

Заклад вищої освіти „Подільський державний університет”
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЄРА ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА»

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання
освітнього ступеня «Магістр», освітньо-професійної
програми «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

МАРУЩАК Ігор Олегович

Керівник канд. техн. наук, доцент

ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« ___ » _____ 2025 р.

Допускається

до захисту:

« ___ » _____ 2025 р.

Гарант освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
канд. техн. наук, доцент

Павло ПОТАПСЬКИЙ

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій
Освітній ступінь «Магістр»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри,

_____ Ігор ГАРАСИМЧУК

« ____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
здобувачу вищої освіти**

МАРУЩАКУ Ігорю Олеговичу

1. Тема роботи: «МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЄРА ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА»

2. Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Затверджено наказом ЗВО «ПДУ» від 24 березня 2025 року №162с.

Тема кваліфікаційної роботи уточнена згідно наказу ЗВО «ПДУ» від 19 листопада 2025 року №1331с «Про зміни до наказу №162с від 24 березня 2025 року».

Строк подання закінченої роботи 25 листопада 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Науково-технічна література, коливання напруги живлення в межах від +10 % до -15 % від номінального значення; зміна частоти живильної мережі на 2 % від стандартного значення; рівень захисту основних вузлів електроприводу IP54.

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

ВСТУП

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

3. ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО

ЕЛЕКТРОПРИВОДА

4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

7. Перелік графічного матеріалу

Презентаційні матеріали за розділами кваліфікаційної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
3	Доцент ПОТАПСЬКИЙ П.В.		

7. Дата видачі завдання 02 липня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Етапи кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів КР	Підпис керівника
	ВСТУП	10.07.25	
1	АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	29.07.25	
2	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	15.08.25	
3	ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	20.09.25	
4	ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	22.10.25	
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ	01.11.25	
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	18.11.25	
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	25.11.25	

Здобувач вищої освіти

Ігор МАРУЦАК

Керівник, к.т.н., доцент

Олександр ДУМАНСЬКИЙ

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	8
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1. Загальні відомості	10
1.2. Будова та принцип роботи норії типу НЗ-50	12
1.3 Електричне обладнання норії	17
Висновки до розділу 1	22
2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	23
2.1. Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження	23
2.2. Структурно-логічна схема дослідження	25
2.3. Вибір методу розрахунку поставленої задачі	27
Висновки до розділу 2	29
3. ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	30
3.1 Аналіз існуючих видів електродвигунів	30
3.2 Загальні вимоги до електроприводів та вибір типу електродвигуна	31
3.3 Аналіз існуючих систем керування двигунами змінного струму	33
3.4 Технічні дані комплектного електропривода OMRON Varispeed F7	38
Висновки до розділу 3	42
4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	43
4.1. Основи функціонування електричної машини з приводом	43
4.2. Математичний опис структурної схеми електропривода	50
4.3. Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода конвеєра завантажування зерна	65
Висновки до розділу 4	70

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ	71
5.1 Аналіз небезпек при роботі норії	71
5.2 Заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання норії	72
Висновки до розділу 5	73
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТКИ	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ТТМ - транспортно-технологічних механізмів;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ДПС – двигун постійного струму;

АД - асинхронний двигун;

ПЧ - частотний перетворювач;

ППЛ - плата програмованої логіки;

ЕРС - електрорушійна сила;

ПЧС - перетворювача частоти струму;

ІС - інвертор струму;

НПЧ - некерованого перетворювача частоти;

ГЧ - генератором частоти;

РШ - регулятора швидкості;

ТГ - тахогенератор.

РЕФЕРАТ

МАРУЩАК Ігор Олегович. Модернізація та дослідження системи керування електропривода конвеєра завантаження зерна. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Факультет енергетики та інформаційних технологій. Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025.

В кваліфікаційній роботі написано вступ, проведено аналіз сучасного стану перетворювальної приводної техніки, огляд літератури з методів регулювання швидкості електроприводів та обґрунтування необхідності оновлення системи керування норією, обрано систему управління електродвигуном стрічкового ківшового елеватора моделі НЗ-50, розроблена структурно-логічна схема магістерського дослідження та обрана методологія наукового пошуку, виконано математичне моделювання перехідних процесів у контурі керування електродвигуном норії, що дозволило більш точно вивчити поведінку системи, розглянуто типи транспортувального обладнання, сфери застосування елеваторів, а також їх будову та принцип дії, зокрема електричну складову ківшових норій. Порівняльний аналіз наявних типів електродвигунів показав, що для цього проекту найкраще підходить модель АИР132М6У3, яка була обрана для модернізації. Зроблений огляд існуючих систем керування електродвигунами змінного струму дозволив вибрати для електродвигуна норії перетворювач частоти типу OMRON Varispeed F7, що здійснює частотно-струмове регулювання. Дано опис технічних характеристик перетворювача та принципової схеми його підключення. Представлені заходи з охорони праці при експлуатації електропривода норії. Написані висновки до кваліфікаційної роботи і оформлено список використаних джерел і додатки.

Ключові слова: норія, транспортер, електропривод, електродвигун, моделювання, управління, струм, напруга, перетворювач частоти.

АНОТАЦІЇ

Дослідження присвячене вдосконаленню системи керування електропривода ківшевої норії, що використовується для транспортування зерна. Основна увага зосереджена на підвищенні ефективності та надійності роботи привода шляхом використання регульованих асинхронних двигунів.

У роботі проведено огляд сучасних рішень у галузі приводної техніки та систем автоматизованого регулювання швидкості, визначено доцільність модернізації електропривода норії НЗ-50. Обґрунтовано вибір асинхронного двигуна АИР132М6У3 та частотного перетворювача OMRON Varispeed F7 для реалізації керування.

Створено математичні моделі елементів системи, виконано розрахунок параметрів і проаналізовано динамічні характеристики за різних законів керування. Запропонована схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході забезпечила покращення швидкодії та стійкості системи.

Розглянуто питання охорони праці під час експлуатації електропривода.

ABSTRACTS

The study is devoted to the improvement of the control system of the electric drive of a bucket elevator used for grain transportation. The main attention is focused on increasing the efficiency and reliability of the drive by using adjustable asynchronous motors.

The paper reviews modern solutions in the field of drive technology and automated speed control systems, determines the feasibility of modernizing the electric drive of the NZ-50 elevator. The choice of the AIR132M6U3 asynchronous motor and the OMRON Varispeed F7 frequency converter for implementing control is justified.

Mathematical models of the system elements are created, parameters are calculated and dynamic characteristics are analyzed for different control laws. The proposed scheme with a PI regulator and a filter at the input has improved the speed and stability of the system.

In the final part, the issue of labor protection during the operation of the electric drive is considered.

ВСТУП

Актуальність обраної теми визначається важливістю дослідження системи управління електричним приводом конвеєра, призначеного для транспортування зерна, який є важливим елементом у процесах зберігання та обробки зернових культур. Норія, або ковшовий елеватор, є пристроєм, що забезпечує вертикальний підйом сипких матеріалів, таких як зерно, насіння соняшнику або соя, і має широку популярність в сільськогосподарських виробництвах. Її конструкція, в основному, являє собою вертикальний конвеєр з ковшами, що постійно обертаються, піднімаючи вантаж.

Технологічний процес транспортування зерна є важливим етапом у загальному циклі обробки сільськогосподарської продукції, оскільки він безпосередньо впливає на якість продукції та ефективність роботи всього підприємства. Висока ефективність норії залежить від стабільної роботи її електричного приводу. Особливу увагу необхідно приділяти електричним приводам, здатним адаптуватися до змінних навантажень, що часто трапляються під час роботи конвеєра.

Зважаючи на потребу в оптимізації роботи таких систем, сучасні технології, зокрема частотно-регульовані електричні приводи, дозволяють досягати значної економії енергоспоживання. Інтеграція частотно-регульованих приводів забезпечує плавне регулювання швидкості конвеєра, що є важливим аспектом при роботі з вантажами змінної маси та об'єму, дозволяючи підвищити загальну продуктивність і знизити енергетичні витрати.

Метою даного дослідження є вдосконалення системи управління електричним приводом вертикального конвеєра для завантаження зерна, зокрема, через інтеграцію асинхронного двигуна з частотним регулюванням. Основна увага зосереджена на розробці методів оптимізації роботи цієї системи, що дозволить покращити ефективність функціонування конвеєра, зменшити енергетичні втрати та забезпечити безпечну експлуатацію обладнання.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити кілька завдань: забезпечити точний контроль запуску і зупинки конвеєра, мінімізувати споживану енергію та

забезпечити стабільну роботу в різних режимах. Важливим етапом є створення математичних моделей, що дозволяють провести детальний аналіз і моделювання роботи системи управління електричним приводом з використанням сучасних програмних інструментів, таких як Simulink (MathLab).

Об'єктом дослідження є процеси, що відбуваються в електричному приводі ковшової норії, а предметом — динамічні характеристики системи управління та параметри, які впливають на точність і ефективність цієї системи.

Предметом же дослідження є динамічні характеристики системи управління, а також параметри, що сприяють підвищенню точності системи управління електроприводом ковшової норії.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Загальні відомості

Напрями розвитку стрічкових ковшових елеваторів та конвеєрного транспорту зосереджуються на підвищенні їх продуктивності, надійності, безпеки, зменшенні металомісткості, а також зростанні потужності приводів при збереженні принципів енергоощадження та високої якості продукції. Наприклад, сучасні стрічкові ковшові елеватори можуть досягати продуктивності до 1800 т/год, висоти транспортування до 180 м, а потужність приводів може сягати кількох сотень кіловат.

Три основні напрямки майбутнього розвитку цієї техніки включають:

1. Удосконалення конструкцій та компонентів стрічкових ковшових елеваторів.
2. Розробка та вдосконалення систем автоматичного моніторингу і сигналізації.
3. Створення та впровадження систем оптимального управління роботою ковшових елеваторів.

Сучасні автоматизовані системи моніторингу включають мікропроцесорні рішення, які збирають і обробляють дані з різноманітних сенсорів. Це дозволяє здійснювати контроль над швидкістю, вібрацією, температурою, зміщенням стрічки, а також рівнем вантажу на конвеєрі. Розробка програмного забезпечення для таких систем заснована на динамічному аналізі роботи ковшових елеваторів.

Математичне моделювання роботи конвеєрних установок застосовується для оптимізації роботи приводів ковшових елеваторів за визначеними критеріями, такими як обмеження на зусилля на приводі, мінімізація пошкоджень матеріалу та зниження експлуатаційних витрат.

Вивчення поточного стану транспортно-технологічних механізмів (ТТМ) висвітлюється у монографії [12], де наведено математичні та динамічні моделі процесів, що виконуються різними машинами на горизонтальних, похилих і

вертикальних шляхах. Пропонуються нові методи для практичного застосування, які сприяють підвищенню ефективності використання розроблених і модернізованих машин.

Світовий досвід в галузі створення та модернізації технологічних систем показує значний прогрес у розвитку регульованих електроприводів, комп'ютерних систем автоматизації та інформаційних технологій. Відомі електротехнічні корпорації у всьому світі виробляють регульовані електроприводи в комплекті з автоматизованими системами управління, що є гнучкими програмованими рішеннями, що застосовуються у різних галузях. Інвестиції в ці технології швидко окупаються завдяки значному підвищенню ефективності виробничих процесів. Крім того, такі системи активно використовуються для регулювання важливих технологічних параметрів, таких як рівень, тиск, температура, вологість, дозування та продуктивність.

Серед основних глобальних тенденцій у розвитку електроприводів виділяються такі:

1. Збільшення використання регульованих електроприводів у різних сферах, таких як промислове обладнання, транспорт, авіаційна та космічна техніка, медицина і побутова техніка. Це дозволяє досягати нових рівнів ефективності та якості технологічних процесів.

2. Перехід від нерегульованих до регульованих електроприводів у енергоємних установках (насоси, компресори, вентилятори тощо) для значного скорочення енергоспоживання та підвищення енергоефективності.

3. Впровадження блочно-модульних принципів проектування електроприводів та систем автоматизації, що дозволяє створювати більш гнучкі та масштабовані рішення для різних технологічних потреб.

4. Комп'ютеризація усіх елементів електроприводів, механізмів і агрегатів, що передбачає нові підходи до проектування та інтеграції складних автоматизованих систем управління.

5. Подальший розвиток методів каскадного (підлеглого) керування, які стали широко застосовуватись у регулюванні електроприводів і технологічних змінних для обробки і виробництва матеріалів.

Ці тенденції свідчать про постійне вдосконалення технологій, що веде до підвищення ефективності виробничих процесів, зниження витрат і економії енергії. Водночас інвестиції в сучасні регульовані електроприводи та автоматизовані системи забезпечують значний економічний ефект, знижуючи експлуатаційні витрати та підвищуючи надійність обладнання.

1.2. Будова та принцип роботи норії типу НЗ-50

Норія НЗ-50 є одним із найбільш популярних типів стрічкових ковшових елеваторів, що призначена для вертикального транспортування різноманітних сипучих матеріалів, таких як зерно, вугілля, кормові добавки, цемент, руда та інші промислові продукти. Основною її складовою є стрічка або ланцюг з закріпленими ковшами, які піднімають матеріал з нижнього рівня на висоту для подальшого переміщення або завантаження в інші технологічні лінії.

Норії НЗ-50 широко використовуються в агропромислових підприємствах, а також у гірничій, хімічній та харчовій промисловості, де необхідно транспортувати великі обсяги сипучих матеріалів за короткий проміжок часу. Ці елеватори мають продуктивність до 50 тонн на годину (т/год), але її значення може варіюватися в залежності від типу матеріалу, його властивостей і умов експлуатації, таких як висота підйому або швидкість руху стрічки.

Максимальна висота транспортування матеріалів для цієї моделі може коливатися від 20 до 50 м, що залежить від конструкційних параметрів і вимог щодо безперешкодного переміщення матеріалу на наступні етапи обробки.

Норія НЗ-50 оснащена електричним приводом, що дає можливість регулювати швидкість підйому і переміщення матеріалу, забезпечуючи таким чином оптимальну продуктивність та енергоефективність. Привід складається з асинхронного електродвигуна, який передає обертальний момент на барабани або шків, до яких прикріплена стрічка чи ланцюг.

Матеріали, з яких виготовлені основні частини норії, повинні мати високу зносостійкість, корозійну стійкість та механічну міцність. Для ковшів та стрічок часто використовують леговану сталь або спеціальні пластики, що мають

підвищену стійкість до механічних навантажень і стирання, оскільки саме ці елементи найбільше піддаються механічному впливу під час роботи.

Основні переваги норії НЗ-50:

Частотно-регульовані електроприводи дозволяють точніше налаштувати швидкість руху ковшів в залежності від потреби в конкретному виробничому процесі, що забезпечує значну економію електроенергії порівняно з традиційними механічними приводами.

Норія НЗ-50 може транспортувати різні види сипучих матеріалів, включаючи зерно, цемент, вугілля, руду та інші сільськогосподарські чи промислові продукти. Вона ефективно працює як з сухими матеріалами, так і з матеріалами, що містять вологу або мають різну зернистість.

Надійність та довговічність норії НЗ-50 забезпечується використанням високоякісних матеріалів для ковшів, стрічок та інших елементів конструкції. Вона має високу зносостійкість і може працювати тривалий час без значних поломок, а також потребує мінімального обслуговування.

Конструкція норії проста в обслуговуванні, що дозволяє знижувати витрати на технічне обслуговування та ремонти.

Норії НЗ-50 можуть бути оснащені додатковими модулями або компонентами, що дозволяє адаптувати обладнання до конкретних умов експлуатації, таких як підвищення висоти підйому або зміна продуктивності.

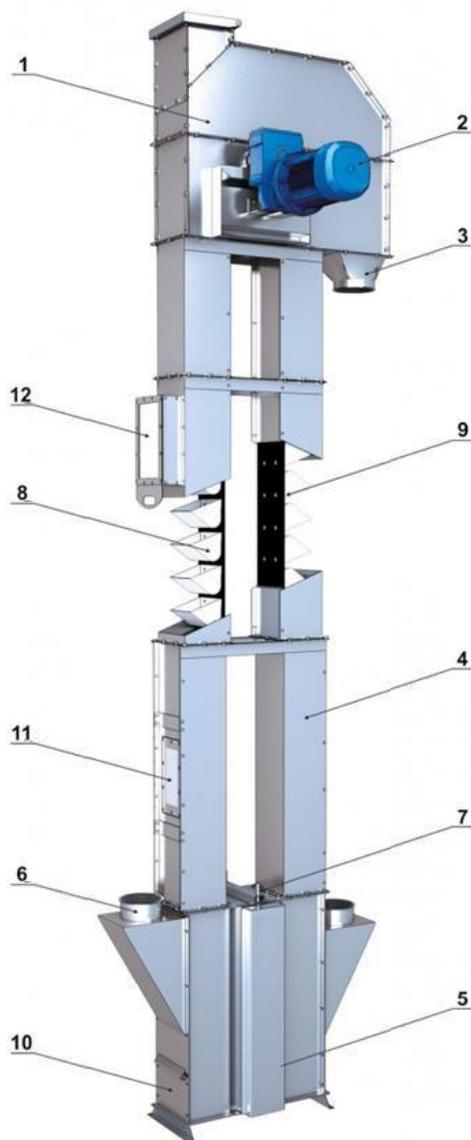
Норії НЗ-50 широко застосовуються на елеваторах для транспортування зерна, насіння, кормів, а також в агропромислових підприємствах для підйому зерна з низьких силосів до висоти, де воно може бути складоване або підготовлене для подальшої обробки.

Розвиток норій НЗ-50 включає удосконалення систем автоматизації, інтеграцію сучасних систем моніторингу стану обладнання в реальному часі, а також розробку нових матеріалів, що забезпечують підвищену зносостійкість і довговічність ковшів та стрічок. Впровадження таких норій в автоматизовані виробничі лінії дозволяє знижувати витрати на обслуговування та підвищувати загальну ефективність роботи підприємства.

Норія НЗ-50 — це високопродуктивне, надійне та енергоефективне

обладнання, яке може використовуватися в різних галузях промисловості для вертикального транспортування сипучих матеріалів. Вона здатна працювати з великими обсягами матеріалу на великих висотах, забезпечуючи стабільність і ефективність в технологічних процесах.

Конструктивно норія складається з кількох основних частин: головки норії (верхня частина), башмака норії (нижня частина), стрічки з ковшами, натяжної секції (рис. 1.1).



