

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Проект електроприводу для конвейерного транспортування деталей

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

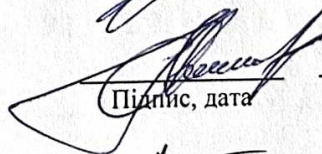
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 3 курсу
група ЕТс-22-1


Підпис

О. В. Дацюк
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

С. Л. Горященко
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Пундик
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

В. С. Неймак
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

2 06 2024р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Спеціалізація Електропобутова техніка

Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2.06.2025

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дацюк Олексій Валисльович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Проект електроприводу для конвейєрного транспортування деталей

керівник роботи Горященко Сергій Леонідович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи потужність до 1.5 кВт. Швидкість руху конвеєра до 03 м/с

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

Вступ. 1. Огляд існуючих систем електроприводів конвеєра. 2. Розробка конструкції електроприводу конвеєра. 3. Розрахунки електроприводу конвеєра. Висновки. Перелік джерел посилань.

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

1. Огляд типів конвеєрів (ДО, А1). 2. Електропривід конвеєра (ВЗ, А1). 3. Моделювання САК привода конвеєра (ДІ2, А1). 4. 3Д модель конвеєра (ДІ1, А1). 5. Моделювання навантаження конвеєра (РР, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд існуючих систем електроприводів конвеєра		
2. Розробка конструкції електроприводу конвеєра		
3. Розрахунки електроприводу конвеєра		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент

Підпис

О.В. Дацюк

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

С. Л. Горященко

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Дацюк Олексій Васильович

2. Тема магістерської роботи Проект електроприводу для конвейерного транспортування деталей

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 65

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: _____
Вступ. 1. Огляд існуючих систем електроприводів конвеєра. 2. Розробка конструкції електроприводу конвеєра. 3. Розрахунки електроприводу конвеєра. Висновки. Перелік джерел _____
лань. _____

Підпис студента  _____

" 2 " 06 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 4 від " 20 " 06 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК 4/С
Рекомендації ЕК -

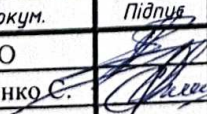


Особливі відмітки -

Технічний секретар  _____

" 20 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

	стр
Вступ	3
1. Огляд існуючих систем електроприводів конвеєра	4
1.1 Типи конвеєрів.....	4
1.2 Вибір електроприводу для конвеєра	7
1.3 Регулювання швидкості конвеєрів.....	11
1.4 Аналіз систем регулювання швидкості асинхронного двигуна.....	14
Висновки до першого розділу.....	22
2 Розробка конструкції електроприводу конвеєра.....	23
2.1 Побудова системи регулювання в електроприводах.....	23
2.2 Розробка алгоритму керування електроприводом конвеєра.....	31
2.3 Розробка елементів приводу.....	39
Висновки до другого розділу	45
3. Розрахунки електроприводу конвеєра.....	46
3.1 Розробка системи автоматизованого регулювання швидкості конвеєра	46
3.2 Визначення стійкості системи.....	50
3.3 Визначення стійкості системи за критерієм.....	54
3.4 Побудова логарифмічних характеристик.....	55
3.5 Побудова перехідного процесу.....	58
Висновки до третього розділу.....	62
Висновки	63
Перелік джерел посилань.....	64

БРМА 25.00.00.000 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Проект електроприводу для конвейерного транспортування деталей	Літ.	Арк.	Аркушів
		Дацюк О		2024		2		
		Горященко С.						
		Т.Контр						
		Н. Контр.						
		Затверд.	Неймак В.С.					гр. ЕТс-22-2

ВСТУП

Конвеєри – це спеціалізоване обладнання, призначене для транспортування штучних, кускових або сипучих вантажів. Вони забезпечують автоматизацію виробничих процесів, значно підвищуючи їх ефективність. Такі транспортні системи можуть використовуватись як окремі пристрої для переміщення вантажів, так і в складі автоматизованих ліній для виробництва складних вузлів і деталей. Під час вибору оптимального типу конвеєра, який забезпечить найвищу економічну та технічну ефективність, слід враховувати кілька важливих аспектів: – характеристики вантажів, що транспортуються; – необхідну продуктивність обладнання; – розташування зон навантаження і розвантаження, а також відстань між ними; – рівень автоматизації, який потребує виробничий процес; – умови зберігання вантажів у зоні завантаження.

Автоматичне виконання технологічних операцій нерозривно пов'язано з розмірами, формою та властивостями предмету труда, припустимим полем розсіювання показників його властивостей, розмірів і форми, можливими положеннями у просторі, швидкостями та прискореннями при його переміщеннях по припустимим траєкторіям.

Комплексний підхід до автоматизації виробництва зумовлений єдністю технології та технічних засобів. Проблему автоматизації складальних операцій потрібно вирішувати, виходячи з єдиних для всіх конструкцій (об'єктів складання) технологічних принципів уніфікації операцій.

До складу автоматизованого технологічного процесу можуть входити не складальні операції (наприклад, нанесення клейових плівок, їх активізація, зволоження заготівель, формування заготовок, обробка взуття та інше). Комплексна автоматизація процесу неможлива без автоматичного виконання вказаних операцій або їх можливого вилучення.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КОНВЕЄРА

1.1 Типи конвеєрів

З проведеного аналізу літератури [1-10] можна визначити основні типів конвеєрів, які бувають таких типів:

- 1) Поясні конвеєри. Континуальні стрічки, що рухаються над роликами; широко використовуються у виробництві, логістиці, портах.
- 2) Роликові конвеєри. Вантаж переміщується роликами — бувають гравітаційні та з мотор-роликами.
- 3) Гвинтові конвеєри. Використовують спіральний шнек для транспортування сипучих матеріалів.
- 4) Ланцюгові конвеєри. Переміщення важких/неоднорідних вантажів за допомогою ланцюга.
- 5) Штампові конвеєри. Ланцюг із плоскими slat-панелями — для важких матеріалів, гарячих, абразивних.
- 6) Бункерні/ковшові конвеєри. Вантаж піднімається за допомогою ковшів на стрічці чи ланцюзі — підходять для вертикального транспортування
- 7) Пневматичні конвеєри. Транспортування порошків/гранул повітрям всередині труб.
- 8) Вібраційні конвеєри. Матеріал рухається завдяки вібраціям — часто в харчовій промисловості та сортуванні.
- 9) Гнучкі конвеєри. Пластикова ланцюгова система, що може проходити під кутом, через повороти.
- 10) Спіральні та вертикальні конвеєри. Піднімають вантажі на різні рівні — без редуктора.
- 11) Трубчасті ланцюгові конвеєри. Вантаж рухається в герметичній трубі за допомогою дисків на ланцюгу.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12) Верхньоповітряні конвеєри. Системи на монорельсі, підвішені до стелі — часто в автосервісах або на фарбувальних лініях.

13) Магнітні конвеєри. Переміщують металеві деталі магнітом — без стрічки.

Якщо розглядати електропривід для конвеєрної лінії потужністю до 1.5 кВт, то вибір рішень залежить від:

- типу навантаження (постійне, змінне, ударне),
- режиму роботи (тривалий, короткочасний, реверсивний),
- вимог до точності регулювання швидкості,
- бюджету та умов експлуатації (вологість, пил, температура тощо).

Основні варіанти електроприводів (до 2 кВт) може бути такий, як Асинхронний двигун + частотний перетворювач (VFD). Тип двигуна: Короткозамкнений асинхронний двигун (3~). Керування: Частотник (VFD) з векторним або скалярним керуванням (U/f). Переваги: надійність, низька вартість, простота, плавний запуск, захист від перевантажень.

Недоліки: Не найкраще для точної позиціонування.

Подача деталей, транспортування сировини, пакувальні лінії.

Популярні виробники: SEW-Eurodrive, Siemens, ABB, Schneider, Delta.

Редукторний мотор (мотозубчастий агрегат) має комбінацію Електродвигун + редуктор (планетарний, черв'ячний, циліндричний). Виконує функції: зменшення обертів та збільшення моменту. Це компактне рішення з фіксованою швидкістю. Часто комбінується з частотником для змінної швидкості. Застосування: Лінії з постійною швидкістю або високим моментом (наприклад, завантажувачі або гвинтові транспортери).

Серводвигун + сервоусилювач (servo drive) мають тип двигуна PMSM (синхронний з постійними магнітами) або безщітковий DC (BLDC). Керування здійснюється сервопідсилювачем із замкнутим контуром по позиції/швидкості/моменту. Переваги: Висока точність, швидка динаміка,

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реверс. Недоліки: Вища вартість, складніше налаштування. Застосування: Привід маркувальників, сортувальників, позиціонування на розподільчих лініях.

Бездатчиковий BLDC-двигун + драйвер призначений для легких або мобільних ліній (наприклад, гнучкі міні-конвеєри). Переваги: Компактність, енергоефективність. Керування йде від драйвера або контролера з ШІМ/CAN-шиною. Недоліки: Обмеження по моменту, складніше керування при великих навантаженнях.

Таблиця 1.1 - Порівняння варіантів електроприводу

Варіант	Точність	Вартість	Надійність	Регулювання швидкості	Реверс	Використання
Асинхронний + VFD	Низька	Низька	Висока	Так (через VFD)	Так	Загальні конвеєри
Мотор-редуктор	Середня	Середня	Висока	Так (з VFD) або фікс.	Частково	Важкі або повільні лінії
Серводвигун	Висока	Висока	Висока	Так (дуже точне)	Так	Точні приводи
BLDC + драйвер	Середня	Середня	Середня	Так	Так	Мобільні/компактні лінії

Таблиця 1.2 - Рекомендації для практичного вибору

Умова	Рішення
Стандартна лінія подачі/переміщення	Асинхронний двигун + частотник
Повільне, потужне транспортування (шнеки, підйомники)	Мотор-редуктор + VFD
Точне позиціонування (дозування, маркування, сортування)	Серводвигун
Мобільні або легкі гнучкі системи	BLDC + драйвер

1.2 Вибір електроприводу для конвеєра

Конвеєр складається з кількох ключових елементів: стрічки, натяжного та приводного барабанів, опорних роликів і двигуна. Еластична стрічка встановлюється на барабани, що приводяться в рух двигуном. Така конструкція забезпечує безперервне переміщення вантажів з одного місця в інше. Подібний механізм є ідеальним для транспортування сипучих і кускових матеріалів. До того ж обладнання часто застосовується для перевезення штучних об'єктів з метою подальшого фасування.

Електроприводи стрічкових конвеєрів здебільшого побудовані на основі асинхронних електродвигунів змінного струму. Найпоширенішим рішенням є привід із короткозамкненим асинхронним двигуном. Для запуску конвеєрів під навантаженням електродвигуни повинні забезпечувати пусковий момент, який перевищує номінальний до 2 раз. Однак, різке прикладення значного тягового моменту може спричинити суттєві динамічні перевантаження в стрічці або ланцюгу. Через це короткозамкнені асинхронні двигуни доцільно використовувати лише у випадках порівняно невеликої потужності. Для вирішення цієї проблеми у стрічкових конвеєрах переважно застосовуються електроприводи з короткозамкненими асинхронними двигунами, оснащені додатковою муфтою між двигуном і приводною станцією. Використання муфти дозволяє запускати двигун без навантаження, а після його розгону забезпечувати плавний розгін тягового органу, що знижує ризик динамічних перенапружень і пробуксовки стрічки. Регульовані муфти дають можливість без обмежень використовувати короткозамкнені двигуни незалежно від їх потужності. Для важких стрічкових конвеєрів із широкими і довгими стрічками часто застосовуються асинхронні двигуни з фазним ротором та реостатним керуванням під час запуску. Щоб забезпечити плавність старту, опір у роторному колі зазвичай має багато ступенів: 10-20 при контакторному

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

управлінні і до 20-30 при використанні контролера. Тривалість запуску за реостатного управління може складати від 30 до 60 секунд, що значно знижує динамічні навантаження на тяговий орган. У разі автоматизації запуску конвеєрів оптимальним є управління процесом пуску відповідно до заданого часу — це гарантує незмінність тривалості запуску. Якщо потрібно регулювати швидкість руху конвеєра, тип електроприводу обирається з урахуванням вимог до плавності та діапазону регулювання. Для поступового регулювання швидкості можуть використовуватися приводи типу Г-Д, ТП-Д, системи живлення якоря двигуна постійного струму через силовий магнітний підсилювач (система БМУ-Д), а також асинхронні приводи з каскадним регулюванням. З розвитком перетворювальної техніки, особливо частотних перетворювачів, широко впроваджується частотне управління асинхронними двигунами в регульованих приводах для конвеєрів та живильників. Використання короткозамкнених асинхронних двигунів у цих системах значно підвищує надійність приводів і забезпечує їхню безпеку при роботі у вибухонебезпечних умовах.

Електроприводи для конвеєрів і транспортерів зазвичай функціонують в тривалому режимі з постійним навантаженням. Вибір двигуна залежить від режиму його роботи, адже правильний розрахунок середніх показників ККД і коефіцієнта потужності є критично важливим при виборі геометричних параметрів, визначенні втрат, процесах нагрівання та охолодження, а також під час вибору встановленої потужності двигунів. Конвеєрні лінії, попри їх конструктивну різноманітність, мають спільні експлуатаційні особливості: - Працюють в тривалому режимі без пауз протягом кількох змін або однієї. - При запуску може виникнути значний статичний момент, який інколи перевищує номінальні навантаження, наприклад, при запуску навантаженого конвеєра після раптової зупинки. - Рідкісні запуски не впливають на продуктивність, а напрямок обертання електродвигуна є стабільним. - Двигуни функціонують у різних умовах: у вологих та запилених приміщеннях, на відкритому повітрі, в

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цехах з агресивним середовищем, при екстремальних температурах. Асинхронні двигуни пропонують ряд переваг [8, 9]:

1. Проста конструкція забезпечує економічність у виробництві.
2. Низьке енергоспоживання підвищує ефективність.
3. Універсальність дозволяє їх використання в системах без точної підтримки швидкості обертання.
4. Висока надійність у роботі.
5. Можливість роботи при однофазному підключенні.
6. Невибагливість у догляді.
7. Проста схема управління.
8. Висока ефективність завдяки відсутності втрат на тертя та високому коефіцієнту потужності.
9. Тривалий термін експлуатації.
10. Працюють безпосередньо від мережі змінного струму.

