

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Удосконалення роботи електропривода тросошайбових транспортерів

Виконав: студент б курсу, групи 601МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Меташок С.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Захарченко Р.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Магістр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри автоматки,  
електроніки та телекомунікацій**

О.В. Шефер

“ 03 ” вересня 2021 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
**Меташку Станіславу Васильовичу**

**1. Тема проекту (роботи) «Удосконалення роботи електропривода тросошайбових транспортерів».**

керівник проекту (роботи) Захарченко Р.В., к.т.н., доцент

затверджена наказом вищого навчального закладу від “25” серпня 2021 року №688фа.

**2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.12.2021 р.**

**3. Вихідні дані до проекту (роботи) планова (змінна) продуктивність транспортера – 12000 роздач; зміна – 8 годин; найбільший кут нахилу транспортера – 30 °С; потужність електропривода – 2,2 кВт; швидкість обертання – 1500 об/хв.**

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Загальні відомості. Приготування кормів. Засоби роздачі кормів на свинофермах. Опис об'єкту автоматизації. Особливості режимів роботи підвісних транспортерів і вимоги, що ставляться до електроприводів транспортерів. Типи електроприводів, призначених для транспортерів. Принципи роботи, переваги і недоліки. Перспективи використання частотно-регульованих електроприводів. Вибір електродвигуна для приводу транспортерів і розрахунок його параметрів і характеристик. Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення електродвигуна. Розрахунок природних механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна. Розрахунок штучних механічних характеристик електродвигуна при законі  $U/f = \text{const}$  частотного регулювання. Вибір перетворювача частоти. Опис перетворювача частоти. Розрахунок енергетичних показників електродвигуна. Математична модель і структурна схема асинхронного двигуна транспортера. Розрахунок параметрів об'єкта керування. Структурна схема системи «перетворювач частоти - асинхронний двигун» і розрахунок її параметрів. Вибір віртуальної моделі електроприводу і дослідження перехідних процесів. Вибір складу периферії ПЧ для забезпечення умов гальмування, електромагнітної сумісності роботи електродвигуна в умовах комутації. Підбір силових елементів комутації та захисту. Розрахунок економічної ефективності.**

**5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):**

1. Технологічна схема готування та роздачі корму на свинокомплексі.
2. Функціонально-технологічна схема тросошайбового кормороздавача.
3. Схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електроприводу тросошайбового транспортера з автономним інвертором напруги.
4. Структурна схема електропривода транспортера.
5. Дослідження статичного режиму роботи електропривода транспортера.
6. Дослідження динамічного режиму роботи електропривода транспортера.
7. Схема електрична принципова силової частини електропривода тросошайбового транспортера.
8. Схема електрична принципова електропривода тросошайбового транспортера.
9. Таблиця техніко-економічних показників.

**6. Консультанти розділів проекту (роботи)**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економіка	Григор'єва Олеся Володимирівна, к.е.н., доцент		

**7. Дата видачі завдання 03.10.2021 р.****КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

<u>Пор. №</u>	<u>Назва етапів магістерської роботи</u>	<u>Термін виконання етапів роботи</u>			<u>Примітка (плакати)</u>
<u>1</u>	Загальні відомості. Приготування кормів. Засоби роздачі кормів на свинофермах. Опис об'єкту автоматизації. Особливості режимів роботи підвісних транспортерів і вимоги, що ставляться до електроприводів транспортерів	<u>10.10.21</u>		<u>10%</u>	<u>Пл. 1</u>
<u>2</u>	Типи електроприводів, призначених для транспортерів. Принципи роботи, переваги і недоліки. Перспективи використання частотно-регульованих електроприводів	<u>15.10.21</u>		<u>20%</u>	<u>Пл. 2</u>
<u>3</u>	Вибір електродвигуна для приводу транспортерів і розрахунок його параметрів і характеристик	<u>27.10.21</u>	<u>I</u>	<u>30%</u>	<u>Пл. 3</u>
<u>4</u>	Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення електродвигуна. Розрахунок природних механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна	<u>02.11.21</u>		<u>40%</u>	<u>Пл. 4</u>
<u>5</u>	Розрахунок штучних механічних характеристик електродвигуна при законі $U/f = \text{const}$ частотного регулювання. Вибір перетворювача частоти.	<u>10.11.21</u>		<u>50 %</u>	<u>Пл. 5</u>
<u>6</u>	Математична модель і структурна схема асинхронного двигуна транспортера. Розрахунок параметрів об'єкта керування. Структурна схема системи «перетворювач частоти - асинхронний двигун» і розрахунок її параметрів	<u>24.11.21</u>	<u>II</u>	<u>60%</u>	<u>Пл. 6</u>
<u>7</u>	Вибір віртуальної моделі електроприводу і дослідження перехідних процесів	<u>30.11.21</u>		<u>70%</u>	<u>Пл. 7</u>
<u>8</u>	Вибір складу периферії ПЧ для забезпечення умов гальмування, електромагнітної сумісності роботи електродвигуна в умовах комутації. Підбір силових елементів комутації та захисту	<u>04.12.21</u>		<u>80%</u>	<u>Пл. 8</u>
<u>9</u>	Розрахунок економічної ефективності	<u>10.12.21</u>		<u>90%</u>	<u>Пл. 9</u>
<u>10</u>	Оформлення магістерської роботи	<u>15.12.21</u>	<u>III</u>	<u>100%</u>	

Магістрант \_\_\_\_\_  
( підпис )

Меташок С.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Захарченко Р.В.  
(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

	стор.
<b>ВСТУП</b>	6
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА</b>	
1.1 Загальні відомості	8
1.2 Приготування кормів	10
1.3 Засоби роздачі кормів на свинофермах	11
1.4 Опис об'єкту автоматизації	22
1.5 Особливості режимів роботи підвісних транспортера і вимоги, що ставляться до електроприводів транспортера	24
1.6 Типи електроприводів, призначених для транспортера.	
Принципи роботи, переваги і недоліки	25
1.7 Перспективи використання частотно-регульованих електроприводів	29
<b>РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА</b>	
2.1 Вибір електродвигуна для приводу транспортер і розрахунок його параметрів і характеристик	33
2.2 Розрахунок природних механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна	38
2.3 Розрахунок штучних механічних характеристик електродвигуна при законі $U/f = \text{const}$ частотного регулювання	46
2.4 Вибір перетворювача частоти	55
2.5 Опис перетворювача частоти E2-8300-S3L	59
2.6 Розрахунок енергетичних показників електродвигуна	65
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТРОСОШАЙБОВОГО ТРАНСПОРТЕРА ТА ВИБІР ПЕРИФЕРІЇ ПЧ</b>	
3.1 Математична модель і структурна схема асинхронного двигуна транспортера	68
3.2 Розрахунок параметрів об'єкта керування	71
3.3 Структурна схема системи «перетворювач частоти –	

асинхронний двигун» і розрахунок її параметрів	72
3.4 Вибір віртуальної моделі електроприводу і дослідження перехідних процесів	74
3.5 Вибір складу периферії ПЧ для забезпечення умов гальмування, електромагнітної сумісності роботи електродвигуна в умовах комутації	79
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>	
4.1. Техніко-економічне обґрунтування	80
4.2. Визначення витрат на розроблення САК транспортера	80
4.3. Розрахунок річного фонду роботи САК транспортера	82
4.4. Розрахунок річної експлуатаційної САК транспортера	83
4.5. Розрахунок поточних річних витрат	84
4.6. Розрахунок вартості машино–години роботи	86
4.7. Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції	87
4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації	87
<b>ВИСНОВКИ</b>	90
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>	91
<b>ДОДАТКИ</b>	

## ВСТУП

У сучасному світі важливим фактором підвищення економічної ефективності суб'єктів господарювання та поліпшенням умов праці є автоматизація технологічних процесів. Об'єкти сільськогосподарської галузі також оснащуються засобами автоматизації. Комплексна автоматизація низки технологічних процесів є конче необхідною при складних виробництвах будь-якого напрямлення.

Для масовості автоматизації технологічних процесів у сільському господарстві, необхідна комплексна механізація та електрифікація усього сільськогосподарського виробництва. Через високу собівартість вітчизняна сільськогосподарська продукція не є конкурентоспроможною у повній мірі. Свинарство, як частина сільськогосподарської вітчизняної галузі, також не є конкурентоспроможним.

В Україні свинарство є найбільш ефективною галуззю тваринництва, тому її розвитку в державі приділяється значна увага. Слід зазначити, що автоматизація в сільському господарстві, а саме в тваринництві, має свої особливості. Через те, що основні технологічні процеси виробництва сільськогосподарської продукції пов'язані з біологічними процесами, то необхідно враховувати умови утримання тварин. Постійне поліпшення таких умов приведе, в результаті, до збільшення виходу продукції та підвищення її якості.

Метою даної магістерської роботи є підвищення ефективності керування процесом приготування та роздачі кормів на свинокомплексі.

Виділимо основні задачі, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети:

- проведення аналізу технологічного процесу як об'єкта автоматизації;
- проведення аналізу рівня автоматизації технологічної лінії;
- вибір функціональної схеми керування;

- вибір електродвигуна для приводу транспортер і розрахунок його параметрів і характеристик
- розрахунок природних механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна;
- розробка математичної моделі і структурна схема асинхронного двигуна транспортера;
- вибір віртуальної моделі електроприводу і дослідження перехідних процесів;
- вибір складу периферії ПЧ для забезпечення умов гальмування, електромагнітної сумісності роботи електродвигуна в умовах комутації;
- підбір силових елементів комутації та захисту.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Загальні відомості

Місце утримання великої кількості свиней, кормів та тривалого зберігання органічних відходів має назву – свинокомплекс. Свинокомплекс – це ряд технологічно об'єднаних споруд та об'єктів, призначених для повного технологічного циклу свинарства – від народження до забою та переробки м'яса свиней. На рисунку 1.1. схематично наведений генеральний план типового свинокомплексу.

Утримують тварин у спеціальних приміщеннях – свинарниках. У кормоцехах виготовляють кормові суміші. Надалі кормові суміші транспортером направляються до кормушок, де безпосередньо харчуються свині, що утримуються у свинокомплексі [3].

Традиційно у свинарстві застосовують стаціонарні системи роздачі сухих та рідких кормових сумішей для, відповідно, сухого (застосовують 80% ферм) та рідкого (застосовують 20% ферм) типу годівлі.

Сухий тип годівлі свиней є більш популярним, через менш високі інвестиційні витрати на установку устаткування, не складне обслуговування такого устаткування та високий рівень санітарно-гігієнічного стану свинарника. На всіх сучасних світових та вітчизняних свинокомплексах для швидкої та якісної роздачі комбікормів застосовують автоматизовані технічні засоби при годівлі всіх статевовікових груп свиней. Слід зазначити, що досхоchu годують свиней на відгодівлі та поросят на дорощуванні. Всі інші статевовікові групи свиней харчуються за чітким порціонним раціоном [10].

Для постійної автоматичної подачі корму, годівниці мають бути зроблені так, щоб в міру поїдання корму тваринами, він надходив знову згідно встановлено раціону. Через спеціальні кормові проводи корм надходить у приміщення свинарника із зовнішнього бункера. Якщо

приміщення свинарника має складну конфігурацією, то необхідно застосовувати ланцюгово-шайбові транспортери.

На спеціальному вигодовуванні знаходяться свиноматки з підсисними поросятами та холосто-поросні свиноматки. Для свиноматок з підсисними поросятами годівницю закріплюють в огороженні, і в певний час, у заданому обсязі через дозатор їм подається кормова суміш. Аналогічно вигодовуються холосто-поросні свиноматки при індивідуальному утриманні [24].

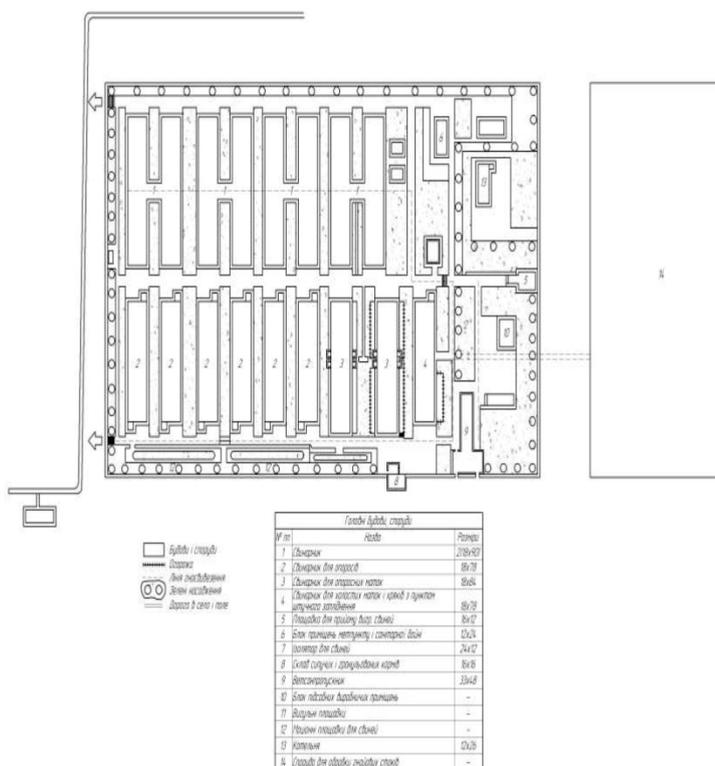


Рисунок 1.1 – Генеральний план свинокомплексу

При груповому утриманні свиноматок у свинокомплексі, технологія годування є складнішою, адже кожній свиноматці чітко відміряється та згодовується її дози. Це є головною особливістю технології годівлі свиноматок при груповому утриманні. Також необхідно не допускати відтискування більш сильними особами слабких тварин від їхніх кормових місць. Роздавання кормової суміші організовується досить швидко, щоб

свиноматка поїдала її не відходячи до іншої годівниці. Для цього система кормової роздачі обладнується індивідуальними дозуючими пристроями [20].