1 - верхня голівка ковшевого елеватора ; 2 - мотор-редуктор; 3 - патрубок вивантаження; 4 - шахта норії; 5 - нижній башмак ківшевого елеватора; 6 - патрубок завантаження; 7 - натяжна шпилька; 8 - ківші норії; 9 - стрічка норії; 10 - люк для очищення; 11 - люк обслуговування; 12 - вибухорозрядний пристрій

Рисунок 1.1 - Загальний вид і складові частини стрічкової ківшевої норії НЗ-50

Стрічка укладена в шахту і натягнута між верхнім і нижнім барабанами. Механізм протягання стрічки приводиться в рух мотор-редуктором, розташованим у головці норії. Завантаження матеріалу здійснюється через спеціальний патрубок, а вивантаження — через вивантажувальний патрубок.

Норія є безперервним механізмом для переміщення вантажів, де стрічка з прикріпленими до неї ковшами виступає як рухомий елемент, що транспортує матеріали.

Конструктивно вона базується на зварній рамі, на якій монтуються приводний барабан та сам механізм приводу. Рама обладнана фланцями для стикування з норійними трубами та отвором для вивантаження транспортованого матеріалу із ковшів. Для унеможливлення зворотного висипання зерна в нижній частині (башмаку) встановлено шибер із можливістю регулювання.

Усередині башмака, на вертикальних направляючих (штоках), розміщено барабан, відповідальний за забезпечення належного натягу стрічки.

Для з'єднання корпусу башмака з секціями труб у верхній частині кожуха передбачені відповідні отвори. Власне норійні труби (секції) слугують для формування огорожі (оболонки) стрічки з ковшами, з'єднуючи верхню частину (головку) та нижню частину (башмак) норії.

Стрічка норії огинає як приводний, так і натяжний барабани. Кінці стрічки з'єднуються між собою за допомогою спеціальних кутиків.

Натяг стрічки у башмаку реалізується через два натяжні гвинти, по одному для кожного кінця вала натяжного барабана. Така конструктивна особливість дозволяє точно відрегулювати положення натяжного барабана, усуваючи ризик сповзання стрічки під час роботи. Крім того, передбачено дві заслінки, які спрощують очищення механізму при зміні виду транспортованої культури або у випадку завалу.

Ковші фіксуються на стрічці через рівні проміжки. З'єднання ковшів зі стрічкою виконується спеціальними болтами, голівки яких розташовані з внутрішнього боку стрічки. Критично важливо при затягуванні болтів забезпечити, щоб їхня голівка повністю втопилася у спеціально передбачене заглиблення на ковші.

У секції, призначеній для обслуговування, розміщено кронштейн для кріплення пристрою автоматичного закривання заслінки, а також вікно зі знімною кришкою, що забезпечує доступ до ковшової стрічки.

Стандартна довжина норійних секцій становить 2 метри та 1 метр; секції підмоторної та оглядової мають довжину 1,25 метра. Фактична робоча висота норії визначається від рівня завантажувального вікна до рівня вивантажувального вікна, тобто це висота підйому вантажу. Габаритний розмір усієї установки перевищує цю висоту підйому на 1,5 метра.

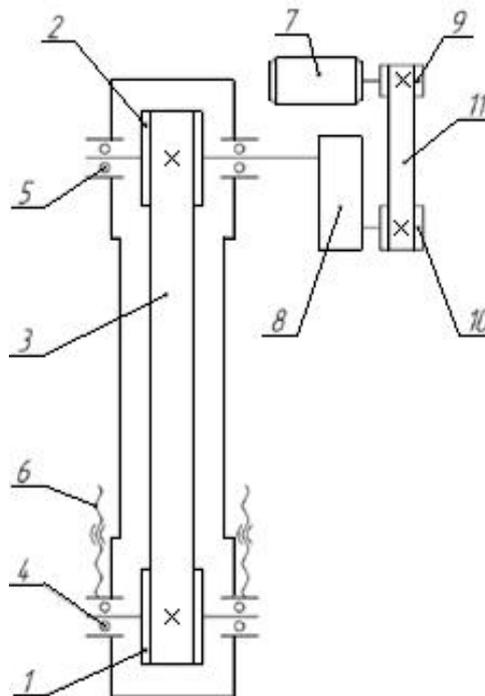
Стрічкові зернові норії можуть мати дуже різну робочу висоту, яка підбирається відповідно до специфічних потреб виробничого процесу. Зазвичай, висота більшості моделей коливається в діапазоні від 3 до 23 метрів.

При установці норії, у нижню її частину, в обов'язковому порядку, встановлюється датчик швидкості. У випадку забивання норії або влучення усередину норії сторонніх предметів, що заважають її правильній роботі, відбудеться призупинка норії, датчик дасть команду в електричний щит, який відразу відключить живлення від електродвигуна норії й сповістить про це на пульті керування загорянням червоної лампочки «Перешкода в норії».

Кінематична схема норії та схема розташування підшипникових вузлів показана на рисунку 1.2 [13].

Запуск норії для зерна розпочинається з активації приводу, що поступово набирає оберти до встановленої робочої швидкості. Як тільки система досягає необхідної швидкості, відкривається завантажувальний патрубок, що дає змогу зерну потрапити в ковші, розташовані в нижній частині конвеєра.

Привід обертає барабан, що передає обертальний момент на стрічку з ковшами. Стрічка починає рухатися, і ковші, що закріплені на ній, піднімають зерно вгору. Транспортування зерна відбувається до верхньої частини установки, де зерно вивантажується через патрубок.



1 – барабан натяжний; 2 – барабан приводний; 3 – стрічка; 4, 5 – підшипниковий вузол; 6 – механізм натягу стрічки; 7 – електродвигун; 8 – редуктор; 9, 10 – шків;
11 – ремінь клиновий

Рисунок 1.2 - Кінематична схема норії

Коли стрічка обертається навколо ведучого барабана, зерно, завдяки відцентровій силі, викидається з ковшів і через спеціальний розвантажувальний жолоб потрапляє з апарату. Використання відцентрової сили для розвантаження дозволяє знизити навантаження на привід, забезпечуючи стабільну роботу і збереження необхідної потужності.

Після розвантаження зерна ковші повертаються в нижню частину конвеєра, готові до наступного циклу підйому. Це дозволяє підтримувати безперервну і ефективну роботу норії, зменшуючи енергетичні витрати та підвищуючи продуктивність транспортування.

1.3 Електричне обладнання норії

Електричне обладнання норії включає в себе низку компонентів, таких як електродвигуни, пускорегульовальну та захисну апаратуру, кінцеві вимикачі,

сигнальні та освітлювальні пристрої, а також кабелі та проводи для забезпечення електроживлення всіх систем. Всі ці елементи живляться від трифазної мережі змінного струму з напругою 380 В.

Для управління роботою норії використовується пульт оператора, який забезпечує контроль над функціонуванням установки. Система автоматизованого управління електроприводом виконує низку важливих функцій, включаючи:

Індивідуальне включення приводних механізмів, які розташовані в різних частинах установки (верхній та нижній);

Автоматичне подання попереджувального сигналу, що сповіщає оператора про початок роботи;

Забезпечення підвищеного пускового моменту для початкового запуску приводу;

Обмеження часу утримання зусилля в разі невдалої спроби запуску (6-8 секунд), що допомагає уникнути перегріву електричних двигунів;

Автоматичне відключення установки у разі пошкодження тягового органу або будь-якого елемента, що транспортує матеріал;

Захист від надмірних динамічних навантажень, які можуть виникнути через заклинювання або інші механічні перешкоди в роботі конвеєра.

Для того, щоб забезпечити стабільний і безперебійний процес транспортування зерна, необхідно забезпечити збалансовану подачу матеріалу в норію. У цьому процесі важливу роль відіграє контролер, який отримує сигнали від сенсорів, встановлених на секції очищення. Ці сигнали прямо залежні від обсягу зерна, що обробляється в секції. Контролер аналізує отриману інформацію і відповідно коригує швидкість обертання мотор-редуктора для підтримки оптимальної роботи.

Для забезпечення безпеки експлуатації норії в її конструкції передбачені різні види захисних механізмів. Основні з них включають:

Контроль перевантаження ковшів: Використовуються датчики тиску (підпору) для виявлення перевантаження. Існують два основні типи таких датчиків: ємнісні та мембранні. Ємнісний датчик працює за принципом зміни

ємності конденсатора, коли зерно потрапляє в його зону. Мембранний датчик містить мембрану, яка деформується під впливом тиску зерна, рухаючи шток, що замикає електричний ланцюг через мікровимикач. Сигнал від будь-якого з цих датчиків надходить на контролер, який ініціює команду зупинки подачі зерна в норію через транспортер приймального бункера;

Виявлення провисання або розриву стрічки: Це завдання виконують індуктивні датчики швидкості. Вони здатні виявити будь-яке відхилення в русі стрічки або її пошкодження. Коли датчик фіксує проблему, сигнал передається на контролер, який відразу припиняє подачу живлення на мотор-редуктор конвеєра, щоб запобігти подальшому пошкодженню обладнання;

Аварійна зупинка: У разі серйозної аварійної ситуації або неполадки система автоматично активує комбінований пристрій, що поєднує сирену та світловий маячок. Це служить як звукове, так і візуальне попередження про неполадку, сигналізуючи оператору про необхідність термінового втручання.

Загалом, система управління та захисту норії забезпечує безпечну і ефективну роботу завдяки використанню різноманітних датчиків і пристроїв, які автоматично реагують на зміни в умовах експлуатації. Ці заходи сприяють не тільки підтриманню стабільної роботи обладнання, але й попереджають про можливі технічні проблеми, дозволяючи своєчасно реагувати на будь-які несправності.

На рис. 1.4 представлені основні елементи апаратури, що відповідають за запуск, регулювання і безпеку роботи норії.

У цій схемі використовується спільне живлення силових і керувальних кіл від одного джерела напруги, що дозволяє спростити конструкцію і знизити витрати на додаткові джерела енергії. Однак для підвищення надійності релейно-контакторних апаратів, які зазвичай спроектовані на меншу напругу, а також з метою покращення безпеки, схеми керування часто живляться від джерела з пониженою напругою.

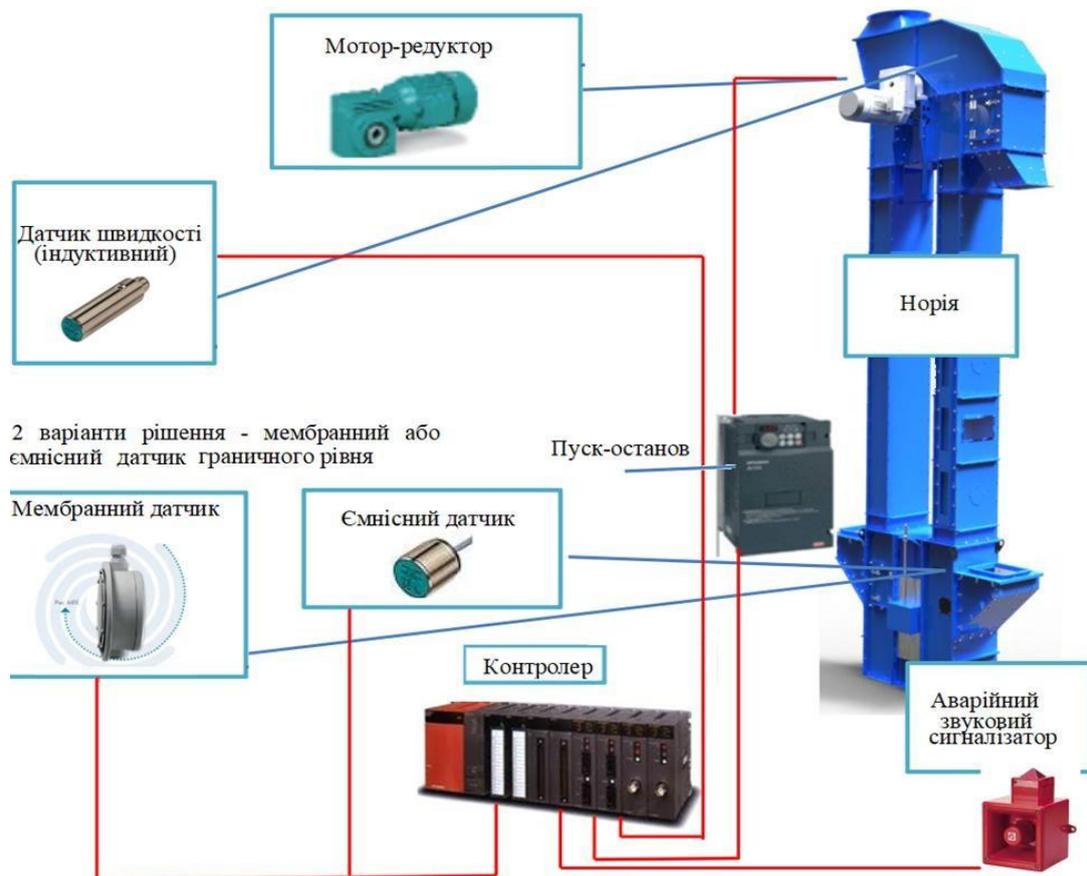


Рисунок 1.4 - Складові пуско-регулювальної апаратури

На рисунку 1.5 показана рекомендована схема електрична принципова керування норії.



Рисунок 1.5 - Рекомендована схема електрична принципова керування норії

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором керується через магнітний пускач. Під керуванням розуміються всі операції, що включають запуск і зупинку двигуна, а також відключення двигуна від мережі у разі порушення стандартного режиму роботи.

Запуск двигуна здійснюється за допомогою натискання кнопки SB1.2 ("пуск"), а зупинка — натисканням кнопки SB1.1 ("стоп").

Якщо рубильник QF увімкнений, для активації двигуна необхідно натиснути кнопку SB1.2. Це подає живлення на котушку контактора K1M. У результаті контакти KM в силовому колі замикаються, підключаючи статор двигуна до мережі. Двигун починає обертатися.

Одночасно в колі керування замикається допоміжний контакт КМА, що створює шунт для кнопки SB1.2 ("пуск"). Після цього немає потреби утримувати кнопку натиснутою, оскільки коло котушки контактора K1M залишатиметься замкненим. Кнопка S2, що має самоповернення, через дію пружини повертається у своє початкове, розімкнуте положення.

Для відключення електродвигуна від мережі натискається кнопка SB1.1 ("стоп"). Котушка контактора K1M виводиться з живлення, і контакти KM розмикаються, відключаючи обмотки статора від мережі. Допоміжний контакт КМА розмикається, і схема повертається у початковий стан. Це припиняє обертання двигуна.

Захист двигуна та кола керування від коротких замикань і перевантажень забезпечується плавкими запобіжниками Пр та двома електротепловими реле КК. Ці реле реагують на підвищення температури через перевантаження і автоматично відключають двигун для запобігання його пошкодженню.

Крім того, схема передбачає "нульовий захист". Якщо напруга зникає або суттєво падає, механізм розмикання контактів магнітного пускача K1M відключає двигун від мережі. Після нормалізації напруги мимовільного повторного запуску не відбудеться, що дозволяє уникнути непередбачених ситуацій і забезпечує додаткову безпеку для електричної установки.

Ці елементи працюють разом, щоб забезпечити стабільну та безпечну роботу електродвигуна, при цьому мінімізуючи ризики пошкодження обладнання через

перевантаження або короткі замикання.

Висновки до розділу 1:

Норія НЗ-50 є одним з найбільш поширених і високопродуктивних типів стрічкових ковшових елеваторів, що активно застосовуються в різних галузях промисловості для вертикального транспортування сипучих матеріалів. Це надійне і енергоефективне обладнання здатне працювати при високих навантаженнях та великих висотах транспортування, забезпечуючи стабільну роботу на великих обсягах матеріалу. Завдяки своїм високим технічним характеристикам, НЗ-50 займає важливе місце у багатьох технологічних процесах, де необхідно піднімати великі обсяги сипучих матеріалів, таких як зерно, вугілля, руда та інші.

Електрична принципова схема норії побудована таким чином, що живлення як силових, так і керувальних кіл здійснюється від одного джерела напруги. Це дозволяє спростити конструкцію та знизити витрати на додаткове обладнання. Водночас, для підвищення надійності роботи релейно-контакторних апаратів, які часто проєктуються для роботи на зниженій напрузі, в схему інтегровано додаткові заходи безпеки. У більшості випадків кола керування живляться від окремого джерела зниженої напруги, що дозволяє значно зменшити ризики, пов'язані з перевантаженням чи короткими замиканнями в керувальних ланцюгах.

Це рішення забезпечує не лише підвищену безпеку експлуатації, але й знижує ймовірність відмови в системі керування, що є критичним для безперервної роботи такого складного та енергоємного обладнання, як стрічкові ковшові елеватори. Крім того, застосування таких схем дозволяє значно знизити витрати на обслуговування та ремонт обладнання, оскільки знижена напруга у колах керування зменшує знос елементів і запобігає їх перегріву.

Таким чином, розвиток конструкцій і схем управління стрічкових ковшових елеваторів, таких як НЗ-50, має на меті не лише підвищення ефективності та надійності їх роботи, але й забезпечення безпеки, економічності та довговічності цього важливого виду транспорту в промислових умовах.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження

Процес формування наукового знання починається зі збору та аналізу емпіричних даних, їх інтеграції і виявлення закономірностей, що призводить до створення системи, здатної пояснювати факти та прогнозувати нові явища.

Основною функцією науки є здобуття об'єктивних знань про матеріальний і нематеріальний світи, прагнення до досягнення істини та розуміння законів розвитку природи та суспільства. Наука включає теорію, методи дослідження, технічні засоби і етапи впровадження результатів у практику.

Наука реалізується через наукове дослідження, яке є процесом вивчення об'єкта з метою розкриття його природи та розвитку, що приносить користь суспільству. Завдання наукового пошуку — це визначення об'єкта, глибоке вивчення його властивостей та досягнення результатів, корисних для практики.

Метод (від грецького "methodos" — шлях до чогось) — це спосіб досягнення мети, планомірний підхід до дослідження для встановлення істини. Науковий метод — це система способів пізнання подій, їх взаємозалежностей і динаміки. Методика дослідження визначає правила застосування методів для наукового пошуку.