Залежно від конструкції, продуктивності та довжини конвеєрів використовуються різні системи електропривода на основі асинхронних двигунів: від простих релейно-контакторних систем з двигунами з короткозамкненим ротором до систем із фазним ротором для плавного запуску з регулюванням опору. Важливо, щоб електропривод забезпечував запуск із заданими моментом і прискоренням, аби уникнути неприпустимих навантажень на стрічку та металоконструкції.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

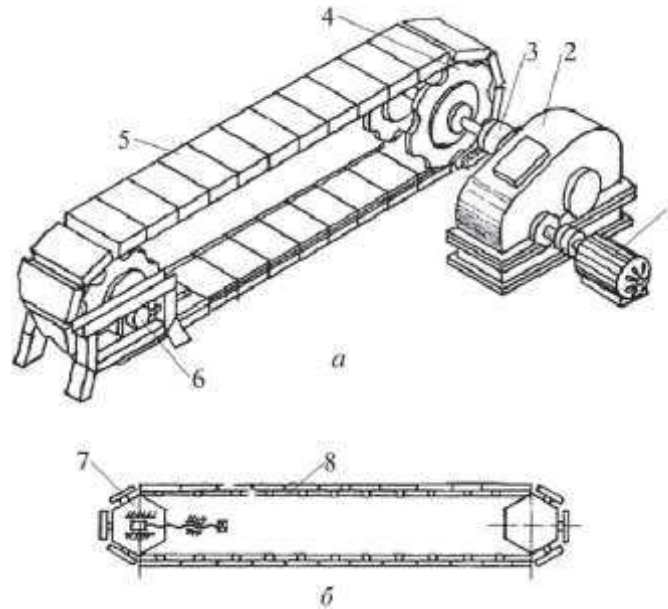


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд пластинчастого конвеєра

Особливості конструкції пластинчастих конвеєрів включають можливість виготовлення з різною кількістю рядів ланцюга: 2, 3, 4 і більше. Конвеєр може бути побудований із поєднанням прямих і поворотних секцій. Для зручності експлуатації передбачено регулювання захисних огорожень як за шириною, так і за висотою за допомогою кронштейнів. Опори можуть бути виконані зі зварного металу або у форматі "євростандарт" із використанням пластикових триног чи двоног. Регулювання швидкості забезпечується за допомогою частотного перетворювача або механічного варіатора. До переваг таких конвеєрів належить використання комплектуючих від провідних європейських виробників, таких як Sistem Plast, Ave, Rexnord. Матеріали для виготовлення пластинчастих ланцюгів можуть бути пластиковими або нержавіючими сталевими. Залежно від умов виробництва доступне налаштування швидкості транспортування ланцюга в рамках технічних характеристик. Для цього в приводі конвеєра застосовуються варіатор або частотний перетворювач.

Використання регульованих електроприводів, які забезпечують плавний запуск і регулювання лінійної швидкості стрічки конвеєра, сприяє зменшенню динамічних навантажень і рівномірному розподілу навантаження між окремими

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

приводними електродвигунами. При цьому має бути забезпечений необхідний діапазон регулювання швидкості стрічки конвеєра для оптимальної роботи системи.

1.3 Способи регулювання швидкості конвеєрів

Регулювання швидкості роботи конвеєра дозволяє зменшити знос стрічки, знизити витрати електроенергії, а також оптимізувати ширину стрічки. Це дозволяє розраховувати стрічку за середнім вантажопотоком, а не за піковими навантаженнями, що виникають у певні моменти. Існують два способи регулювання швидкості: безперервний і дискретний. Дискретне регулювання базується на поступових змінах швидкості руху стрічки при досягненні вантажопотоком певних граничних значень, встановлених як рівні перемикачів. У разі безперервного регулювання налаштовуються режими роботи конвеєра так, щоб швидкість стрічки змінювалася пропорційно до вантажопотоку. Це забезпечує стабільність лінійного навантаження на стрічці, максимально наближеного до розрахункового значення. Дослідження [12, 13] підкреслюють доцільність регулювання швидкості конвеєра залежно від темпів роботи комбайна. У роботі [14] пропонується впроваджувати автоматичні системи регулювання за принципами стабілізації для підтримання параметра на заданому рівні або за принципом стежачих систем, які дають змогу адаптувати вихідні параметри під зміни вхідних умов. У цих системах лінійне навантаження є регульованим параметром, величина вантажопотоку виступає обурюючим впливом, а розрахункове навантаження слугує бажаною величиною. У цих випадках стрічковий конвеєр виконує функцію зворотного зв'язку. Проте через інерційність системи реакція конвеєра на зміну вантажопотоку відбувається із запізненням, що є її недоліком. Щоб уникнути перевантаження або недовантаження, рекомендується вимірювати вантажопотік із певним випередженням у часі. За наявності кількох конвеєрів у

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортному ланцюгу швидкість кожного наступного можна налаштувати відповідно до змін у швидкості попереднього. При дискретному способі регулювання першочергово необхідно визначити оптимальну кількість ступенів зміни швидкості приводу. Ступінь використання конвеєра за продуктивністю можна охарактеризувати величиною пробігу несучого органу при транспортуванні заданого обсягу вантажу. Враховуючи, що переріз вантажу на стрічці обернено пропорційний її швидкості, скорочення пробігу стрічки при різних режимах можна визначити шляхом аналізу середньозважених показників заповнення на постійній і дискретно змінюваній швидкостях. У дослідженні [15], яке розглядає вибір раціональних ступенів регулювання, зазначається, що така оптимізація значно знижує необґрунтований знос стрічки і компонентів конвеєра. Регульована швидкість сприяє скороченню пробігу тягового органу, що виражається у підвищенні ефективності використання обладнання.

У роботах [16, 17] проаналізовано ключові принципи розробки та дослідження систем регулювання швидкості стрічкового конвеєра, як безперервного, так і дискретного типу, з урахуванням ймовірнісних характеристик випадкового шахтного вантажопотоку. У випадку дискретного регулювання швидкість конвеєра змінюється ривком при досягненні вантажопотоком певного рівня. В рамках цієї роботи представлено методику визначення основних параметрів такого управління, зокрема оптимальних рівнів перемикання швидкостей та їх кількості, середнього часу функціонування на кожному рівні, а також погонного навантаження в умовах дискретного регулювання. Додатково розглянуто основні принципи побудови систем безперервного управління й подано методику розробки оптимальної системи регулювання.

Для забезпечення оптимальної роботи системи визначено кілька критеріїв. Вони спрямовані на зменшення ймовірності відхилення поточної швидкості конвеєрної стрічки $V(t)$ від заданої швидкості $V_{рас}(t)$ для транспортування матеріалів, мінімізацію математичного очікування абсолютної різниці між

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

швидкостями або зниження математичного очікування квадрата цієї різниці. У дослідженні [18] представлено метод побудови системи автоматичного розподілу навантаження в багатодвигунному конвеєрі (з n приводами), який забезпечує рівномірний розподіл навантаження між приводами незалежно від кількості чи розташування приводів і швидкості конвеєрної стрічки. Такий підхід дозволяє скоротити статичний запас міцності стрічки, що знижує її вартість та, водночас, дає змогу збільшити довжину конвеєрної лінії. При створенні математичної моделі конвеєра використовується класична багатомасова система, описана в роботах [19, 20], де маси з'єднуються ідеалізованими пружно-в'язкими елементами. Однак у моделі обмежуються лише двома масами, чого недостатньо для точного аналізу, оскільки таке спрощення унеможливує врахування змін швидкості. Розглянуто оптимізацію динамічних режимів роботи системи. При запуску потрібно обмежити динамічні навантаження, що виникають. А саме: ривки та прискорення. У режимі постійної швидкості необхідно забезпечувати точне регулювання для скорочення зносу та продовження терміну експлуатації стрічки. Автор вводить критерій оптимізації динамічних режимів стрічкового конвеєра через функціонал, який враховує точність підтримання швидкості та обмеження на динамічні зусилля і прискорення. Відомо, що для мінімізації застосовується інтегральне рівняння Вінера-Хопфа. Дослідження [15] показує переваги застосування асинхронного електропривода для роботи конвеєрних систем. Такий привод забезпечує високу надійність і якість функціонування обладнання. Аналіз виконавчих механізмів підтверджує перевагу асинхронного двигуна з фазним ротором, що може бути увімкнений через асинхронно-вентильний каскад. У межах дослідження розроблено модель асинхронного двигуна. Вона представлена у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь першого порядку, які описують роботу розімкненої системи електроприводу. Регуляція швидкості такого двигуна заснована на імпульсному управлінні. При підключенні електронного ключа паралельно інвертору в

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

ланцюг випрямленого струму ротора, відбувається зміна тривалості роботи ключа, що дозволяє регулювати швидкість. При використанні багатопривідної станції в конвеєрній лінії виникає необхідність забезпечення синхронізації роботи всіх виконавчих елементів.

1.4 Аналіз систем регулювання швидкості асинхронного двигуна

Асинхронні двигуни з фазним ротором, оснащені різними системами управління знайшли широке використання на конвеєрах. Серед цих систем можна відзначити менш ефективні параметричні системи управління та більш економічні, що застосовують вентильні перетворювачі, підключені до роторного контуру двигуна. У таких системах статор зазвичай під'єднується безпосередньо до мережі, в той час як у роторному контурі, в залежності від типу керування, встановлюють або додатковий опір, або напівпровідниковий перетворювач. Типовою ознакою управління через роторне коло є можливість регулювання і контролю енергії ковзання, що недоступно для систем з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Завдяки цьому такі системи забезпечують високий коефіцієнт корисної дії (ККД), який залишається сталим навіть при значних змінах швидкості в широкому діапазоні. Крім того, електроприводи такого типу відрізняються високою перевантажувальною здатністю. У вентильно-машинних електромеханічних каскадах енергія ковзання використовується для живлення машини постійного струму. Приклад подібної схеми показано на рисунку 1.3. У цій конфігурації якорь двигуна постійного струму живиться від некерованого випрямляча, який підключається до роторного контуру асинхронного двигуна з фазним ротором. Енергія ковзання в такій системі перетворюється на додатковий крутний момент. За принципом роботи цієї схеми, основний момент створюється асинхронним двигуном при ковзанні, близькому до номінального. У разі зменшення швидкості додатковий момент забезпечує двигун постійного струму, що

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє підтримувати загальний момент на сталому рівні. Регулювання швидкості асинхронного двигуна у таких системах здійснюється шляхом зміни напруги збудження двигуна постійного струму [14].

Така схема має декілька плюсів. Зокрема, вона дозволяє тримати постійну потужність на валу мотора завдяки збільшенню моменту при зменшенні швидкості обертання. Проте зі збільшенням діапазону регулювання швидкості значно зростають масо-габаритні параметри мотора постійного струму. Через це використання таких каскадів обмежується механізмами, що мають електроприводи з діапазоном регулювання, який не перевищує 2:1. На відміну від попереднього типу конструкцій, у вентильно-машинних каскадах потужність ковзання передається назад у мережу.

Для реалізації цього рішення двигун постійного струму механічно з'єднують із синхронним генератором (рисунок 1.4).

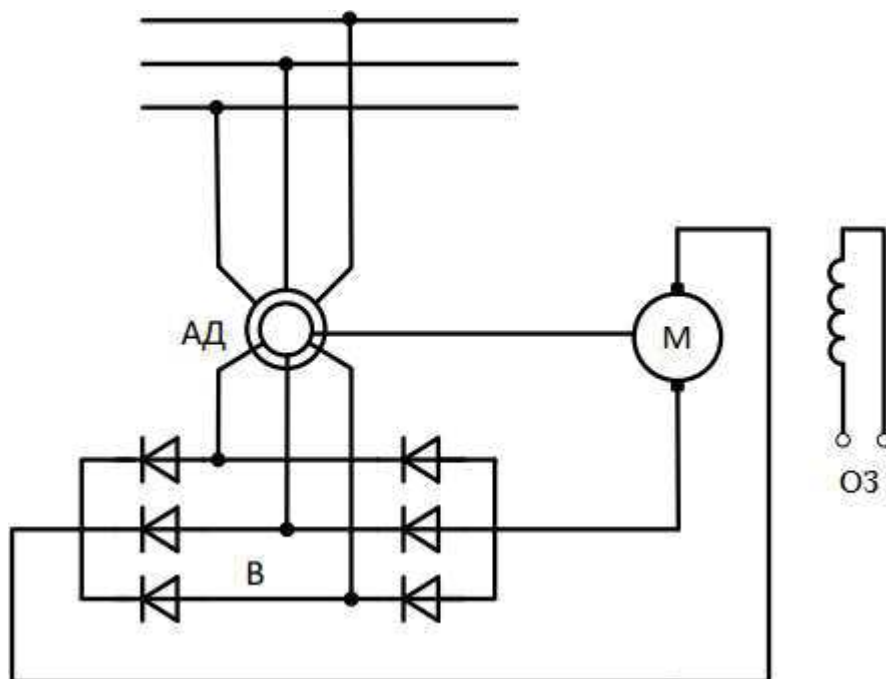


Рисунок 1.3 – Схема вентильно-машинного електромеханічного каскаду

Потужність ковзання передається від ротора асинхронного двигуна, а саме через двигун постійного струму до синхронного генератора, а далі — в електромережу. Це забезпечує дворазове перетворення енергії.

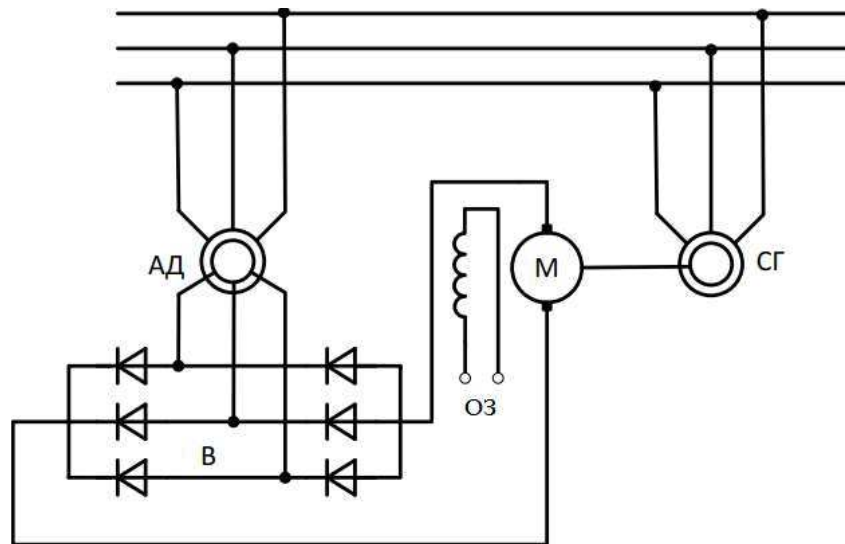


Рисунок 1.4 – Схема вентильно-машинного каскаду

Однак вона має певні недоліки, серед яких необхідність застосування двох додаткових електричних машин. Так як є подвійне перетворення енергії то коефіцієнт корисної дії низький. На рисунку 1.5 зображено схему асинхронно-вентильного каскаду з ланкою постійного струму, де випрямляч з боку ротора є некерованим. Енергія ковзання повертається в електричну мережу через керований інвертор. Регулювання швидкості реалізується шляхом введення додаткової ЕРС у роторне коло асинхронного двигуна. Діапазон регулювання обмежується кутом відкриття тиристорів інвертора. Головними перевагами цієї схеми є її простота конструкції, ширший у зіставленні з вентильно-машинним каскадом діапазон регулювання швидкості, а також високий ККД завдяки поверненню енергії ковзання у мережу. Проте така схема не дозволяє забезпечити функціонування асинхронного двигуна в руховому режимі за швидкості вище синхронної або в генераторному режимі за швидкості нижче синхронної. Ці обмеження можливо здолати, усунувши ланку постійного струму та встановивши два регульовані перетворювачі. В такому випадку керування вентилями здійснюється залежно від частоти ковзання або за допомогою незалежного регулювання амплітуди та частоти додаткової ЕРС. Це

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

режимі. Цей режим має низку переваг, серед яких можливість регулювання коефіцієнта потужності як самого двигуна, так і загалом всієї енергосистеми. Різні підходи до управління асинхронними двигунами були раніше досліджені та проаналізовані. Під час підключення двох роторних обмоток до джерела постійного струму асинхронний двигун починає функціонувати подібно до синхронного. Окрім цього, існує альтернативний метод управління, знаний як імпульсно-векторний. Принцип дії асинхронного двигуна з таким керуванням відображено на наведеній схемі. 1.6.