## 1.2 Приготування кормів

Технологія приготування кормів для свиней є важливою та трудомісткою технологічною операцією. Питома вага (приблизно 50-60%) у загальних витратах праці на одиницю продукції припадає саме на приготування кормів. Зауважимо, що 60-80% від собівартості одиниці продукції становить вартість готових кормів. Існує поширена практика вигодовування свиней кормовими сумішами власного виробництва.

Всі кормові суміші потребують попередньої обробки. Ця процедура необхідна для підвищення ефективності використання поживної маси – кращого засвоєння організмом свині, підвищення поживності та зниження захворювання тварин. Обробка кормової суміші – це одна або декілька послідовних технологічних операцій на належному рівні [20].

Перед згодовуванням кормів тваринам їх готують до вживання. Така підготовка може бути механічна, теплова, хімічна або біологічна.

Розглянемо механічні способи підготовки кормів. До них відносяться подрібнення та розпилювання, зволоження та ретельне очищення від домішок, а також безпосередньо приготування кормових сумішей. Якщо перед згодовуванням тварині корм розпарюють, то це є теплова обробка кормових сумішей. Вапнування, обробка лугом або кислотою є хімічною обробкою комбікормів. Якщо відбувається силосування або дріжджування корму, то це біологічний спосіб за участю мікроорганізмів.

Запорукою продуктивності тварин, зниження їх захворюваності та, в результаті, отримання найбільшої економічної вигоди, є правильний вибір того чи іншого способу підготовки кормів до уживання [12].

Отже, до технологічних схем підготовки та роздачі кормів сьогодення можна віднести:

1) виготовлення власних повноцінних комбікормів або доставка їх зі спеціалізованих заводів, роздавання кормів та згодовування їх у сухому вигляді.

2) виготовлення власних рідких кормових сумішей у кормоцеху на основі комбікормів та роздавання кормових сумішей насосами. У такому випадку можлива комбінація комбікормів та відходів цукрових заводів, молокозаводів, м'ясокомбінатів, пивзаводів тощо. Продуктивність свиней підвищується до 15%, адже засвоюваність рідких кормів вища. Оскільки вологість рідких кормових сумішей близько 80%, то можна повністю відмовитись від поїлок, що, в свою чергу, знизить витрати на вигодовування свиней. Поряд з такими перевагами є й недоліки рідкої кормо роздавальної системи. Передусім, вони пов'язані з очищенням трубопроводів та годівниць від залишків корму, що закисає. У зв'язку з корозією елементів системи роздачі корму, вона швидко виходить з ладу.

3) приготування власних поживних вологих мішанок з вологістю до 75%. Такі мішанки виготовляються з додаванням з силосу, концентратів, сінажного борошна тощо. Для їх приготування потрібно будівництво окремого кормоцеху, тому ця схема менше застосовується на практиці.

4) збирання поблизу великих комбінатів харчування та великих міст, підготовка та знезаражування харчових відходів у спеціальному кормоцеху та роздача спеціальними мобільними роздавальниками [3].

### **1.3 Засоби роздачі кормів на свинофермах**

На рисунку 1.2 зображена типова система автоматичної рідкої годівлі HYDROMIX, що виготовляється у Німеччині фірмою Bigdutchman (рис. 1.2).

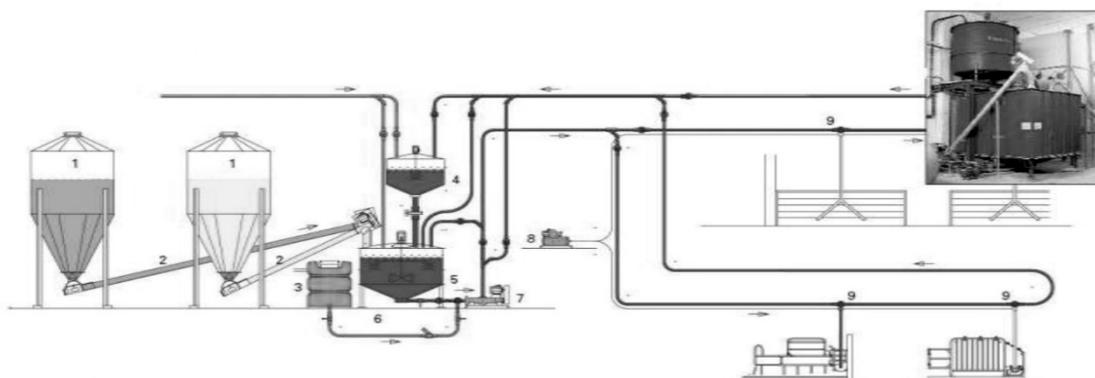


Рисунок 1.2 – Система HYDROMIX із промиванням труб:

- 1 – бункер для комбікорму; 2 – кормовий шнек; 3 – ємність для свіжої води;  
 4 – ємність для технічної води; 5 – ємність змішування; 6 – електронні ваги;  
 7 – кормовий насос; 8 – компресор; 9 – кормовий вентиль

Технологічна схема рідкої годівлі свиней має складнішу технологічну схему, ніж сухими комбікормами. На рисунку 1.3 зображена технологічна схема процесу роздачі сухих кормових сумішей у свинарнику [3].

Системи сухої годівлі, в свою чергу, за варіантами комплектації поділяються на систему сухої годівлі з роздачею корму в об'ємні дозатори (вигодовування свиноматок) або роздачею корму в кормові автомати (вигодовування поросят). За допомогою кормових автоматів відбувається роздача сухих кормових сумішей для поросят усіх вікових груп. Кормові автомати розраховані на групову годівлю свиней. В залежності від віку тварини, кожний кормовий автомат може нагодувати до 60 свиней.

Сухі комбікорми зазвичай є гранульованими. Виділимо основні переваги сухого вигодовування свиней. Серед таких, підвищення засвоюваності та часткове знезаражування, простіший механізм автоматизації процесу роздавання кормів, зменшення втрат при поїданні корму свинями, а також зниження безпосередньо обсягів кормів, що, в свою чергу, призведе до зниження потреби в складських приміщеннях та транспортуванні [10].

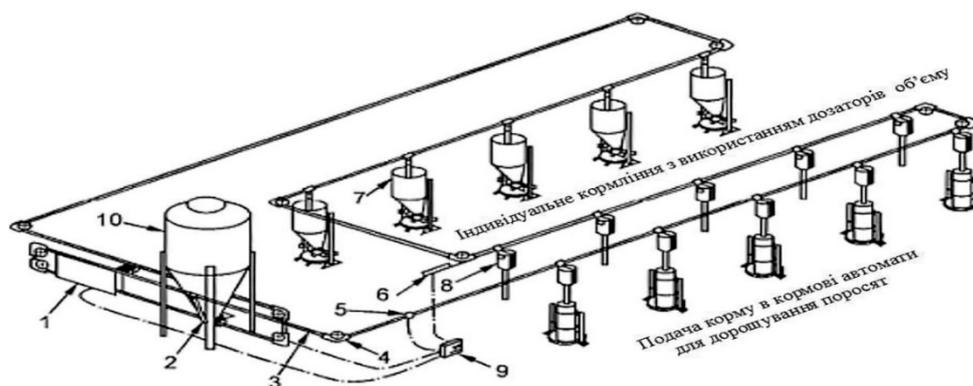


Рисунок 1.3 – Технологічна схема процесу роздачі сухих комбікормів у свинарнику

1 – привід тросошайбового кормового роздатчика; 2 – прийомна воронка;  
 3 – тросошайбовий транспортер; 4 – поворотний пристрій; 5 – сенсор відключення подачі кормів; 6 – привід об'ємних дозаторів кормів; 7 – спускна труба; 8 – об'ємний дозатор; 9 – керуючий пристрій; 10 – бункер для зберігання сухих кормів

Типова автоматична система роздачі кормів – це комплекс наступних елементів: трубопровід, що складається зі сталевий оцинкованої тонкостінної труби кормового проводу та з пластикових кутиків, по яких корм транспортується в об'ємні дозатори або кормові автомати. Через такий трубопровід протягнуто шайботрос. Шайботрос – це сталевий трос із литими пластиковими дисками. Висота проведення кормового проводу близько двох метрів [12].

Поки всі кормові апарати не заповняться кормом, система годівлі буде працювати. Це є її основним принципом роботи. Коли кормові апарати або дозатори наповнюються останньою кормовою дозою, то система зупинки подає сигнал на блок керування для зупинки транспортера. Вищенаведений процес є основною функцією системи годівлі свиней.

Близько тваринницьких приміщень розташовані спеціальні бункери, де зберігається оперативний запас сухої суміші. Такі бункери можуть бути виготовлені з металу або скловолокна, бути гладкими або рифленими [20].

Використання контурної системи транспортування комбікормів до дозаторів та годівниць буде доцільним у приміщеннях свинокомплексу з великою кількістю вигинів, поворотів та різницею в рівнях. У такому випадку, можна використовувати такі види транспортерів кормів як спіральні, ланцюгові або тросові (рис. 1.4).

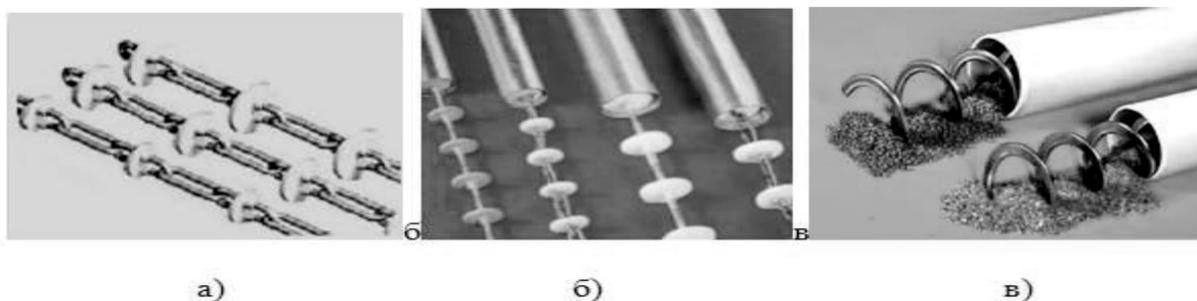


Рисунок 1.4 – Транспортери кормів:  
а – ланцюговий; б – тросовий; в – спіральний

У зарубіжних та вітчизняних свинокомплексах на практиці, зазвичай, для транспортування сипучих кормів застосовують транспортну спіраль. Транспортна спіраль виготовляється із гнучкої високоякісної сталі. Отже, до основних переваг спіральних транспортерів відносяться:

- вони є універсальними для кожного виду приміщення, мають швидкий та нескладний монтаж, мають редукторний двигун;
- їх метою є підвищеної продуктивності загалом, поряд з економією кутових коліс;
- мають холостий хід лінії до кормового бункера та можливість згрупування одного гнучкого шнека із двома, а також більшою кількістю контурів [24].

Дозатори, що зазвичай застосовуються у клітках для тварин, є з вертикальним заповненням до встановленого обсягу дозатора (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Приміщення з дозаторами вертикального заповнення

Дані дозатори є елементом єдиної керованої від пульта системи автоматизованої роздачі корму. Вони просто й чітко встановлюють дози та обсяги кормових сумішей. Відкривається дозатор через пуль керування системи автоматизованої роздачі корму свинарника [3].

У сучасному світі та на вітчизняних свинокомплексах вже поряд із стаціонарними, застосовують і мобільні кормороздавачі. Їх функцією є транспортування та роздача комбікормів в індивідуальних стойках.

У свинарниках тварин годують багаторазово. Якщо це свинарник-відкормлювач, то свиней годують 5 раз у добу з інтервалом 4, 8, 12, 16 або 20 годин. Суміш видається автоматично невеликими порціями згідно встановленої норми об'ємними дозаторами для кожної вікової групи (наприклад, 1...3,5 кг за одну дозу). У верстат подається повна норма комбікорму за всі повні цикли кормового роздатчика. В залежності від зональних особливостей, способу годівлі, умов утримання свиней та організації робіт на свинокомплексі здійснюється вибір типу кормового роздатчика. По мірі зростання свиней норми корму збільшують відповідно [10].

Зазначимо, що змішувачі КС-1,5, КЕС-1,7, РС-5А є популярними мобільними електрифікованими кормороздавачами у всьому світі. Вони можуть змішувати та роздавати кормові суміші вологістю 60...80%.

Мобільний електрифікований кормороздавач КСП-0,8 застосовується для нормованого роздавання комбікормів у свинарниках-маточниках свиноматкам та поросяткам-сисунам. Такі кормороздавачі завантажуються кормами, що надходять готові з кормоцеху, за допомогою транспортера. Принципи роздачі кормів у всіх кормових роздатчиках майже аналогічний [20].

Для змішування й роздачі напіврідких кормових сумішей на фермах використовується пересувний кормовий роздатчик КС-1,5. Фактично це рейковий самохідний візок з двома парами коліс у вигляді бункера. Візок обладнаний механізмом приводу, керування та електроустаткування. До мережі електродвигун підключається кабелем, що розташований у спеціальній ринві. Кормова суміш завантажуються через отвір у верхній частині бункера. В середині бункера розташовуються відвантажувальні шнеки та мішалка з лопатами. Зазначимо, що керування роздавальником є напівавтоматичним. Включення та вимикання мішалки з лопатками, вивантажувального шнека й керування переміщенням кормового роздатчика здійснюється за допомогою кулачкових муфт, які перемикає оператор. Поворотом заслінок у місцях приєднання вивантажувальних шнеків регулюється норма видачі кормів згідно встановленої дози. Коли заслінка одного зі шнеків перекривається повністю, то видачі кормів на відбувається на одну сторону.

