручність конфігурації.

Датчики. Для контролю ключових параметрів — швидкості руху стрічки, витрати матеріалу, рівня завантаження та контролю сходу стрічки — застосовуються різні типи промислових датчиків. Siemens виробляє ультразвукові, радарні та лазерні сенсори, які відзначаються високою точністю та надійністю в умовах виробництва.

Частотно-регульовані приводи. Для регулювання швидкості та крутного моменту електродвигуна стрічкового живильника використовують частотні перетворювачі серії SINAMICS. Під час вибору приводу враховують сумісність із

двигуном, доступні режими керування, енергоефективність та можливості інтеграції в систему автоматизації.

Комунікаційні протоколи. Обладнання Siemens підтримує широкий спектр промислових мереж, таких як PROFIBUS, PROFINET та Ethernet/IP. Під час вибору апаратних компонентів важливо забезпечити їхню повну сумісність із наявною комунікаційною інфраструктурою підприємства.



Рис. 3.1. ПЛК Siemens S7-1500

Таблиця 3.1

Характеристики

Параметр	Значення
Ступінь захисту	IP20 згідно зі стандартом ІЕС 60 529
Діапазон робочих температур (горизонтальна установка)	0...+60°C (при 50°C дисплей вимикається)
Відносна вологість	5%...95%, без конденсації
Атмосферний тиск	1080...795 гПа (-1000...+2000 м над рівнем моря)
Випробувальна напруга ізоляції для кіл до 50 В	707 В (типовий тест)
Випробувальна напруга ізоляції для кіл 250 В	2500 В

Для вибраного ПЛК доцільно використати частотний перетворювач АВВ ACS880-01 тієї ж компанії (див. рисунок 3.2).



Рис. 3.2. Перетворювач частоти Siemens SINAMICS V20 2,2 кВт, 380 В

Таблиця 3.3

Характеристи

Параметр	Значення
Діапазон напруг	208-240 В; 380-480 В
Вихідна частота	0-550 Гц
ККД	97%
Ступінь захисту	IP20/NEMA 1
Входи	4 цифрових входи; 2 аналогових входи
Виходи	2 цифрових виходи; 1 аналоговий вихід

Для забезпечення надійної роботи стрічкового живильника слід врахувати можливі аварійні ситуації. З цією метою варто встановити датчик контролю сходу стрічки ДКСЛ-6320 від НВП «ТЕКО» (див. рисунок 3.3).



Рис. 3.3. Датчик сходу стрічки

Таблиця 3.3

Характеристика датчика

Параметр	НПК «ТЕКО»
Напруга живлення, В	250 В А/С / до 400 мА
Кут спрацьовування	30°
Підключення	Кабель 4×0,25 кв. мм
Тип контакту	Перемикаючий
Ціна, тг	44380

Доцільно обрати датчик швидкості Siemens MD-256 [10] (рис. 3.4), оскільки він забезпечує сумісну роботу з датчиком контролю ваги.



Рис. 3.4. Датчик швидкості

Таблиця 3.4

Характеристики датчика швидкості

Параметр	Значення
Живлення	від +10 до +15 В пост. струму, 30 мА – від інтегратора
Температура	від -40 до +55 °С
Вхід	обертання вала від 0,5 до 470 об/хв, в обох напрямках
Вихід	однонаправлений понижувальний вихід з відкритим колектором +5 В пост. струму, макс. 25 мА (до інтегратора), 256 імпульсів на оберт, від 2 до 2000 Гц
Сертифікати	CE, NEMA 4X, IP65

Для роботи живильника доцільно використати конвеєрні ваги (див. рисунок 3.5), оскільки обладнання має подібну конструкцію та виконує однакові функції. Із каталогу оберемо конвеєрні ваги PCS-100Б виробництва CST.