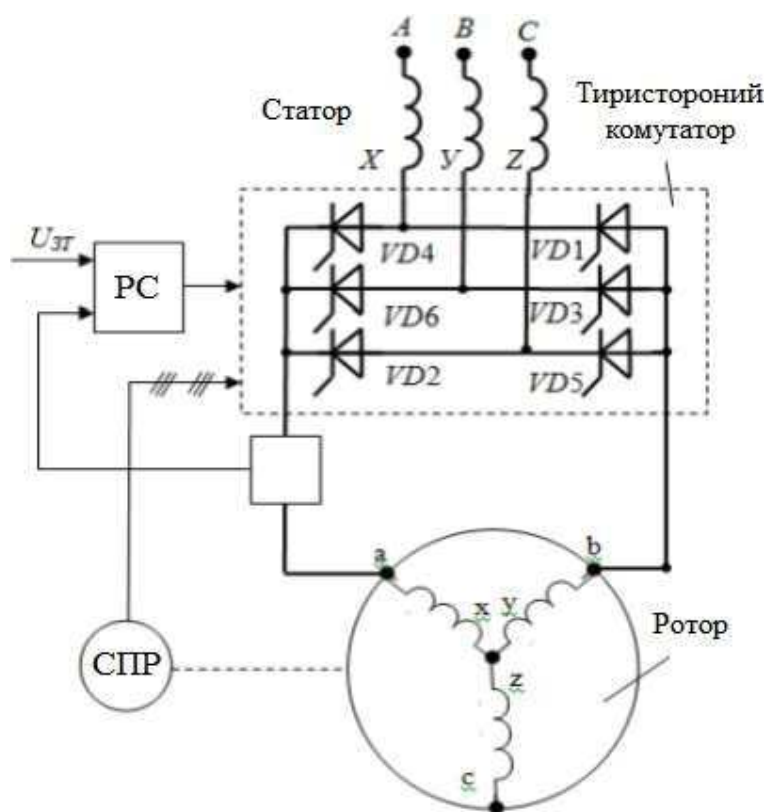


Рисунок 1.6 – Функціональна схема електроприводу з імпульсно-векторним керуванням

Схема теж має певні особливості, що впливають на її ефективність. Головним недоліком цієї системи є пульсація електромагнітного моменту в асинхронному двигуні, що виникає через несинусоїдальну форму струмів та напруг. Це, своєю чергою, зменшує точність регулювання швидкості обертання двигуна. Запровадження послідовного з'єднання ротора й статора в цій системі

дозволяє скоротити кількість елементів та спростити схему. Однак для дієвої реалізації цього методу треба, щоб властивості ротора і статора були зіставними. У разі неспівпадіння параметрів ймовірно обмеження по найбільшому струму, що спричиняє неповне використання можливостей машини. Специфікою конструкції асинхронного двигуна з фазним ротором є можливість послідовного з'єднання обмоток статора і ротора за допомогою напівпровідникових пристроїв. Такий спосіб керування завдяки меншій кількості комутаційних елементів сприяє підвищенню енергоефективності та надійності електроприводу. В синхронно-асинхронній машині обмотки статора й ротора також з'єднуються послідовно, але через некеровані ключі. Схема даного методу зображена на рисунку. 1.7.

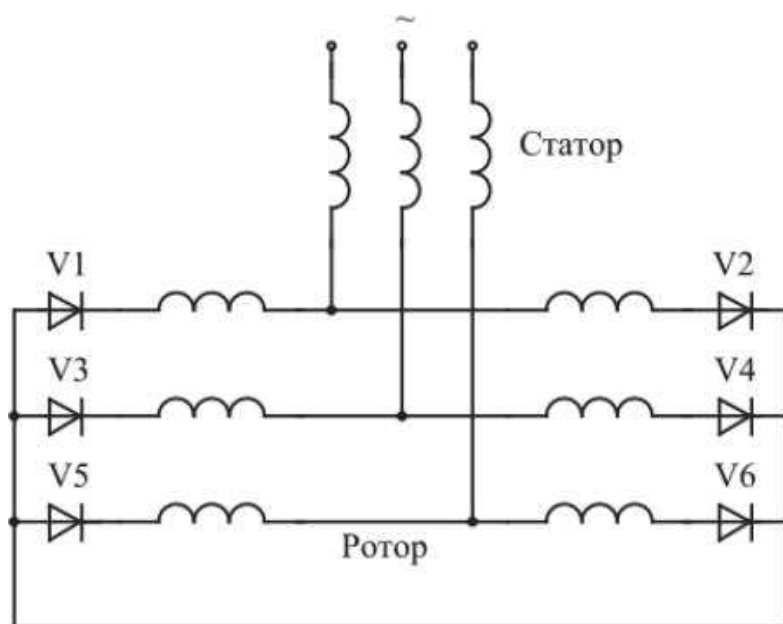


Рисунок 1.7 – Схема підключення двигуна

В режимі роботи синхронно-асинхронної машини організована таким чином, що кожна фаза включає дві гілки, які з'єднуються з трифазним мостовим випрямлячем. Випрямляч, у свою чергу, підключений до кінців статорних обмоток. Вихідні кола мостового випрямляча замикаються накоротко, унаслідок чого струм ротора набуває пульсуючого характеру. При взаємодії із магнітним

полем статора утворюється синхронізуючий момент, який супроводжується виникненням пульсуючих моментів обертання ротора, частота яких залежить від частоти ковзання. У результаті взаємодії цих моментів формується загальний обертальний момент. Це підвищує ККД машини завдяки відсутності струмів частоти ковзання у статорному колі, оскільки вони замикаються через вентилі випрямляча. Електропривод, реалізований за таким підходом, забезпечує пусковий момент, що перевищує номінальний утрічі, при невисокому пусковому струмі. Жорсткість механічної характеристики цього привода можна відрегулювати шляхом зміни схеми підключення обмоток ротора до плечей випрямляча. Подібний тип управління переважно застосовується там, де потрібен значний пусковий момент. Однак така схема має і недоліки, серед яких необхідність мати виводи обмоток ротора та встановлювати на ньому обертовий випрямляч. Щодо протяжних конвеєрів, через зростання лінійних опорів виникає потреба підсилювати натяг виконавчого елемента, що ускладнює конструкцію і збільшує вагу привода. Таким чином, експлуатація таких конвеєрів лише з одним приводним барабаном стає часто нерентабельною або навіть технічно неможливою. Найефективнішим рішенням у цьому випадку є багатодвигунний привод. Його механізми розташовуються вздовж усього конвеєра на певних інтервалах і працюють злагоджено на спільне навантаження. Завдяки цьому вдається знизити максимальний натяг виконавчого елемента до допустимого рівня, водночас зменшити енергоспоживання і вагу конструкції конвеєра. Такі приводи мають найбільше поширення в підвісних і пластинчастих конвеєрах, де тяговим елементом є ланцюг. У стрічкових конвеєрах передача зусиль здійснюється через тертя між приводними барабанами й стрічкою. Для цього можуть використовуватися системи з одним або двома барабанами. Однобарабанні приводи простіші й надійніші, проте їх застосування обмежується невеликими малопотужними конвеєрами, що потребують значного зусилля для транспортування матеріалів. У потужних і довгих конвеєрах використовуються

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

двобарабанні багаторухові приводи. Сучасні тенденції в енергетиці, орієнтовані на економію ресурсів, задають стандарти створення енергоефективних систем управління. Введення асинхронних двигунів у синхронному режимі у приводи стрічкових конвеєрів є обґрунтованим рішенням завдяки жорстким характеристикам роботи в такому режимі. Завдання автоматизації стрічкових конвеєрів можна структурувати за певною схемою, що представлена на відповідному рисунку. 1.8 [2-4].

Висновки до першого розділу

Використання стрічкових конвеєрів зі сталою швидкістю руху полотна демонструє низький рівень ефективності, який становить близько 60% за продуктивністю та 65% за тривалістю роботи. Поліпшення ефективності таких машин можливе через застосування систем регулювання швидкості руху стрічки, яка може підлаштовувати цю швидкість відповідно до ваги вантажу. Розвиток загальнопромислової мікропроцесорної техніки управління та повсюдне впровадження систем керування асинхронних приводів, а також використання відповідних систем контролю відкрили можливості вирішувати це завдання за допомогою сучасних методів оптимізованого управління. Тому, за мету даної роботи обрано розробку системи регульованого електроприводу транспортера конвеєра.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОНВЕЄРА

2.1 Побудова системи регулювання електроприводу

Система регулювання електроприводу – це сукупність пристроїв, які забезпечують автоматичне управління швидкістю, моментом, положенням та іншими параметрами електродвигуна, щоб забезпечити виконання заданої технологічної операції.

Структура системи регулювання електроприводу включає в себе наступні основні елементи: електродвигун перетворювач частоти (для асинхронних двигунів): датчики, система управління, виконавчі механізми, захист.

Використання єдиного зворотного зв'язку в електроприводах не дозволяє досягти високих показників статичної та динамічної якості. У процесі вдосконалення електроприводів було розроблено системи з кількома зворотними зв'язками та багатоконтурною структурою. Кількість контурів у таких системах визначається числом параметрів, які контролюються, наприклад, струм, напруга якоря, швидкість обертання двигуна, положення валу приводного механізму тощо. Електропривод із подвійним зворотним зв'язком струму та швидкості представлено на (рис. 2.1). У кожному контурі на вході регулятора відбувається порівняння сигналів, пропорційних заданому та реальному значенням вихідної величини цього контуру. Вихідна напруга регулятора слугує вхідним сигналом для наступного контуру. [13-15].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи потребує оптимізації, що означає вибір таких параметрів регулятора, які забезпечують відповідну якість регулювання. Якість визначається перехідним процесом у разі ступінчастого вхідного сигналу, який характеризується певним перерегулюванням та швидкодією. Модульний критерій оптимізації відпрацювання ступінчастого вхідного сигналу супроводжується певним перерегулюванням. Відповідно цьому, передавальна функція замкнутого контуру з регулятором має вигляд коливальної ланки із коефіцієнтом демпфування. $\xi = \sqrt{2}/2$

$$\Phi(p) = \frac{1/k_{OC}}{2T^2\mu p^2 + 2T\mu p + 1} \quad (2.1)$$

де $T\mu$ – постійна часу;

k_{OC} – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку.

Тривалість перехідного процесу дорівнює $4.7 "T" \mu$ та не залежить від сталої часу об'єкта регулювання. Цей спосіб налаштування також називають налаштуванням на оптимум за модулем (ОМ). Суть цього підходу полягає в тому, щоб у широкому діапазоні частот наблизити модуль частотної характеристики замкненого контуру до одиниці [15].

Симетричний критерій оптимізації (СО) часто використовується для налаштування систем, що включають два інтегральних елементи або один інтегральний та один інерційний елемент у структурі регульованого об'єкта. Цей підхід особливо ефективний за умови, що об'єкт має досить велику сталу часу. Тому передавальна функція замкненої системи за керованим впливом може бути подана у такій формі:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Phi(p) = \frac{(4T_{\mu}p + 1)}{(2T_{\mu}p + 1)(4T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu}p + 1)} \quad (2.2)$$

За ступінчастої керуючої дії час, за який вихідна величина вперше досягає відповідного значення ті дорівнює $3.1 T_{\mu}$, максимальне перерегулювання може бути понад 40%. [20]

Розглянемо двоконтурну систему електроприводу з підпорядкованим регулюванням та її процес оптимізації, що стартує з внутрішнього контуру струму. На схемі:

$W_{PT}(p)$ – показана передаточна функція регулятора струму;

T_M – електромеханічна стала часу роботи електроприводу;

T_s – електромагнітна постійна часу головного ланцюга електроприводу;

K_{II} – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача;

K_T – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом;

T_y – постійна часу системи тиристорного перетворювача.

Затримкою системи управління визначається постійна T_{μ} . Вона являє собою некомпенсовану малу постійну часу. Структурну схему розімкнутого контуру регулювання струму представлено на рисунку 2.3. У схемі відсутній зворотний зв'язок за ЕРС.

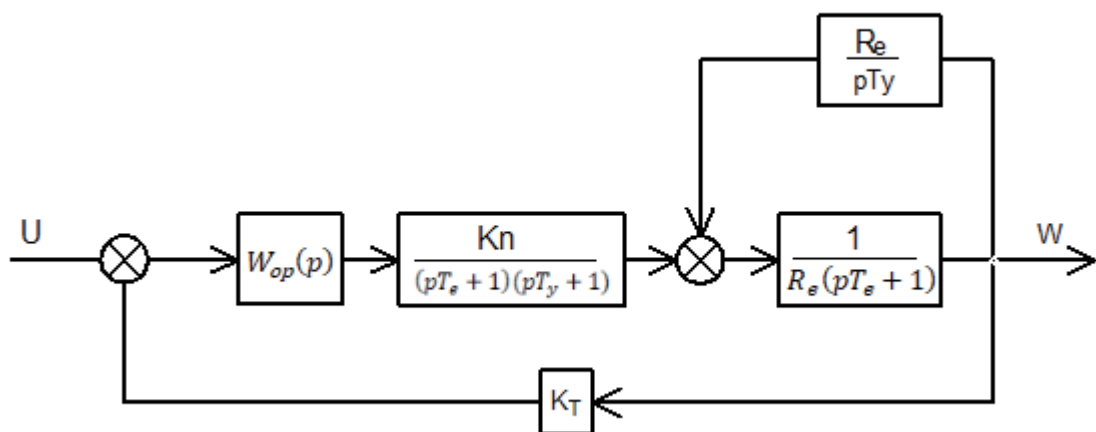


Рисунок 2.3 – Структурна схема контуру струму електроприводу

Відомо, що передавальна функція розімкнутого контуру (або передатна функція у відкритому контурі) - це математичний опис динамічної поведінки системи, коли зворотній зв'язок відсутній. Іншими словами, це відношення вихідного сигналу до вхідного сигналу, коли система працює без зворотного зв'язку і визначається за формулою:

$$W_{роз}(p) = W_{рГ}(p)W_0(p) \quad (2.3)$$

звідки

$$W_{рГ}(p) = \frac{W_{роз}(p)}{W_0(p)} \quad (2.4)$$

Передавальна функція розімкнутого контуру після перетворень прийме вигляд:

$$W_{роз}(p) = \frac{1}{pT_0\Pi(p\tau + 1)} \quad (2.5)$$

де T_0 – постійна, що визначається при умови пропускання замкнутим контуром максимальної частоти.

При $T_0 \geq 2 \sum_1^k \tau$ то рівняння можна представити у вигляді:

$$W_{роз}(p) = \frac{1}{pT_0(pT_\mu + 1)} \quad (2.6)$$

$$\Pi(p\tau + 1) \cong p \sum_1^k \tau + 1 = pT_\mu + 1 \quad (2.7)$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\sum_1^k \tau_i = T_\mu$ – сума постійних часу (малих).