На рисунках 1.6 та 1.7 зображений кормороздавач-змішувач КС-1,5 та його схема. Фактично це бункер на візку з опорними колесами, який переміщується по спеціальним рейкам-шляхам за допомогою електроприводу [24].

Для дозованого роздавання кормової суміші вологістю до 75 % з розмірами часток не більше 10 мм у групові годівниці на свинофермах застосовується кормороздавач вологих кормових сумішей КВК-Ф-15.

Як бачимо на рисунку 1.7 кормороздавач складається із бункера-живильника 1, шафи керування 2, електронасосного агрегату 3, перемикача

потоків 4, кормового проводу 5, механізму відкриття клапанів 6, напрямної 7, відводів 8 та електроконтактного манометра 9.

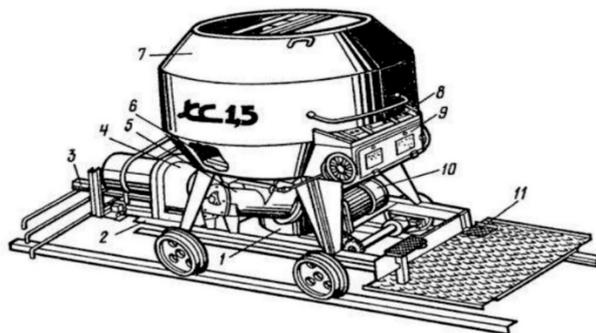


Рисунок 1.6 - Кормороздавач-змішувач КС-1,5

1 – розподільча коробка; 2 – ходова частина; 3 – пристрій зупинки кормороздавача при зіткненні з перешкодами; 4 –редуктор-змішувач; 5 – вивантажувальні шнеки; 6 – мішалка; 7 – бункер-змішувач; 8 – пульт керування; 9 – панель приладів; 10 – електродвигун механізму переміщення; 11 – педаль гальма

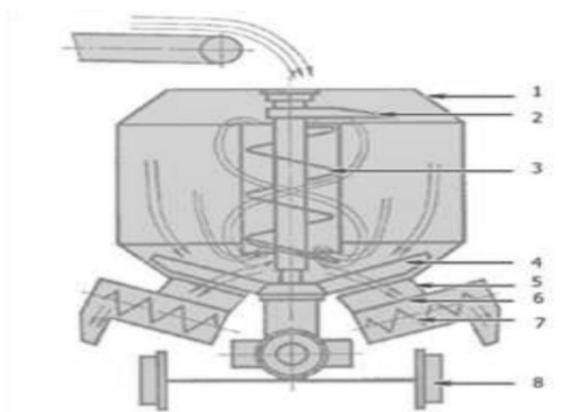


Рисунок 1.7 – Конструктивно-технологічна схема кормороздавача КС-1,5  
1 – бункер; 2 – розрівнювач; 3 – вертикальний шнек; 4 – лопатева мішалка; 5 – камера; 6 – заслінка; 7 – вивантажувальний шнек; 8 – ходова частина

Електронасосний агрегат ІВ 20/10 це поєднання електродвигуна, гвинтового насосу та проміжного корпусу. Триходовий кран, який складається з корпусу, кришок та барабана є перемикачем потоку.

Кормовий провід є сталюю трубою діаметром 80 мм з вікнами для витікання корму та отвори для тросів випускних клапанів.

Визначено, що електродвигун, штанга з упорами, черв'ячний редуктор, напрямна, двоплечі важелі та зубчаста рейка входять до складу механізму відкриття клапанів [3].

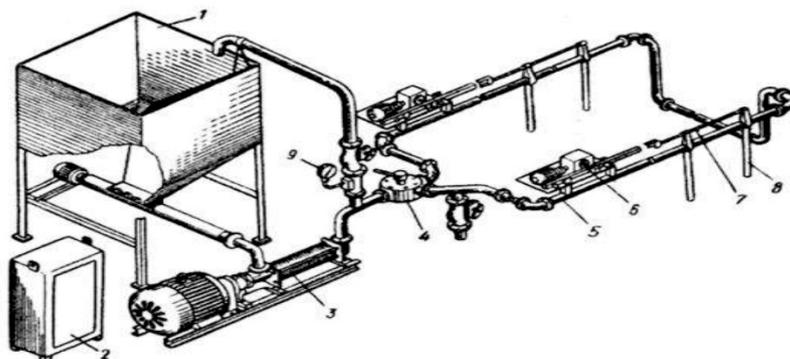


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд кормороздавача вологих кормових сумішей  
КВК- Ф-15:

- 1 – бункер-живильник; 2 – шафа керування; 3 – електронасосний агрегат  
4 – перемикач; 5 – кормовий провід; 6 – механізм відкриття клапанів;  
7 – напрямна; 8 – відвід; 9 – електроконтактний манометр

Випускний клапан являє собою пластмасовий конус з жорстко закріпленим співвісним йому тросом, на якому фіксується упор.

Послідовність процесу роботи кормороздавальної гідравлічної системи зображена на рисунку 1.9.

Отже, гвинтовим насосом нагнітається через перемикач потоку в кормовий провід комбікорм. Потім послідовно відкриваються випускні вікна та корм по відводам спрямовується у годівниці, згідно програми, встановленою реле часу. Штанга автоматично повертається у вихідне положення, після видачі кормової суміші, через вимикання електронасосного агрегату. Процес повторюється після встановлення перемикача потоку для заповнення наступного кормового проводу [20].

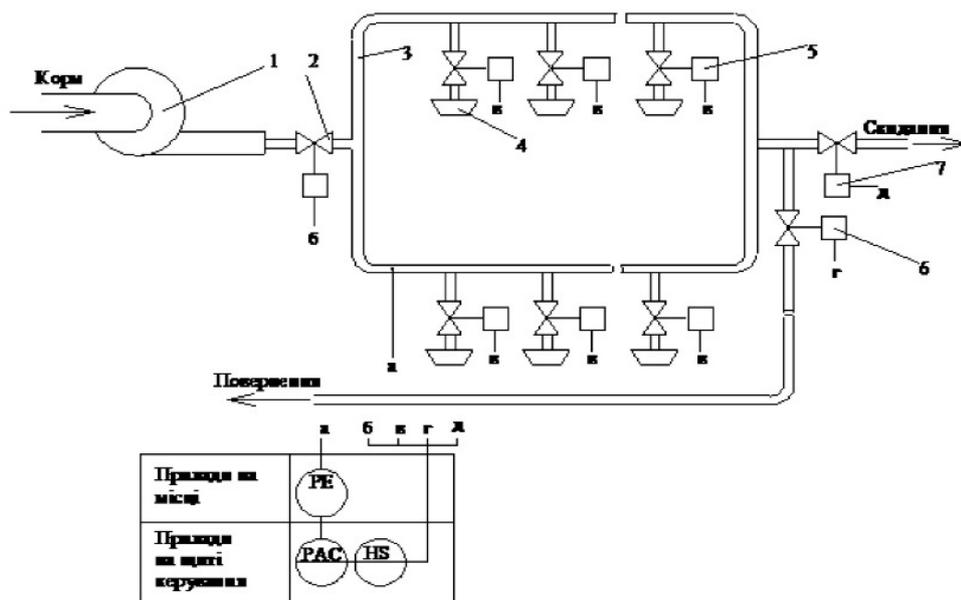


Рисунок 1.9 – Функціональна схема автоматизації кормороздавальної гідравлічної системи

1 – гідронасос; 2 – головний клапан; 3 – лінія кормової роздачі; 4 – годівниця; 5 – місцевий клапан дозування; 6 – клапан повернення; 7 – клапан скидання

При нормованій годівлі сухими комбікормами використовуються тросошайбові кормороздавачі. На функціональній схемі автоматизації, що зображена на рисунку 1.10, наведено правильне керування роздачею кормів [12].

З бункера добової норми видачі корму БСК1 шнековим транспортером комбікорм подається на проміжний бункер 2. БСК1 знаходиться поза тваринницьким приміщенням, а бункер 2 знаходиться в приміщенні свиноферми. З проміжного бункера корм переміщується по кормового проводу тросошайбовим транспортером. Через отвори в кормовому проводі комбікорм подається в індивідуальні або групові дозатори 3.

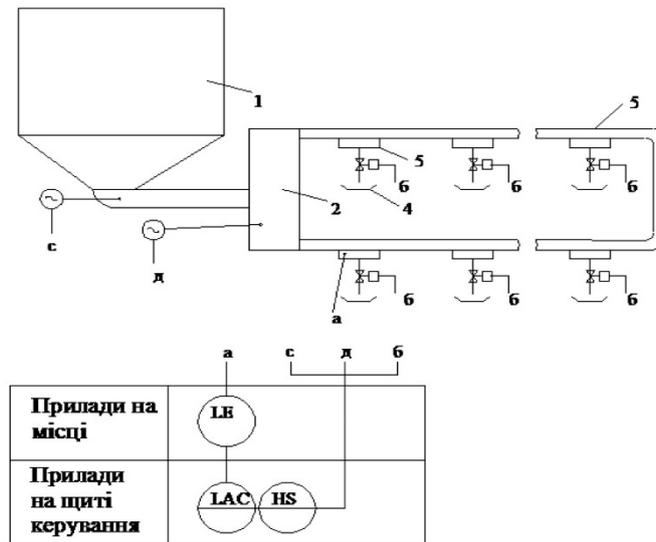


Рисунок 1.10 – Функціонально-технологічна схема тросошайбового кормороздавача

Датчик рівня LE В встановлено останньому індивідуальному дозаторі. На регулятор рівня сигналізуючи LAC потрапляє сигнал про готовність видачі корму з датчика рівня [24].

В залежності від рівня кормів у індивідуальних дозаторах, регулятор рівня забезпечує двохпозиційне керування електроприводом завантажувального шнека та тросошайбового транспортера. Шляхом одночасного ввімкнення заслінок з електромагнітним приводом, відбувається видача кормових сумішей по команді від програмного пристрою KS в певний час.

На практиці при ненормованих видачах сипких кормів в свинарниках доречним буде використання спіральних кормороздавачів, які по структурі аналогічні з тросошайбовими [10].

Як і в попередній системі в бункерах БСК, зберігається добова норма видачі кормів. Комбікорм подається спіральними транспортерами з бункера БСК до проміжного бункера та дозаторів по трубопроводам. Постійну наявність корму в дозаторах забезпечує електропривод спірального транспортера, що має програмне керування. Індивідуальні чи групові

дозатори мають лише регулювальні заслінки, саме тому кормова суміш в годівницях є постійно та свиня харчується за бажанням. Це є суттєвою відмінністю від попередньої системи, що розглядалася вище.

Не рідко використовується стаціонарний кормовий роздатчик РКС-3000, який забезпечує рівномірну роздачу сухих, соковитих та напіврідких кормів для 3000 за півгодини. Такий пристрій буде доречним при груповому способі утриманні тварин [10].

На рисунку 1.11 видно, що готовий комбікорм надходить у живильник, враховуючи разову норму кормів на все поголів'я свиней.

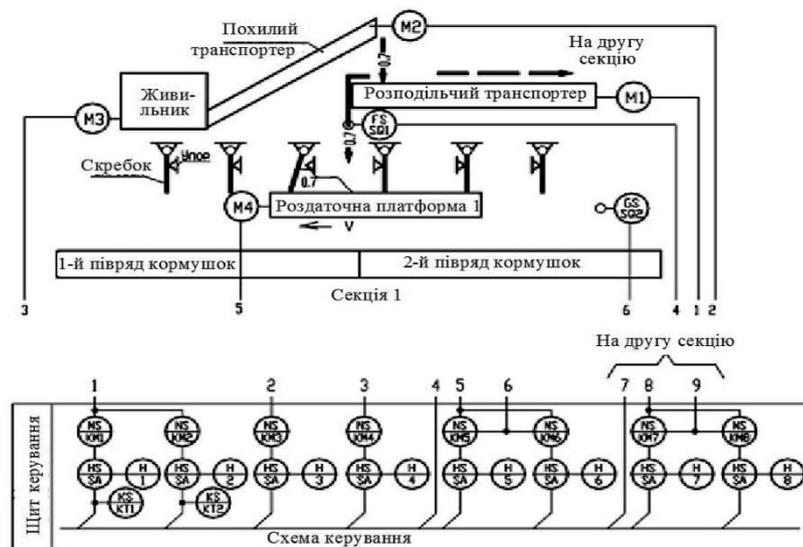


Рисунок 1.11 – Схема автоматизації кормового роздатчика РКС-3000

Потім кормова суміш подається на похилий та на розподільний транспортери. По черзі розподільний транспортер завантажує секції 1 та 2 роздавальника кормів (секція 2 не показана на рисунку) за допомогою роздавальної платформи [24].

У кожній секції роздавальника роздавальна платформа робить зворотно-поступальний рух на відстань, рівну половині довжини годівниць.

Коли роздавальна платформа рухається вліво, на неї надходить корм. Не заважають просуванню платформи з кормом шкребки, що підвішені на шарнірах та повертаються нагору. Шкребки опускаються, затримують корм і

скидають його в годівниці при зворотному ході платформи. У цей час кормом завантажується права половина платформи.

Здійснювати безпосередньо трубопровідним транспортом доставку корму та його роздачу доцільно в відокремлених секторах свиноферм.

Отже, пневматичний та гідравлічний є двома способами доставки й роздачі вологих кормових сумішей по трубах. Пневматичний спосіб є більш дорогим, адже більш металомісткий. До того ж, при такому способі багато корму при вивантаженні в годівниці розприскується та розпилюється. Обґрунтовано доцільним буде використання відцентрових насосів типу НФ при транспортуванні кормових сумішей з вологістю вище 74 %. Проте їх чутливість до змін вологості та тиску в системі не робить їх популярними у використанні на світових та вітчизняних свинокомплексах [12].