Дослідження можна класифікувати на теоретичні та емпіричні. Теоретичні дослідження охоплюють розробку гіпотез, створення теорій, виведення закономірностей і порівняння різних теоретичних моделей, що дає змогу сформулювати наукові принципи, які пояснюють явища і процеси. Емпіричні дослідження базуються на зборі фактичних даних через спостереження і експериментування, що дозволяє перевіряти теоретичні припущення в умовах реального світу або в контрольованих лабораторних обставинах.

Експеримент, як один із основних методів у емпіричних дослідженнях, дозволяє перевіряти й уточнювати теоретичні припущення, моделюючи реальні

умови і вивчаючи реакцію системи на змінні фактори. Завдяки експериментам стає можливим виявлення нових закономірностей, перевірка теоретичних моделей та отримання практичних результатів для подальшого вдосконалення існуючих теорій.

При дослідженні складних технічних та інженерних систем застосовуються різноманітні методи моделювання. Серед основних методів виділяються фізичне, імітаційне, аналогове та математичне моделювання.

Фізичне моделювання полягає у створенні зменшеної копії досліджуваної системи, яка відтворює ключові характеристики і властивості оригіналу. Це дозволяє на практиці вивчати поведінку системи в реальних умовах або в умовах, наближених до реальних. Однак цей метод часто має свої обмеження, особливо у разі складних чи великих систем.

Аналогове моделювання використовує електричні або механічні аналоги для відтворення процесів, що відбуваються в досліджуваній системі. Тут кожен елемент моделі відповідає певному фізичному параметру оригінальної системи. Аналогові моделі дозволяють досліджувати взаємодію компонентів системи та її динаміку, але також мають обмеження у точності та масштабованості.

Імітаційне моделювання є методом, який створює комп'ютерну модель реальної системи для проведення численних експериментів, що дозволяє отримати більше даних без необхідності проводити реальні дослідження, які можуть бути занадто дорогими або фізично неможливими. Імітаційні моделі часто використовуються для оптимізації систем та прогнозування їх поведінки в різних умовах.

Математичне моделювання — це використання математичних рівнянь для точного опису фізичних процесів і взаємодій у системі. Цей метод дозволяє детально аналізувати складні процеси, виводити їх закони та робити прогнози на основі математичних обчислень. Математичне моделювання є одним з найбільш потужних інструментів для дослідження складних систем, адже воно дозволяє врахувати різноманітні змінні та фактори, що впливають на функціонування системи.

У нашому дослідженні для моделювання динамічних характеристик вертикального конвеєра (норії) використовується комп'ютерне моделювання за допомогою Simulink — програми, що входить до складу пакету MATLAB. Використання комп'ютерних моделей дозволяє проводити числові експерименти, вивчаючи поведінку системи в різних умовах без необхідності створення фізичних прототипів, що може бути дорогим і фізично неможливим через обмеження ресурсів.

Комп'ютерне моделювання є ефективним інструментом для дослідження складних і багатоелементних систем, оскільки воно дає змогу моделювати різні процеси, швидко отримувати результати та коригувати параметри системи на основі отриманих даних. Особливо важливе це в тих випадках, коли реальні експерименти неможливі через обмеженість фінансування або технічні труднощі. Таким чином, комп'ютерні моделі є незамінними при проектуванні та оптимізації технічних систем, а також для дослідження їх ефективності і надійності в умовах, які важко змоделювати в реальному світі.

2.2 Структурно-логічна схема дослідження

Методика — це система основних принципів, методів, прийомів і інструментів, які застосовуються в процесі організації та реалізації науково-практичної діяльності. Вона поєднує теоретичні та емпіричні підходи до пізнання дійсності і являє собою чітку інструкцію для досягнення поставленої мети.

Головне завдання методу дослідження полягає в тому, щоб забезпечити ефективне виконання наукових цілей і завдань, спираючись на визначені принципи, вимоги, умови та обмеження.

Цей підхід був розроблений з огляду на основні цілі магістерської роботи і демонструє її логічну послідовність: виявлення актуальності теми, чітке формулювання проблеми, пошук теоретичних основ для її вирішення та безпосереднє розв'язання. Він визначає дослідницьку послідовність, або алгоритм, і встановлює правильний порядок розкриття структурних частин та підрозділів

магістерської роботи.

Структурно-логічна схема є важливим інструментом для планування роботи та уявлення дослідницького процесу. Вона дозволяє не лише детально описати етапи досягнення мети (формулювання гіпотези), але й визначити правильну послідовність розкриття розділів магістерської роботи.

У процесі підготовки магістерської роботи можна виділити кілька етапів. На першому етапі обирається тема дослідження, доводиться її значущість і складається індивідуальний план роботи. Наступним кроком є пошук та аналіз релевантної літератури з обраної теми, а також формування списку використаних джерел.

На основі цього створюється перша версія теоретичного розділу, який включає:

формулювання кінцевої мети дослідження та деталізацію завдань;

визначення об'єкта і предмета дослідження;

вибір методів і методик для проведення дослідження.

Після цього описується сам процес дослідження, що проводиться за обраною методологією. У нашому випадку, для моделювання процесів електричного приводу стрічкового конвеєра використовується математичне моделювання в середовищі Simulink програми MATLAB.

Далі інтерпретуються отримані результати дослідження. На основі отриманих результатів проводиться узагальнення теоретичних знань та даних.

Останнім етапом є розробка заходів для забезпечення безпеки праці та охорони довкілля, а також план реалізації результатів дослідження в навчальному процесі.

Попередній план дослідження надає загальну характеристику об'єкта і предмета роботи, але з часом цей план буде уточнюватися в міру прогресу дослідження. Зазвичай це план-рубрикатор, який містить перелік розділів і підрозділів, впорядкованих логічно.

Алгоритм виконання магістерського дослідження зображений у структурно-логічній схемі у вигляді таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Структурно-логічна схема дослідження

Дослідження системи керування електропривода конвеєра завантаження зерна (норії)	
Складання індивідуального календарного плану роботи	
Пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії	
Підготовка теоретичної частини	Сучасний стан досліджень транспортно-технологічних механізмів, аналіз систем керування приводами конвеєрів
	Класифікація транспортуючих машин
Опис об'єкту дослідження	Розгляд будови, конструкції і основні вузли ківшевої норії
	Аналіз існуючих типів електродвигунів, обґрунтований вибір двигуна
	Аналіз та вибір системи керування обраним двигуном
Опис процесу дослідження	Розгляд способів регулювання кутової швидкості електродвигуна, вибір електропривода
	Моделювання перехідних процесів та аналіз результатів
Узагальнення результатів моделювання	Інтерпретація отриманих результатів дослідження
	Формулювання висновків
Узагальнення науково-теоретичних результатів	
Розробка заходів з охорони праці	
Реалізація отриманих результатів у навчальний процес	

2.3 Вибір методу розрахунку поставленої задачі

У даній кваліфікаційній роботі не передбачено проведення експериментальних досліджень, оскільки вона має виключно теоретичний характер. Тому основним інструментом для отримання та представлення результатів є моделювання.

Моделювання як метод наукового пошуку виникло внаслідок потреби розв'язувати завдання, які неможливо вирішити безпосередньо. Це стосується випадків, коли об'єкт недоступний для безпосереднього вивчення, ще не існує або ж його дослідження займає надто багато часу та є економічно невиправданим. Модель стає своєрідним посередником між науковцем і об'єктом дослідження, дозволяючи вивчати його через аналіз аналогічної системи.

У науковому контексті, моделювання є опосередкованим шляхом пізнання, де створена модель заміщає реальний об'єкт або процес, зберігаючи певні його риси, що дозволяють отримати нові знання. У системному аналізі моделі є важливим інструментом для дослідження та проектування складних систем. Вони також виконують практичну функцію, коли модель використовується як інструмент управління, оптимізації або прогнозування.

Моделювання завжди зумовлене метою дослідження, і, залежно від поставлених завдань, для одного й того ж об'єкта можуть бути створені різні моделі. Тому вибір параметрів і ознак для моделювання залежить від конкретної мети. Процес дослідження включає створення моделі, вивчення її властивостей і перенесення результатів на реальний об'єкт або систему. Моделювання виконує функцію пізнання, а також може бути використане як інструмент для експериментування, навчання, прогнозування та комунікації.

Математичне моделювання використовує рівняння для опису різних процесів і явищ і дозволяє виявити функціональні залежності між компонентами системи. Математичні моделі можуть бути представлені у вигляді аналітичних або статистичних моделей. Аналітичні моделі є спрощеними, з обмеженою кількістю змінних, що дозволяє швидше знаходити оптимальні рішення. Статистичні моделі, хоч і є більш точними, потребують більше обчислень і складніші у використанні.

Математичне моделювання дозволяє детально аналізувати поведінку складних систем, враховуючи різноманітні фактори, що впливають на їх функціонування. Вибір математичної моделі залежить від властивостей об'єкта дослідження, таких як лінійність чи нелінійність, динамічність чи статичність, а також ступінь детермінованості процесів.

У цьому дослідженні для моделювання динамічних характеристик електроприводу вертикального конвеєра використовуються математичні моделі, розроблені за допомогою програмного забезпечення Mathcad та Simulink (в складі MATLAB). Ці програми дозволяють виконувати розрахунки і симуляції, що дають змогу досліджувати перехідні процеси в системі за зміни вхідних

параметрів.

Метод моделювання набуває особливої важливості при розв'язанні складних інженерних задач, особливо в умовах, коли реальні експерименти неможливі через фінансові або фізичні обмеження. Зважаючи на розвиток комп'ютерних технологій, математичне моделювання стало основним методом у дослідженні таких складних систем, як електричні приводи і системи автоматизації, що дозволяє ефективно аналізувати і оптимізувати їх роботу. Тому в цій кваліфікаційній роботі як основний метод наукового пошуку було вибрано саме метод математичного моделювання.

Висновки до розділу 2:

У розділі 2 кваліфікаційної роботи вибраний та обґрунтований метод наукового дослідження, а також побудована структурно-логічна схема дослідження. Зокрема, детально розглянуто вибір методу розрахунку задачі, де акцент зроблено на використанні методу математичного моделювання. Це дозволяє ефективно аналізувати перехідні режими в електроприводі ковшевої норії, що є основним об'єктом дослідження.

Завдяки використанню математичного моделювання можна не лише дослідити режим роботи системи в різних умовах, але й оцінити ефективність її роботи, передбачити поведінку при зміні параметрів, а також оптимізувати налаштування та процеси управління. Це дозволяє зробити висновки щодо найбільш ефективних способів налаштування електроприводу ковшевої норії для досягнення стабільної та надійної роботи в різних експлуатаційних умовах.

Таким чином, метод математичного моделювання є ключовим інструментом для дослідження перехідних режимів та аналізу функціонування електричного приводу норії, що підтверджує обґрунтованість його вибору для вирішення поставленої задачі.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Аналіз існуючих видів електродвигунів

Високомоментні двигуни постійного струму з постійномагнітним збудженням здобули популярність завдяки гарним регульовальним характеристикам, компактним розмірам, швидкості реакції та простоті живильного перетворювача. Однак їхнім недоліком є щітково-колекторний вузол, який знижує надійність через тертя та зміни електричних властивостей під час експлуатації.

Безколекторні двигуни, навпаки, мають мінімальне обслуговування та можливість інтеграції в гнучкі виробничі лінії. Вони компактніші та мають менше тепловиділення, що робить їх більш ефективними. Електродвигуни змінного струму простіші у виробництві та експлуатації порівняно з двигунами постійного струму, до того ж, їхній ККД можна підвищити за рахунок оптимізації конструкції ротора.

Енергозбереження є важливим завданням, особливо для асинхронних двигунів, які споживають до 70% електроенергії в автоматизованих системах. Хоча при збільшенні частоти мережевої напруги знижуються електричні характеристики і ККД, зменшуються масогабаритні показники. Асинхронні двигуни, особливо з короткозамкненим ротором, популярні завдяки надійності, довговічності та простоті обслуговування. Однак у регульованих електроприводах вони поступалися двигунам постійного струму. Завдяки новим схемам і імпульсним силовим компонентам, асинхронні машини все частіше замінюють ДПС у цих системах.

3.2 Загальні вимоги до електроприводів та вибір типу електродвигуна

До промислових електроприводів висуваються такі основні вимоги [4]:

Забезпечення стабільної високої надійності роботи, мінімальна потреба в технічному обслуговуванні за умови залучення обмеженої кількості фахівців для ремонту та пусконаладжувальних робіт;

Можливість швидкого переналаштування електротехнічних елементів, включаючи автоматичне налаштування;

Наявність автоматизованого моніторингу стану обладнання через діагностичні, індикаційні та захисні системи.

При проектуванні та розробці електроприводу необхідно детально опрацьовувати питання уніфікації та стандартизації конструктивних компонентів, параметрів на вході та виході електроавтоматики, а також вимірювальних приладів.

Електропривід має працювати від трифазної промислової мережі змінного струму з лінійною напругою 380 В та частотою 50 Гц.

Електропривід повинен забезпечувати роботу в умовах:

Коливання напруги живлення в межах від +10 % до -15 % від номінального значення;

Зміна частоти живильної мережі на 2 % від стандартного значення;

Короткочасні падіння миттєвих значень напруги;

Температури навколишнього середовища від -40°C до +40°C;

Вологість повітря до 80 % при температурі 30°C;

Наявність вибухонебезпечних середовищ, вільних від парів і газів, що можуть пошкоджувати металеві деталі та ізоляційні матеріали.

Елементи електроприводу, що знаходяться в окремих корпусах (шафах), повинні витримувати вібрації в діапазоні частот від 1 до 30 Гц, а ті, що монтуються безпосередньо на агрегатах – до 60 Гц. Рівень захисту основних вузлів електроприводу та шаф має бути не нижчим за IP54, а для пультів керування та електродвигунів – не нижчим за IP44.

Основні критерії вибору типу приводу для зазначеної установки:

Широкий діапазон регулювання кутової швидкості двигуна;

Високі динамічні характеристики;

Відмінні показники надійності, тривалий термін служби, безвідмовність, зручність у ремонті;

Ступінь захисту двигуна не менше IP44.

При виборі приводу також слід враховувати його здатність до безперебійної роботи, а також ефективність при тривалій роботі на низьких обертах.

Для регульованих електроприводів використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим або фазним ротором, синхронні та вентильні електродвигуни.

У даній роботі розглядається ковшовий елеватор (норія), що використовує асинхронний електродвигун серії 4А з короткозамкненим ротором потужністю 7,5 кВт.

Зважаючи на умови пожежної та вибухонебезпечності цього транспортного засобу, для подальшого аналізу системи управління електроприводом норії, ми обираємо більш сучасний електродвигун типу АИР132М6У3 зі ступенем захисту IP44, основні технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.1 [2].

Таблиця 3.1 -Технічні характеристики електродвигуна АИР132М6У3

Параметр	Значення
Типорозмір	АИР132М6У3
Потужність, кВт	7,5
Частота обертання, об/хв	1000
Номінальний струм, А	17,2
КПД, %	87
Сos φ	0,77
Мпуск/Мном	2,0
Ммакс/Мном	2,1
Іпуск/Іном	6,5
Маса, кг	91

Електродвигун захищений від влучення пилу та водяних бризів на внутрішні робочі елементи. Однак умови його експлуатації вимагають відсутності в повітрі струмопровідних або агресивних елементів – це негативно позначається на довговічності виробу.

3.3 Аналіз існуючих систем керування двигунами змінного струму

Для забезпечення безперебійного та якісного технологічного процесу необхідно постійно здійснювати моніторинг ключових параметрів електроприводу, таких як крутний момент M , потужність P , точність переміщення та інші величини, які визначають координати електроприводу.

Для належної оцінки вимог до електроприводу (ЕП) застосовуються загальноприйняті показники якості регулювання процесу [15].

Основні показники якості регулювання швидкості:

Діапазон регулювання – визначається як відношення максимальної та мінімальної швидкості, яку можна досягти за допомогою обраного методу регулювання.

Статична похибка регулювання швидкості – відображає помилку у значенні швидкості при коливаннях моменту.

Плавність регулювання – характеризує кількість дискретних механічних характеристик, які можна отримати в межах заданого діапазону регулювання. Чим менший коефіцієнт плавності, тим кращою є плавність регулювання.

Стійкість роботи на встановленій швидкості – стійкість роботи зростає зі збільшенням жорсткості механічної характеристики. Це означає, що стабільність регулювання покращується, коли система здатна тримати швидкість на постійному рівні.

Характер регулювання – може бути однозонним або двозонним.

Однозонне регулювання дозволяє змінювати швидкість тільки в одному напрямку відносно природної механічної характеристики при заданому моменті. Наприклад, реостатне регулювання двигуна постійного струму з послідовним збудженням (ДПС) є однозонним регулюванням.

Двизонне регулювання дозволяє змінювати швидкість як у напрямку збільшення, так і в напрямку зменшення, при цьому швидкість обертання двигуна змінюється відносно його природної механічної характеристики при сталому моменті. Прикладом є частотне керування асинхронними двигунами.

Економічна ефективність регулювання – оцінюється через коефіцієнт

корисної дії (ККД) двигуна, а також враховуються втрати, пов'язані з експлуатацією та обслуговуванням обладнання.

Основні режими регулювання включають: підтримання сталого кутового швидкості, сталого моменту та сталого рівня потужності.

На практиці для керування швидкістю асинхронних двигунів використовуються різноманітні методики, які зведені в таблиці 3.2 [3,7].

Таблиця 3.2 -Способи керування швидкістю асинхронного двигуна

Спосіб керування швидкістю АД	Характеристика методу
Вмикання додаткового опору в ланцюг ротора (реостатне регулювання)	Переваги: просте і надійне обладнання; висока надійність керування. Недоліки: невисокий діапазон керування; низька економічність регулювання (через витрати енергії на опорах ротора)
Зміною напруги живлення за рахунок додаткових опорів статора, імпульсного регулювання і т.п.	Переваги: висока плавність регулювання; простота методу. Недоліки: зменшена напруга живлення; зменшений максимальний момент; невисока економічність регулювання.
Зміною кількості пар полюсів	Переваги: простота і надійність методу, високий ККД. Недоліки: низька плавність регулювання; погіршенні малогабаритні показники; підвищені витрати на матеріал
Ввід додаткової ЕРС у коло ротора (каскадні схеми вмикання АД з інерційними моментами та перетворювачами)	Переваги: простота в синхронізації швидкостей АД; висока економічність регулювання. Недоліки: необхідність застосування АД з фазним ротором; низька універсальність методів
Регулювання зміною величини і частоти напруги статора	Переваги: найбільший діапазон та плавність регулювання; висока точність регулювання; високий ККД двигуна. Частотне регулювання АД здійснюється за допомогою мікропроцесорних систем керування на основі математичного опису загальної двухфазної асинхронної машини (АМ)

Для забезпечення технологічних вимог до конвеєрів найбільш перспективними є методи варіативного контролю електроприводу за частотою. Такий підхід дозволяє змінювати швидкість конвеєра в залежності від умов технологічного процесу. Робота асинхронного двигуна при заданій частоті визначається напругою або струмом (магнітним потоком) статора, а також величиною ковзання.