Передавальна функція об'єкта регулювання - це математичний опис динамічної поведінки об'єкта, що показує, як його вихідна величина змінюється у відповідь на вхідну. Вона описує взаємозв'язок між входом і виходом системи та є важливою для аналізу та проектування систем автоматичного регулювання, буде визначатися як:

$$W_o(p) = W_{OK}(p) \frac{1}{pT_\mu + 1} \quad (2.8)$$

При врахуванні умови оптимізації стає $T_0=2T_\mu$, отже отримаємо:

$$W_{op}(p) = \frac{1}{W_{OK}(p)p2T_\mu} \quad (2.9)$$

Контур струму таким чином буде:

$$W(p) = \frac{\frac{K_n K_T}{R_e}}{(pT_e + 1)(pT_y + 1)} \quad (2.10)$$

Підставимо рівняння (2.10) в рівняння (2.9), отримаємо:

$$W_{pt}(p) = \frac{(pT_e + 1)(pT_y + 1)}{\frac{K_n K_T}{K_e} \cdot p2T_\mu} \quad (2.11)$$

Це відповідає пропорційно-інтегрально-диференційному регулятору (ПІД), який описує математичний зв'язок між помилкою (різницею між бажаним і фактичним значенням) та вихідним сигналом, який використовується

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для керування системою. Вона складається з трьох частин: пропорційної, інтегральної та диференціальної, кожна з яких вносить свій внесок у кінцевий керуючий сигнал. Якщо система управління є безінерційною ланкою ($T_y=0$), тоді отримаємо:

$$W_{pt}(p) = \frac{(pT_e + 1)}{\frac{K_n K_T}{K_e} \cdot p 2T\mu} \quad (2.12)$$

Постійна часу зворотного зв'язку регулятора струму тоді буде:

$$T_{oc} = T_3 = R_{oc}C \quad (2.13)$$

Постійна часу інтегрування регулятора струму визначається як:

$$T_p = 2T\mu \frac{K_n K_T}{K_e} = R_{et}C \quad (2.14)$$

Передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку по струму характеризує відношення сигналу, який повертається із виходу системи на її вхід, до вихідного сигналу системи. Він характеризує ступінь впливу зворотного зв'язку на роботу системи і знаходиться за формулою:

$$K_c = K_{dc} \frac{K_{3T}}{R_T} \quad (2.15)$$

де K_{dc} – передавальний коефіцієнт датчика струму, [В/А].

З вищезазначених отриманих рівнянь можна дійти до:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$2T\mu = \frac{R_T C R_3}{K_n K_{дс}} \quad (2.16)$$

Передавальна функція замкнутого контуру струму, також відома як передавальна функція зворотного зв'язку, описує співвідношення між вхідним і вихідним сигналами системи з зворотним зв'язком. Вона дозволяє аналізувати і проектувати системи автоматичного управління, враховуючи вплив зворотного зв'язку на стабільність, точність та інші характеристики системи і має вигляд:

$$W(p) = \frac{I_n(p)}{U_{РС}(p)} = \frac{1/K_T}{p^2 2T_\mu^2 + 2T_{MP} + 1} \quad (2.17)$$

Перехідний процес у струмовому контурі під час раптової зупинки двигуна можна прирівняти до імпульсного збурення:

$$I_n(p) = I_{КЗ} \frac{p 2T_\mu (pT_\mu + 1)}{(pT_{з+1}) [p 2T_\mu (pT_\mu + 1) + 1]}, \quad (2.18)$$

$$\text{де } I_{КЗ} = \frac{\Delta E_n}{R_3}$$

Струму визначається за рівнянням:

$$I_n(p) = \frac{I_{зmax}}{p 2T_\mu (pT_\mu + 1) + 1}, \quad (2.19)$$

$$\text{де } I_{зmax} = \frac{\Delta U_{зТ}}{K_T}.$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після оптимізації контуру струму відбувається оптимізація контуру швидкості. Структурна схема розімкненого контуру швидкості, з винятком члена другого порядку з рівняння, зображена на рисунку 2.4. Для досягнення астатичних властивостей щодо вхідних і збурювальних впливів регулятор швидкості обирають пропорційно-інтегральним (ПІ) із визначеною функцією передачі. Оптимізація виконується на основі симетричного критерію. [21]

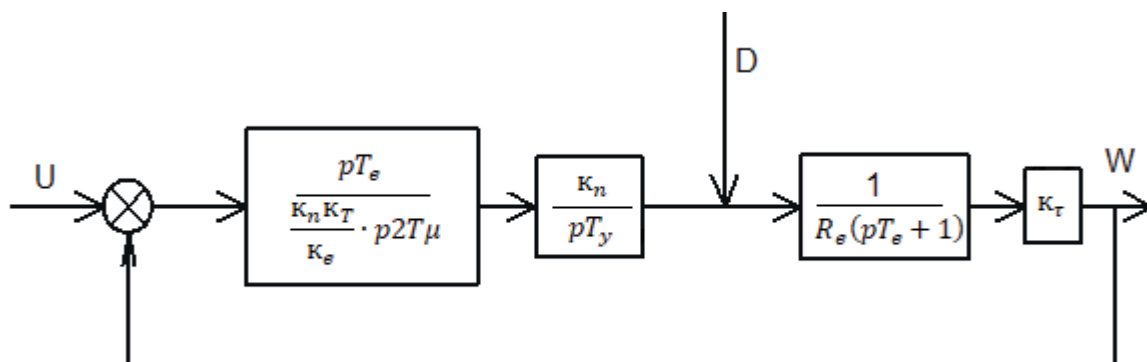


Рисунок 2.4 – Структурна схема контуру швидкості

$$W_{PC}(p) = \frac{1 + T_1 p}{T_2 p} \quad (2.20)$$

де $T_1 = R_2 C_2$; $T_2 = R_4 C_2$.

Для подальших розрахунків потрібно визначити еквівалентну постійну інтегрування контуру швидкості обертання:

$$B_C = \frac{R_1 K_T T_{\text{ЭМ}} C_2 \Phi T_2}{R_2 K_e R_3} \quad (2.21)$$

$$T_{MC} = 2T_{\mu T} + T_k \quad (2.22)$$

Якщо зворотній зв'язок позитивний, система може стати більш стабільною та менш чутливою до шумів. Передавальна функція замкнутої системи регулювання:

$$W_{ЗАМ}(p) = \frac{1 + T_1 p}{B_c T_\mu p^3 + B_c p^2 + T_1 p + 1} \quad (2.23)$$

В цьому випадку частота визначається як:

$$W_c = \frac{1}{\sqrt{T_\mu T_1}} \quad (2.24)$$

2.2 Розробка алгоритму керування електроприводом конвеєра

Розглянемо процедуру розробки оптимального регулятора для управління конвеєром, його електромеханічна система являється коливальною динамічною ланкою. Такий підхід є доцільним для однодвигунного конвеєра, у якого контур регулювання швидкості приводу. Застосування цього методу значно спростить процес розробки регулятора, водночас зберігаючи достатню точність у вирішенні завдань оптимізації. Поточне навантаження конвеєра залежить від обсягу вантажу, що подається на стрічку, і визначається наступним рівнянням (2.25):

$$Q = (1 - e^{-pT})\delta. \quad (2.25)$$

Розкладемо e^{pT} у ряд Тейлора та обмежимося двома членами, і, враховуючи інтегральну складову навантаження, отримаємо:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$Q = (1 - e^{-pT})\delta = \left(1 - \frac{1}{e^{pT}}\right)\delta = \left(\frac{e^{pT} - 1}{e^{pT}}\right)\delta \approx$$

$$\approx \left(\frac{1 + pT - 1}{1 + pT}\right)\delta = \frac{T}{Tp + 1}\sigma. \quad (2.26)$$

Час затримки залежить від значення швидкості за формулою $T = l_k i_p R_\delta^{-1} \omega^{-1}$, можемо подати рівняння, яке моделює завантаження у формі Коші:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{R_\delta}{l_k i_p} \omega Q + \sigma. \quad (2.27)$$

Привід може бути описаним такою системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon;$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{эп}}^2} \omega - \frac{2\xi}{T_{\text{эп}}} + \frac{K_{\text{эп}}}{T_{\text{эп}}} u. \quad (2.28)$$

Враховуючи запропоновану модель електромеханічної системи, можна зобразити у вигляді, наведеному на рисунку 2.5.[12]

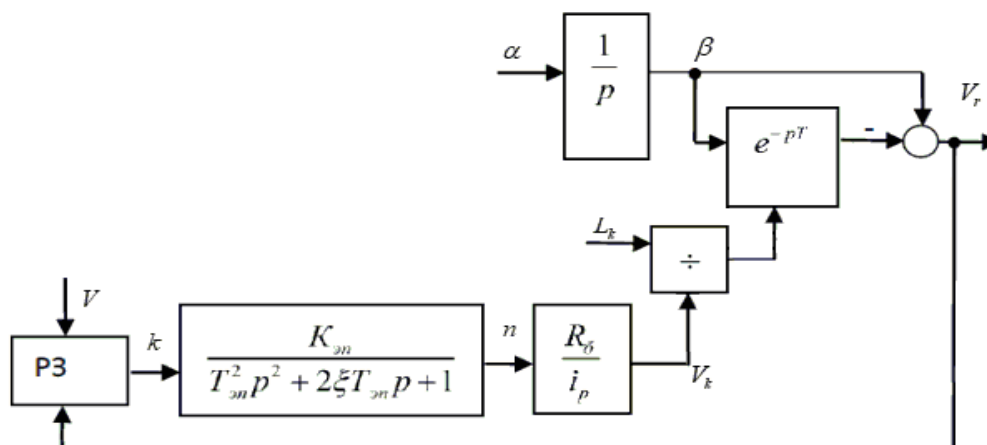


Рисунок 2.5 - Системи стабілізації конвеєра при зміні навантаження

На рисунку 2.5 використано такі позначення:

V, V_r - заданий та реальний об'єм вантажу на конвеєрі;

k - керуючий вплив з виходу регулятора завантаження;

n - частота обертання валу двигуна;

V_k - швидкість руху стрічки конвеєра;

L_k - довжина конвеєра;

α - миттєва кількість вантажу, що надходить на конвеєр;

β - кількість вантажу, що завантажується на конвеєр;

R_o - радіус приводного барабана;

i_p - передавальне число редуктора;

K_{em}, ξ, T_{em} - параметри електромеханічної системи конвеєра.

Ефективність роботи описується коефіцієнтом корисної передачі (ККП), який обчислюється за наступною формулою:

$$W_p(j\omega) = k_p$$

Для усієї системи:

$$W(j\omega) = k_p W_{об}(j\omega).$$

Отже, коефіцієнт підсилення системи збільшується на певну величину k_p разів. Тому перехідні процеси у П-регуляторі описуються рівнянням:

$$\mu = k_p \varepsilon,$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де ε - Вхідний сигнал регулятора визначається як різниця між фактичним значенням регульованої величини та заданим параметром; μ - керуючий вплив регулятора на об'єкт та спрямований на усунення відхилення регульованої величини від заданого показника.

2.3 Розробка елементів приводу

Для нашого конвеєра потрібно обрати мотор-редуктор в якості електроприводу. Навантаження на конвеєрі – 200 кг, швидкість руху до 0.3 м/с.

Визначимо потужність P_d на приводному валу конвеєра, з урахуванням того, що ККД $\eta = 0,94$, Момент 5000 Н

$$P_d = \frac{(k P_o)}{\eta} = 1,2 * \frac{5000 * 2 * 10^{-3}}{0,94} = 1,28 \text{ кВт}$$

Обираємо енергоефективний електродвигун LEDERMANN L3E A 90SA2 1.5 кВт 3000 об/хв [20]

Цей потужний трифазний асинхронний двигун призначений для різноманітних промислових завдань, де важливі надійність і енергоефективність. Він відповідає найвищим європейським стандартам енергоефективності ІЕ3.

Висока потужність: 1,5 кВт при 3000 об/хв.

Двигун забезпечує помітне зниження споживання електроенергії та сприяє скороченню експлуатаційних витрат, що дає економію до 20% електроенергії порівняно з двигунами ГОСТ.

Двигун німецької якості має відповідну гарну надійність, забезпечує тривалий термін служби й стабільну роботу.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Багатофункціональність дає можливість використовувати пристрій у різних галузях промисловості. Компактна конструкція оптимізує простір і спрощує процес встановлення.

Клас захисту IP55 гарантує стійкість до впливу пилу й вологи. Знижений рівень шуму й вібрації сприяє комфортним умовам експлуатації.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики:

Тип двигуна: асинхронний
Потужність: 1,5 кВт
Кількість фаз: 3
Напруга: 400 В
Кількість полюсів: 2
Діаметр валу: 24 мм
Частота обертання: 3000 об/хв
Монтажне виконання: В3
Ефективність навантаження 100%: 84,2%
Коефіцієнт потужності: 0,82
Ефективність навантаження 75%: 84,9%
Ефективність навантаження 50%: 83,2%
Охолодження: IC411
Клас захисту: IP55
Коефіцієнт пускового струму: 6,2
Коефіцієнт пускового моменту: 2,7
Коефіцієнт крутного моменту: 3,4
Частота струму: 50 Гц
Вага: 13 кг
Країна-виробник: Німеччина

У якості редуктора обрано черв'ячний NMRV 110 , 840 Н.м [21]

Черв'ячні редуктори серії NMRV є надійною альтернативою для заміни багатьох зношених редукторів інших виробників завдяки універсальним приєднувальним розмірам. Вони здатні адаптуватися до різних потреб завдяки можливості комплектації: вихідними фланцями (F, FB, FL), вихідними валами (однобічними або двобічними), реактивними кронштейнами.

Редуктори серії NMRV мають універсальний конструктивний корпус, що дозволяє їх монтаж у будь-якому положенні на обладнанні. Корпуси редукторів типорозмірів 025 – 090 виготовляються з легкосплавних металів методом лиття під тиском, що забезпечує точність і легкість конструкції. Для типорозмірів 110 – 150 використовуються чавунні корпуси, які гарантують високу міцність усіх елементів і довговічність редуктора.