#### **1.4 Опис об'єкту автоматизації**

Наведені схеми керування можна реалізувати на основі релейно-контакторної схеми та на базі контролера.

У даній магістерській роботі реалізуємо схему на базі контролера, враховуючи фактори надійності, простоти виконання, моніторингу, функціональності та економічної доцільності.

Розглянемо більш детально кожний з вище перелічених факторів:

– виключення зі схеми великої кількості релейно-контактних елементів підвищує надійність, дозволяє простіше усувати неполадки та скорочує можливі місця їх появи;

– наявність зручного та доступного інтерфейсу контролера дозволяє реалізовувати на ньому необхідні завдання при мінімумі затрачених зусиль;

– контролер дозволяє виконувати контроль та моніторинг технологічного процесу в реальному часі;

– у випадку зміни технологічного процесу можна не впроваджувати нові елементи схеми, шляхом перепрограмування контролера;

– вартість контролера нижче вартості апаратури без застосування контролера [24].

Отже, є обґрунтованою доцільність застосування контролера при реалізації алгоритму керування.

Схема лінії приготування та роздачі корму на свинофермі наведено на рисунку 1.12.

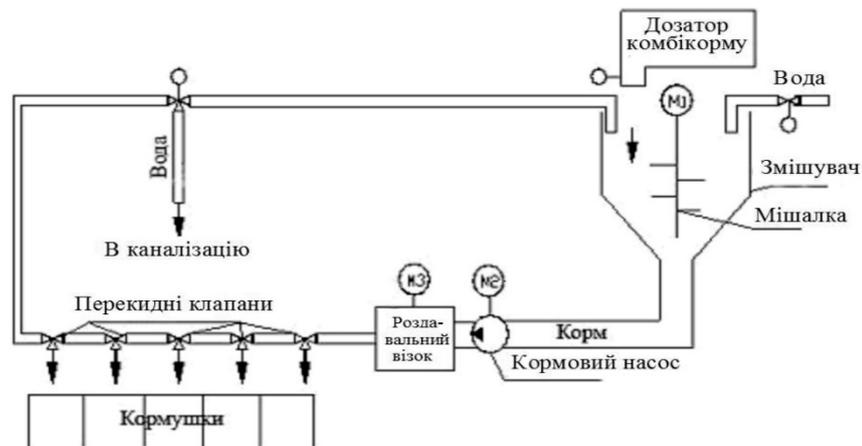


Рисунок 1.12 – Схема лінії готування й роздачі корму на свинокомплексі

Лінія працює у двох режимах: кормової роздачі та промивання. У режимі кормової роздачі лінія повинна працювати наступним чином. Спочатку у самому змішувачі готується корм по сигналу від добового реле часу. Для цього в змішувач заливається певна доза живильної рідини, після чого при включеній мішалці засипається доза комбікорму й мішалка перемішує суміш ще додатковий час. Після закінчення змішування корму включається рух роздавального візка, який переміщається з вихідного положення до першого перекидного клапана першої годівниці, де відкриває клапан і зупиняється. При цьому спрацьовує насос та вивантажує дозу корму в першу годівницю (доза виміряється витратоміром). Після вивантаження дози насос відключається, а роздавальний візок рухається далі [10].

Процес завантаження годівниць повторюється. Коли забезпечене завантаження останньої годівниці, слід забезпечити рух візка у вихідне положення й включення звукової сигналізації завершення роботи лінії в режимі кормової роздачі.

### **1.5 Особливості режимів роботи підвісних транспортера і вимоги, що ставляться до електроприводів транспортера**

Розглянемо умови експлуатації транспортера, серед яких:

- досить довгий та тривалий режим роботи. Зазвичай, протягом значних проміжків часу, зі змінами, без пауз за час включення;
- можливість виникнення значних статичних моментів при рушанні, переважаючих навіть номінальні навантаження ( $M_{с,тр} > M_{с, ном}$ ). Наприклад при пуску навантажених транспортера після раптової або аварійної зупинки;
- відносно не часті пуски, що не впливають на продуктивність транспортеру поряд з незмінним напрямком обертання двигуна;
- двигун транспортера працює в різних умовах навколишнього середовища: в запилених чи вологих приміщеннях, на відкритому повітрі, при високій або низькій температурах, в цехах з агресивним середовищем тощо [3].

Розглянемо вимоги, що висуваються до електроприводу транспортера:

- плавний пуск та гальмування для запобігання пробуксовування стрічки або розгойдування вантажу у стрічкових та підвісних;
- підвищений пусковий момент ( $M_{п}/M_{пус} = 1,6...1,8$ );
- невелике регулювання швидкості в діапазоні 1:2 для зміни темпу роботи у поточних ліній;
- узгоджене обертання електроприводів для декількох транспортерів.

Електропривод з трифазними асинхронними двигунами тривалого режиму роботи – з короткозамкненим та з фазним ротором, задовольняє вимоги майже повністю.

Великий пусковий струм поряд із здешевленням автоматизації транспортера є недоліком двигунів з короткозамкненим ротором. Більш доречним економічно буде вибір двигуна з підвищеним пусковим моментом. Для однодвигунного приводу транспортера, швидкість яких повинна регулюватися, використовують багато-швидкісні двигуни з перемиканням числа пар полюсів, або застосовують додаткові механічні варіатори або регульовані електричні і гідравлічні муфти. Двигуни з фазним ротором встановлюють на транспортері, що потребують підвищеної пускового моменту, при багатодвигунному приводі транспортера з метою вирівнювання навантажень окремих двигунів, а також при необхідності узгодженого руху транспортера ПТС [10].

## **1.6 Типи електроприводів, призначених для транспортера. Принципи роботи, переваги і недоліки**

АД з КЗ-ротором та підвищеним пусковим моментом, одно-швидкісні або багато-швидкісні з перемиканням числа пар полюсів. Додамо, що для регулювання швидкості однодвигунного приводу транспортер застосовуються додаткові варіатори механічні або регульовані електричні і гідравлічні муфти [24].

АД з фазним ротором:

- на транспортері, що потребують підвищеного пускового моменту;
- при багатодвигунному приводі транспортера (для вирівнювання навантажень окремих двигунів);
- при забезпеченні узгодженого руху транспортера.

При великій протяжності транспортера застосовується багатодвигунний привід. Використання декількох приводних станцій дозволяє уникнути великих напруг в механізмах, перевантаження ділянок, зменшити габарити тягового органу і величину тягових зусиль.

При цьому тяговий орган кожної приводної станції передає зусилля, пропорційне статичному опору тільки однієї ділянки, а не всього транспортер.

Вибір місця установки приводних станцій визначається відповідно до діаграмою зміни зусиль натягу.

Оптимальна кількість приводних станцій визначається техніко-економічними розрахунками.

Приводні АД з КЗ-ротором повинні мати однакові параметри, у АД з фазним ротором характеристики у відповідність можна привести введенням додаткових опорів в ланцюг їх роторів [20].

Електропривод синхронного обертання.

Існують механізми, які потребують обертання з рівними швидкостями, тобто їх привід складається з однакових двигунів. Прикладами можуть бути механізми баштових кранів, створів розвідних мостів, воріт шлюзів, транспортера, де потрібно погоджене обертання електродвигунів, а з'єднання їх механічним валом неможливо. У цьому випадку застосовується електричний зв'язок між роторами асинхронних (АД) або синхронних (СД) двигунів, звана електричним валом.

Існує кілька спеціальних схем, реалізованих за принципом «електричного валу».

До складу схеми входять два головні двигуни (ГД1, ГД2), що приводять у рух, відповідно, «механізм 1» та «механізм 2» та мають однакові характеристики.

На кожному валу «ГД1» і «ГД2» змонтовані допоміжні асинхронні двигуни «АД1» і «АД2», фазні ротори яких з'єднані електрично. Потужність допоміжних електродвигунів значно менше потужності головних.

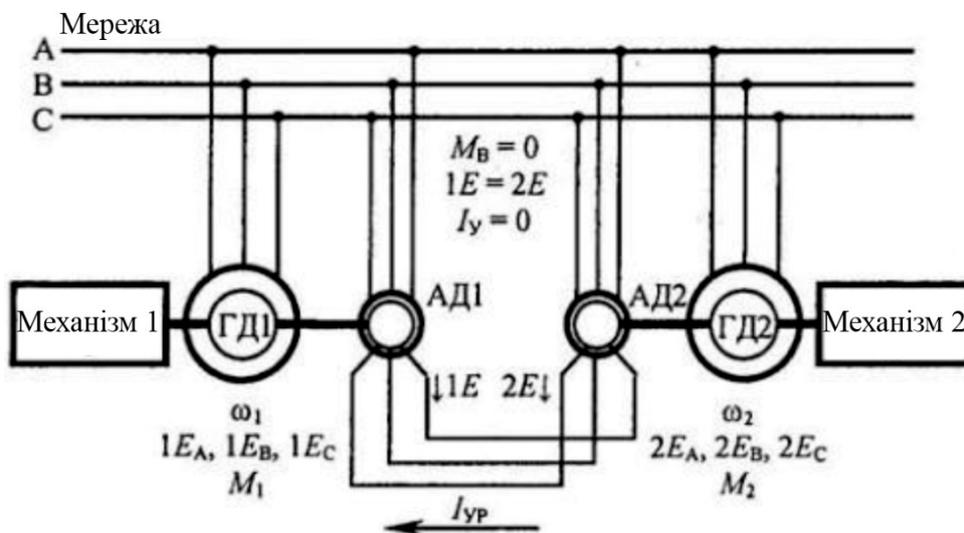


Рисунок 1.9 – Схема «електричного валу» з допоміжним АД

Обмотки статорів ГД включені в мережу з прямим чергуванням фаз, а допоміжних – зі зворотним. При нерівності навантажень на механізми, розрізняються швидкості обертання роторів  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , виникає ЕРС, під дією якої з'являються зрівняльні струми, що створюють моменти  $M_1$ ,  $M_2$ , які будуть протидіяти що викликала з причини (закон Ленца) до тих пір, поки  $\omega_1$  і  $\omega_2$  не вирівняти [20].

Переваги: висока ефективність і жорстка механічна характеристика.

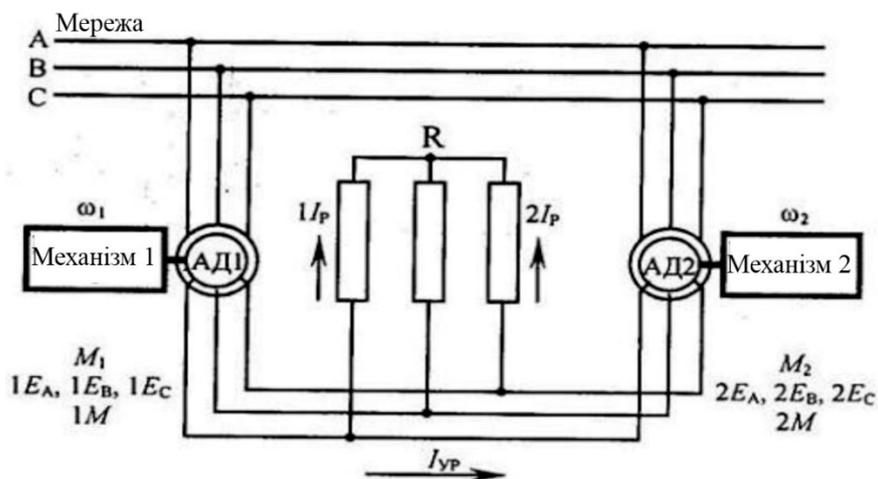


Рисунок 1.10 – Схема «електричного валу» з резисторами

До складу схеми входять два приводних асинхронних двигуна з фазним ротором (АД1, АД2) та резистори (R), проте сама схема працює аналогічно схемі з допоміжними АТ.

У порівнянні з попередньою, недоліками цієї схеми буде менша ефективність, адже допоміжні моменти  $M_1$  і  $M_2$  значно менше, наявність резисторів в ланцюзі ротора зменшує жорсткість характери стик та викликає додаткові втрати електроенергії [10].

У порівнянні з попередньою переваги буде простота використання, дешевизна та менша габаритність приладу.

До складу схеми входять два приводних двигуна з фазним ротором Д1, Д2 і перетворювач частоти (ПЧ). Статорні обмотки ПЧ, Д1 і Д2 підключені до мережі, а роторні пов'язані електрично.

При обертанні ПЧ частота в роторах буде пропорційна ковзанню, швидкість обертання всіх машин буде однаковою і рівною  $\omega = \frac{2\pi}{p}(f_1 - f_2)$ .

Це справедливо при рівних навантаженнях на механізмах.

Ковзання збільшиться, а швидкість знизиться, якщо збільшиться навантаження одного механізму. При новому ковзанні ЕРС ротора Д1 збільшиться, що призведе до збільшення струму ротора, а, отже, і його моменту. Система повернеться в початковий стан і буде працювати узгоджено.

Можна встановити пристрій для зміни частоти, наприклад, механічний варіатор, для розширення меж зміни швидкостей працюючих механізмів. Це дозволить встановлювати та обирати величину узгодженої швидкості механізмів без зміни швидкості АД.

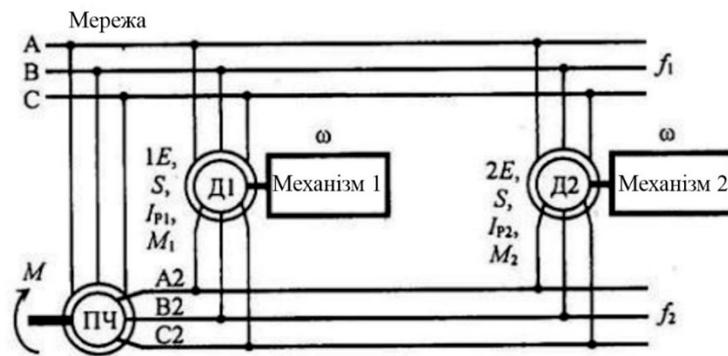


Рисунок 1.11 – Схема «електричного валу» подвійного живлення

Розглянуті схеми можна застосовувати для будь-якого числа узгоджено працюючих механізмів, принцип роботи схеми не змінюється.