Таблиця 3.5

Основні характеристики ваг

Характеристики	Од. вим.	Параметри
Найбільша продуктивність	Т/год	до 10 000
Точність зважування	%	0,1 – 0,5
Діапазон температур для вагової платформи	°C	-45...+70
Діапазон температур для блока індикації	°C	-10...+40

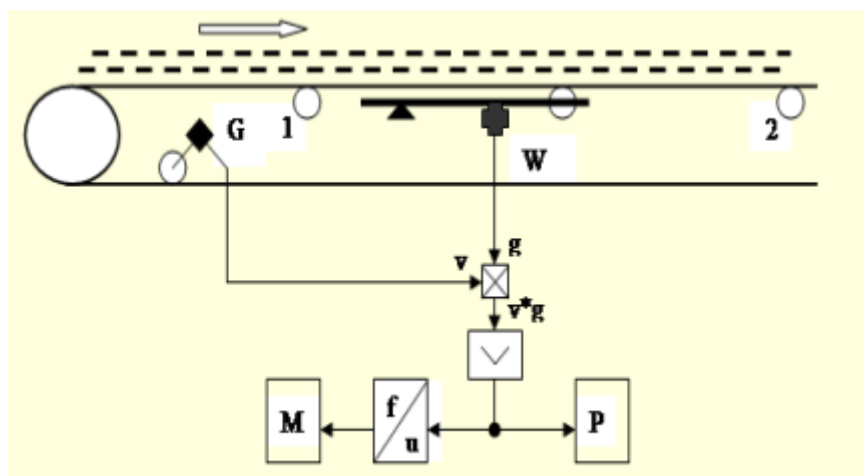


Рис. 3.5. Принцип роботи стрічкових ваг

У підсумку сформовано апаратну частину системи керування. Процес роботи живильника відображається на HMI-панелі в середовищі Roots Screen, що працює з обраним ПЛК Simatic S7-1500 [11]. Оператор має здійснювати нагляд за роботою виконавчих механізмів і запобігати виникненню аварійних ситуацій.

Висновок до розділу 3

У даному розділі виконано підбір і обґрунтування апаратних засобів автоматизації для реалізації системи регулювання продуктивності стрічкового живильника. Розглянуто сучасні технічні рішення провідних виробників, зокрема

компанії Siemens, що відповідають вимогам промислової надійності, точності та сумісності.

Як центральний елемент системи керування обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-1500, який забезпечує необхідну обчислювальну потужність, достатню кількість каналів введення/виведення та підтримку промислових комунікаційних протоколів. Використання людино-машинного інтерфейсу SIMATIC HMI дозволяє здійснювати моніторинг параметрів роботи живильника, керування режимами та оперативне реагування на аварійні ситуації.

Для реалізації плавного та енергоефективного регулювання швидкості стрічки підбрано частотно-регульований привід серії SINAMICS, який характеризується високим коефіцієнтом корисної дії, широким діапазоном вихідних частот і наявністю необхідних входів та виходів для інтеграції в систему автоматизації. Забезпечення безпечної роботи живильника досягнуто шляхом використання датчика контролю сходу стрічки, що дозволяє своєчасно виявляти аварійні режими та запобігати пошкодженню обладнання.

Для вимірювання швидкості руху стрічки та формування сигналів зворотного зв'язку обрано датчик швидкості Siemens MD-256, який має високу точність, широкий температурний діапазон і сумісність із ваговими системами. Контроль продуктивності реалізовано за допомогою конвеєрних ваг PCS-100Б, що забезпечують необхідну точність зважування та працездатність у складних умовах експлуатації.

Таким чином, у розділі сформовано повну апаратну базу системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового живильника, яка забезпечує надійний контроль технологічних параметрів, безпечну експлуатацію обладнання та можливість візуалізації процесу на HMI. Обрані технічні засоби створюють основу для реалізації ефективної та сучасної системи автоматизації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Як підсумок можна стверджувати, що розроблення системи автоматичного регулювання (САР) продуктивності стрічкового живильника має суттєві переваги з точки зору підвищення продуктивності, точності та безпеки технологічного процесу. Впровадження автоматизованого керування дозволяє мінімізувати або повністю усунути необхідність ручного втручання оператора, що значно знижує ймовірність виникнення людських помилок і забезпечує стабільний, безперервний та оптимізований потік матеріалу.