Розробимо модель мотор – редуктора у програмному середовищі SolidWorks. Загальний вигляд показано на БРМА 25.01.00.000 В3 і 3Д модель на рис. 2.6

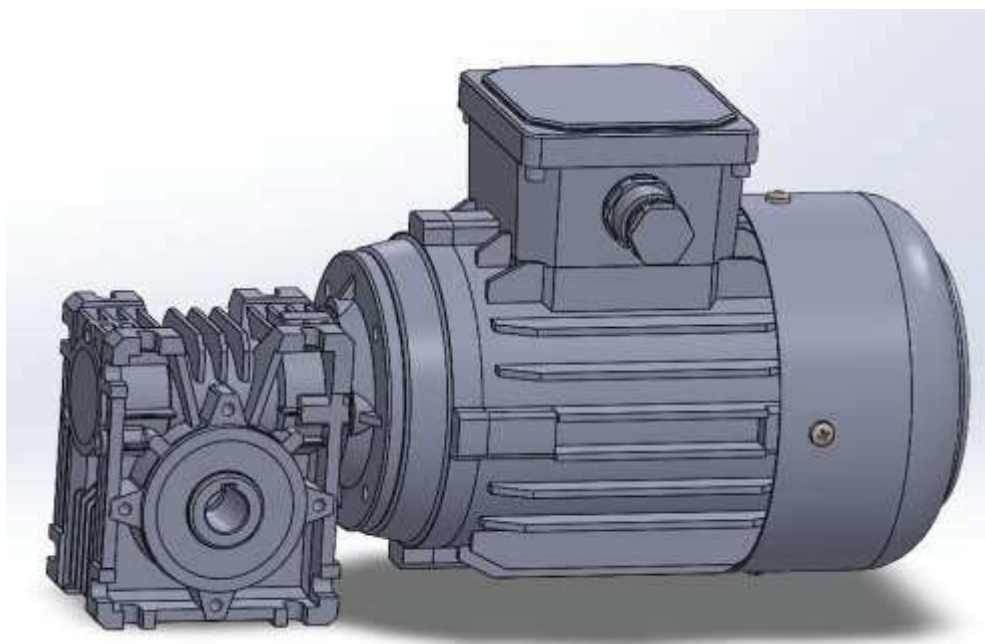


Рисунок 2.6 - 3Д модель Мотор-редуктора

Також розробимо варіант конвеєра зі застосуванням даного мотор-редуктора. Така модель представлена на БРМА25.00.00.00 ДІ2 і на рис .2.7.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

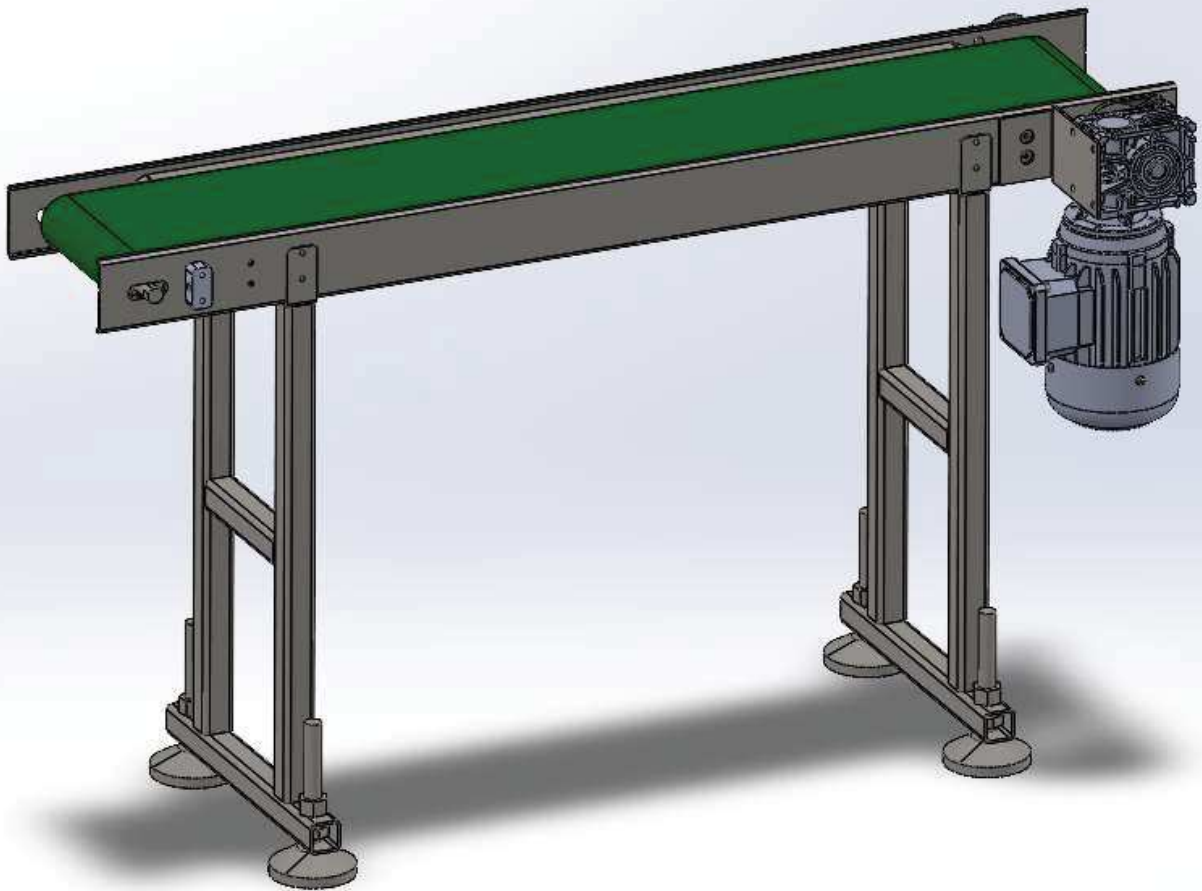


Рисунок 2.7 – Модель конвеєра з електроприводом

Для подальших розрахунків проведемо моделювання навантаження конвеєра у середовищі Simulation від SolidWorks.

Розроблена модель для розрахунку методом кінцевих елементів показана на рис.2.8. При моделюванні врахуємо крутний момент, що діє на барабан конвеєра.

Розраховані результати напруження показані на рис.2.9, величину деформації на рис.2.10, навантаження на опори конвеєра на рис.2.10.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

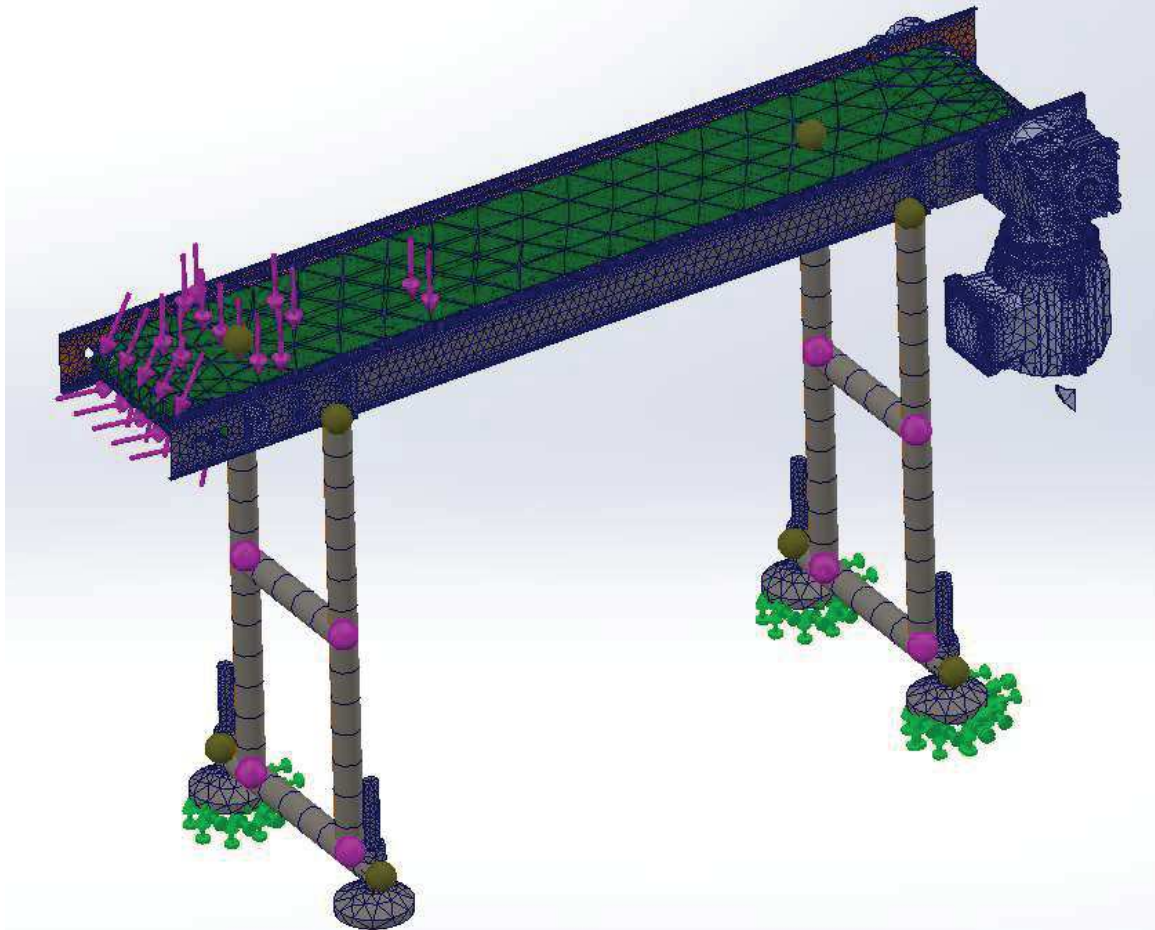


Рисунок 2.8 - МКЕ модель конвеєра

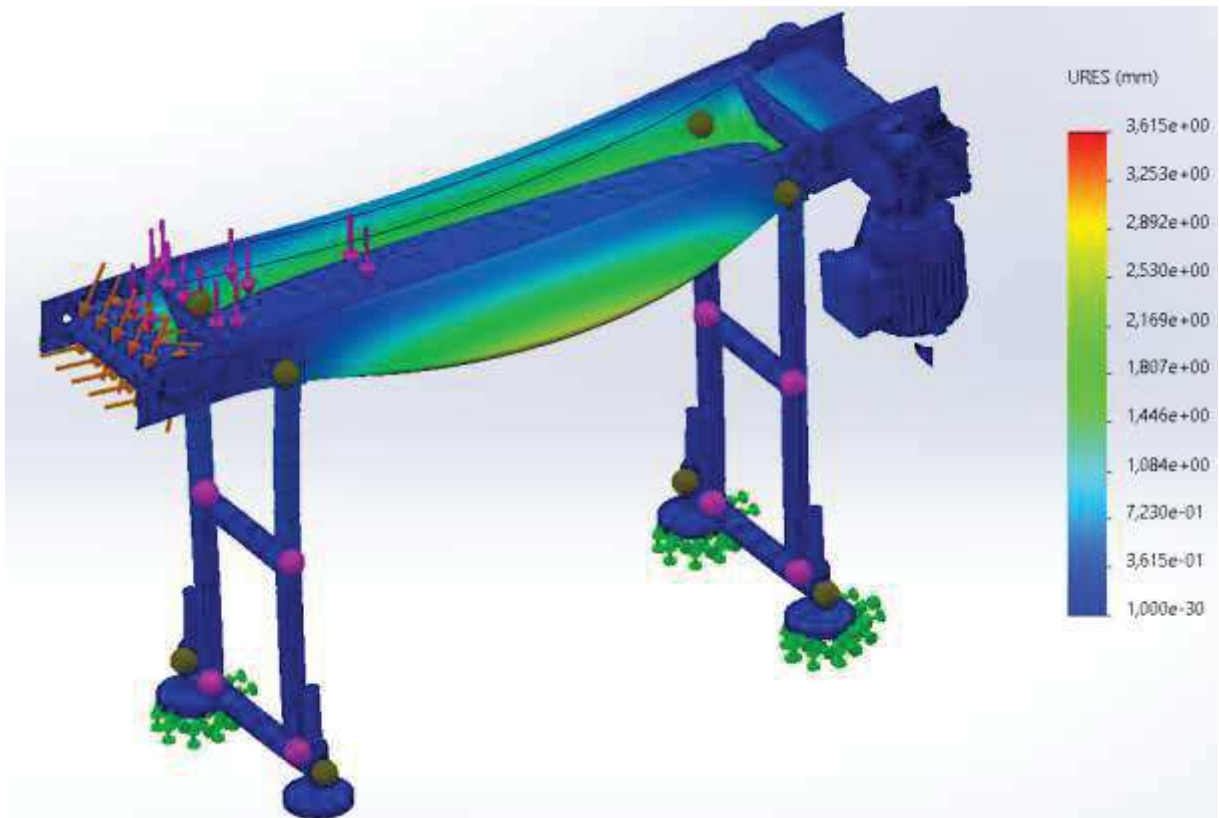


Рисунок 2.9 - Моделювання деформації конвеєра

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

40

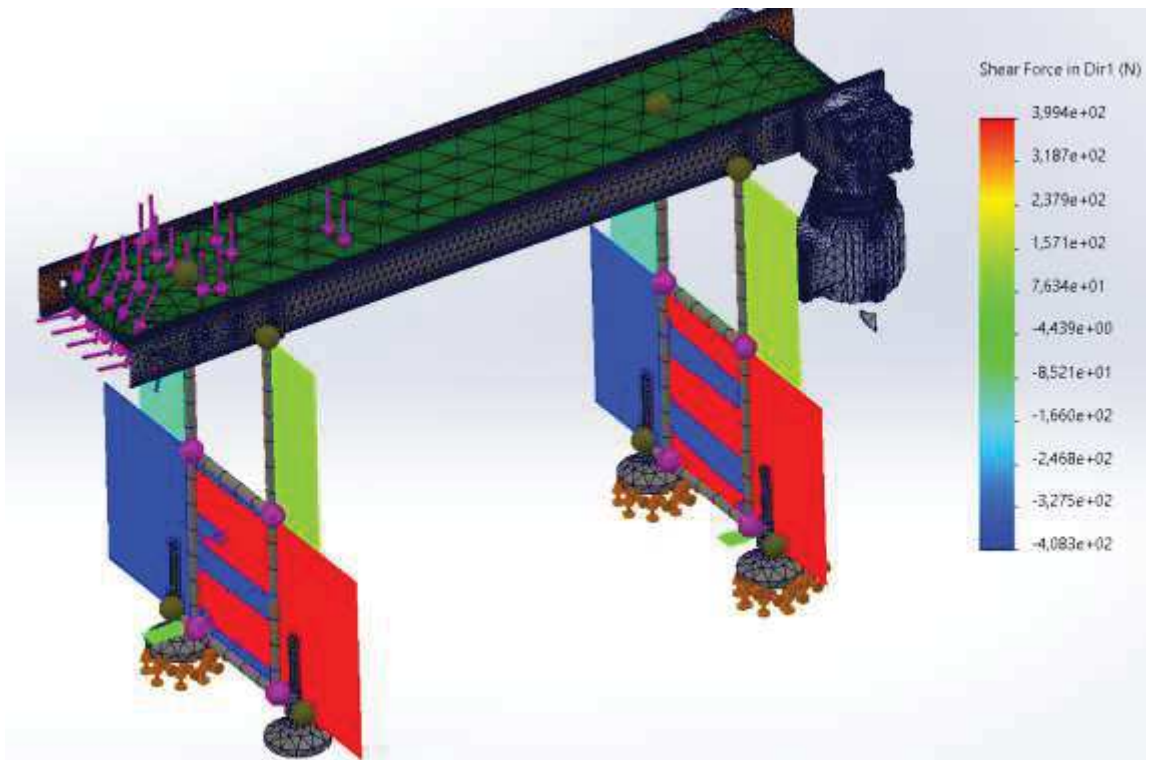


Рисунок 2.10 - Моделювання навантаження на опори конвеєр



Рисунок 2.11 - Моделювання навантаження конвеєра

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Висновки до другого розділу

Запропонована схема регулювання швидкості конвеєра.

Вибрано електродвигун та редуктор для електроприводу.

Розроблена модель конвеєра у середовищі SolidWorks, з обраним електроприводом. Проведено моделювання навантаження на конвеєр. Визначено величини переміщення стрічки, напруження на опорах.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРАХУНКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОНВЕЄРА

3.1 Розробка системи автоматизованого регулювання швидкості конвеєра

Структурну схему системи автоматичного регулювання (САР) електропривода конвеєра показана на рис.3.1.