## 1.7 Перспективи використання частотно-регульованих електроприводів

Питання забезпечення пускових процесів конвеєрних установок можна вирішити шляхом застосування релейно-контакторних схем та пристроїв плавного пуску.

Необхідним буде застосування регульованого електроприводу для реалізації інших вимог до конвеєрних установок, таких як, регулювання швидкості стрічки в функції вантажопотоку або обмеження динамічних навантажень.

В сучасних умовах найбільшими перспективами володіють частотно-регульовані електроприводи з асинхронними та синхронними двигунами. Синхронний частотно-регульований електропривод виконується на базі високовольтних перетворювачів частоти з вихідною напругою 6 і 10 кВ. Асинхронний частотно-регульований електропривод виконується з перетворювачами частоти вітчизняних і зарубіжних виробників на напруги 0,4; 0,69; 1,19; 3,0 (3,3); 6,0 (6,3; 6,6); 10,0 (10,5) кВ для двигунів відповідного напруги. Двухтрансформаторні перетворювачі частоти не можуть бути

використані для приводу конвеєрних установок, адже регулювання швидкості стрічки конвеєрних установок і обмеження динамічних навантажень вимагає діапазон регулювання швидкості як мінімум 10:1. Підвісний трансформатор вже при діапазоні регулювання 1,5:1 входить в режим насичення через меншу частоти струму щодо номінальної, що призводить до підвищених втрат потужності.

На рисунку 1.12 представлена типова схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електроприводу з автономним інвертором напруги на базі IGBT транзисторів. перетворювачі частоти побудовані на основі напівпровідникової силової електроніки:

- інтелектуальні силові модулі (IGBT-модуль), що представляють собою конструктивне єдність силових ключів і драйверів керування ними;
- вбудовані елементи захисту та інтерфейсу з мікроконтролерною системою керування.

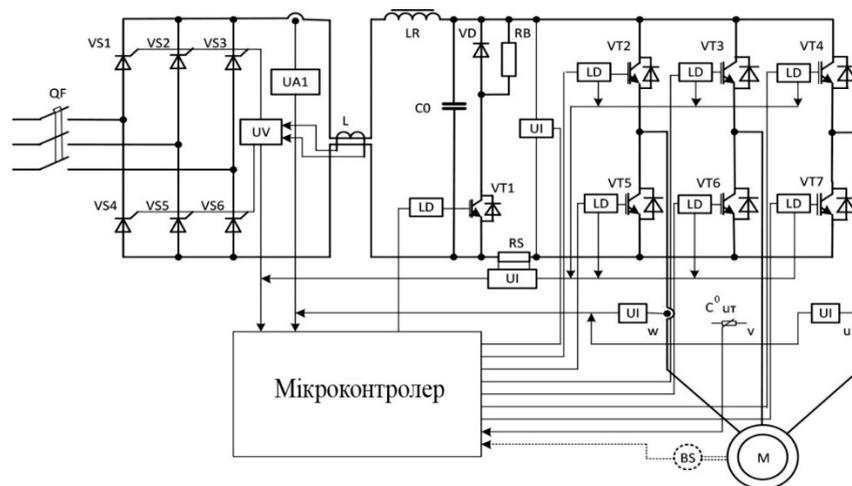


Рисунок 1.12 – Типова схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електроприводу з автономним інвертором напруги

Низьковольтні перетворювачі частоти напругою до 1,19 кВ і високовольтні на напругу до 10 кВ випускаються з інверторами напруги на базі IGBT транзисторів і, як правило, комплектуються ПІД-регулятором (PID Controller). Високовольтні перетворювачі частоти на напруга від 3,0 (3,3) до

10 (10,5) кВ випускаються з інверторами струму на базі замикаючих тиристорів [17].

Перетворювач частоти призначений для регулювання частоти обертання валу асинхронних та синхронних електродвигунів на номінальну напругу живлення 6 і 10 кВ. Діапазон зміни частоти струму статора від 0,2 до 70 Гц, а напруги – від 0 до 6000 В або від 0 до 10000 В.

Метод керування, який використовується в високовольтному перетворювачі частоти з інвертором струму, називається бездатчиковим прямим векторним керуванням. Це означає, що струм статора розкладається на складові, що визначають момент і потік, дозволяючи швидко змінювати момент двигуна не впливаючи на його потік. Цей метод застосовується без тахометричного зворотного зв'язку у випадках, коли потрібна тривала робота двигуна при швидкостях, відповідних більш 6 Гц і початковому пусковому моменті менше 100% номінального [15].

Повний векторне керування може бути здійснено і з тахометричним зворотним зв'язком, коли потрібно тривалий режим роботи двигуна при малих значеннях швидкості, відповідних 0,2 – 6 Гц і з великим початковим пусковим моментом – до 150% номінального.

Відбувається забезпечення усієї лінійки приводних двигунів конвеєрних установок завдяки аналізу існуючого парку перетворювачів частоти. При виборі перетворювачів частоти для регулювання швидкості тягового органу конвеєрної установки необхідно керуватися наступними правилами:

- номінальна напруга приводного двигуна має відповідати номінальній напрузі перетворювача частоти;
- номінальна потужність (струм) перетворювача частоти повинна відповідати номінальній потужності (струму) перетворювача частоти;
- паралельне включення декількох двигунів допускається тільки до перетворювачів частоти з інвертором напруги. Таке підключення двигунів

допускається в межах потужності (струму) перетворювача частоти (сумарна номінальна потужність підключених двигунів повинна бути дорівнює або менше номінальної потужності перетворювача частоти);

– перетворювач частоти з інвертором струму призначений для роботи з індивідуальним електроприводом, тобто до нього можна підключити тільки один приводний двигун конвеєрної установки. Ряд конвеєрних установок мають кілька приводних двигунів, для них необхідно використовувати кілька перетворювачів частоти з інвертором струму, кількість яких відповідає кількості двигунів;

– для шахт, небезпечних за газом та пилом, необхідно застосування вибухозахищених перетворювачів частоти. Вітчизняна і зарубіжна промисловість виготовляє спеціальні вибухозахищені перетворювачі частоти з інвертором напруги для шахтних конвеєрних установок потужністю до 500 кВт на напруги 660 і 1140 В. Ряд модифікацій перетворювачів частоти мають вбудовану функцію динамічного гальмування, що необхідно для транспортера, що працюють на спуск вантажу.

## РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Вибір електродвигуна для приводу транспортер і розрахунок його параметрів і характеристик

У даній магістерській роботі ми обираємо асинхронний двигун потужністю 2,2 кВт серії 4A112MA8Y3. Технічні характеристики двигуна наведені в таблиці 2.1.

Для розрахунку маємо такі дані електродвигуна:

- номінальна вихідна потужність  $P_{2H} = 2,2$  кВт;
- номінальна фазна напруга обмотки статора  $U_{1H} = 220$  В;
- номінальна частота струму  $f_1 = 50$  Гц;
- номінальний коефіцієнт корисної дії  $\eta_H = 76,5\%$ ;
- номінальний коефіцієнт потужності обмотки статора  $\cos\varphi_H = 0,71$ ;
- критичне ковзання ротора  $S_k = 29\%$ ,
- номінальне ковзання ротора  $S_H = 3,4\%$ ;
- число пар полюсів:  $p = 4$ ;
- число фаз:  $m = 3$ ;
- швидкість холостого ходу:  $n_0 = 750$  об/хв;
- момент інерції на валу машини:  $J = 0,017$  кг·м<sup>2</sup>.
- відношення пускового моменту до номінального моменту,  $m_H = 1,9$ ;
- відношення пускового струму до номінального струму,  $k_{i.H} = 5,0$
- відношення максимального (критичного) моменту до номінального моменту,  $m_k = 2,2$ ;
- відношення мінімального моменту до номінального моменту,  $m_m = 1,5$ .

Синхронна кутова швидкість обертання:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_p}{30}; \quad (2.1)$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад / с.}$$

Таблиця 2.1 – Номінальні дані асинхронного двигуна 4А112МА8У3

Тип двиг уна	Номина льна потужні сть, кВт	Номін альна синхр онна часто та оберт ання, об/хв.	Кое фіці ент кори сної дії, %	Коефі цієнт поту жност і	Номін альни й струм при 380 В, А	Номін альни й моме нт, Нм	Співвідн шення пусково го моменту до номинал ьного моменту , $m_n$	Співві дно шення пусков ого струму до номина льного струму , $k_{i,n}$	Віно ше ння макси маль ного момен ту до номина льного момен ту, $m_k$	Від но шення макси маль ного момен ту до номина льного момен ту, $m_m$	Динам ічний момен т інерці ї ротор а, кг·м <sup>2</sup> , $J_{дв}$
4А1 12М А8У 3	2,2	750	76,5	0,71	6,1	29	1,9	5	2,2	1,5	0,017

Номінальна кутова швидкість обертання:

$$\omega_k = (1 - S_H) \cdot \omega_0; \quad (2.2)$$

$$\omega_k = (1 - 0,034) \cdot 78,5 = 75,83 \text{ рад / с.}$$

Номінальний момент електродвигуна:

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H}; \quad (2.3)$$

$$M_H = \frac{2,2 \cdot 10^3}{75,83} = 29 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номінальна фазна напруга:

$$U_{1\phi n} = \frac{U_{\Delta \Delta}}{\sqrt{3}}; \quad (2.4)$$

$$U_{1\phi n} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Номинальний фазний струм статора:

$$I_{1\phi_H} = \frac{P_{2H} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\phi_H} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}; \quad (2.5)$$

$$U_{1\phi_H} = \frac{2,2 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,765 \cdot 0,71} = 6,1 \text{ A.}$$

Максимальний пусковий струм:

$$I_{1\text{пуск}} = k_{i.y.np} \cdot I_{1\phi_H}; \quad (2.6)$$

$$I_{1\text{пуск}} = 5 \cdot 6,1 = 30,5 \text{ A.}$$

Критичний (максимальний) момент електродвигуна:

$$M_k = m_k \cdot M_H; \quad (2.7)$$

$$M_k = 2,2 \cdot 29 = 63,8 \text{ H} \cdot \text{м.}$$

Пусковий момент електродвигуна:

$$M_{\text{пуск}} = m_n \cdot M_H; \quad (2.8)$$

$$M_{\text{пуск}} = 1,9 \cdot 29 = 55,1 \text{ H} \cdot \text{м.}$$

Мінімальний момент електродвигуна:

$$M_{\text{мін}} = m_m \cdot M_H; \quad (2.9)$$

$$M_{\text{мін}} = 1,5 \cdot 29 = 43,5 \text{ H} \cdot \text{м.}$$

У довіднику наведені параметри Г-подібної схеми заміщення (рис. 2.2) у відносних одиницях:

– в номінальному режимі:  $R'_1=0,093$ ;  $X'_1=0,11$ ;  $R'_2=0,083$ ;  $X'_2=0,17$ ;  $X_\mu=1,5$ .

За відомими паспортними даними АД і параметрами Г-образної схеми заміщення розраховуються параметри Т-подібної схеми заміщення (рис. 2.3).

Базове значення опору:

$$Z_{\text{баз}} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}; \quad (2.10)$$

$$Z_{\text{баз}} = \frac{220}{6,1} = 36 \text{ Ом.}$$

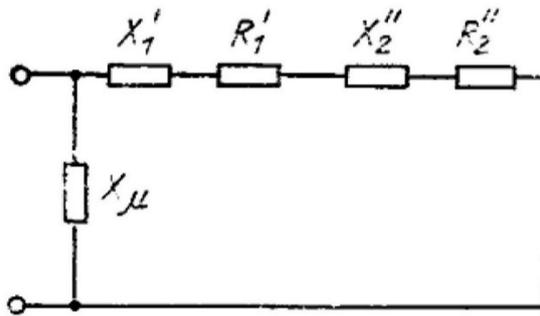


Рисунок 2.2–Г-подібна схема заміщення

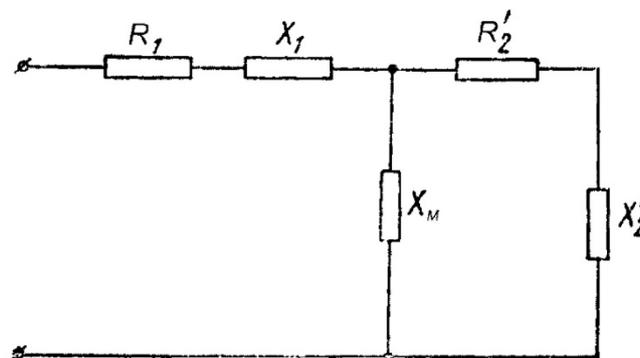


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення

Реактивний опір розсіювання статора у відносних одиницях [1]:

$$X_1^* = \frac{2 \cdot X_1' \cdot X_m}{X_m + \sqrt{X_m^2 + 4 \cdot X_1' \cdot X_m}}; \quad (2.11)$$

$$X_1^* = \frac{2 \cdot 0,11 \cdot 1,5}{1,5 + \sqrt{1,5^2 + 4 \cdot 0,11 \cdot 1,5}} = 1,103.$$