Асинхронні електроприводи з регулюванням частоти є оптимальними для технологічних процесів, що вимагають плавного та точного контролю швидкості на великому діапазоні. Перехід на частотне регулювання дає змогу оптимізувати умови роботи технологічного обладнання, що дозволяє забезпечити економію енергії та підтримку ефективного, ресурсощадного режиму експлуатації як технологічних, так і електричних систем.

Завдяки частотному регулюванню знижується навантаження та динамічні впливи на обладнання, що подовжує його термін служби і зменшує витрати на обслуговування.

Частотне регулювання асинхронного двигуна (АД) здійснюється за допомогою мікропроцесорних систем контролю, заснованих на математичному описі двофазної асинхронної машини. У процесі частотного регулювання замість подачі стандартної змінної напруги з електромережі (одно- або трифазної), напруга проходить через трансформацію, під час якої змінюються її основні параметри: амплітуда, частота, струм, а також кутлова різниця між фазами та вектор магнітного потоку в обмотках статора та ротора.

Ця трансформація відбувається в спеціальному пристрої, відомому як частотний перетворювач (ПЧ).

Існують два основні методи частотного регулювання: керування за допомогою частоти та напруги статора; керування за допомогою частоти та струму статора.

Принципова змога регулювати кутову швидкість асинхронного двигуна шляхом зміни частоти мережевої напруги впливає з формули:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_1 (1 - s) / p .$$

При зміні частоти виникає також необхідність регулювання амплітуди джерела напруги, що впливає з виразу:

$$U1 \approx E1 = k \cdot \Phi \cdot f_1 .$$

Якщо при незмінній напрузі змінювати частоту, то магнітний потік змінюється обернено пропорційно до частоти. Наприклад, зниження частоти призводить до збільшення потоку, що може спричинити насичення сталі ротора, що в свою чергу збільшує струм і може викликати перегрів двигуна. Навпаки, збільшення частоти зменшує потік і, як результат, знижує максимальний доступний момент [3].

Для ефективного використання асинхронного двигуна в режимі регулювання кутової швидкості через зміну частоти необхідно одночасно коригувати напругу в залежності від частоти та навантаження. Це досягається лише в замкнених системах електроприводу.

Частотне регулювання кутової швидкості в асинхронних електродвигунах з короткозамкненим ротором стає все більш популярним у різних галузях. Наприклад, в текстильному виробництві, де частотний перетворювач використовується для живлення групи асинхронних двигунів, що працюють в однакових умовах. Цей метод дозволяє регулювати кутову швидкість двигунів плавно і синхронно. Аналогічні системи застосовуються в металургії для управління транспортними рольгангами та деякими типами конвеєрів.

Частотне регулювання швидкості також активно використовується в індивідуальних установках, де потрібні високі швидкості обертання, наприклад, для приводу електрошпинделів в металорізальних верстатах, де частота обертання може досягати 20 000 об/хв.

Економічна ефективність частотного регулювання особливо помітна в приводах, що працюють у режимах з частими змінами напрямку обертання і інтенсивним гальмуванням, таких як у повторно-короткочасних режимах.

Для реалізації частотного регулювання використовуються перетворювачі, які можуть змінювати як частоту, так і амплітуду напруги, відповідно до потреб. Частотні перетворювачі класифікуються на електромашинні та напівпровідникові. Електромашинні перетворювачі можуть мати проміжну ланку постійного струму або прямий зв'язок. У першому випадку змінна напруга з фіксованими параметрами подається на вхід, а на виході отримується регульована частота та амплітуда. Проте електромашинні перетворювачі з прямим зв'язком не отримали широкого застосування через низьку ефективність

Другий підхід до керування асинхронними двигунами – це частотно-струмове керування, яке забезпечує потрібну перевантажувальну здатність та жорсткість механічних характеристик у всьому діапазоні швидкостей. Перевантажувальна здатність досягається шляхом підтримання зв'язку між частотою та напругою статора. Жорсткість характеристик можна підвищити, використовуючи зворотний зв'язок за швидкістю, хоча навіть без нього асинхронні двигуни з частотним регулюванням часто мають вищу жорсткість, ніж двигуни постійного струму.

Системи керування можуть також включати завдання щодо енергозбереження, наприклад, підтримання потрібного моменту при мінімальному струмі або втратах. Це вирішується через екстремальні системи керування.

Векторне керування дозволяє точно регулювати швидкість, навіть без зворотного зв'язку по швидкості. Воно забезпечує широкий діапазон регулювання, безперебійне функціонування на низьких частотах, високу динаміку і ефективність навіть при значних змінах навантаження, оптимізацію ККД двигуна та зменшення втрат. Однак, система складна у реалізації, вимагаючи складних пристроїв для перетворення координат та фаз.

Переваги частотних перетворювачів (ПЧ):

Енергозбереження: знижують споживану енергію в 1,5-2 рази в порівнянні з традиційними релейно-контакторними системами.

Плавний старт і зупинка: зменшуються ударні навантаження та пускові струми, забезпечується м'яке гальмування.

Надійність: захист від перевантажень, перегріву та інших проблем, що продовжує термін служби обладнання та знижує витрати на обслуговування.

Для електроприводу ковшового типу норії доцільно застосувати частотно-струмове керування. Після аналізу різних методів контролю швидкості обертання, обрано перетворювач OMRON Varispeed F7, який працює за принципом частотно-струмового керування.

3.4 Технічні дані комплектного електропривода OMRON Varispeed F7

Частотно-регулюючі приводи OMRON Varispeed F7 є одним з найбільш ефективних і надійних рішень для промислових застосувань. Вони відзначаються високою довговічністю, простотою в експлуатації та багатофункціональністю. Ці приводи ідеально підходять для різних типів обладнання і виробничих процесів, що вимагають точного налаштування швидкості та високої потужності при пуску. Завдяки широкому вибору мережевих протоколів, спеціалізованих прошивок і модулів введення/виведення, OMRON Varispeed F7 може застосовуватись в різних галузях промисловості, від простих до складних виробничих систем.

Основні переваги частотних інверторів OMRON Varispeed F7:

Енергоощадний режим: Один з найпотужніших аспектів даного інвертора – це можливість зменшення енергоспоживання на 5-30% в порівнянні з традиційними системами. Інвертор в автоматичному режимі відслідковує струм, навантаження та налаштовує вихідну напругу таким чином, щоб забезпечити найбільш ефективний режим роботи двигуна при мінімальних витратах енергії. Це особливо ефективно при роботі з двигунами, що функціонують при змінному чи малому навантаженні.

Трирівнева схема керування: Вона дозволяє значно зменшити пікові перепади напруги на обмотках двигуна (до 50%), що зменшує ризик пошкоджень і знижує необхідність в установці додаткових захисних компонентів, таких як дроселі змінного струму, навіть за умови великої протяжності кабелю живлення.

Векторне регулювання магнітного потоку: Це дозволяє забезпечити точне управління електродвигуном, збільшити його ефективність та зменшити рівень шуму, що виробляється в процесі роботи.

Збільшений термін служби обладнання: Завдяки високій надійності та якісним компонентам частотний перетворювач забезпечує тривалий термін служби як електричних, так і механічних компонентів, зменшуючи потребу в обслуговуванні та ремонті.

Широкий асортимент додаткових модулів: OMRON пропонує великий вибір додаткових функцій, таких як:

Комунікаційні інтерфейси для зручного підключення до різних типів мереж.

Плата програмованої логіки (ПЛК), що дозволяє інтегрувати перетворювач у складніші системи управління.

Інтерфейс Mechatrolink для швидкої передачі даних в реальному часі.

Аналогові та дискретні входи/виходи для гнучкої інтеграції з іншими пристроями.

Кероване гальмування та автоматичне відновлення після зникнення напруги: Інвертор підтримує ефективне гальмування електродвигуна, що знижує пульсації пускового моменту та підвищує точність роботи. У разі відключення мережевої напруги система автоматично відновлює роботу без потреби в додаткових налаштуваннях.

Функція "підхоплення" обертового електродвигуна: Це дозволяє підтримувати сталу швидкість обертання, навіть якщо навантаження змінюється, що є важливим для застосувань з мінливими робочими умовами.

Зниження рівня шуму: OMRON Varispeed F7 має технології для суттєвого зниження рівня шуму, що генерується електродвигуном під час роботи, що особливо важливо для застосувань в чутливих або житлових зонах.

Технічні характеристики частотного перетворювача OMRON Varispeed F7:

Модель: OMRON Varispeed F7

Тип керування: Векторне керування (керування магнітним потоком)

Потужність: Варіанти від малих до великих потужностей, що забезпечують

широкий спектр застосувань

Частотний діапазон: Широкий діапазон частот для точного налаштування швидкості

Енергоефективність: Високий коефіцієнт корисної дії з функцією енергозбереження

Захист: Повний захист від перевантажень, короткого замикання, перегріву та інших небажаних ситуацій

Модульність: Великий вибір додаткових модулів та плат для розширення функціоналу

Управління: Можливість підключення до різноманітних систем автоматизації

Частотний перетворювач OMRON Varispeed F7 є ідеальним вибором для широкого спектру промислових застосувань, забезпечуючи високу ефективність, надійність і гнучкість.

Для обраного електродвигуна АІР132М6У3 вибираємо модель перетворювача OMRON з параметрами, зазначеними в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики обраної моделі OMRON Varispeed

Характеристика	Параметр
Номер моделі OMRON	CIMR-F7Z47P5
Максимальна припустима вихідна потужність двигуна	7,5 кВт
Номінальна вихідна потужність	16 кВт
Номінальний вихідний струм	21 А
Джерело живлення:	- максимальна напруга 3 фази, 380 В змінного струму; - номінальна частота 50/60 Гц

Загальна схема частотного перетворювача OMRON Varispeed F7 наведена на рисунку 3.1.

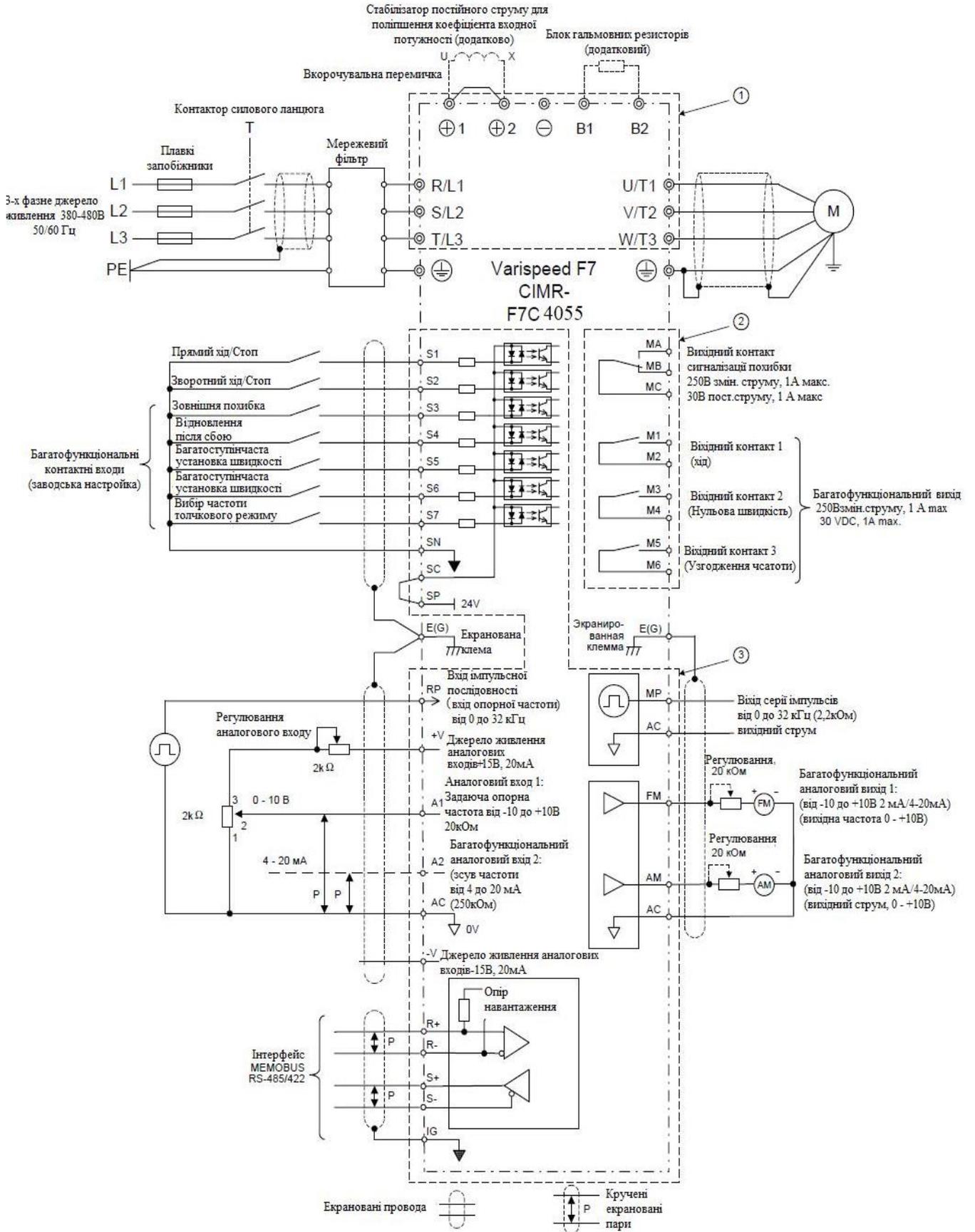


Рисунок 3.1 – Загальна схема частотного перетворювача OMRON Varispeed F7

Стандартна схема підключення перетворювача показана на рисунку 3.2.

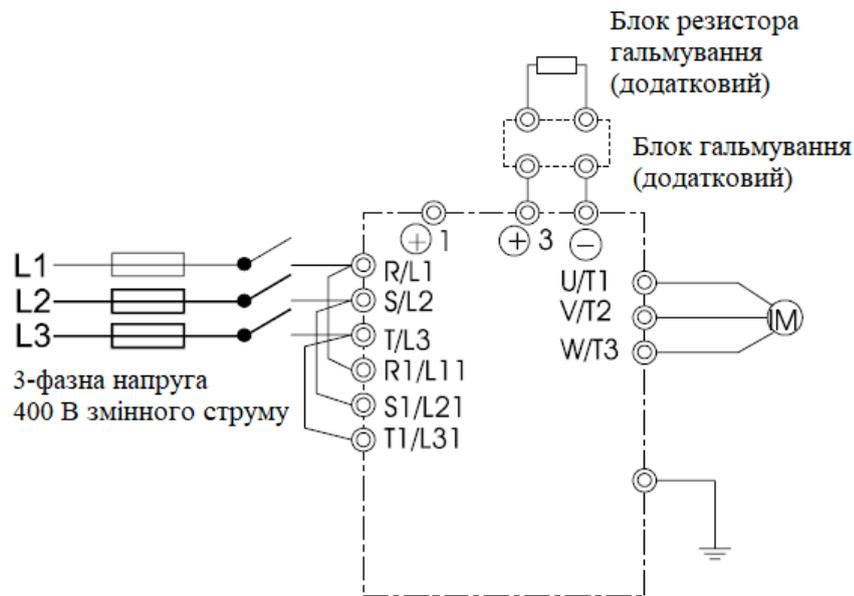


Рисунок 3.2 - Стандартна схема підключення перетворювача OMRON

Висновки до розділу 3:

Було проведено детальний аналіз сучасних розробок у галузі систем управління електродвигунами змінного струму, що дозволяє ефективно регулювати їхні робочі параметри. Особлива увага була приділена потенціалу використання асинхронного електричного двигуна в поєднанні з тиристорним частотним перетворювачем для реалізації регулювання швидкості на прикладі стрічкового транспортера. Така комбінація забезпечує високу точність та ефективність управління швидкістю в умовах різних навантажень та змін робочих параметрів.

Згідно з проведеним аналізом, для забезпечення оптимального контролю швидкості електродвигуна конвеєра було обрано перетворювач частоти OMRON Varispeed F7, який є одним із найбільш ефективних рішень для цього типу систем. Цей перетворювач має високу гнучкість у налаштуваннях, що дозволяє забезпечити точне регулювання частоти обертання двигуна в широкому діапазоні швидкостей.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1 Основи функціонування електричної машини з приводом

Для досягнення бажаних характеристик (як усталених, так і перехідних) асинхронного електроприводу з частотним регулюванням, необхідно використовувати замкнуту систему керування, яка дозволяє стабільно управляти всіма параметрами приводу. Це дає можливість точно регулювати швидкість обертання, кутове положення ротора, струм статора та інші важливі характеристики приводу, а також компенсувати зовнішні впливи, що можуть викликати відхилення від заданих режимів.

Загальна структура такої системи керування (рис. 4.1) включає кілька ключових компонентів:

Асинхронний двигун (АД) — основний елемент системи, який приводить в рух механізм, здійснюючи робочий процес за допомогою електричної енергії.

Частотний перетворювач (ПЧ) — забезпечує регулювання частоти живлення двигуна, що дозволяє змінювати швидкість обертання в широкому діапазоні. Це важливий компонент для ефективного керування роботою приводу.

Регулятори (Р) — пристрої, які отримують вхідні сигнали і здійснюють відповідну корекцію параметрів, таких як швидкість обертання, кутове положення ротора або інші змінні. Регулятори забезпечують стабільну роботу приводу за заданими умовами.

Вимірювальні пристрої (Д) — здійснюють вимірювання електричних змінних приводу, таких як струм, напруга, магнітний потік, швидкість обертання та інші. Ці дані передаються в систему керування для подальшої обробки і корекції роботи приводу.

Сигнали керування, які надходять на входи регуляторів, можуть містити задані значення різних характеристик приводу, зокрема:

Швидкість обертання — одна з основних змінних, що регулюється для підтримання заданого режиму роботи.