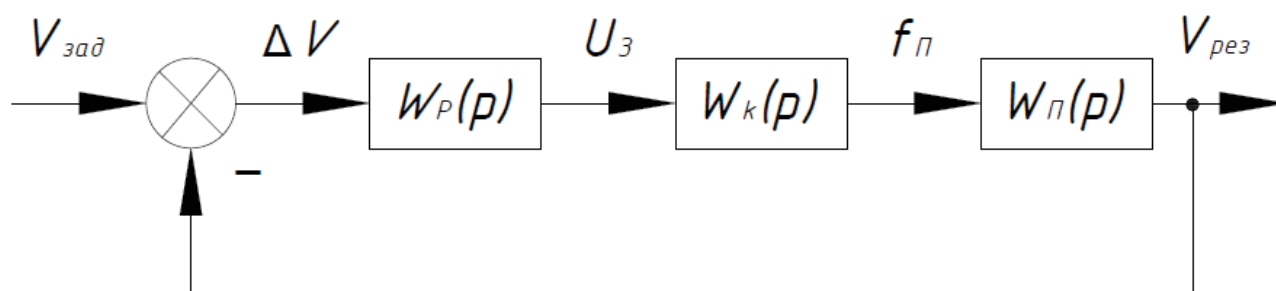


Рисунок 3.1 - Структурна схема системи автоматичного регулювання швидкості конвеєра

Тут $V_{зад}$ – задана швидкість конвеєра; ΔV – розузгодження швидкості; $U_з$ – напруга керуюча; $f_п$ – отримана частота обертання валу електродвигуна; $V_{рез}$ – результуюче значення швидкості конвеєра; $W_p(p)$ – передаточна функція регулюючого пристрою; $W_k(p)$ – передаточна функція перетворювача; $W_п(p)$ – передаточна функція приводу.

Задаючий сигнал є прямо пропорційним потужності:

$$U_з = k_p \Delta V$$

де k_p – коефіцієнт залежності керуючого сигналу від різниці заданої і отриманої потужності.

Коефіцієнт передачі k_p можна виразити через k_1 та співвідносячи зображення за Лапласом вихідного сигналу зі зображенням вхідного сигналу, отримуємо:

$$W_p(p) = \frac{U(p)}{T(p)} = k_1. \quad (3.1)$$

Це є пропорційною ланкою. Вхідним параметром для перетворювача є рівень вхідного сигналу, а вихідним є швидкість. На основі заданих рівностей після введення позначення $K_s \cdot K_f = k_2$. Однією з особливостей перетворення Лапласа, які спричинили його широке розповсюдження в наукових і інженерних обчисленнях, є те, що багатьом співвідношенням та операціям над оригіналами відповідають простіші співвідношення між їхніми зображеннями. Так, згортка двох функцій зводиться в просторі зображень до дії множення, а лінійні диференціальні рівняння стають алгебраїчними. Тому взявши відношення зображення вихідного сигналу до зображення вхідного сигналу за Лапласом, передатну функцію перетворювача можливо представити у вигляді відповідного математичного виразу:

$$W_k(p) = \frac{F(p)}{U(p)} = \frac{k_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (3.2)$$

Конвеєр в даному випадку є керованим предметом. При цьому в усталеному стані швидкість є прямо пропорційною напрузі. Треба також враховувати інерційність системи в динамічному режимі, тому:

$$T_T \frac{dT}{dt} + T = k_T \cdot f_I,$$

де T_T – стала часу швидкості;

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

k_T – коефіцієнт залежності швидкості в усталеному режимі.

Для деталізації цього наразі загального алгоритму розв'язання задачі аналізу значно нелінійних динамічних систем треба отримати передаточну функцію у такій формі:

$$W_p(p) = \frac{T(p)}{F(p)} = \frac{k_3}{T_3 p + 1}. \quad (3.3)$$

Зважаючи на одержані вирази для обчислення передавальних функцій, розглянемо розімкнену передавальну функцію САР швидкості конвеєра:

$$W(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}$$

або

(3.4)

$$W(p) = \frac{k_0}{T_{30} p^3 + T_{20} p^2 + T_{10} p + 1}.$$

$$T_{30} = T_1 T_2 T_3;$$

$$T_{20} = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3;$$

$$T_{10} = T_1 + T_2 + T_3.$$

Де $k_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$.

Передаточна функція замкненої системи, що показана на рис. 3.1, визначається у такій формі

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{33}(p)}.$$

Де $W_p(p)$ – передаточна функція розімкненої САР,

$W_{33}(p)$ – передаточна функція ланки зворотного зв'язку.

Використав формулу (3.4), одержуємо передавальну функцію САР:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\zeta}(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + k_0}. \quad (3.5)$$

Отримані значення розрахунку автоматизованої системи регулювання представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1– Параметри системи керування швидкості

Назва	Позначення	Значення
<u>Пропорційний регулятор</u>		
Коефіцієнт перетворення швидкості у сигнал регулювання	K_p	0,055
<u>Перетворювач</u>		
Коефіцієнт залежності швидкості обертання валу двигуна від напруги (сигналу керування)	K_S	$4,0 \cdot 10^{-4}$
Стала часу зміни швидкості обертання валу двигуна при зміні сигналу керування	T_S	0,14 с
Коефіцієнт, що показує залежність швидкості обертання валу редуктора від напруги	K_f	14 м/с
Стала часу зміни швидкості обертання валу редуктора при зміні сигналу керування	T_f	0,26 с
<u>Конвеєр</u>		
Стала часу зміни швидкості руху при зміні напруги керування	T_N	3,0 с
Коефіцієнт, що показує залежність швидкості руху від напруги керування	k_N	$2,4 \cdot 10^2$

На основі заданих параметрів виконаємо розрахунок коефіцієнтів і сталих часу для передаточних функцій САР.

$$k_0 = 1,014;$$

$$k_1 = 0,65;$$

$$k_2 = 0,0065;$$

$$k_3 = 2,4 \cdot 10^2;$$

$$T_1 = 0,035;$$

$$T_2 = 0,65;$$

$$T_3 = 0,15;$$

$$T_{10} = 0,25;$$

$$T_{20} = 0,13;$$

$$T_{30} = 0,0034125.$$

3.2 Визначення стійкості САР

Метод Найквіста є одним із частотних підходів для визначення стійкості автоматичних систем регулювання (АСР). Він дозволяє визначити стійкість замкненої системи, спираючись на амплітудно-фазову характеристику (АФХ) розімкненої системи. При цьому підхід до аналізу залежить від того, чи утримує система стійкість у розімкненому стані. Передовсім потрібно оцінити стійкість АСР у розімкненому вигляді. Для цього використаємо метод Гурвіца, який належить до алгебраїчних методів аналізу. Як основу, слід прирівняти знаменник рівняння (3.4) до нуля [21]:

$$T_{30}p^3 + T_{20}p^2 + T_{10}p + 1 = 0.$$

Згідно з критерієм стійкості лінійної автоматичної системи регулювання (АСР) необхідною умовою її стійкості є додатність усіх часткових елементів

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матриці Гурвіца, що формується для рівняння вигляду $a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0$ з урахуванням $a_0 = T_{30}, a_1 = T_{20}, a_2 = T_{10}, a_3 = 1$.

Записується у вигляді:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix}.$$

Матриця Гурвіца при $n=3$ набуває наступного вигляду:

$$\begin{vmatrix} T_{20} & 1 & 0 \\ T_{30} & T_{10} & 0 \\ 0 & T_{20} & 1 \end{vmatrix}.$$

Значення коефіцієнтів T_{i0} розраховано вище.

Розглянемо матрицю Гурвіца з застосуванням відповідного критерію:

$$a_0 = T_{30} > 0;$$

$$\Delta_1 = a_1 = T_{20} > 0;$$

$$\Delta_2 = \Delta_1 a_2 = \Delta_1 \cdot T_{10} > 0.$$

Всі часткові визначники є додатними. Тоді можна зробити висновок, що система є стійкою. З огляду на те, що автоматична система регулювання (АСР) у розімкнутому вигляді є стійка, то можна застосувати метод Найквіста.

Для забезпечення стійкості АСР у замкнутому стані необхідно, щоб амплітудно-фазова характеристика (АФХ) розімкненої системи $W(j\omega)$ при зміні ω від 0 до ∞ не охоплювала точку з координатами $(-1; j0)$ за умови її стійкості в розімкненому стані.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому сформуємо характеристичне рівняння для такої САР представлено у такому вигляді [22]:

$$D_p(p) = (T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1).$$

Використовуючи заміну $p \rightarrow j\omega$ отримаємо таку передавальну функцію розімкненої системи, яка може бути приведена до вигляду $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$.

Тоді з (3.4) отримаємо:

$$W(j\omega) = \frac{k_0}{-jT_{30}\omega^3 - T_{20}\omega^2 + jT_{10}\omega + 1}.$$

Узагальнимо групу елементів, що належать до дійсної й уявної частин:

$$W(j\omega) = \frac{k_0 + j0}{(-T_{20}\omega^2 + 1) + j(-T_{30}\omega^3 + T_{10}\omega)}.$$

Потрібно врахувати, що дійсні та уявні частини рівняння визначається через:

$$W(j\omega) = \frac{C(\omega) + jD(\omega)}{E(\omega) + jF(\omega)},$$

Ці частини функції $W(j\omega)$ можна визначити таким чином:

$$U(\omega) = \frac{C(\omega) \cdot E(\omega) + D(\omega) \cdot F(\omega)}{E^2(\omega) + F^2(\omega)},$$

$$V(\omega) = \frac{D(\omega) \cdot E(\omega) - C(\omega) \cdot F(\omega)}{E^2(\omega) + F^2(\omega)}.$$

Отже маємо, що

$$\begin{aligned}C(\omega) &= k_0; \\D(\omega) &= 0; \\E(\omega) &= -T_{20}\omega^2 + 1; \\F(\omega) &= -T_{30}\omega^3 + T_{10}\omega.\end{aligned}$$

Приведення цього виразу до вигляду $W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$ дасть можливість побудувати АФХ. Використовуючи $A(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ отримаємо:

$$\begin{aligned}A(\omega) &= \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \\ \varphi(\omega) &= \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.\end{aligned}$$

Амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи показана на рис.3.2. з урахування зміни ω від 0 до ∞ .

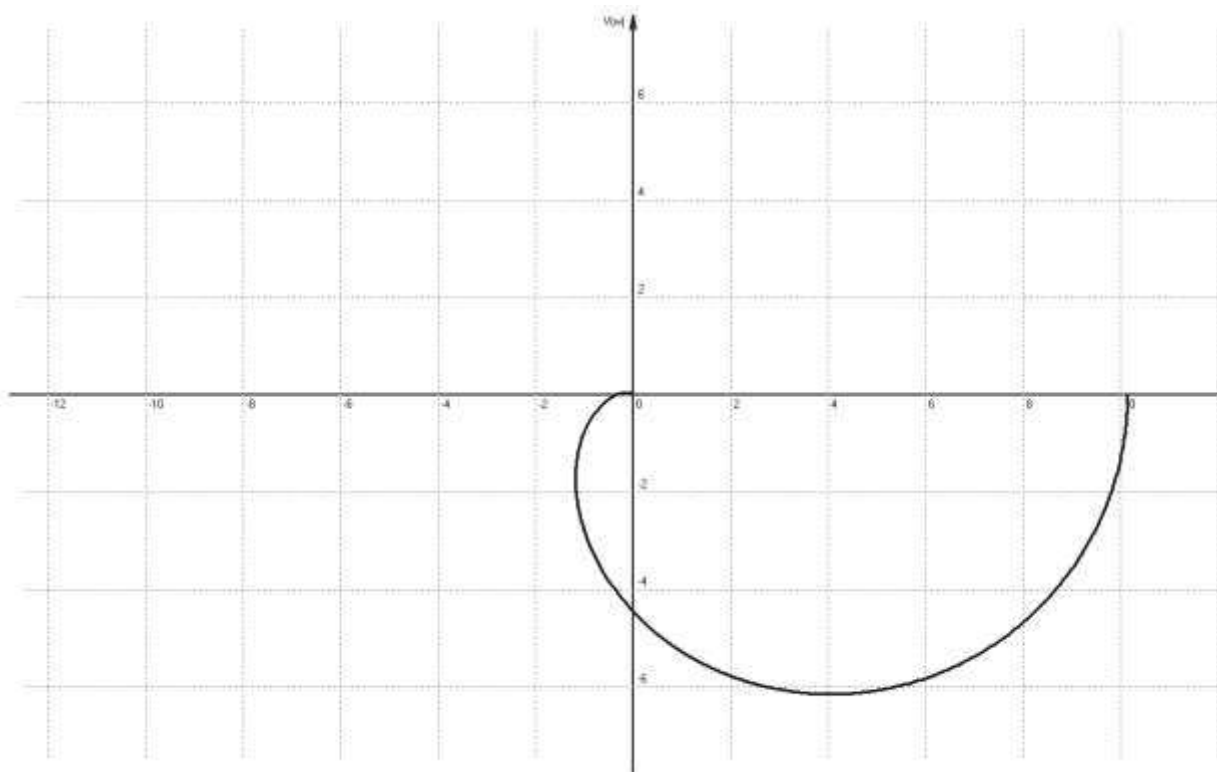


Рисунок 3.2 - Амплітудно-фазова характеристика системи автоматичного

регулювання конвеєра

Зважаючи на вигляд АФЧ на рисунку 3.2, можна дійти висновку, що дана система автоматичного регулювання не охоплює точку. $(-1;j0)$ і є стабільною у замкненому стані.

3.3 Визначення стійкості САР за критерієм Михайлова

Критерій Михайлова — це частотний спосіб аналізу стабільності лінійних систем автоматичного управління (САУ), котрий дозволяє оцінити стійкість системи на основі її амплітудно-фазової характеристики або годографа у комплексній площині. Формулюється так: для стійкої САР необхідно і досить, щоб годограф Михайлова, починаючись при $\omega = 0$ на додатній дійсній піввісі, обходив послідовно в додатному напрямку (проти годинникової стрілки) при збільшенні ω від 0 до ∞ n квадрантів, де n — степінь характеристичного поліному [22].

З рівняння 3.5 запишемо характеристичний вислів замкненої системи

$$D_{\zeta}(p) = T_{30}p^3 + T_{20}p^2 + T_{10}p + 1 + k_0.$$

Виконаємо заміну $p \rightarrow j\omega$ для переходу до частотної площини.