Коефіцієнт, що зв'язує параметри машини в Т і Г-образних схемах заміщення:

$$c_1 = \frac{X_1'}{X_1}; \quad (2.12)$$

$$c_1 = \frac{0,11}{0,103} = 1,07.$$

Реактивний опір розсіювання фази статора:

$$X_1 = \frac{X_1' \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1}; \quad (2.13)$$

$$X_1 = \frac{0,11 \cdot 36}{1,07} = 3,7 \text{ Ом.}$$

Активний опір фази статора:

$$R_1 = R_s = \frac{R_1' \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1}; \quad (2.14)$$

$$R_1 = R_s = \frac{0,093 \cdot 36}{1,07} = 3,35 \text{ Ом.}$$

Індуктивність розсіювання фази статора:

$$L_{15} = \frac{X_1}{\omega_1}; \quad (2.15)$$

$$L_{15} = \frac{3,7}{314} = 0,0118 \text{ Гн.}$$

Реактивний опір розсіювання фази ротора [7]:

$$X_2' = \frac{X_2'' \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1}; \quad (2.16)$$

Активний опір фази ротора:  $X_2' = \frac{0,17 \cdot 36}{1,07} = 5,72 \text{ Ом.}$

$$R_2' = R_R' = \frac{R_2'' \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1}; \quad (2.17)$$

$$R_2' = R_R' = \frac{0,083 \cdot 36}{1,07} = 2,79 \text{ Ом.}$$

Індуктивність розсіювання фази ротора:

$$L_{25} = \frac{X_2'}{\omega_1}; \quad (2.18)$$

$$L_{25} = \frac{5,72}{314} = 0,018 \text{ Гн.}$$

Реактивний опір взаємодукції:

$$X_{m*} = X_m \cdot Z_{\text{баз}}; \quad (2.19)$$

$$X_{m*} = 1,5 \cdot 36 = 54 \text{ Ом.}$$

Індуктивність взаємоіндукції [4]:

$$L_m = \frac{X_{m*}}{\omega_1}; \quad (2.20)$$

$$L_m = \frac{54}{314} = 0,172 \text{ Гн.}$$

Повна індуктивність фази статора:

$$L_s = L_m + L_{15}; \quad (2.21)$$

$$L_s = 0,172 + 0,0118 = 0,1838 \text{ Гн.}$$

Повна індуктивність фази ротора:

$$L_R = L_m + L_{25}; \quad (2.22)$$

$$L_R = 0,172 + 0,018 = 0,19 \text{ Гн.}$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_k = X_1 + X_2'; \quad (2.23)$$

$$X_k = 3,7 + 5,72 = 9,42 \text{ Ом.}$$

## 2.2 Розрахунок природних механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна

Визначено, що залежності моменту, струму ротора та струму статора від ковзання,  $M(s)$ ,  $I_2'(s)$ ,  $I_1(s)$  відповідно, є основними характеристиками асинхронних двигунів. Під механічною характеристикою асинхронних двигунів розуміють залежність частоти обертання  $n$  ротора від електромагнітного моменту  $M$ , тобто  $n = f(M)$  [11].

Цю характеристику зручно розрахувати за залежністю моменту від ковзання ( $M = f(s)$ ). За формулою Клосса здійснюється реальний розрахунок механічної характеристики:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + as)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k}; \quad (2.24)$$

де:  $M_k$  – критичний момент двигуна;

$s_k$  – критичне ковзання;

$s$  – поточне значення ковзання;

$a = R_1/R_2'$  – коефіцієнт,  $a = 1,2$ .

Значення критичного ковзання визначається за наступною формулою:

$$S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}; \quad (2.25)$$

$$S_k = \pm \frac{2,79}{\sqrt{3,35^2 + (3,7 + 5,72)^2}} = 0,28$$

Розрахунок залежності моменту від ковзання проводиться по такими формулами:

$$M_A = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k}; \quad (2.26)$$

$$M_A = \frac{2 \cdot 69,28 \cdot (1 + 1,2 \cdot 0,28)}{\frac{s}{0,28} + \frac{0,28}{s} + 2 \cdot 1,2 \cdot 0,28} = \frac{185,1}{\frac{s}{0,28} + \frac{0,28}{s} + 0,672}.$$

Критичний момент визначається за формулою:

$$M_k = \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot w_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}; \quad (2.27)$$

$$M_k = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 78,5 \left[ 3,35 \pm \sqrt{3,35^2 + (3,7 + 5,72)^2} \right]} = 69,28 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При  $f = 50$  Гц, змінюючи  $s$  в межах діапазону  $0 \dots 1$ , визначаємо значення моментів, результати розрахунку зведемо в таблицю 2.2.

$$1. s=0 \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0 = 78,5 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$2.s=0,01. \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0,01 = 77,71 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185,1}{\frac{0,01}{0,28} + \frac{0,28}{0,01}} = 6,45 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$3.s=0,034, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0,034 = 75,83 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185,1}{\frac{0,034}{0,28} + \frac{0,28}{0,034} + 0,672} = 20,51 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$4.s=0,1 \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0,1 = 70,65 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185,1}{\frac{0,1}{0,28} + \frac{0,28}{0,1} + 0,672} = 48,34 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$5.s=0,29, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0,29 = 55,73 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185,1}{\frac{0,29}{0,28} + \frac{0,28}{0,29} + 0,672} = 69,34 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$6.s=0,4, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0,4 = 47,1 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185,1}{\frac{0,4}{0,28} + \frac{0,28}{0,4} + 0,672} = 66,12 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$7.s=0,7, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0,7 = 23,55 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185,1}{\frac{0,7}{0,28} + \frac{0,28}{0,7} + 0,672} = 51,86 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$8.s=0,85, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 0,85 = 11,775 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185,1}{\frac{0,85}{0,28} + \frac{0,28}{0,85} + 0,672} = 45,83 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$9. s=1 \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 78,5 - 78,5 \cdot 1 = 0 \text{ рад} / \text{с}.$$

$$M_{д} = \frac{185,1}{\frac{1}{0,28} + 1 + 0,672} = 40,96 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку

S	0	0,01	S <sub>H</sub> =0,034	0,1	S <sub>K</sub> =0,29	0,4	0,7	0,85	1
ω	78,5	77,71	75,83	70,65	55,73	47,1	23,55	11,775	0
M	0	6,45	20,51	48,34	69,34	66,12	51,86	45,83	40,96

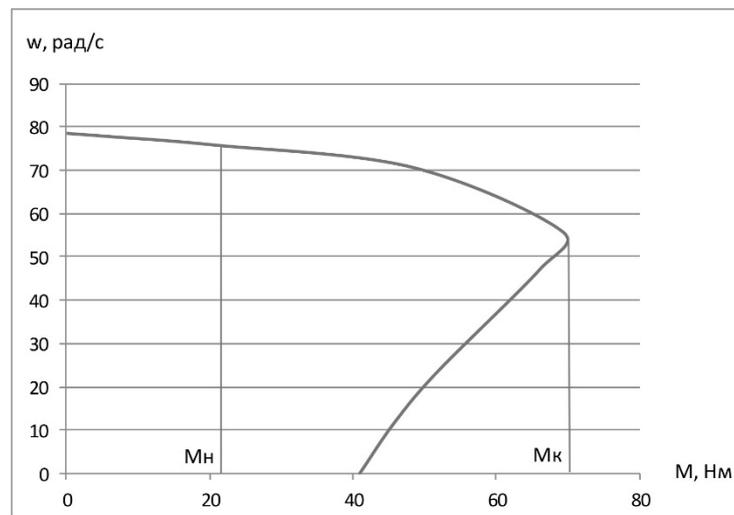


Рисунок 2.4 – Природна механічна характеристика асинхронного електродвигуна транспортера

Електромеханічними характеристиками асинхронних двигунів називають залежності струмів статора і ротора від ковзання, тобто ( $I_1(s)$  і  $I_2'(s)$ ), які визначаються за такими формулами [13]:

$$I_2' = \frac{U_{\phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2}}; \quad (2.28)$$

де:  $U_{\phi H}$  – номінальна фазна напруга обмотки статора, В;

$X_k$  – індуктивний опір короткого замикання, Ом.

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{s}\right)^2 + 9,42^2}}. \quad (2.29)$$

Змінюючи значення ковзання  $s$  в діапазоні  $0...1$ , знаходимо значення  $I_2'$   
Результати розрахунку заносимо в таблицю 2.3 [15].

1.  $s=0, I_2' = 0.$

2.  $s=0,01$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,01}\right)^2 + (9,42)^2}} = 0,79.$$

3.  $s=0,034$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,034}\right)^2 + (9,42)^2}} = 2,56.$$

4.  $s=0,4$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,1}\right)^2 + (9,42)^2}} = 6,74.$$

5.  $s=0,29$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,29}\right)^2 + (9,42)^2}} = 13,72.$$

6.  $s=0,4$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,4}\right)^2 + (9,42)^2}} = 15,74.$$

7.  $s=0,7$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,7}\right)^2 + (9,42)^2}} = 18,43.$$

$$8.s=0,85$$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,85}\right)^2 + (9,42)^2}} = 19,1.$$

$$9.s=1$$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{1}\right)^2 + (9,42)^2}} = 19,57.$$

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку

S	0	0,01	S <sub>н</sub> =0,034	0,1	S <sub>к</sub> =0,29	0,4	0,7	0,85	1
ω	78,5	77,71	75,83	70,65	55,73	47,1	23,55	11,775	0
I <sub>2</sub> '	0	0,79	2,56	6,74	13,72	15,74	18,43	19,1	19,57

Струм  $I_1$  є векторною сумою роторного струму  $I_2'$  і струму намагнічування  $I_\mu$ . Модуль струму статора визначається за наступною формулою:

$$I_1(s) = \sqrt{(I_2')^2 + I_\mu^2 + 2I_\mu I_2' \cdot \sin \psi_2}; \quad (2.30)$$

де:  $\sin \psi_2$  – зрушення струму статора по фазі:

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_1 + X_2'}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2}}; \quad (2.31)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{s}\right)^2 + 9,42^2}}.$$

Струм намагнічування  $I_\mu$  визначається за формулою:

$$I_{\mu} = \frac{U_H}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{\mu})^2}}; \quad (2.32)$$

$$I_{\mu} = \frac{220}{\sqrt{3,35^2 + (3,7 + 54)^2}} = 3,81 \text{ A.}$$

При різних значеннях ковзання  $s$  знаходимо струм ротора  $I_2'(S)$  за формулою (2.58), значення  $\sin\psi_2$  – за формулою (2.61), а струм статора  $I_1(s)$  – за формулою (2.60) [18].

Результати розрахунку наведені в таблиці 2.4

1.  $s=0, \sin\psi_2=0, I_1=0.$

2.  $s=0,01$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,01}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,033.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(0,79)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 0,79 \cdot 0,033} = 0,152.$$

3.  $s=0,034$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,034}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,110.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(2,56)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 2,56 \cdot 0,110} = 0,7.$$

4.  $s=0,1$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,1}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,289.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(6,74)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 6,74 \cdot 0,289} = 3,05.$$

5.  $s=0,29$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,29}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,588.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(13,72)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 13,72 \cdot 0,588} = 10,31.$$

6.  $s=0,4$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,4}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,674.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(15,74)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 15,74 \cdot 0,674} = 13,18.$$

7.  $s=0,7$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,7}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,790.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(18,43)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 18,43 \cdot 0,790} = 17,57.$$

8.  $s=0,85$

$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{0,85}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,818.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(19,1)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 19,1 \cdot 0,818} = 18,74.$$

9.  $s=1$

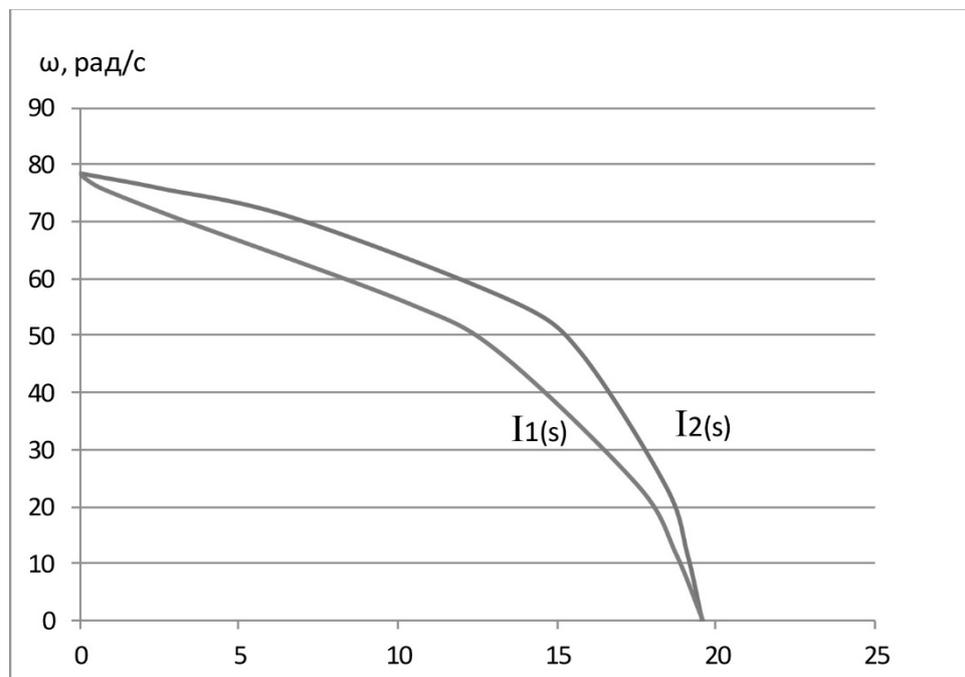
$$\sin \varphi_2 = \frac{9,42}{\sqrt{\left(3,35 + \frac{2,79}{1}\right)^2 + 9,42^2}} = 0,838.$$

$$I_1(s) = \sqrt{(19,57)^2 + 3,81^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 19,57 \cdot 0,838} = 19,59.$$

На рисунку 2.5 наведені природні електромеханічні характеристики, тобто графіки залежностей  $I_1(\omega)$  і  $I_2'(\omega)$  [23].