Кутове положення ротора — може бути важливим для деяких специфічних систем, де потрібен точний контроль положення.

Рівень струму статора — контроль за струмом статора дозволяє захистити привід від перевантажень та знизити енергоспоживання.

Магнітний потік — регулювання цього параметра важливе для досягнення високої ефективності та стабільної роботи.

Зовнішні чинники, які можуть впливати на роботу системи, включають:

Момент навантаження (M_c) на валу асинхронного двигуна — зміни навантаження можуть викликати відхилення від бажаного режиму, тому їх необхідно враховувати в системі керування.

Зміни напруги у мережі живлення (U_c) — коливання напруги можуть негативно вплинути на стабільність роботи приводу, тому система повинна коригувати параметри в залежності від таких змін.

Схематичний загальний вигляд такої системи (рис. 4.1) включає, окрім самого асинхронного двигуна (АД) та інтегрованого частотного перетворювача (ПЧ), ще й апарати регулювання (позначені як Р) та вимірювальні пристрої (Д) для відповідних електричних змінних приводу.

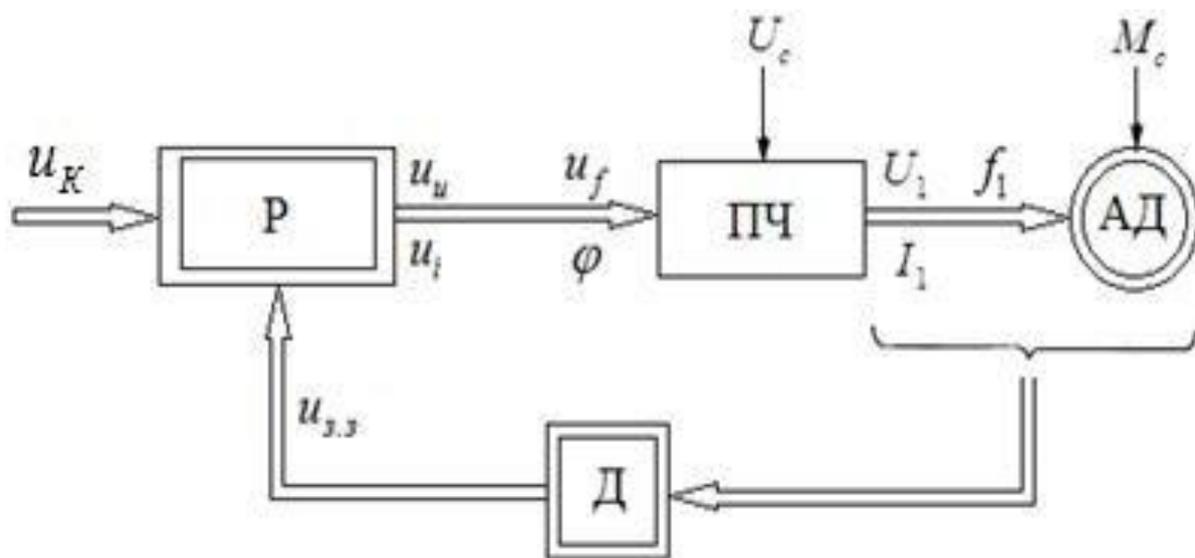


Рисунок 4.1 - Функціональна схема замкненої системи ПЧ-АД зі скалярним керуванням

Сигнали, що надходять від датчиків, є вимірюваними або розрахованими параметрами асинхронної машини (АД). Вони можуть бути отримані безпосередньо через вимірювання таких змінних, як частота, напруга, струм статора, швидкість обертання ротора, магнітний потік у повітряному зазорі АД. Також ці параметри можуть бути розраховані за допомогою математичних моделей АД, наприклад, електрорушійна сила (ЕРС) або потокозчеплення між статором і ротором.

Вихідні сигнали регуляторів, які формуються під впливом керуючих впливів, зворотного зв'язку та застосованих алгоритмів керування, є сигналами для перетворювача частоти. Це включає сигнал керування частотою, а також вихідну напругу і струм, що забезпечують необхідні умови для роботи електроприводу.

При реалізації частотно-струмового керування асинхронний двигун (АД) живиться від перетворювача частоти струму (ПЧС), який функціонує як джерело струму. Один з варіантів побудови такого перетворювача — це автономний інвертор струму (рис. 4.2, а). Цей інвертор включає в себе:

Керований випрямляч, що завдяки негативному зворотному зв'язку по струму навантаження (через датчик струму ДС і регулятор струму РС) разом з фільтруючим дроселем D_r працює як кероване джерело постійного струму.

Інвертор струму (ІС), чия основна функція — формування необхідної частоти вихідного струму, що забезпечує контроль швидкості обертання асинхронного двигуна.

Іншим варіантом реалізації ПЧС є використання перетворювачів частоти з прямим зв'язком на базі некерованого перетворювача частоти (НПЧ) (рис. 4.2, б). У таких системах:

Для кожної вентиляльної групи передбачено внутрішній контур регулювання струму.

Частота вихідного струму НПЧ задається генератором частоти (ГЧ).

Контур регулювання струму є астатичним, а параметри ПІ-регулятора визначаються аналогічно параметрам ПІ-регулятора струму в електроприводах

постійного струму.

Використання таких перетворювачів дозволяє ефективно керувати параметрами асинхронного двигуна, забезпечуючи плавне регулювання швидкості, що сприяє підвищенню енергоефективності та стабільності роботи електроприводу.

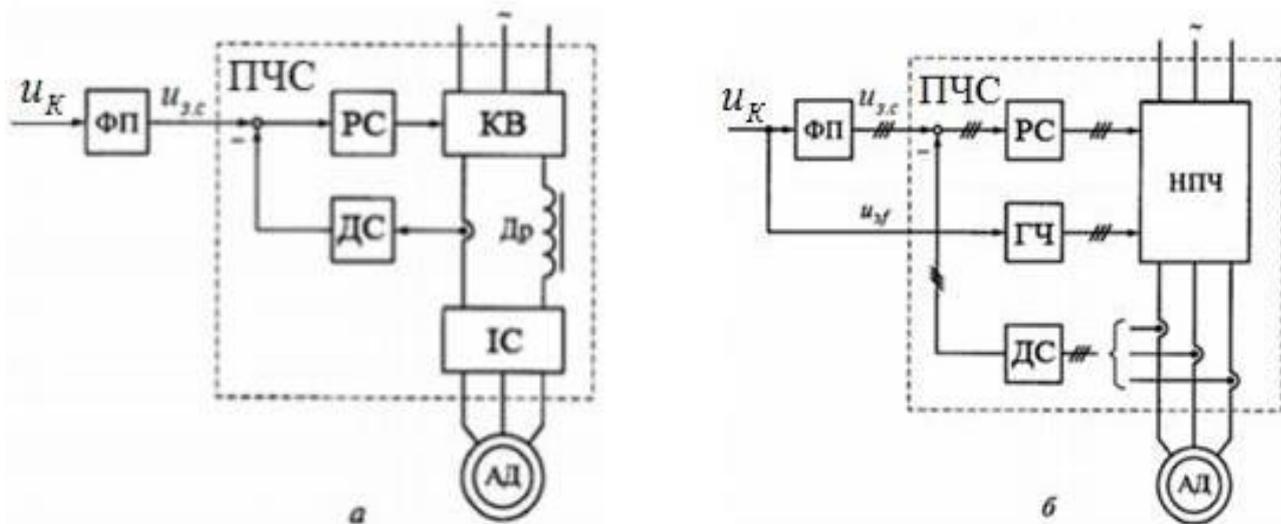


Рисунок 4.2 - Функціональні схеми систем ПЧ-АД при живленні від джерела струму на основі автономного інвертора (а) і перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком (б)

Особливою рисою перетворювача частоти струму (ПЧС) є здатність забезпечувати двосторонній обмін енергією між живильною мережею та двигуном з нереверсивним управлінням швидкістю (УВ). Це досягається завдяки зміщенню напрямку проти-ЕРС інвертора при збереженні напрямку випрямленого струму в ньому.

Керування асинхронним двигуном (АД) здійснюється через сигнали, що визначають вихідний струм i і частоту u_z перетворювача ПЧС. Обидва ці сигнали залежать від загального керуючого сигналу u .

При живленні АД від джерела струму магнітний потік змінюється під впливом розмагнічуючої дії струму ротора, особливо при зміні абсолютного ковзання. Для стабілізації магнітного потоку при варіації навантаження в систему керування струмом ПЧС вводиться функціональний перетворювач (ФП), який визначає значення струму статора $I_{ак}$ функцію абсолютного ковзання s . Ця

залежність $I_1 = f(s_a)$ та відповідна їй залежність вихідної частоти $u_{z.c.} = \varphi(u_k)$ є нелінійними функціями (як показано на рисунку 4.3). На робочих ділянках механічних характеристик АД ці залежності наближаються до умови $I_2 \approx s$. Криві цих функцій симетричні відносно осі струму (заданий струм), що обумовлено симетрією механічних характеристик АД в режимах роботи як двигуна, так і генератора.

На практиці для реалізації функціонального перетворювача часто використовують лінійну апроксимацію залежності $I_1 = f(s_a)$ (штрихова лінія на рисунку 4.3). В даному випадку значення I_1^{max} і $u_{z.c.}^{max}$ визначають максимально допустимий струм статора та сигнал його завдання, а I_1^{min} і $u_{z.c.}^{min}$ — струм холостого ходу АД і сигнал для його завдання.

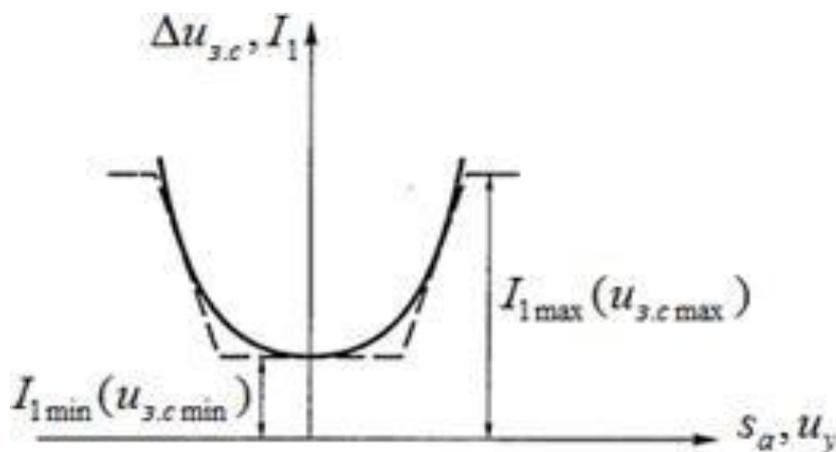


Рисунок 4.3 - Залежність струму статора від абсолютного ковзання АД

Позитивні властивості асинхронного двигуна (АД), які проявляються при живленні від перетворювача частоти струму (ПЧС), включають незалежність електромагнітного моменту від частоти і здатність забезпечувати більший момент при заданому струмі статора і критичному абсолютному ковзанні порівняно з живленням від джерела напруги. Ці переваги можуть бути реалізовані в замкнутій системі, що контролює абсолютне ковзання і струм двигуна в залежності від навантаження.

Функціональна схема такої системи частотно-струмового керування АД представлена на рисунку 4.4. Вона включає необхідні елементи для забезпечення замкнутого циклу керування, де основними параметрами є ковзання та струм

статора, що коригуються в залежності від змін навантаження. Таким чином, ця система дозволяє досягати високої ефективності роботи АД, оптимізуючи його характеристики в різних умовах експлуатації.

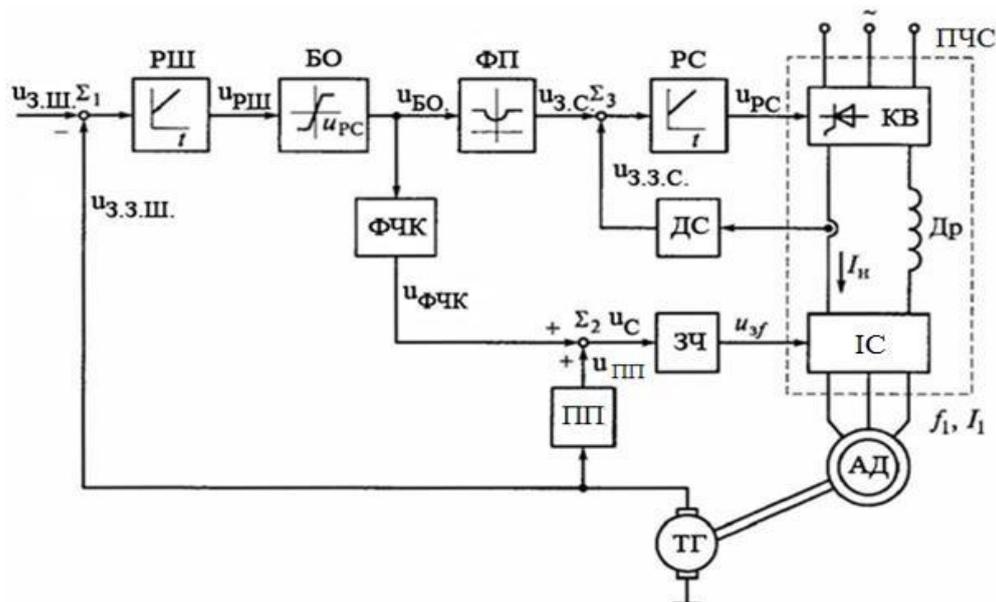


Рисунок 4.4 - Функціональна схема замкнутої системи ПЧ-АД з частотно-струмовим керуванням

Джерело струму реалізоване на основі керуючого випрямляча КВ, струм навантаження I_n якого задається вихідною напругою u_{PC} регулятора струму РС, пропорційною різниці напруги $u_{з.с.}$ на виході ФП і $u_{з.з.с.}$ датчика струму ДС. Стабілізація швидкості АД забезпечується за рахунок регулятора швидкості РШ, на вході якого порівнюються напруги завдання швидкості $u_{з.ш.}$ і зворотного зв'язку $u_{з.з.ш.}$ з виходу тахогенератора ТГ. Особливість схеми в тому, що тут автоматично формуються сигнали, пропорційні абсолютному ковзанню і завданню синхронної швидкості АД [17].

Сигнал, пропорційний s_a , формується на виході РШ, оскільки $u_{з.ш.}$ пропорційно завданням швидкості $\omega_{0з}$ ідеального холостого ходу АД, а $u_{з.з.ш.}$ — поточній швидкості ротора ω , тобто $u_{РШ} = (u_{з.ш.} - u_{з.з.ш.}) = (\omega_{0з} - \omega) = s_a \cdot \omega_{ном}$. Якщо передатний коефіцієнт формувача частоти ковзання ФЧК вибрати таким чином, щоб з урахуванням $\omega_{ном}$ його вихідний сигнал $u_{ФЧК}$ був пропорційний

$(\omega_{03} - \omega)$, то після сумування цього сигналу з вихідним сигналом u_{III} узгоджувального пристрою ПП, пропорційним поточному значенню ω , на виході суматора Σ_2 пристрою завдання частоти (ЗЧ) інвертора струму ІС перетворювача ПЧС буде сформований сигнал

$$u_C = u_{ФЧК} + u_{ПП} \cong (\omega_{03} - \omega) + \omega = \omega_{03}.$$

В результаті на вихід ЗЧ буде сигнал завдання частоти вихідного струму ПЧС $u_{3,f} \cong u_{3,III} \cong \omega_{03}$, що визначає завдання синхронної швидкості АД.

Оскільки електромагнітний момент двигуна пропорційний квадрату струму статорної обмотки ($M \cong I_1^2$), який, у свою чергу, пропорційний абсолютному ковзанню ($I_1^2 \cong s_a$), вихідний сигнал РШ пропорційний s_a і є сигналом завдання електромагнітного моменту АД. Тому вихідною напругою u_{BO} блоку обмеження БО на виході РШ можна впливати і на обмеження максимального моменту АД.

Перед пуском двигуна ($u_{3,III} = 0$, $u_{РШ} = 0$) сигнал завдання частоти перетворювача $u_{3,f} = 0$ і за рахунок характеристики ФП ($u_{3,III,min} \neq 0$) в АД задається постійний струм, який забезпечує потік намагнічування і режим динамічного гальмування АД. Зі збільшенням $u_{3,III}$ зростає сигнал завдання частоти, струм статора стає змінним із заданою частотою і двигун починає обертання під дією максимального моменту, встановленого сигналом $u_{3,III}$. Збільшення швидкості буде відбуватися до тих пір, поки не зрівняються сигнали завдання і зворотного зв'язку по швидкості двигуна. Після цього вихідний сигнал РШ при відсутності статичного навантаження на валу АД знову встановиться рівним нулю, але за рахунок позитивного зворотного зв'язку по швидкості вже при $u_{3,f} \neq 0$. Потік холостого ходу АД буде при цьому створюватися змінним струмом I_{1min} (рисунок 4.3).

4.2 Математичний опис структурної схеми електропривода

Повний електричний привід серії OMRON Varispeed F7 [18] постачається з усіма стандартними компонентами, тому немає необхідності у складних розрахунках чи підборі основних частин системи. Однак виробник не передбачає корегуючого модуля, оскільки його параметри визначаються індивідуально для кожного конкретного електродвигуна. Для правильної налаштування приводу потрібно зафіксувати певні регульовальні показники, які гарантують досягнення бажаних динамічних характеристик системи. Це вимагає проведення аналізу динаміки через математичну модель даного електроприводу.

При вивченні процесів перехідного характеру в трифазних асинхронних електродвигунах доцільно використовувати спрощення, що дозволяють зручно описати основні взаємозв'язки показників і змінних. Для цього приймаються наступні припущення:

Сила магнітного поля в обмотках апарату розподіляється по колу повітряного зазору згідно з синусоїдальним законом.

Втрати в феромагнітних матеріалах (як в статорі, так і в роторі) вважаються нульовими.

Обмотки статора та ротора є ідеально збалансованими, а їхні осі зміщені на 120° .

Насичення магнітної системи не враховується.