Сформуємо характеристичний поліном вигляду [22]:

$$D_{\zeta}(p) = (-T_{20}\omega^2 + 1 + k_0) + j(-T_{30}\omega^3 + T_{10}\omega).$$

Дизначимо дійсну складову характеристичного поліному як $U(\omega)$ та уявну — як $V(\omega)$, змінюючи їх значення від 0 до ∞ , див. рис.3.2. Це дасть можливість побудувати годограф Михайлова на комплексній площині.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

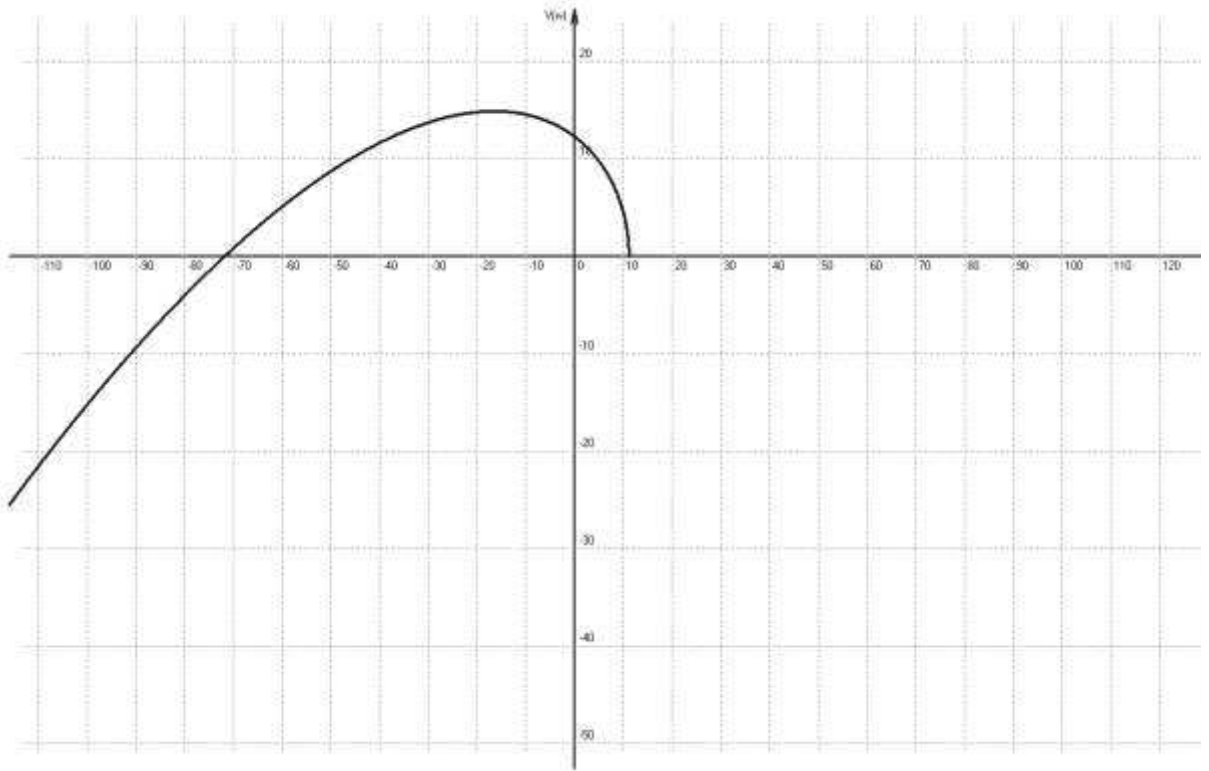


Рисунок 3.3 - Годограф Михайлова

Оскільки годограф проходить через 3 квадранти за умови ступеня характеристичного полінома, що дорівнює трьом, то з такого збудованого годографа Михайлова можемо підтвердити висновок про те, що САР є стійкою. При подальшому обчисленні дійсна частина прямує до $-\infty$, і уявна частина також прямує до $-\infty$.

3.4 Логарифмічні характеристики САР

Запишемо передавальну функцію розімкненої системи ще раз, оскільки це необхідно для побудови логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) та логарифмічної фазо-частотної характеристики (ЛФЧХ). Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) являє собою графічне відображення частотної поведінки системи, де амплітуда виражається в децибелах (дБ), а частота відображається в логарифмічному масштабі, наприклад, в октавах або декадах. Цей підхід широко використовується для

аналізу і проектування лінійних стаціонарних систем. Особливо часто ЛАЧХ застосовується у сфері аудіотехніки та систем управління, оскільки такий формат дозволяє значно спростити дослідження складних систем. Маємо:

$$W(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}.$$

Виконаємо заміну $p \rightarrow j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{k_0}{(T_1 \cdot j\omega + 1) \cdot (T_2 \cdot j\omega + 1) \cdot (T_3 \cdot j\omega + 1)}. \quad (3.6)$$

Значення модуля $W(j\omega)$ буде:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{k_0}{\sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1} \cdot \sqrt{T_2^2 \omega^2 + 1} \cdot \sqrt{T_3^2 \omega^2 + 1}}.$$

Отримаємо ЛАЧХ системи з урахуванням умов, що $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$:

$$L(\omega) = 20 \lg k_0 - 20 \lg \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1} - 20 \lg \sqrt{T_2^2 \omega^2 + 1} - 20 \lg \sqrt{T_3^2 \omega^2 + 1}.$$

Визначимо частоти ЛАЧХ, а саме:

$$\omega = \frac{1}{T_1} = 0,286 \text{сек};$$

$$\omega = \frac{1}{T_2} = 6,667 \text{сек};$$

$$\omega = \frac{1}{T_3} = 15,385 \text{сек}.$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Для створення ЛАЧХ нанесемо пряму величину $L(\omega) = 20 \lg k_0 = 20$ з початковим нахилом 0Дб/дек. Вона змінюватиме нахил на -20 Дб/дек при ω_1, ω_2 коли буде створенні її на частотах зрізу.

Побудуємо ЛАЧХ в логарифмічній системі координат (див. рис.3.4) відповідно до наведених міркувань.

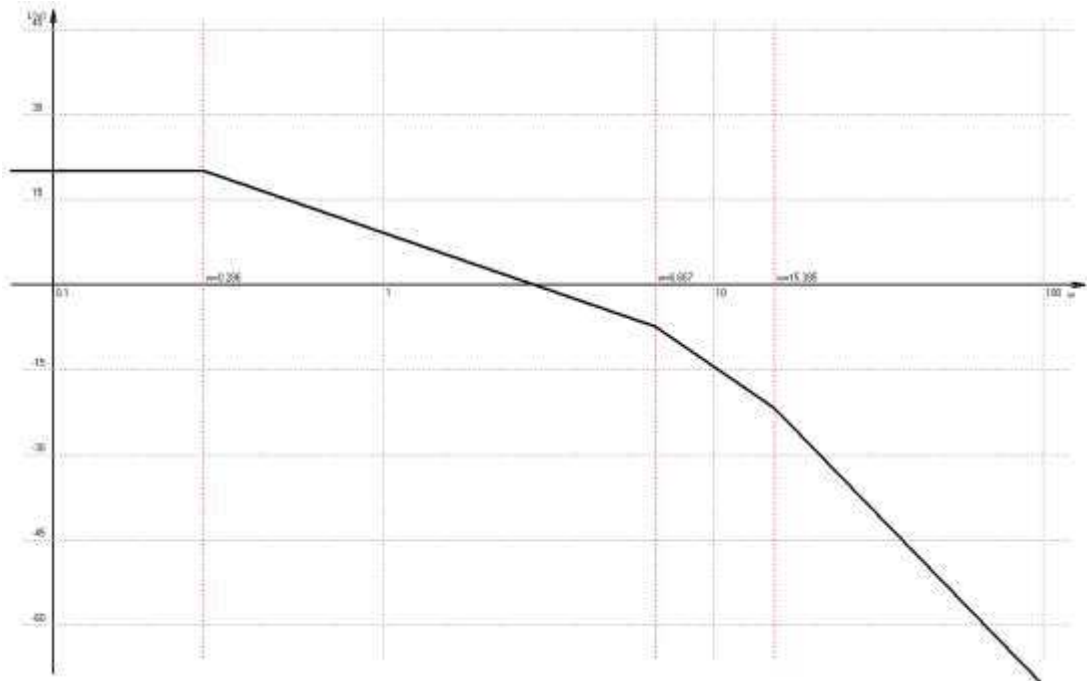


Рисунок 3.4 - Логарифмічна ампліудно-частотна характеристика

Після запису функції $W(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(j\omega)e^{j\varphi_i(\omega)}$ вираз ЛФХ стає:

$$\ln[e^{j\varphi(\omega)}] = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega).$$

Це вірно для передавальної характеристики розімкненої САР вигляду

$$W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega).$$

Логарифмічна фазо-частотна характеристика (ЛФЧХ) - це графічне представлення фазового зсуву вихідного сигналу системи відносно вхідного, в залежності від частоти, в логарифмічному масштабі. Вона показує, як змінюється фаза вихідного сигналу в залежності від частоти вхідного сигналу, і є важливою частиною аналізу частотних характеристик лінійних систем. Отже,

загальна ЛФЧХ є сумою окремих частин. Тобто, аби збудувати підсумкову ЛФХ, досить окремо збудувати ЛФЧХ окремих ланок і після цього їх потрібно просумувати.

Розділимо формулу (3.6) на окремі прості частини:

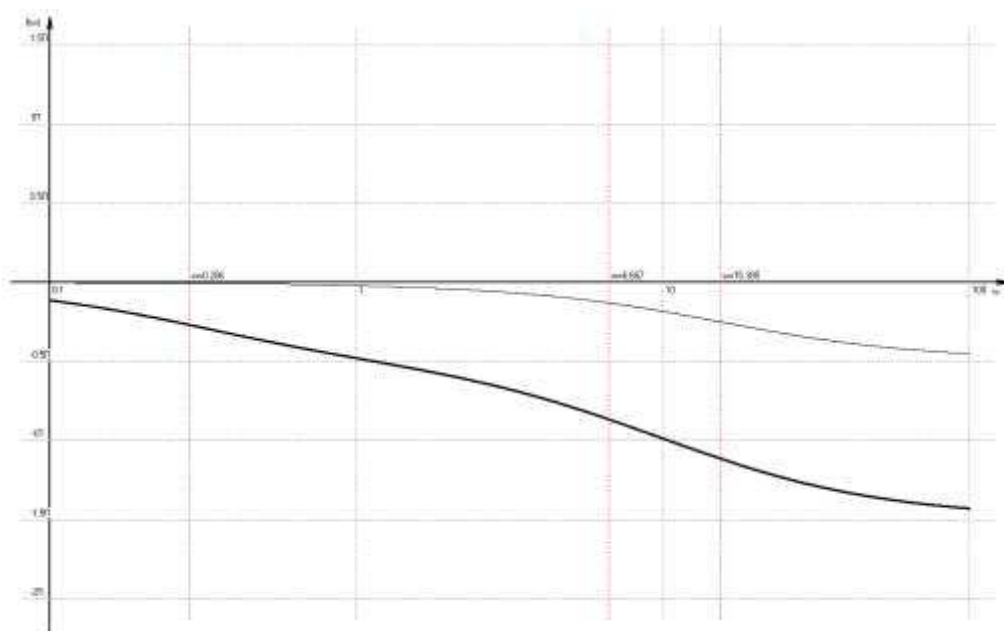
$$W(j\omega) = k_0 \cdot \frac{1}{T_1 \cdot j\omega + 1} \cdot \frac{1}{T_2 \cdot j\omega + 1} \cdot \frac{1}{T_3 \cdot j\omega + 1}.$$

Для визначення функції ЛФЧХ отримаємо:

$$\begin{cases} \varphi_0(\omega) = \arctg \frac{0}{k_0} = 0 \\ \varphi_1(\omega) = -\arctg T_1 \omega \\ \varphi_2(\omega) = -\arctg T_2 \omega \\ \varphi_3(\omega) = -\arctg T_3 \omega \end{cases}$$

При зміні ω від 0 до ∞ отримаємо часткові ЛФЧХ в логарифмічній системі координат.

При алгебраїчному підсумовуванні окремих ЛФЧХ, здобуваємо загальну ЛФЧХ розімкненої системи (див. рис. 3.5).).



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рисунок 3.5 - Логарифмічна фазо-частотна характеристика САР

Величина ω ($\omega \rightarrow \infty$) при якій ЛФХ набуває значення $-\pi$, показує, що ЛАЧХ має від'ємну величину, отже система є стабільною.

3.5 Побудова перехідного процесу САР

Реакцію на одиничну керуючу функцію $g(t) = p_{зад}(e) = I(e)$ формує перехідну характеристику замкненої САР, що показана на рис.3.1. Використаємо метод одиничних трапецій та трикутників і, відповідно до алгоритму вказаного методу, побудуємо залежність дійсної частини $U_3(\omega)$ АФЧХ від частот ω [20, 22].

Виконавши заміну $p \rightarrow j\omega$ отримаємо АФЧХ з формули (3.5) у такому вигляді

$$W_3(j\omega) = \frac{k_0}{-jT_{30}\omega^3 - T_{20}\omega^2 + jT_{10}\omega + 1 + k_0}.$$

Дійсні та уявні складові частини згрупуємо та отримаємо АФЧХ замкненої системи. Вона має вигляд [20, 22]:

$$W_3(j\omega) = \frac{k_0 + j0}{(-T_{20}\omega^2 + 1 + k_0) + j(-T_{30}\omega^3 + T_{10}\omega)}.$$

Якщо $W_3(j\omega) = \frac{C(\omega) + jD(\omega)}{E(\omega) + jF(\omega)}$, то дійсні і уявні частини функції $W_3(j\omega)$

будуть визначатися як [20, 22]:

$$U_3(\omega) = \frac{C(\omega) \cdot E(\omega) + D(\omega) \cdot F(\omega)}{E^2(\omega) + F^2(\omega)},$$

$$V_3(\omega) = \frac{D(\omega) \cdot E(\omega) - C(\omega) \cdot F(\omega)}{E^2(\omega) + F^2(\omega)}.$$

Тоді отримаємо значення [20, 22]:

$$\begin{aligned}C(\omega) &= k_0; \\D(\omega) &= 0; \\E(\omega) &= -T_{20}\omega^2 + 1 + k_0; \\F(\omega) &= -T_{30}\omega^3 + T_{10}\omega.\end{aligned}$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика матиме дійсну складову у вигляді [20, 22]:

$$U_3(\omega) = \frac{k_0 \cdot (-T_{20}\omega^2 + 1 + k_0)}{(-T_{20}\omega^2 + 1 + k_0)^2 + (-T_{30}\omega^3 + T_{10}\omega)^2}.$$

Змінюючи значення ω від 0 до ω_c , де ω_c сформуємо, згідно рекомендацій [20] границі області суттєвих частот. Отже, якщо в цьому діапазоні виконується умова $\left| \frac{U_3(0)}{U_3(\omega)} \right| \geq 10$, тоді отримуємо характеристику $U_3(\omega)$ (див. рис.3.6) [20], де границя області суттєвих частот рівною 36 с^{-1} .