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку залежності  $I_1(s)$ 

S	0	0,01	$S_H=0,034$	0,1	$S_K=0,29$	0,4	0,7	0,85	1
$\omega$	78,5	77,71	75,83	70,65	55,73	47,1	23,55	11,775	0
$I_2'(s)$	0	0,79	2,56	6,74	13,72	15,74	18,43	19,1	19,57
$I_1(s)$	0	0,152	0,7	3,05	10,31	13,18	17,57	18,74	19,59
$\sin \psi_2$	0	0,033	0,110	0,289	0,588	0,674	0,790	0,818	0,838

Рисунок 2.5 – Графіки залежностей  $I_2'(\omega)$  і  $I_1(\omega)$  (електромеханічних характеристик)

### 2.3 Розрахунок штучних механічних характеристик електродвигуна при законі $U/f = \text{const}$ частотного регулювання

Для знаходження моменту скористаємося формулою:

$$M_D = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}; \quad (2.33)$$

де:  $M_k$  – максимальний (критичний) момент двигуна;

$s_k$  – критичне ковзання.

$$a = \frac{R_1}{R_2}; \quad (2.34)$$

$$a = \frac{3,35}{2,79} = 1,2.$$

Слід зазначити обставина впливу зміни напруги мережі на механічні характеристики асинхронного двигуна. При заданому ковзанні момент двигуна пропорційний квадрату напруги, тому двигун досить чутливий до коливань напруги [15].

При зміні частоти напруги живлення змінюються синхронна частота обертання  $\omega_0$ , ковзання  $S$  і індуктивний опір статора і індуктивний опір розсіювання ротора:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{zP} \left( \frac{f_{1r}}{f_{1H}} \right) = \frac{2\pi}{zP} (f^*); \quad (2.35)$$

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega}{\frac{2\pi}{zP} \left( \frac{f_{1r}}{f_{1H}} \right)} = \frac{\omega}{\frac{2\pi}{zP} (f^*)}; \quad (2.36)$$

$$X_1 + X_2' = (X_1 + X_2') \left( \frac{f_1}{f_{1Y}} \right) = (X_1 + X_2') (f^*); \quad (2.37)$$

Співвідношення між частотою і напругою виражається наступною формулою:

$$\frac{U_i}{f_{ii}} = \frac{U_H}{f_H} = const; \quad (2.38)$$

З виразу (2.38) випливає, що при значенні частоти  $f_1$  і значення напруги теж має змінюватися, вона має дорівнювати:

$$U_i = U_H \frac{f_{ii}}{f_H} = U_H \left( \frac{f_{ii}}{f_H} \right) = U_H (f^*); \quad (2.39)$$

Розраховуємо штучні механічні характеристики АД при  $U/f = \text{const}$  для частот  $f_1 = 40$  Гц,  $f_2 = 25$  Гц,  $f_3 = 15$  Гц.

Для побудови даних механічних характеристик розраховуємо кутову швидкість для всіх значень ковзань [23]:

$$\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s;$$

Перераховуємо індуктивні опору статора і ротора для частоти 40 Гц:

$$X_{1(40)} = 2\pi \cdot L_1; \quad (2.40)$$

$$X_{1(40)} = 2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 0,0118 = 2,96 \text{ Ом.}$$

$$X'_{2(40)} = \frac{X'_2}{1,25} = 4,576 \text{ Ом.} \quad (2.41)$$

Індуктивні опору при частоті 25 Гц:

$$X_{1(25)} = 2\pi \cdot f_{25} \cdot L_1; \quad (2.42)$$

$$X_{1(25)} = 2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 0,0118 = 1,85 \text{ Ом.}$$

$$X'_{2(25)} = \frac{X'_2}{2} = 2,86 \text{ Ом.} \quad (2.43)$$

Індуктивні опору при частоті 15 Гц:

$$X_{1(15)} = 2\pi \cdot f_{15} \cdot L_1; \quad (2.44)$$

$$X_{1(15)} = 2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 0,0118 = 1,11 \text{ Ом.}$$

$$X'_{2(15)} = \frac{X'_2}{3,33} = 1,72 \text{ Ом.} \quad (2.45)$$

Розраховуємо значення критичного ковзання при частоті 40 Гц:

$$s_{k40} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1(40)} + X'_{2(40)})^2}}; \quad (2.46)$$

$$s_{k40} = \pm \frac{2,79}{\sqrt{3,35^2 + (2,96 + 4,576)^2}} = 0,338.$$

$$as_{k40} = \frac{R_1}{R_2} \cdot s_{k40} = 0,406. \quad (2.47)$$

$$\omega_{0(40)} = \frac{6,28 \cdot 40}{4} = 62,8 \text{ рад / с.} \quad (2.48)$$

Розраховуємо значення критичного ковзання при частоті 25 Гц:

$$s_{k25} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1(25)} + X_{2(25)}')^2}}; \quad (2.49)$$

$$as_{k25} = \frac{R_1}{R_2} \cdot s_{k25} = 0,579. \quad (2.50)$$

$$\omega_{0(25)} = \frac{2\pi f_2}{p}; \quad (2.51)$$

$$\omega_{0(25)} = \frac{6,28 \cdot 25}{4} = 39,25 \text{ рад / с.}$$

Розраховуємо значення критичного ковзання при частоті 15 Гц:

$$s_{k15} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1(15)} + X_{2(15)}')^2}}; \quad (2.52)$$

$$s_{k525} = \pm \frac{2,79}{\sqrt{3,35^2 + (1,11 + 1,72)^2}} = 0,728.$$

$$as_{k15} = \frac{R_1}{R_2} \cdot s_{k15} = 0,873. \quad (2.53)$$

$$\omega_{0(15)} = \frac{2\pi f_3}{p}; \quad (2.54)$$

$$\omega_{0(15)} = \frac{6,28 \cdot 15}{4} = 23,55 \text{ рад / с.}$$

Через те, що заданий закон частотного регулювання ( $U/f = \text{const}$ ), то ми отримуємо  $220/50 = 4,4$ , звідки впливає що при частоті  $f_1 = 40$  Гц значення  $U_{\phi 1} = 176$  В, при частоті  $f_2 = 25$  Гц значення  $U_{\phi 2} = 110$  В, при частоті  $f_3 = 15$  Гц значення  $U_{\phi 3} = 66$  В.

Розраховуємо значення критичного моменту для частоти 40 Гц:

$$M_{k(40)} = \frac{3U_{\phi 1}^2}{2\omega_{40} \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{1(40)} + X'_{2(40)})^2} \right]}; \quad (2.55)$$

$$M_{k(40)} = \frac{3 \cdot 176^2}{2 \cdot 62,8 \left[ 3,35 \pm \sqrt{3,35^2 + (2,96 + 4,576)^2} \right]} = 63,8.$$

Критичний момент для частоти 25 Гц:

$$M_{k(25)} = \frac{3U^2\phi 2}{2\omega_{25} \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{1(25)} + X'_{2(25)})^2} \right]}; \quad (2.56)$$

$$M_{k(25)} = \frac{3 \cdot 110^2}{2 \cdot 39,25 \left[ 3,35 \pm \sqrt{3,35^2 + (1,85 + 2,86)^2} \right]} = 50,65.$$

Критичний момент для частоти 15 Гц:

$$M_{k(15)} = \frac{3U^2\phi 3}{2\omega_{15} \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{1(20)} + X'_{2(20)})^2} \right]}; \quad (2.57)$$

$$M_{k(15)} = \frac{3 \cdot 66^2}{2 \cdot 23,55 \left[ 3,35 \pm \sqrt{3,35^2 + (1,11 + 1,72)^2} \right]} = 35,87.$$

Знайдемо значення моментів асинхронного двигуна при частоті 40 Гц.

$$M_{Д40} = \frac{2M_{k40}(1 + as_{k40})}{\frac{s}{s_{k40}} + \frac{s_{k40}}{s} + 2as_{k40}}; \quad (2.58)$$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{s}{0,338} + \frac{0,338}{s} + 0,812}.$$

1.  $s=0$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0 = 62,8 \text{ рад} / \text{с}$ .

$M=0$ .

2.  $s=0,01$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0,01 = 62,172 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{0,01}{0,338} + \frac{0,338}{0,01} + 0,812} = 5,16 H \cdot m.$$

3.  $s=0,034$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0,034 = 60,66 \text{ рад} / c.$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{0,034}{0,338} + \frac{0,338}{0,034} + 0,812} = 16,5 H \cdot m.$$

4.  $s=0,1$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0,1 = 39,77 \text{ рад} / c.$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{0,1}{0,338} + \frac{0,338}{0,1} + 0,812} = 39,77 H \cdot m.$$

5.  $s=0,338$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0,338 = 41,57 \text{ рад} / c.$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{0,338}{0,338} + \frac{0,338}{0,338} + 0,812} = 63,63 H \cdot m.$$

6.  $s=0,4$ ,  $s=0,4$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0,4 = 37,68 \text{ рад} / c.$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{0,4}{0,338} + \frac{0,338}{0,4} + 0,812} = 62,99 H \cdot m.$$

7.  $s=0,7$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0,7 = 18,84 \text{ рад} / c.$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{0,7}{0,338} + \frac{0,338}{0,7} + 0,812} = 53,04 H \cdot m.$$

8.  $s=0,85$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 0,85 = 9,42 \text{ рад} / c.$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{0,85}{0,338} + \frac{0,338}{0,85} + 0,812} = 48,04 H \cdot m.$$

9.  $s=1$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 62,8 - 62,8 \cdot 1 = 0 \text{ рад} / c.$

$$M_{Д40} = \frac{179,35}{\frac{1}{0,338} + \frac{0,338}{1} + 0,812} = 43,53 H \cdot m.$$

Результати розрахунку наведені в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку

S	0	0,01	0,034	0,1	0,338	0,4	0,7	0,85	1
$\omega$	62,8	62,172	60,66	56,52	41,57	37,68	18,84	9,42	0
M	0	5,16	16,5	39,77	63,63	62,99	53,04	48,04	43,53

Знайдемо значення моментів асинхронного двигуна при частоті 25 Гц.

$$M_{Д25} = \frac{2M_{k25}(1 + as_{k25})}{\frac{s}{s_{k25}} + \frac{s_{k25}}{s} + 2as_{k25}}; \quad (2.59)$$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{s}{0,483} + \frac{0,483}{s} + 1,159}.$$

1.  $s=0, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0 = 39,25 \text{ рад} / \text{с}.$

$$M_{Д25} = 0.$$

2.  $s=0,01, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0,01 = 38,86 \text{ рад} / \text{с}.$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0,01}{0,483} + \frac{0,483}{0,01} + 1,159} = 3,23 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.  $s=0,034, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0,034 = 37,92 \text{ рад} / \text{с}.$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0,034}{0,483} + \frac{0,483}{0,034} + 1,159} = 10,37 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4.  $s=0,1, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0,1 = 35,33 \text{ рад} / \text{с}.$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0,1}{0,483} + \frac{0,483}{0,1} + 1,159} = 25,82 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5.  $s=0,29, \quad \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \quad \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0,29 = 27,87 \text{ рад} / \text{с}.$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0,29}{0,483} + \frac{0,483}{0,29} + 1,159} = 46,78 \text{ H} \cdot \text{ м.}$$

6.  $s=0,483, \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0,483 = 20,29 \text{ рад} / \text{ с.}$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0,483}{0,483} + \frac{0,483}{0,483} + 1,159} = 50,65 \text{ H} \cdot \text{ м.}$$

7.  $s=0,7, \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0,7 = 11,78 \text{ рад} / \text{ с.}$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0,7}{0,483} + \frac{0,483}{0,7} + 1,159} = 11,78 \text{ H} \cdot \text{ м.}$$

8.  $s=0,85, \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 0,85 = 5,89 \text{ рад} / \text{ с.}$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0,85}{0,483} + \frac{0,483}{0,85} + 1,159} = 45,85 \text{ H} \cdot \text{ м.}$$

9.  $s=1, \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \omega = 39,25 - 39,25 \cdot 1 = 0 \text{ рад} / \text{ с.}$

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{1}{0,483} + \frac{0,483}{1} + 1,159} = 43,13 \text{ H} \cdot \text{ м.}$$

Результати розрахунку наведені в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку

S	0	0,01	0,034	0,1	0,29	0,483	0,7	0,85	1
$\omega$	39,25	38,86	37,92	35,33	27,87	20,29	11,78	5,89	0
M	0	3,23	10,37	25,82	46,78	50,65	48,48	45,85	43,13

Знайдемо значення моментів асинхронного двигуна при частоті 15 Гц.

$$M_{Д15} = \frac{2M_{k15}(1 + as_{k15})}{\frac{s}{s_{k15}} + \frac{s_{k15}}{s} + 2as_{k15}}; \quad (2.60)$$

1.  $s=0, \omega = \omega_0 - \omega \cdot s; \omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0 = 23,55 \text{ рад} / \text{ с.}$

$$M_{Д15} = 0.$$

2.  $s=0,01$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0,034 = 22,75 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д15} = \frac{134,4}{\frac{0,01}{0,728} + \frac{0,728}{0,01} + 1,75} = 1,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.  $s=0,034$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0,034 = 22,75 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д15} = \frac{134,4}{\frac{0,034}{0,728} + \frac{0,728}{0,034} + 1,75} = 5,79 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4.  $s=0,1$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0,1 = 21,2 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д15} = \frac{134,4}{\frac{0,1}{0,728} + \frac{0,728}{0,1} + 1,75} = 14,66 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5.  $s=0,29$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0,1 = 21,2 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д15} = \frac{134,4}{\frac{0,29}{0,728} + \frac{0,728}{0,29} + 1,75} = 28,84 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6.  $s=0,4$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0,4 = 14,13 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д15} = \frac{134,4}{\frac{0,4}{0,728} + \frac{0,728}{0,4} + 1,75} = 32,62 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7.  $s=0,728$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0,728 = 6,41 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д15} = \frac{134,4}{\frac{0,728}{0,728} + \frac{0,728}{0,728} + 1,75} = 35,84 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8.  $s=0,85$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 0,85 = 3,53 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{Д15} = \frac{134,4}{\frac{0,85}{0,728} + \frac{0,728}{0,85} + 1,75} = 35,65 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9.  $s=1$ ,  $\omega = \omega_0 - \omega \cdot s$ ;  $\omega = 23,55 - 23,55 \cdot 1 = 0 \text{ рад} / \text{с}$ .