Проведено аналіз технологічного процесу стрічкових конвеєрних систем. Надано короткий опис принципів транспортування та дозування сипких матеріалів, розглянуто конструкцію та принцип роботи стрічкового живильника. Проаналізовано особливості роботи електропривода живильника та фактори, що впливають на зміну продуктивності. На основі проведеного аналізу сформульовано постановку завдання магістерської роботи та визначено основні вимоги до автоматичної системи керування продуктивністю.

Розроблено автоматичну систему регулювання продуктивності стрічкового живильника. Побудовано функціональну та структурну схеми системи керування. Отримано математичну модель об'єкта керування та виконано аналіз його динамічних властивостей. Здійснено синтез регулятора продуктивності та проведено його налаштування як емпіричним методом, так і з використанням програмних засобів MATLAB (команда Tune). Оцінено якість роботи системи регулювання за основними показниками.

Виконано вибір та обґрунтування апаратних засобів автоматизації для реалізації розробленої системи керування. Обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-1500, частотно-регульований привід, датчики швидкості, вагові системи та пристрої контролю аварійних режимів. Розглянуто питання сумісності обладнання, промислових комунікацій та візуалізації процесу за допомогою НМІ. Сформовано апаратну базу для впровадження автоматичної системи керування продуктивністю стрічкового живильника.

Отже, розроблення та впровадження системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового живильника забезпечує комплексне підвищення ефективності роботи технологічних ліній і може бути успішно застосоване в різних галузях промисловості, зокрема в гірничодобувній, переробній, сільськогосподарській та будівельній сферах. Використання таких систем є важливим кроком у напрямку цифровізації виробництва та підвищення його конкурентоспроможності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Різноманітні типи стрічкових конвеєрів: посібник з вибору правильної промислової системи. Режим доступу: <https://www.zhongrenmachinery.com/uk/application/various-types-of-conveyors>.
2. Стрічковий живильник. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%BA.
3. Конвеєрні системи: автоматизація складу та виробництва. Режим доступу: [://konsort.com.ua/konveyerni-systemy-avtomatyzacziya-skladu-ta-vyrobnyctva/?srsltid=AfmBOooC-wpuXcKodrcSl9Q--g1TcDIXH6UlcI5xSpO0EF790deMNUde](http://konsort.com.ua/konveyerni-systemy-avtomatyzacziya-skladu-ta-vyrobnyctva/?srsltid=AfmBOooC-wpuXcKodrcSl9Q--g1TcDIXH6UlcI5xSpO0EF790deMNUde).
4. Бакалов В. Г. Змішувачі для сипких матеріалів і методи оцінювання якості суміші : монографія / В. Г. Бакалов. – Чернігів : ЧДТУ, 2013. – 159 с.
5. Момот В.Ю. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 1998. 129 с.
6. І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв: Навч. посібник, 2006. – 100 с.
7. Транспортні системи електромеханічних комплексів. Лабораторні роботи: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.В. Зайченко, В.А. Побігайло, А.В. Волошко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
8. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. К.: Либідь, 1997. 544 с.
9. Перетворювач частоти Siemens SINAMICS V20 380-480 V, 2.2 кВт <https://electrocontrol.com.ua/ua/6sl3210-5be22-2uv0-siemens-sinamics-v20-380-480-v-2-2-kvt>.

10. Siemens MD-256. Режим доступу:
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/599/18249599/att_65821/v1/7ML19985FJ02_1.pdf.

11. Надшвидкий контролер Siemens SIMATIC S7-1500. Режим доступу:
<https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1500.html>.