При аналізі перехідних процесів розглядається спрощена модель асинхронного двигуна, в якій електрорушійна сила (ЕРС) і густина магнітного потоку розподіляються по колу за синусоїдальним законом. Втрати в металі відсутні, а контур намагнічування вважається лінійним. Диференціальні рівняння для такого ідеалізованого асинхронного двигуна можна описати в системі координат «ікс-ігрек», яка обертається з частотою синхронного режиму ω_0 .

$$\left. \begin{aligned}
 U_1 &= I_1 \cdot r_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_0\psi_1; \\
 0 &= I_2 \cdot r_2' + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_0 - z_p\omega_2)\psi_2; \\
 \psi_1 &= L_1 I_1 + L_0 I_2'; \\
 \psi_2 &= L_2' I_2' + L_0 I_1,
 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де U_1, I_1, ψ_1 – вектори напруги, струму і потокозчеплення статора;

I_2', ψ_2 – ті ж параметри для ротора, приведені до статора;

L_0 – повна результуюча взаємна індуктивність обмотки статора і ротора;

L_2', L_1' – повні результуючі індуктивності обмотки статора і ротора (приведені до статора), що складаються з індуктивності від головного потоку і індуктивностей від полів розсіювання;

r_1, r_2' – активні опори обмоток статора і ротора (приведені до статора);

ω_2 – кутова швидкість обертання ротора;

z_p – число пар полюсів двигуна.

Обертовий момент двигуна M ,

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot I_m (\psi_1^* \cdot I_1) = \frac{3}{2} \cdot z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot I_m (\psi_2^* \cdot I_1). \quad (4.2)$$

Рівняння руху двигуна:

$$M - M_C = I \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.3)$$

При живленні від АІС, коли заданий струм статора двигуна, доцільно перейти до рівнянь, що містять U_1, I_1, ψ_2 .

З третього і четвертого рівнянь системи (4.1):

$$\psi_1 = \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_1 + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_2,$$

$$\Delta^* = L_1 L_2' - L_0^2; \quad I_2' = \frac{1}{L_2'} \cdot \psi_2 - \frac{L_0}{L_2'} \cdot I_1.$$

Підставимо дані вирази в перші два рівняння системи (4.1) і одержимо:

$$U_{1x} = R_1 I_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_1}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt} \quad (4.4)$$

$$0 = -\frac{R_2}{L_2'} \cdot L_0 I_1 + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_2 \quad (4.5)$$

Спроектуємо вирази (4.5) на осі x і y , а також введемо в якості незалежної перемінної I_l , що спрямована уздовж осі x , при цьому $I_{lx} = I_l$:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R_1 I_{1x} - \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_{1y} + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_{1x}}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt}; \\ U_{1y} &= R_1 I_{1y} - \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_{1x} + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_{1y}}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2y}}{dt}; \\ 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_{1x} + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2y}; \\ 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_{1y} + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2x}. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R_1 I_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_1}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt}; \\ U_{1y} &= \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_1 + \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2y}}{dt}; \\ 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_1 + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2y}; \\ 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2x}. \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Знайдемо момент двигуна з виразу (4.3):

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} I_m \cdot \psi_{21}^* I_1 \quad (4.8)$$

де $\psi_2^* = \psi_{2x} - j\psi_{2y}$;

$$I_1 = I_{1x} + jI_{1y}.$$

Підставимо значення ψ_{2i}^* і I_1 у (4.8) і одержимо

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} (\psi_{2x} I_{1y} - \psi_{2y} I_{1x}).$$

Так як при $I_{1x} = I_1$ і $I_{1y} = 0$, то попередній вираз перетвориться в такий:

$$M = -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} I_1. \quad (4.9)$$

Запишемо систему рівнянь (4.7) і рівняння (4.9) в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x}(p) &= (R_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} p) \cdot I_1(p) - \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p \psi_{2x}(p); \\ U_{1y}(p) &= \omega_0(p) \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} I_1(p) + \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \psi_{2x}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p \psi_{2y}(p); \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_1(p) + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x}(p) + p \psi_{2x}(p) - (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2y}(p); \\ 0 &= \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + p \psi_{2y}(p) + (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2x}(p); \\ M &= -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) I_1(p). \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

При живленні двигуна від АІС, нас буде цікавити тільки активна складова напруги $U_{1x}(p)$, тому при побудові структурної схеми асинхронного двигуна, друге рівняння системи (4.10) використовуватися не буде.

$$\overline{\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'}} \quad \overline{\psi_{2y}} \quad \overline{I_1}$$

$$\left. \begin{aligned}
 U_{1x}(p) &= R_1 \left(1 + \frac{\Delta^*}{L_2' R_1} p\right) \cdot I_1(p) - \omega_0(p) \cdot \frac{L_0'}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + \frac{L_0'}{L_2'} p \psi_{2x}(p); \\
 \psi_{2x}(p) &= \frac{L_0'}{1 + \frac{L_2'}{R_2} p} \cdot I_1(p) + \left[-\frac{L_2'}{R_2} / \left(1 + \frac{L_2'}{R_2} p\right) \right] \cdot (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2y}(p); \\
 \psi_{2y}(p) &= \left[-\frac{L_2'}{R_2} / \left(1 + \frac{L_2'}{R_2} p\right) \right] \cdot (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2x}(p); \\
 M &= -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0'}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) I_1(p).
 \end{aligned} \right\} (4.12)$$

На підставі системи рівнянь (4.12) і рівняння (4.3) складемо структурну схему асинхронного двигуна, що представлена на рисунку 4.5.

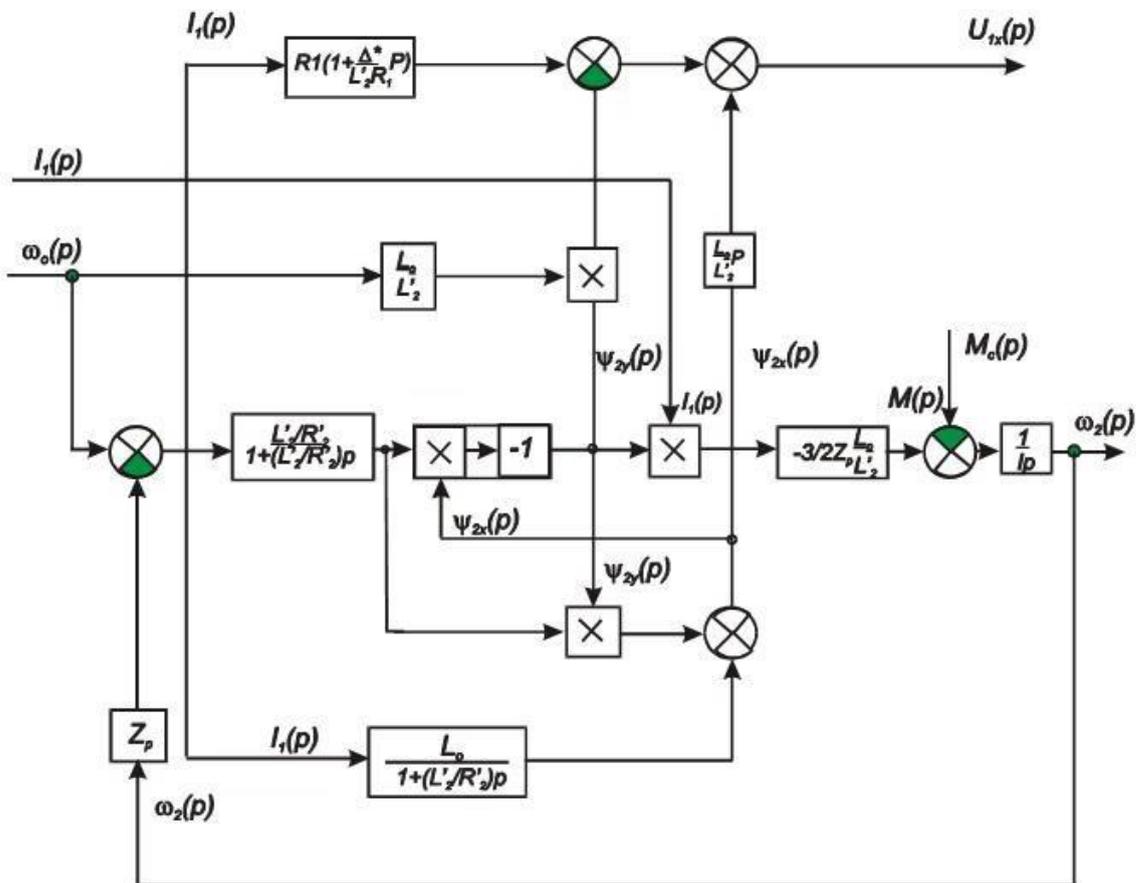


Рисунок 4.5 – Структурна схема асинхронного електродвигуна

Складену структурну схему асинхронного двигуна при керуванні кутовою частотою напруги статора й за умови сталості потокозчеплення статора зручніше побудувати, якщо представити координати двигуна у в.о.

Здійснимо перехід до умовних одиниць, прийнявши за базові значення координат їх значення у номінальному режимі: $M_{нфн}$; $\omega_{1н}$; $U_{1\alpha H}$; $\omega_{0н}$,

$$\omega_{0H} = \frac{\omega_{1H}}{p_i},$$

де ω_{0H} – синхронна кутова швидкість двигуна, c^{-1} .

Тоді

$$\left[\frac{\Delta\omega}{\omega_{0H}} \right] = \Delta\bar{\omega}; \quad \left[\frac{\Delta\omega_1}{\omega_{1H}} \right] = \Delta\bar{\omega}_1; \quad \left[\frac{\Delta M}{M_{п.ф.н}} \right] = \Delta\bar{M}; \quad \left[\frac{\Delta M_o}{M_{п.ф.н}} \right] = \Delta\bar{M}_o; \quad \left[\frac{\Delta u_{1\alpha}}{U_{1\alpha H}} \right] = \Delta u_{1\alpha}.$$

Передатна функція двигуна запишеться так

$$\frac{\Delta\bar{M}(p)}{\Delta\bar{\omega}_1(p) - \Delta\bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{v} \right)^2 \frac{(T_E p + 1) - \frac{\left(\frac{S}{S_{kp}}\right)^2}{1 + \left(\frac{S}{S_{kp}}\right)^2} (T_E p + 2)}{(T_E p + 1)^2 + \left(\frac{S}{S_{kp}}\right)^2}, \quad (4.14)$$

де $\gamma = \frac{U_{1\alpha}}{U_{1\alpha H}}$ - відносна напруга статора;

$v = \frac{\omega_1}{\omega_{1H}}$ – відносна частота напруги статора, $v = 0,8$.

Або в спрощеному виді

$$\frac{\Delta\bar{M}(p)}{\Delta\bar{\omega}_1(p) - \Delta\bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{v} \right)^2 \frac{1}{T_E p + 1}. \quad (4.15)$$

Відповідно на підставі рівняння (4.14) маємо

$$\frac{\Delta\bar{M}(p)}{\Delta\bar{\omega}_1(p) - \Delta\bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{v} \right)^2 \frac{1}{T_M p}, \quad (4.16)$$

де $T_M = \frac{J\omega_{0н}}{M_{п.ф.н}}$ - механічна постійна часу двигуна, с.

Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні побудована на підставі виразів (4.15), (4.16), показана на рисунку 4.6.

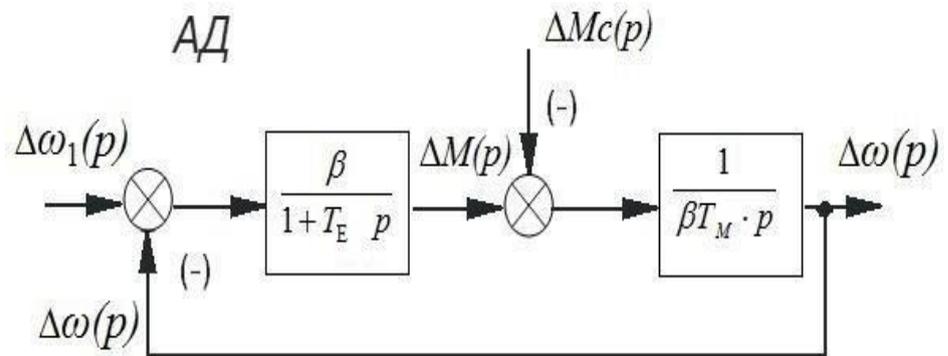


Рисунок 4.6 – Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні

Для розробки математичної моделі електроприводу враховуються такі припущення:

Частотний перетворювач працює в рамках замкненої системи керування швидкістю, що дозволяє виконувати плавне регулювання частоти струму двигуна. Це забезпечує роботу двигуна на лінійній частині характеристики, де момент опору змінюється від нуля до номінального значення, а ковзання варіюється від 0 до номінального значення.

Датчик швидкості має дуже малу інерційність, тому її можна не враховувати в розрахунках моделі.

Виходячи з цих припущень, можна створити структурну схему для подальшого моделювання електроприводу. При цьому система керування з частотним перетворювачем у складі замкненої системи керування матиме структуру двоконтурної системи підлеглого керування, яка включає:

Внутрішній контур струму: забезпечує точне регулювання струму в електродвигуні, стабілізуючи його при зміні навантаження.

Зовнішній контур швидкості: регулює швидкість обертання двигуна, підтримуючи її на необхідному рівні в залежності від заданих значень.

На рисунку 4.7 представлена спрощена структурна схема такого приводу. Вона включає: частотний перетворювач, який перетворює вхідну напругу на

змінну частоту для живлення електродвигуна; вимірювальні датчики швидкості і струму, які надають зворотний зв'язок в систему; регулятори (внутрішній і зовнішній контури), що забезпечують необхідні корекції для стабільної роботи приводу в заданих умовах.

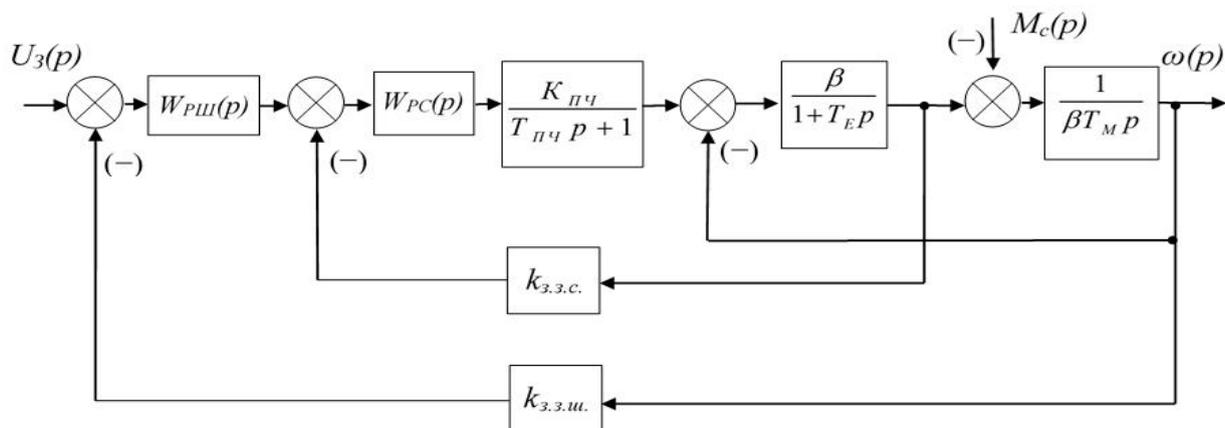


Рисунок 4.7 – Структурна схема електропривода зі спрощеною математичною моделлю електродвигуна

$W_{PШ}(p)$ - передатна функція регулятора швидкості;

$W_{PC}(p)$ - передатна функція регулятора струму.

β – модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики;

T_E – еквівалентна електромагнітна постійна часу кіл статора та ротора АД;

T_M - електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна;

$k_{ПЧ}$ – передатний коефіцієнт перетворювача частоти; $k_{ПЧ} = 50$;

$T_{ПЧ}$ – постійна часу кола керування ЧП, яка при високих частотах модуляції вихідної напруги промислових ЧП (2...50 кГц) не перевищує 0,001с.

Зворотні зв'язки за струмом та швидкістю виконаємо за допомогою пропорційних ланок з коефіцієнтами $k_{3.3.c}$ і $k_{3.3.ш}$ відповідно.

Регулятори швидкості і струму приймаємо як пропорційно-інтегральні ланки з коефіцієнтом передачі $k_{PШ}$ і k_{PC} та постійними часу $T_{PШ}$ і T_{PC} відповідно:

$$W_{PШ}(p) = k_{PШ} + \frac{1}{T_{PШ} \cdot p};$$

$$W_{PC}(p) = \frac{\Delta u_{PC}}{\Delta u} = k_{PC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p}.$$

Структурна схема з наведеними передатними функціями регуляторів зображена на рисунку 4.8.

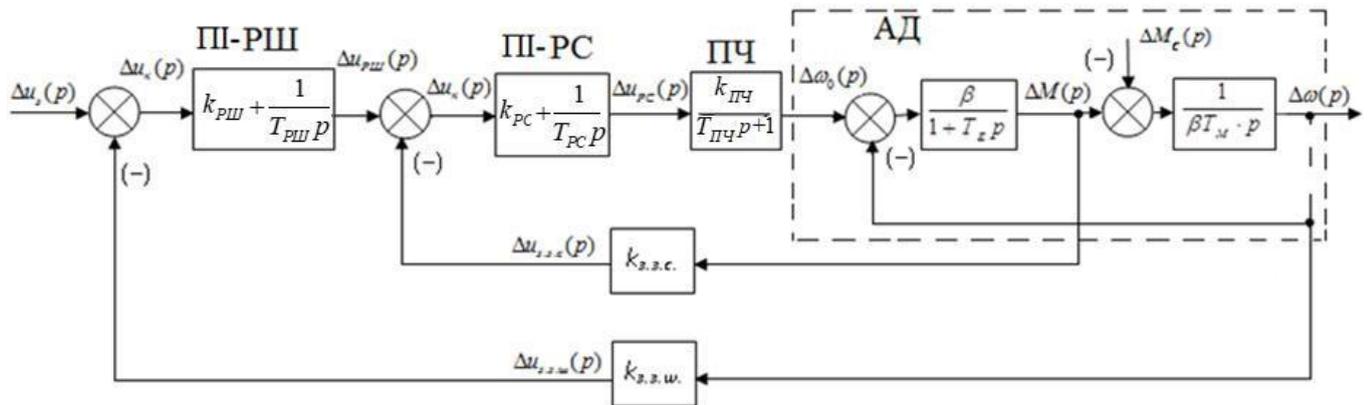


Рисунок 4.8 – Структурна схема електропривода

У відповідності зі структурною схемою передатна функція асинхронного двигуна

$$W_{AD}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p},$$

де T_M – електромеханічна постійна часу двигуна.