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

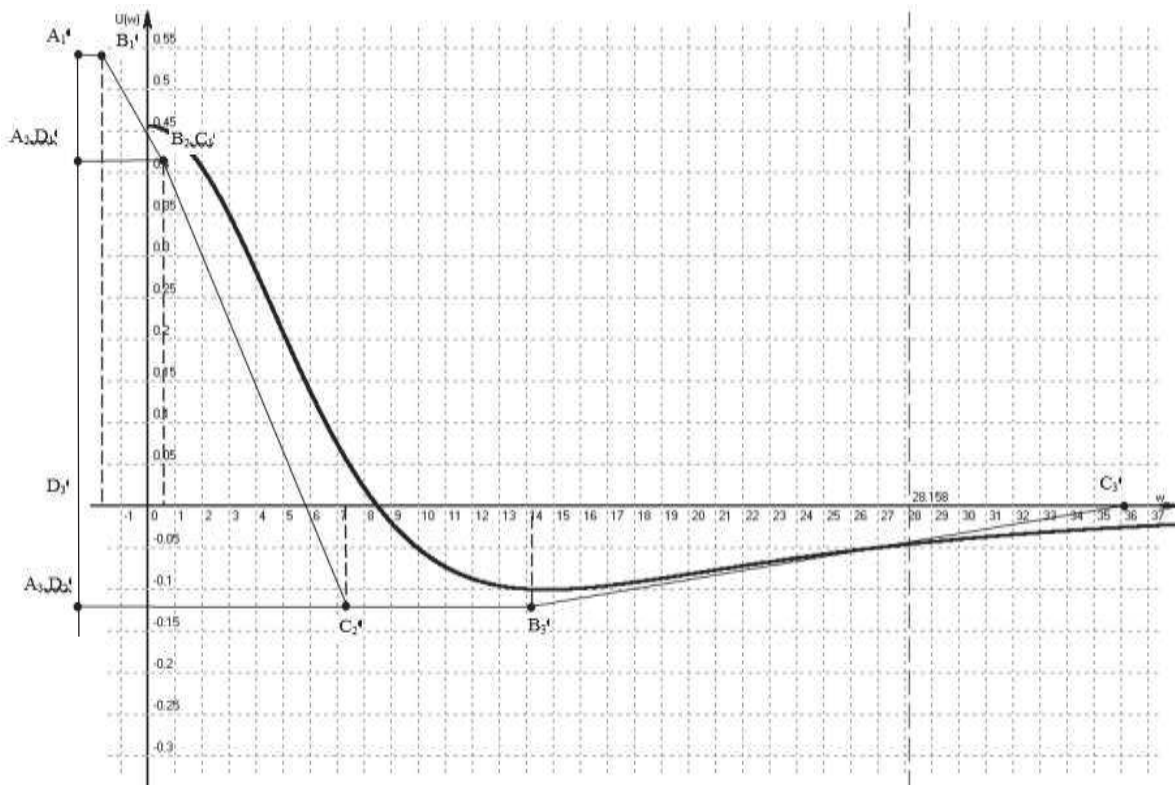


Рисунок 3.6 - Дійсна частина амплітудно-фазової частотної характеристики САК $U_3(\omega)$

Отриману характеристику наближаємо рівноцінними фігурами $H(\omega)$.
Сформуємо набір з відповідних трьох трапецій (див рис.3.7) [20]:

$$N1 - A_1 B_1 C_1 D_1;$$

$$N2 - A_2 B_2 C_2 D_2;$$

$$N3 - A_3 B_3 C_3 D_3.$$

Крім того з рисунку 3.7 визначаємо висоти H_i та нахили сторін трапецій v_i :
Отримали:

$$N1: H_1=0,13; \omega_{1p}=-1,25; \omega_{1o}=0,25; v_1=0,21;$$

$$N2: H_2=0,54; \omega_{2p}=7,0; \omega_{2o}=0,35; v_2=0,72;$$

$$N3: H_3=-0,13; \omega_{3p}=14; \omega_{3o}=36; v_3=0,24.$$

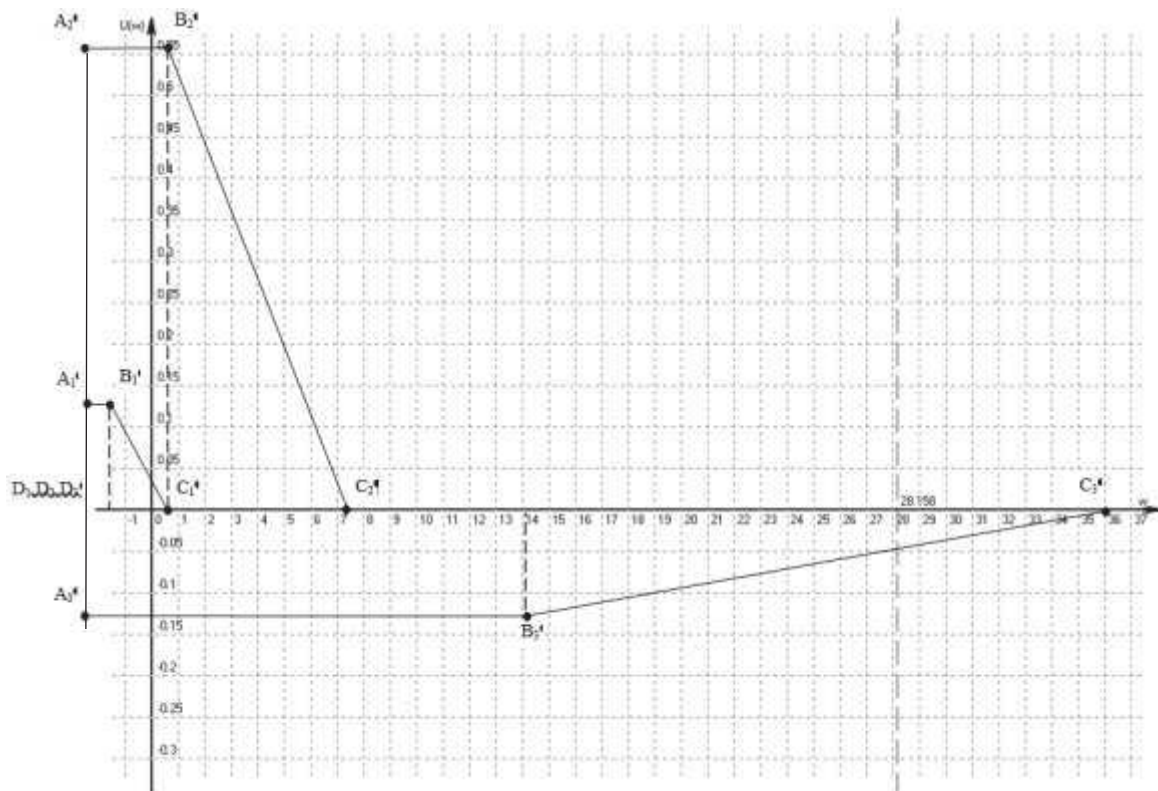


Рисунок 3.7 – Отримані еквівалентні трапеції, що апроксимуються

Змінюючи значення дійсного часу t від 0 до 1,5 с отримаємо відповідне значення табличного часу для кожної з трапецій $\tau_x = \omega_{ip} t_x$. Сумуючи обрані значення для кожного моменту часу по всіх апроксимуючих трапеціях отримуємо ординати функції перехідного процесу $h(t)$. З'єднавши знайдені точки на графіку між собою, дістаємо функцію графік перехідного процесу розгону електродвигуна як реакцію на одиничну керуючу дію показано на рис.3.8. з демпфуванням $\zeta=0.7$

Система розганяється до цільової швидкості 0.3 м/с.

Спостерігається перерегулювання — швидкість трохи перевищує цільову перед стабілізацією, Це характерно для приводів без жорсткого обмеження по прискоренню або без ідеальної компенсації інерції.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

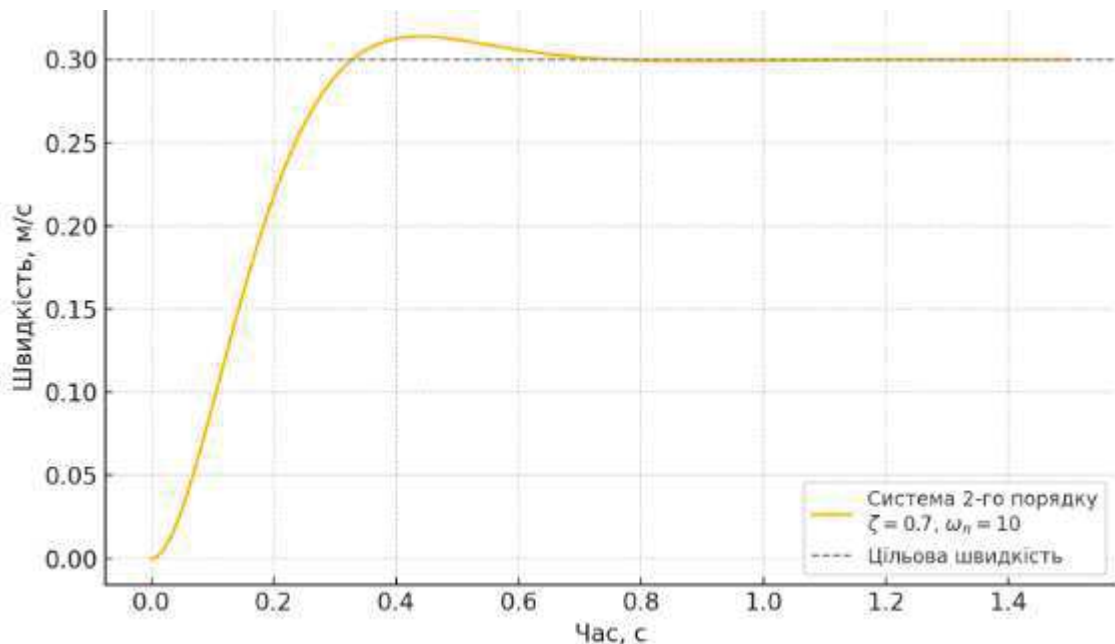


Рисунок 3.8 – Змодельований перехідний процес САК електродвигуна

Проведемо аналіз отриманої перехідної функції з рис. 3.8 та визначимо основні показники якості:

1) відсутнє перерегулювання системи $\sigma = \frac{h_{\max} - h_{cm}}{h_{cm}} \cdot 100\% = 0\%$. Немає

потреби застосовувати регулятори для зменшення перерегулювання;

2) час регулювання становить 0,66 с;

Висновки до третього розділу

Розроблено структурну схему розглядуваної САР керування електроприводом конвеєра. Було проведено її моделювання та розрахунки.

Отримано значення регулювальної функції.

Система виявилась стабільною.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз типів конвеєрів і вибрано відповідний об'єкт для автоматизації. Визначено, що для транспортування вантажів у заданих умовах доцільно використовувати тип конвеєра — стрічковий, що забезпечує потрібну продуктивність, надійність і адаптивність до виробничого середовища.

Обґрунтовано вибір типу електроприводу. На основі аналізу навантаження, режиму роботи та вимог до керування обґрунтовано застосування асинхронного короткозамкненого у складі електроприводної системи. Обрано електродвигун потужністю 1.5 кВт, з частотою обертання 3000 об/хв.

Рекомендовано використовувати комплект: двигун Ledermann IE3 1.5 кВт (або подібний), редуктор типу NMRV-110 (для підвищення моменту) та частотний перетворювач типу Danfoss/Siemens/Delta. Система забезпечує надійну та адаптивну роботу з можливістю інтеграції в автоматизовану лінію

Розроблено математичну модель роботи електроприводу. Побудовано спрощену модель системи конвеєра “електродвигун – редуктор – навантаження”, що враховує основні інерційні маси та опори.

Проведено вибір та моделювання системи керування приводом. Визначено доцільність застосування частотного перетворювача з векторним керуванням (FOC) для забезпечення плавного пуску. Змодельовано динаміку роботи системи.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Схеми автоматизації механізмів безперервного транспорту Школа для електрика: пристрій, проектування, монтаж, налагодження, експлуатація та ремонт електрообладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://bezremonta.net>

2. Маренич К.М. Автоматизований електропривод машин і установок шахт і рудників / Маренич К.М., Товстик Ю.В., Турупалов В.В., Василець С.В., Лізан І.Я. // Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – 2015. – 141-149 с.

3. Yusong Pang. Intelligent Belt Conveyor Monitoring and Control / Yusong Pang. – Technische Universiteit Delft, 2010. – 196 с.

4. Bart Zeeuw van der Laan. System reliability analysis of belt conveyor / Bart Zeeuw van der Laan. – Transportation Engineering, 2016. – 73 с.

5. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом стрічкового конвеєру. Курсове та дипломне проектування, навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабко В. В. – Вінниця : ВНТУ. – 2010. – 89 с.

6. Принципи побудови систем підпорядкованого регулювання в електроприводах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lektsii.com>

7. Печеник М.В. Особливості підвищення енергетичної ефективності електромеханічної систем конвеєра / М. В.Печеник, С. О. Бур'ян, А. О. Горбатовський // Вісник НТУУ“ХПІ”, Серія : Проблеми автоматизованого електропривода теорія і практика. – Харків : – 2013. – № 36. – с.65-72

8. Каталог продукції / Програмне забезпечення, пристрої зв'язку / Середовище програмування CODESYS. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://owen.ua>

9. Грідін С. В. Керування блоком ПІД регулятор в середовищі CoDeSyS. // Блог Грідіна Семена Робототехніка та автоматизація - це наука про майбутнє. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kip-world.ua>

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Методика розрахунку зубцюватих і черв'ячних передач у курсовому проектуванні: Методичні вказівки / Соств. В.Я, Баранцов, Т.Г. Зайцева. – Липецк, 1991. – 32 с.

11 . Колесніков, М. Ю. (2024). *Оптимальне керування електроприводом конвеєрної установки змінної довжини : магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка* [Kolesnikov, M. Y. Optimal control of conveyor drive with variable length: Master's thesis, specialty 141]. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 96 с. Отримано з <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71993> (ela.kpi.ua)

12. Мішакін, В. М. (2024). *Дослідження магістрального стрічкового конвеєра на основі математичної моделі із врахуванням його механічної частини : магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка* [Mishakin, V. M. Investigation of belt conveyor based on mathematical model with mechanical component: Master's thesis, specialty 141]. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 147 с. Отримано з <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71995> (ela.kpi.ua)

13. Руднєв, М. А. (2021). *Підвищення енергоефективності роботи стрічкового конвеєру гірничо-збагачувального виробництва : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»* [Rudniev, M. A. Improving energy efficiency of belt conveyor in mining & processing production]. Кропивницький: ЦНТУ, 102 с. Отримано з <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/11483> (dspace.kntu.kr.ua)

14. Пальчак, В.-Н. С. (2024). *Підвищення продуктивності конвеєрних ліній : магістерська дис. : 131 Прикладна механіка* [Palchak, V.-N. S. Increasing productivity of conveyor lines: Master's thesis, specialty 131 Applied Mechanics]. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 103 с. Отримано з <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71392> (ela.kpi.ua)

15. Зелінський, В. В. (2024). *Адаптивне керування електромеханічною системою транспортування сипких вантажів : магістерська дис. : 141*

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка [Zelinskyi, V. V. Adaptive control of electromechanical bulk material conveying system: Master's thesis, specialty 141]. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 97 с. Отримано з <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/64062> (ela.kpi.ua).

16. Кислиця, С. Г., & Ковган, Р. М. (2024). *Дослідження електроприводу багатомоторного взаємопов'язаного шарового конвеєру* [Kyslytsia, S. H., & Kovhan, R. M. Research on drive of multi-motor linked roller conveyor]. Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка». Тези. Отримано з <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/18141> (reposit.nupp.edu.ua)

17. Глушак, А. А. *Моделювання електроприводу конвеєра з урахуванням впливу навантаження : магістерська дисертація* / А. А. Глушак. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2018. – 88 с. – Режим доступу: <https://iq.vntu.edu.ua/repository/getfile.php/7841.pdf>

18. Elektrodvigun IE3 enerhoefektyvnyi Ledermann L3E-90SA2 (1,5 kW, 3000 ob/min, B3) [Електродвигун IE3 енергоефективний Ledermann L3E-90SA2]. – Режим доступу: <https://www.ekvives.com/ledermannmotor/elektrodvigun-ie3-energoefektivnij-ledermann-l3e-90sa2-15-kvt-3000-obhv-b3/>

19. Черв'ячний редуктор NMRV-110 (840 Н·м, 2 дюйми)] // Техно-Привід. – Режим доступу: <https://techno-privod.com.ua/production/cheriv-iachnyj-reduktor-nmrv-110-840-n-m-2/>

20. Рябич, Р.І. (2019). *Система управління виробництвом солоного крекери* (Бакалаврська дипломна робота, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»). E-learning Архів КПІ. <https://ela.kpi.ua/items/160332af-2540-4b33-8f18-419815d2f7b4>

21. Основи теорії авторегулювання: [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», освітньої програми «Електронні компоненти і системи» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Миколаєць Д.А.,

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Клен К.С., Ямненко Ю.С. – Електронні текстові данні (1 файл: 5918 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 216 с.

22. Сільвестров А.М. Островерхов М.Я., Шефер О.В., Ладік Н.А., Зіменков Д.К. Системи автоматичного керування технологічними комплексами: навчальний посібник. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 466 с.

23. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонтєв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонтєва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.

24. Критерій стійкості Михайлова – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Критерій_стійкості_Михайлова (дата звернення: 20.04.2025).

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		