Визначення параметрів здійснюється за допомогою перехідних характеристик.

Розрахуємо параметри елементів структурної схеми (рисунок 4.8).

Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів зведені в таблицю 4.1.

Сформована структурна схема обраного електропривода з частотно-струмовим керуванням (рисунок 4.8) є основою для побудови динамічної структурної схеми системи керування електропривода згідно з функціональною схемою (рисунок 4.4).

Таблиця 4.1 - Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів

Параметр	Значення
Типорозмір	АИР132М6У3
Потужність електродвигуна , кВт	7.5
Число пар полюсів p , шт	6
Синхронна частота обертання ротора n_n , об/хв.	1000
Номінальна частота мережі f , Гц	50
Номінальна напруга U , В	380
Номінальний струм статора при 380 В, I_H , А	17.2
Ковзання S_H , %	3,2
ККД, %	89
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$,	0,77
Відношення максимального моменту до номінального, M_{\max}/M_H	2,1
Кратність пускового моменту, $M_{\text{пуск}}/M_H$	2
Кратність пускового струму, $I_{\text{п}}/I_H$	6,5
Момент інерції ротора J_o , кг·м ²	0,0597

Сформована структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні (рисунок 4.7) є основою для побудови динамічної структурної схеми системи керування електроприводом згідно з функціональною схемою (рисунок 4.4).

Для розрахунку параметрів структурної схеми необхідно попередньо визначити відсутні параметри двигуна, технічні данні якого наведені в таблиці 3.1.

Кутова швидкість електромагнітного поля статора ω_c , рад/с,

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c, \quad (4.17)$$

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,16 \text{ рад/с.}$$

Номінальна кутова швидкість ротора двигуна ω_H , рад/с,

$$\omega_H = \frac{\omega_c \cdot (1 - S_H)}{p}, \quad (4.18)$$

$$\omega_H = \frac{314,16 \cdot (1 - 0,032)}{6} = 50,7 \text{ рад/с.}$$

Номінальна момент двигуна M_H , Н·м,

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (4.19)$$

$$M_H = \frac{7500}{50,7} = 147,9 \text{ Н·м}$$

Пусковий момент двигуна M_{II} , Н·м,

$$M_{II} = K_{\text{пуск}} \cdot M_H, \quad (4.20)$$

де $K_{\text{пуск}}$ - кратність пускового моменту, Приймаємо $K_{\text{пуск}} = 2$.

$$M_{II} = 2 \cdot 147,9 = 295,8 \text{ Н·м.}$$

Максимальний момент двигуна M_{\max} , Н·м,

$$M_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_H} \cdot M_H, \quad (4.21)$$

$$M_{\max} = 2,1 \cdot 147,9 = 310,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичене ковзання двигуна $S_{кр} = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ за спрощеною формулою

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H}, \quad (4.22)$$

де $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H} = 2,1.$

$$S_{кр} = 0,032 \cdot (2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1}) = 0,126 = 12,6\%.$$

Для моделювання системи керування електроприводом припускаємо, що характеристика асинхронного двигуна має лінійний вигляд, застосовуючи такі спрощення:

Навантаження змінюється стрибкоподібно, тобто відбувається раптове збільшення або зменшення статичного моменту навантаження.

Рівень обурення не перевищує максимальний момент, який може бути розвинений двигуном. Тому після обурення асинхронний двигун працює на стабільній частині своєї механічної характеристики.

Оскільки двигун взаємодіє з частотним перетворювачем, його робота відбувається на стійкій частині механічної характеристики, яку можна описати математичним виразом.

$$\frac{M_H}{2 \cdot M_{\max} \cdot \omega_c} \cdot p + \frac{S_{кр} \cdot M_H}{2 \cdot M_{\max}} = S_H. \quad (4.23)$$

Напишемо рівняння в такому вигляді

$$\frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_c \cdot S_H}{Z_p} \cdot p + M_H = M_{CT}. \quad (4.24)$$

Рівняння (4.23) спільно з (4.24) складають систему, що описує поведінку асинхронного двигуна в перехідних процесах з урахуванням електромагнітних явищ. Якщо прийняти, що до стрибка навантаження двигун працював в сталому режимі, то цю точку можна покласти точкою з нульовими початковими умовами для подальшого перехідного процесу. Після відповідних перетворень, розглянута система прийме вигляд:

$$(T_E \cdot T_M \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1) \cdot M_H = M_{CT}, \quad (4.25)$$

$$\frac{S_{кр}}{2 \cdot M_{\max}} \cdot (T_E \cdot p + 1) \cdot M_H = S_H, \quad (4.26)$$

де T_E – електромагнітна постійна часу асинхронного двигуна, с;

T_M – електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна, с.

Система рівнянь (4.25) і (4.26) дозволяє отримати передатну функцію розглянутої системи електропривода. Вхідний величиною тут є статичний момент опору M_{CT} , а вихідний – значення кутової швидкості і моменту двигуна.

Передатна функція по ковзанню має вигляд

$$W(p) = \frac{S_{кр}}{2 \cdot M_{\max}} \cdot \frac{T_E \cdot p + 1}{T_E \cdot T_M \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}. \quad (4.27)$$

Визначення параметрів структурної схеми [17]. Модуль жорсткості механічної характеристики АД β , $\frac{H \cdot M}{c^{-1}}$,

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_H \cdot S_H}, \quad (4.28)$$

$$\beta = \frac{147,9}{50,7 \cdot 0,032} = 91,2 \frac{H \cdot M}{c^{-1}}.$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу ланок статора і ротора T_E , с,

$$T_E = \frac{1}{\omega_c \cdot S_{кр}}, \quad (4.29)$$

$$T_E = \frac{1}{314,16 \cdot 0,126} = 0,025 \text{ с.}$$

Сумарний момент інерції електропривода J_Σ , кг·м²,

$$J_\Sigma = J_H + 0,6 \cdot J_H, \quad (4.30)$$

$$J_\Sigma = 0,0597 + 0,6 \cdot 0,0597 = 0,0955 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Тривалість перехідного процесу у двигуні при одномасовій механічній частині характеризується електромеханічною сталою часу. Значення електромеханічної сталої лежить у межах $T_M = (0,08 - 2)$ с і залежить від моменту інерції, електричного опору кола якоря та магнітного потоку.

Електромеханічна постійна часу двигуна T_M , с,

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta}, \quad (4.31)$$

$$T_M = \frac{0,0955}{91,2} = 0,001 \text{ с.}$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю $k_{3.3.Ш}$, В·с,

$$k_{3.3.Ш} = \frac{u_{3.3.Ш.НОМ}}{\omega_H}, \quad (4.32)$$

де $u_{3.3.Ш.НОМ}$ – напруга зворотного зв'язку за швидкістю, $u_{3.3.Ш.НОМ} = 10$ В.

$$k_{3.3.Ш} = \frac{10}{50,7} = 0,2 \text{ В} \cdot \text{с.}$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом $k_{3.3.С}$, $\frac{В \cdot А}{Н \cdot м}$,

$$k_{3.3.С} = \frac{u_{3.3.С.НОМ}}{M_H / I_H}, \quad (4.33)$$

де $u_{3.3.С.НОМ}$ – напруга зворотного зв'язку за струмом, $u_{3.3.С.НОМ} = 10$ В.

$$k_{3.3.C} = \frac{10}{147,9 / 17,2} = 1,16 \frac{B \cdot A}{H \cdot M}.$$

Для первинних розрахунків приймаємо, що величина постійної часу регулятора швидкості $T_{PШ}$ дорівнює величині постійної часу двигуна T_M , а регулятора струму T_{PC} – постійній часу частотного перетворювача $T_{ПЧ}$.

Коефіцієнти підсилення регуляторів k_{PC} і $k_{PШ}$, що відповідають датчикам струму і швидкості, вважаємо рівними 10.

Коефіцієнт підсилення частотного перетворювача приймаємо $k_{ПЧ} = 50$.

Передатна функція перетворювача частоти разом з випрямлячем $W_{ПЧ}(p)$,

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{k_{ПЧ}}{T_{ПЧ} \cdot p + 1}, \quad (4.34)$$

де $T_{ПЧ}$ – постійна часу комутації для транзисторів. Приймаємо $T_{ПЧ} = 0,005$ с.

Передатна функція регулятора струму $W_{PC}(p)$,

$$W_{PC}(p) = k_{PC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p}, \quad (4.35)$$

Передатна функція регулятора швидкості $W_{PШ}(p)$,

$$W_{PШ}(p) = k_{PШ} + \frac{1}{T_{PШ} \cdot p}, \quad (4.36)$$

де $k_{PШ}$ – коефіцієнт передачі регулятора швидкості, $k_{PШ} = 10$;

$T_{PШ}$ – постійна часу регулятора швидкості, $T_{PШ} = T_M = 0,001$ с,

Передатна функція асинхронного двигуна $W_{AD}(p)$,

$$W_{AD}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p}, \quad (4.37)$$

4.3 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода конвеєра завантажування зерна

Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 - Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики	$\frac{H \cdot M}{c^{-1}}$	$\beta = 91,2$
Електромагнітна стала часу	с	$T_E = 0,025$
Електромеханічна постійна часу	с	$T_M = 0,001$
Постійна часу регулятора швидкості	с	$T_{PШ} = 0,001$
Постійна часу перетворювача	с	$T_{ПЧ} = 0,005$
Постійна часу регулятора струму	с	$T_{PC} = 0,005$
Коефіцієнт підсилення (передачі) перетворювача	-	$k_{ПЧ} = 50$
Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості	-	$k_{PШ} = 10$
Коефіцієнт підсилення регулятора струму	-	$k_{PC} = 10$
Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю	В·с	$k_{3.3.Ш} = 0,2$
Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом	$\frac{B \cdot A}{H \cdot M}$	$k_{3.3.C} = 1,16$

Передатні функції ланок:

– асинхронного двигуна:

$$W_{AD}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p};$$

$$W_{AD}(p) = \frac{91,2}{0,025 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{0,091 \cdot p};$$

– перетворювача частоти:

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{k_{ПЧ}}{T_{ПЧ} \cdot p + 1};$$

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{50}{0,005 \cdot p + 1};$$

– регулятора струму:

$$W_{PC}(p) = k_{PC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p};$$

$$W_{PC}(p) = 10 + \frac{1}{0,005 \cdot p};$$

– регулятора швидкості:

$$W_{PШ}(p) = k_{PШ} + \frac{1}{T_{PШ} \cdot p};$$

$$W_{PШ}(p) = 10 + \frac{1}{0,001 \cdot p};$$

– фільтра на вході системи керування:

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{3 \cdot T_{PШ} \cdot p + 1};$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{3 \cdot 0,001 \cdot p + 1} = \frac{1}{0,003 \cdot p + 1};$$

– коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом

$$W_{3.3.C}(p) = k_{3.3.C} = 1,16;$$

– коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю

$$W_{3.3.Ш}(p) = k_{3.3.Ш} = 0,2.$$

Проведений аналіз динамічних властивостей системи автоматичного керування здійснювався шляхом зміни законів керування при розрахункових параметрах, які наведені в таблиці 4.2. Моделювання було виконано в середовищі Simulink пакету MathLab [5].

На схемах, які було використано для моделювання, представлені наступні компоненти:

«Step» — джерело східчастого впливу з амплітудою 10 В.

«Gain1» та «Gain2» — пропорційні складові ПІ-регуляторів швидкості та струму відповідно.

«Transfer Fcn1» та «Transfer Fcn2» — інтегральні складові ПІ-регуляторів швидкості та струму.

«Transfer Fcn3» — передатна функція частотного перетворювача.

«Transfer Fcn4» та «Transfer Fcn5» — лінеаризовані моделі асинхронного двигуна.

«Gain4» та «Gain5» — датчики струму та швидкості відповідно.

Ці компоненти дозволяють здійснити моделювання процесів, які відбуваються в електроприводі з частотним регулюванням, для подальшого аналізу динаміки та оцінки ефективності різних законів керування.

За допомогою блоків «Gain3» та «Gain6» виконується перерахування отриманих даних у відносні одиниці (для спрощення подальшого порівняння).

«Scope1», та «Scope2» – використовуються для отримання графіку перехідного процесу за швидкістю та струмом відповідно.

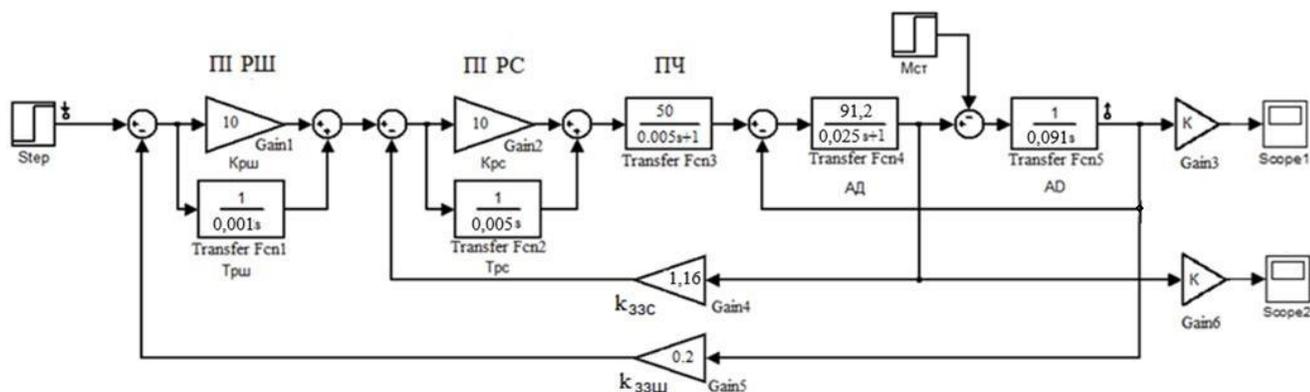


Рисунок 4.9 – Динамічна розрахункова модель системи з ПІ-регулятором швидкості

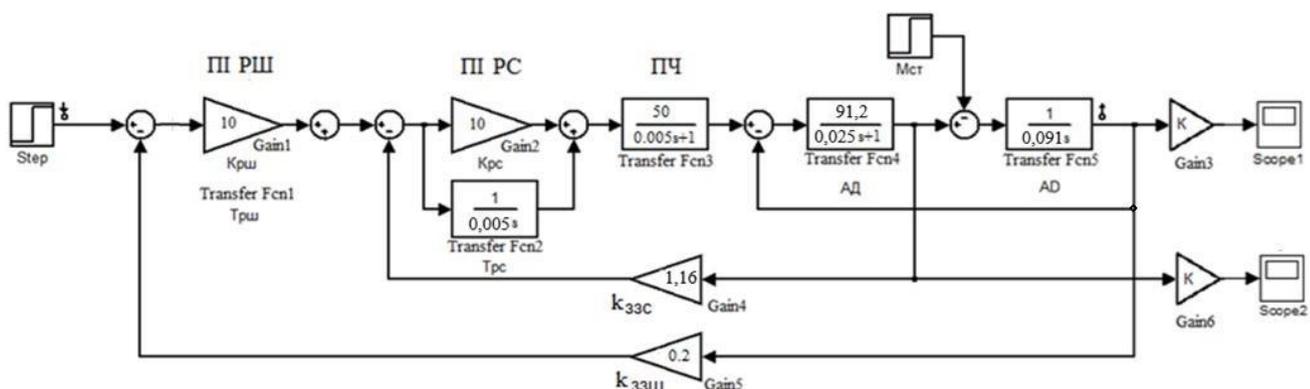


Рисунок 4.10 – Динамічна розрахункова модель з ПІ-регулятором швидкості

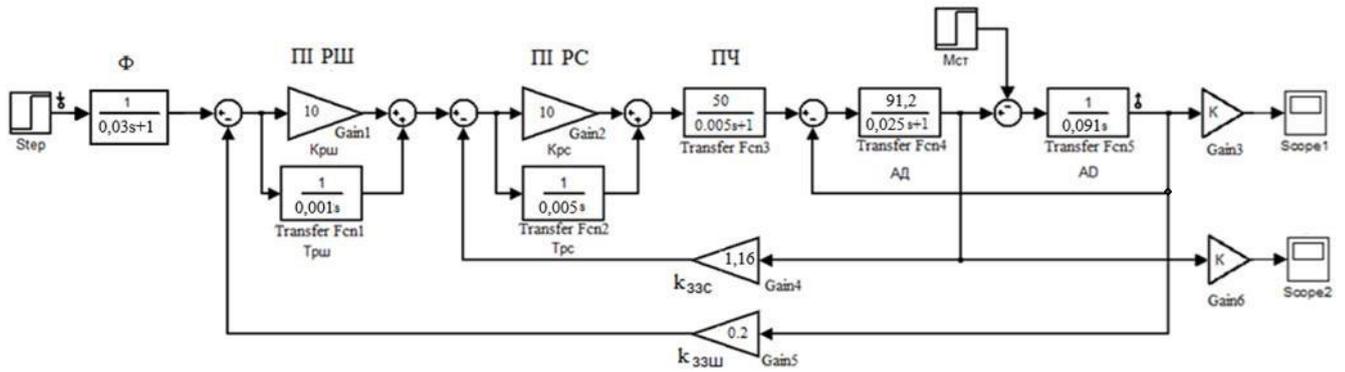


Рисунок 4.11 – Динамічна розрахункова модель з ПІ-регулятором швидкості і фільтром на вході в систему

На рисунках 4.12 та 4.13 наведені результати аналізу для перехідних процесів за швидкістю та за струмом.

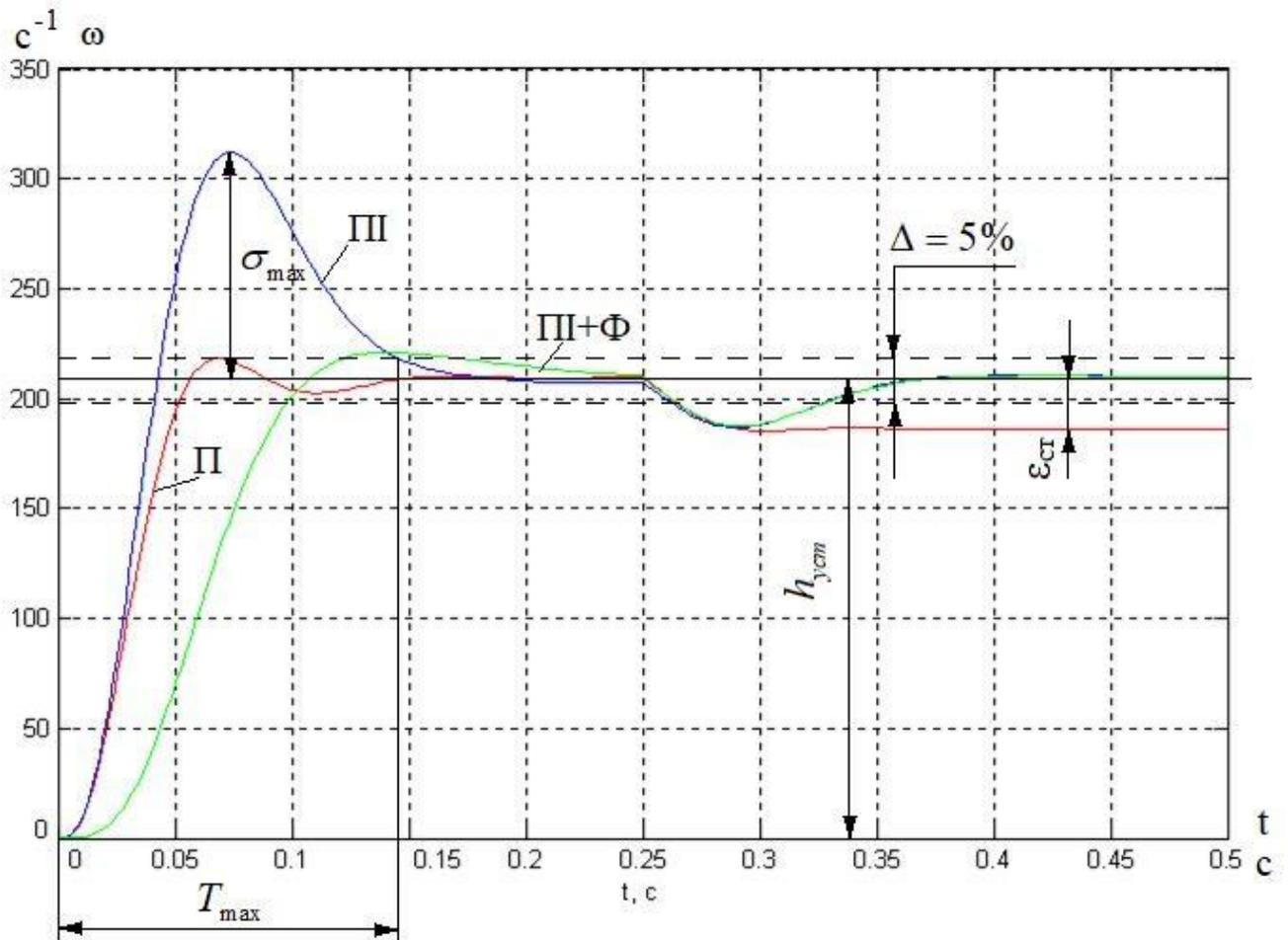


Рисунок 4.12 - Перехідні процеси по швидкості

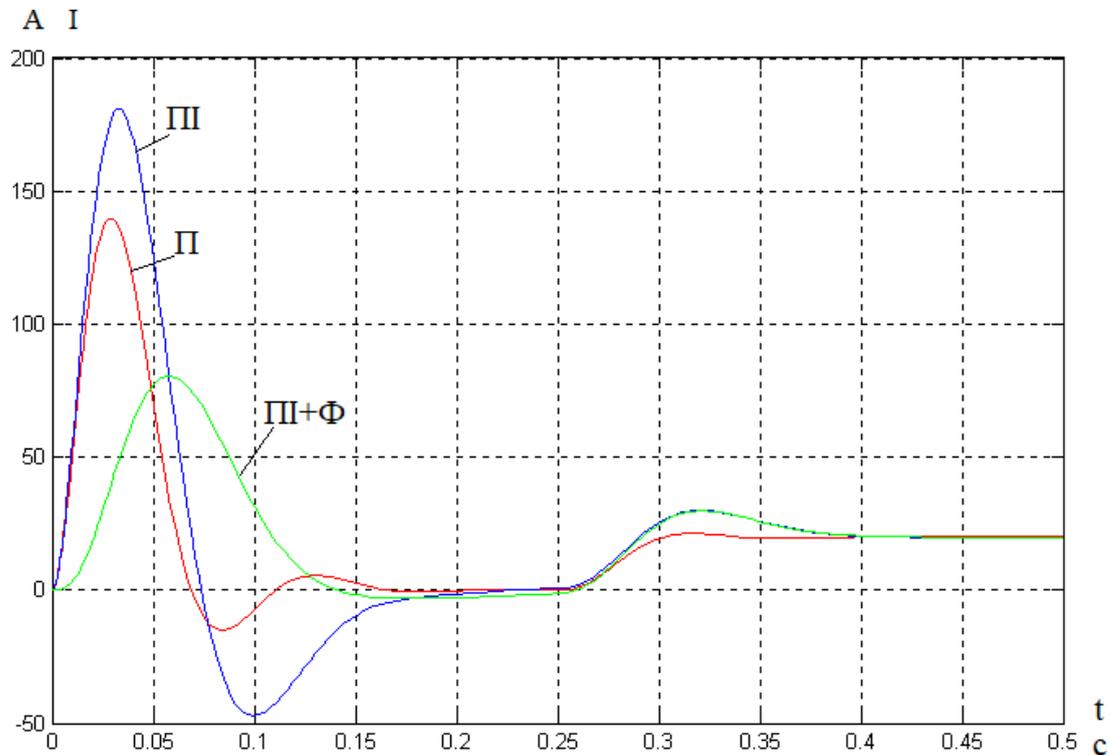


Рисунок 4.13 - Перехідні процеси по струму

Основні показники якості регулювання зведені в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - Основні показники якості регулювання

Тип регулятора	$h_{уст}, c^{-1}$	h_{max}, c^{-1}	$\sigma_{max}, \%$	T_{max}, c	$\epsilon_{ст}, \%$	N
III-регулятор	210	322	53	0,14	0	1
II-регулятор	210	222	5,7	0,06	8	1
III-регулятор з фільтром на вході	210	225	6	0,11	0	1

У результаті моделювання перехідних процесів системи було встановлено, що найкращі показники динаміки досягаються при використанні III-регулятора, налаштованого на симетричний оптимум, у контурі регулювання швидкості. Для зменшення перерегулювання додатково використано фільтр на вхід системи.

Ось основні результати:

При застосуванні III-регулятора перерегулювання склало 53%, що перевищує допустимі 30%; час перехідного процесу — 0,14 с.

При використанні II-регулятора перерегулювання знизилося до 5,7%, але виникла статична похибка 8%, а час перехідного процесу склав 0,06 с.

При введенні аперіодичної ланки (фільтра) на вхід системи з ПІ-регулятором перерегулювання зменшилось до 6%, час перехідного процесу становив 0,11 с, коливальність $N = 1$, а статична похибка була відсутня.

Зважаючи на результати, для системи керування була обрана схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході, що забезпечує найменше перерегулювання та стабільну роботу.

Висновки до розділу 4

У розділі 4 кваліфікаційної роботи розроблено функціональну схему системи керування електроприводом з частотно-струмовим регулюванням. Проведено математичний опис, складено структурну схему та розраховані параметри системи. Також виконано аналіз її динамічних властивостей.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ

2.4 Аналіз небезпек при роботі норії

На виробничих підприємствах, зокрема в машинобудуванні, харчовій та переробній промисловості, активно використовуються підймальні та транспортні механізми для маніпуляцій із вантажами. Для транспортування сипких чи поштучних матеріалів на певну висоту застосовуються елеватори (норії), які мають ковші для роботи з такими матеріалами.

Норії є об'єктами з підвищеним ризиком, і їх експлуатація підпорядкована вимогам безпеки. Основні вимоги до них включають:

Обов'язкове оснащення приладами контролю швидкості, датчиками перевантаження, системами рівномірності руху стрічки, гальмівними системами, кнопками екстреної зупинки та вибухозахисними пристроями.

Регулювання натягу стрічки, герметичність, надійне кріплення компонентів і належне огороження.

Невиконання цих умов може призвести до серйозних аварій, таких як обрив стрічки, вибух або пошкодження механізму.

При експлуатації електродвигунів і ковшових елеваторів існує ризик травм через рухомі частини, що може спричинити серйозні механічні пошкодження. Умови праці при використанні таких механізмів класифікуються за ступенем небезпеки на категорії: оптимальні, допустимі, шкідливі та небезпечні.

Основні небезпечні чинники на таких об'єктах включають: загрозу ураження електричним струмом; вплив вібрації, що може негативно вплинути на здоров'я працівників; шум, який провокує нервові розлади і знижує працездатність; недостатнє освітлення, що може призвести до травм і зниження ефективності праці.

Також слід враховувати вимоги до пожежної безпеки для запобігання загорянням, відповідно до стандартів, таких як ДСТ 12.1.004-91 і НАПБ А.01.001-95. Нормативи також визначають вимоги до конструкцій захисних засобів для

механізмів та безпечної експлуатації конвеєрів.

2.5 Заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання норії

Норії обладнані системами автоматичного відключення приводу в разі зриву ланцюга або пошкодження механізму. Ревізійні люки мають блокувальні замки, які не дозволяють запустити підйомач при їх відкритті. Механізми, що запобігають зворотньому обертанню стрічки чи її падінню, гарантують безпеку під час огляду та обслуговування.

Запуск елеватора можливий лише з визначеної точки, при цьому обов'язково має податися попереджувальний сигнал. Система сповіщення забезпечує зв'язок між точкою запуску та зонами на верхній і нижній частинах норії. Експлуатація елеватора заборонена при недостатньому натягу ланцюга чи стрічки, під час гальмування при подачі вантажу або без підтвердження готовності подальшого обладнання.

Кінцеві вимикачі, блокувальні елементи й системи контролю швидкості повинні перебувати у справному стані. Не можна обходити або виводити з ладу аварійні вимикачі.

Під час проведення робіт, від технічного огляду до капітального ремонту, необхідно повністю знеструмити приводний електродвигун, відключивши всі фази. Це робиться через вимикач, розташований поруч із норією або на її пульті. Очищення та змащування норії дозволяється лише після її повної зупинки.

Зерновий пил, що накопичується всередині норії, може стати джерелом займання або вибуху при підвищених температурах. Регулярне очищення від пилу та бруду є необхідним заходом для запобігання пиловим вибухам.

Технічні заходи для безпечної роботи включають:

Повне знеструмлення електрообладнання та вжиття запобіжних заходів проти мимовільного пуску;

Аварійне вимкнення при обриві тягового елемента, блокуванні завантажувального пристрою чи відсутності захисту електродвигуна;

Встановлення тимчасових захисних бар'єрів і попереджувальних табличок;

Підключення мобільного заземлення до основної заземлювальної шини і перевірка відсутності напруги на заземлених частинах;

Використання спеціальних заземлювальних роз'єднувачів після підтвердження відсутності напруги.

Безпека при роботі з електроустановками забезпечується за допомогою діелектричних рукавиць, вимірювальних приладів, індикаторів напруги та слюсарного інструменту для робіт із лініями до 1000 В. Також використовуються гумові калоші, килимки та ізолюючі підставки.

Для контролю за рівнем пилу в норії рекомендується встановити датчики максимального заповнення, швидкості руху стрічки та бічного зміщення. Додатково бажано встановити сенсори для моніторингу температури опорних вузлів та рівня запиленості.

У приміщенні має бути електрична система пожежної сигналізації з детекторами, а для гасіння початкових загорянь використовуються вогнегасники марки ОХП-4 та ОУ-2А. Первинні засоби пожежогасіння, такі як пісок, багри та відра, зберігаються поруч з обладнанням.

Забороняється: очищати аспіраційні системи руками через оглядові вікна до зупинки механізму; дозволяти накопичення пилу, сміття чи залишків зерна навколо обладнання; перебувати на рамі машини чи відкривати захисні кожухи під час роботи транспортерів; підходити ближче, ніж на витягнуту руку, при відкритті люків, використовуючи спеціальні гаки для цього.

Висновки до розділу 5

В розділі 5 здійснено розгляд чинників, що можуть становити небезпеку чи бути шкідливими під час оперування ковшовими ліфтами, представлено настанови з техніки безпеки з метою запобігання інцидентам при обслузі ковшових ліфтів, включено процедури для забезпечення безпечного використання електроустаткування при роботі з ковшовими ліфтами, згідно з установленими стандартами.

ВИСНОВКИ

Основною метою цього дослідження є удосконалення системи керування електродвигуном зернонавантажувального конвеєра (ківшового елеватора) шляхом впровадження регульованого асинхронного двигуна. Для досягнення цієї мети було проведено аналіз сучасного стану перетворювальної приводної техніки, огляд літератури з методів регулювання швидкості електроприводів та обґрунтування необхідності оновлення системи керування норією.

Об'єктом модернізації обрано систему управління електродвигуном стрічкового ківшового елеватора моделі НЗ-50. В роботі була розроблена структурно-логічна схема магістерського проекту та обрана методологія наукового пошуку. Розрахунковий етап базувався на математичному моделюванні перехідних процесів у контурі керування електродвигуном норії, що дозволило більш точно вивчити поведінку системи.

Було розглянуто типи транспортувального обладнання, сфери застосування елеваторів, а також їх будову та принцип дії, зокрема електричну складову ківшових норій. Порівняльний аналіз наявних типів електродвигунів показав, що для цього проекту найкраще підходить модель АИР132М6У3, яка була обрана для модернізації.

Огляд існуючих систем керування електродвигунами змінного струму дозволив вибрати для електродвигуна норії перетворювач частоти типу OMRON Varispeed F7, що здійснює частотно-струмове регулювання. Дано опис технічних характеристик перетворювача та принципової схеми його підключення.

Особливу увагу було приділено функціональній схемі замкнутого контуру "Перетворювач Частоти – Асинхронний Двигун", в якому використовується векторне (частотно-струмове) керування. Розроблено структурну схему частотно-струмової системи регулювання та виконано розрахунок її параметрів.

Для покращення динамічних характеристик системи були створені математичні моделі її роботи, і проведено оцінку динамічної поведінки при різних законах регулювання. Ось основні результати дослідження:

При використанні ПІ-регулятора (пропорційно-інтегральний) перерегулювання становило $\sigma = 53 \%$, а час досягнення стабільного режиму — $T_{\max} = 0,14$ с.

При застосуванні лише П-регулятора (пропорційного) перерегулювання зменшилося до $\sigma = 5,7 \%$, а час процесу скоротився до $T_{\max} = 0,06$ с, але виникла статична помилка $\varepsilon = 8 \%$.

Включення аперіодичного елемента (фільтра) у систему з ПІ-регулятором дозволило зменшити перерегулювання до $\sigma = 6 \%$, час процесу становив $T_{\max} = 0,11$ с, при цьому статична похибка була усунена ($\varepsilon = 0$). Коливання струму залишалися в межах допустимих значень.

З огляду на ці результати, найкращою конфігурацією для системи керування було обрано поєднання ПІ-регулятора з фільтром на вході, що забезпечило стабільну та безпечну роботу системи.

Висновки показують, що модернізація системи управління позитивно вплинула на її динамічні показники. Отримані результати підтверджують успішне досягнення цілей з оптимізації динамічних характеристик системи управління елеватором.

Також, після аналізу потенційно небезпечних факторів, було визначено необхідні процедури для забезпечення безпечної експлуатації електрообладнання, яке використовується в системах ківшових норій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жигулін О. А., Махмудов І. І., Жигуліна Н. О. Підйомно-транспортні машини: Навчальний посібник. Ніжин, 2020. 150 с.
2. КАТАЛОГ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ AIR.
[https://samsnab.com.ua/docs/Katalog-elektrodvigatelei- AIR-TM-ELMO.pdf](https://samsnab.com.ua/docs/Katalog-elektrodvigatelei-AIR-TM-ELMO.pdf).
3. Бірта Г. О. Методологія і організація наукових досліджень. навч. посіб. / Г. О. Бірта, Ю. Г. Бургу – К. : «Центр учбової літератури», 2014. – 142 с.
4. Видмиш А. А. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
5. Гераїмчук М. Д. Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум / М.Д. Гераїмчук, Ю.Ф. Лазарєв, Т.О. Толочко. – К.:, 2006. – 175с.
6. Грабко В.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. / В.В. Грабко, М.П. Розводюк, С.М. Левицький, М.О. Казак – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
7. Дацишин О.В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв. – Вінниця: Нова книга, 2008.
8. Козуб Ю.Г., Маслійов С.В. Підйомно-транспортні машини: Підручник / Ю.Г. Козуб, С.В. Маслійов – Старобільськ: вид-во ДЗ „ЛНУ імені Тараса Шевченка”, 2018. – 277с.
9. Колесников О. В. Основи наукових досліджень. 2-ге вид. випр.. та доп. Навч. посіб. / О. В. Колесников - К.: Центр учбової літератури, 2011. – 144 с.
10. Ловейкін В.С. Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин. Монографія / В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, М.Г. Діктерук, С.І. Пастушенко - К.- Миколаїв: Вид.-во РВВ МДАУ, 2004.- 286 с.
11. Ловейкін В.С. Тенденції розвитку стрічкових ківшових елеваторів // Національний університет біоресурсів і природокористування України. / В.С. Ловейкін, В.А. Бортунов. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/60814825.pdf> .

12. Ляшук О.Л. Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання / О.Л. Ляшук, Р.Б. Гевко, В.О. Дзюра, О.М. Кирик, А.П. Довбиш. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – 167 с.

13. Норія зернова ковшова стрічкова НКЗ-50 (ковшовий елеватор норія)
<https://agropartner.com.ua/ua/p263499211-noriya-zernovaya-kovshovaya.html>

14. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.

15. Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.

16. Електропривод робочих машин : підручник / П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 290 с

17. . Електропривод : підручник / Лавріненко Ю. М. та ін. ; за ред. Ю. М. Лавріненка. Київ, 2009. 504 с.

18. Практикум з електропривода / Олійник В. С., Марченко О. С., Жулай Є. П., Лавріненко Ю. М. Київ : Урожай, 1995. 190 с.

19. Колб Ант., Колб А.А. Теорія електроприводу: навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.