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{1}{0,728} + \frac{0,728}{1} + 1,75} = 34,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Результати розрахунку наведені в таблиці 2.7

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку

S	0	0,01	0,034	0,1	0,29	0,4	0,728	0,85	1
$\omega$	23,55	23,31	22,75	21,2	16,72	14,13	6,41	3,53	0
M	0	1,8	5,79	14,66	28,84	32,62	35,84	35,65	34,9

За даними, наведеними в таблицях (2.5; 2.6; 2.7), побудуємо штучні механічні характеристики (рис. 2.6)

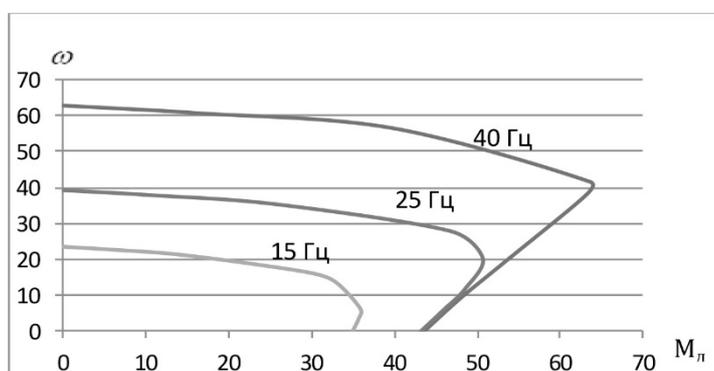


Рисунок 2.6 – Механічні характеристики АД при частотному регулюванні

## 2.4 Вибір перетворювача частоти

Згідно з математичного опису можливість частотного регулювання швидкості машин змінного струму очевидна. Перевагою є те, що поряд зі швидкістю здійснюється регулювання і споживаної з мережі енергії, тобто, в порівнянні з параметричними способами регулювання швидкості, втрати тут мінімальні [1].

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}; \quad (2.61)$$

Необхідність установки перетворювача частоти обумовлюється такими вимогами до конвеєру, як плавність ходу (регулювання в широких межах), мінімальні та постійні енергетичні втрати, можливість реверсування обертання валу двигуна згідно до розглянутого нами випадку.

При виборі перетворювача частоти слід виходити з конкретного завдання, яке має вирішувати електропривод:

- типу та потужності електродвигуна, що підключається;
- точності і діапазону регулювання швидкості;
- точності підтримки моменту обертання на валу двигуна.

При роботі зі стандартним асинхронним двигуном перетворювач слід вибирати з відповідною потужністю. Якщо потрібен великий пусковий момент або короткий час розгону/уповільнення, вибираємо перетворювач на щабель вище стандартного [7].

Можливість працювати з повним моментом двигуна в області нульових частот, підтримувати швидкість при змінному навантаженні без датчиків зворотного зв'язку, точно контролювати момент на валу двигуна, для збільшення точності підтримки моменту та швидкості на валу двигуна в найбільш досконалих перетворювачах реалізовано векторне керування.

Перетворювачі частоти (інвертори) зазвичай мають вбудований ПІД-регулятор. Перетворювач змінює швидкість обертання двигуна таким чином, щоб підтримувати на заданому рівні певний параметр системи (витрата, швидкість, рівень, тиск, температура тощо) завдяки вступу аналогового сигналу 0–10 або 4–20мА з датчика. Наявність вбудованого ПІД-регулятора дозволяє спростити систему керування та не використовувати зовнішніх регуляторів.

Як правило, потужність інвертора підбирається рівній потужності електродвигуна. Це правило поширюється на електродвигуни з номінальною кількістю оборотів 1500 та 3000 оборотів в хвилину. У деяких випадках або при використанні інших електродвигунів вибір перетворювача частоти

(інвертора) повинен відповідати такій умові: номінальний вихідний струму перетворювача частоти (інвертора) повинен бути не менше номінального струму електродвигуна.

Вибір типу перетворювачів частоти провадиться:

а) по напрузі живильної мережі:  $U_c = 220\text{В}$  і величиною номінального струму:  $I_{\text{ном}} = 6,1\text{ А}$ , в першому наближенні, відповідає модифікація: ПЧВ101-К37-А. Однак, з огляду на необхідну ступінь захисту устаткування – IP54 необхідно розмістити його в монтажному шафі і вибрати модифікацію ПЧВ з коефіцієнтом запасу по вихідному струму,  $K_1 \geq 1,3$ . Така міра необхідна для безаварійної роботи ПЧВ в умовах обмеженого доступу охолоджуючого повітря для відводу тепла від ПЧВ. Тоді, розрахункове значення вихідного струму для вибору модифікації ПЧВ:

$$I_{\text{розр}} = I_{\text{ном}} \cdot K_1 \geq 6,1 \times 1,3 \geq 7,93\text{ А}$$

б) вимогу по струму  $I_{\text{розр}} \geq 7,93\text{ А}$  задовольняє модифікація: ПЧВ103-2К2-А (робочий струм до 9,5 А).

На підставі отриманих даних, виберемо перетворювач E2-8300S3L, з параметрами, наведеними в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Параметри ПЧІТ E2-8300-S3L

Потужність перетворювача, кВА	3
Потужність електродвигуна, кВт	2,2
Вихідний номінальний струм, А	10,5
Напруга живлення	Однофазна 220 В (+10%, -15%), 50 Гц ( $\pm$ 5%)
Вихідна частота, Гц	0,1–400

Допускається перевантаження по струму: 150% номінального струму протягом 1 хв.

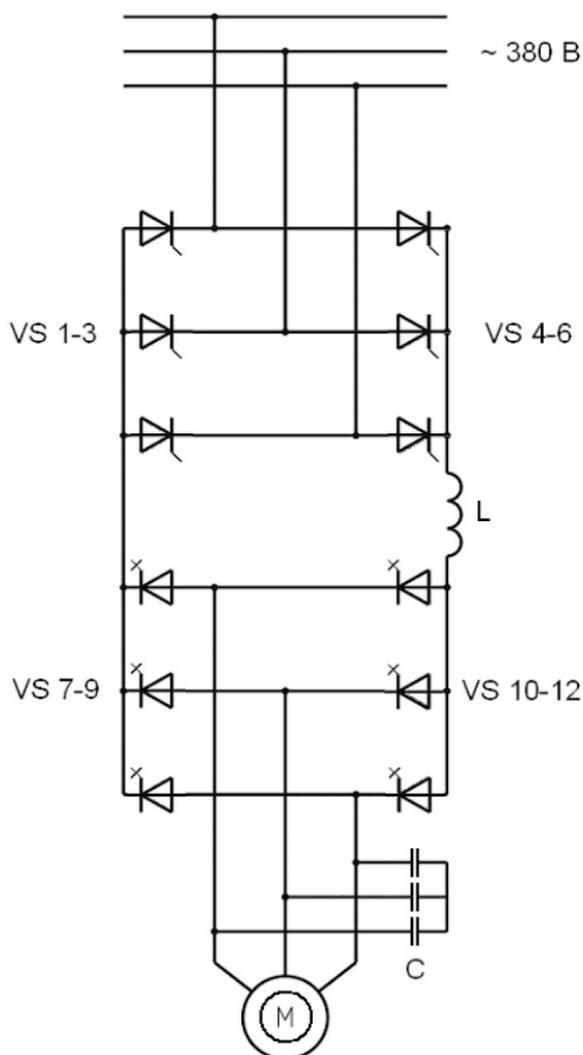


Рисунок 2.7 – Принципова схема перетворювача частоти

Даний перетворювач частоти є дволанковий з проміжним контуром струму. Перша ланка ПЧ – керований випрямляч на тиристорах, проміжний контур постійного струму – реактор. Друга ланка – автономний інвертор струму (ІТА), виконаний на замикаючих тиристорах GTO. АІТ містить конденсатори, які є джерелом реактивної енергії для навантаження ПЧ [4].

Основні переваги ПЧ з АІС:

- можливість рекуперації енергії в мережу;
- вихідна напруга змінюється за законом, близькому до синусоїдального;
- безаварійність режиму короткого замикання на виході.

## 2.5 Опис перетворювача частоти E2-8300-S3L

Як відомо, швидкість ротора асинхронного електродвигуна регулюється зміною частоти напруги живлення, амплітуди напруги живлення, числа пар полюсів статора. Виходячи з технологічних умов, ми зупинимося на першому способі регулювання.

Це обладнання розроблено для регулювання приводу ліфта і вантажопідйомних механізмів з двигуном змінного струму.

Відомим є факт того, що регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною частоти підводиться до статора напруги можливо як в сторону зниження швидкості, так і в бік збільшення швидкості вище номінальної.

При регулюванні частоти вниз від номінальної, можна вибрати такий закон частотного керування, що магнітний потік машини буде підтримуватися незмінним. У цьому випадку максимальний момент двигуна зберігається незмінним і, таким чином, забезпечується сталість перевантажувальної здатності в усьому діапазоні регулювання при незмінному моменті навантаження.

На базі інвертора струму, обраний перетворювач частоти є перетворювачем з проміжною ланкою постійного струму. Принцип його роботи полягає в тому, що змінна напруга мережі випрямляється за допомогою тиристорного випрямляча; отримана постійна напруга стабілізується в проміжній ланцюг індуктивно-ємнісним фільтром нижніх частот. У блоці інвертора, виконаного на силових замикаючих тиристорах (GTO), формується вихідний сигнал потрібної напруги і частоти. Формування вихідної напруги здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Таблиця 2.9 – Функціональні характеристики перетворювача

Тип		E2-8300
Режим керування		U/f або керування вектором струму
Регулювання частоти	Діапазон	Від 0,1 до 650,0 Гц
	Момент при пуску	150%/1Гц (при управлінні вектором струму)
	Кратність регулювання швидкості	1:50 (при управлінні вектором струму)
	Точність регулювання швидкості	± 0,5% (при управлінні вектором струму)
Несуча частота ШІМ		Від 2 до 16 кГц
Характеристики U/f		18 фіксованих і 1 програмована характеристики
Температура середовища		Від -10 до + 50 °С
Відносна вологість		Від 0 до 95% (без конденсату)
Ступінь захисту		IP20 по ГОСТ 14254-96
Керування розгоном /гальмуванням		Два ступені розгону/ гальмування (0,1 - 3600 с) і S-криві (див. опис константи 3-05)

Вибір додаткового обладнання.

Для підвищення якості керування та безвідмовної роботи приводу рекомендується застосовувати спільно з ПЧВ зовнішнє додаткове обладнання. Схема його підключення приведена на рисунку 2.8. Наведено пристрої захисту та комутації і ланцюги живлення ПЧВ.

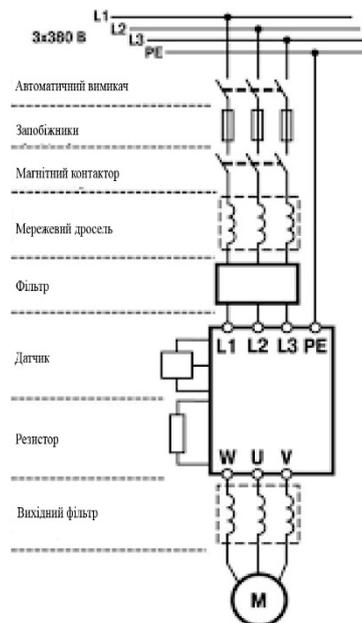


Рисунок 2.8 – Структурна схема підключення приводу модифікації  
ПЧВ103-2К2-А

#### Вибір магнітних контакторів.

Магнітний контактор служить для місцевого або дистанційного керування живленням, а також для виконання захисних функцій ПЧВ. Для перетворювача частоти ПЧВ103-2К2-А вибираємо магнітний контактор ПМЛ-110 (виконання за ступенем захисту – IP00) з номінальним струмом 10 А.

#### Вибір мережевих дроселів.

Мережевий дросель підвищує коефіцієнт потужності рекомендується у тому випадку, якщо потужність джерела живлення (розподільного трансформатора) більше 500 кВА і перевищує в шість і більше разів потужність ПЧВ або якщо довжина кабелю між джерелом живлення і перетворювачем частоти менше 10 м.

При роботі інвертор ПЧВ генерує вищі гармоніки струму, які спотворюють форму та симетрію фаз живлячої напруги. Чим більше потужність ПЧВ, тим більші спотворення він вносить в систему електропостачання. Вищі гармоніки струму призводять до додаткових втрат

в магнітопроводах інших двигунів і трансформаторів, викликаючи нагрівання і скорочення терміну служби. Крім того, вищі гармоніки можуть приводити до нестабільної роботи електронних приладів [13].

При раптових коротких замикань на вході і виході ПЧВ або при грозових перенапруженнях в мережі мережевий дросель обмежує швидкість наростання струму через діоди і транзистори IGBT-модуля, що забезпечує успішне спрацьовування електронного струмового захисту ПЧВ.

Застосування мережевого дроселя в складі приводу ПЧВ:

- 1) дозволяє більш повно використовувати енергозберігаючі властивості ПЧВ в приводах насосів, вентиляторів або інших механізмів;
- 2) захищає мережу електропостачання від вищих гармонік від ПЧВ;
- 3) захищає ПЧВ від асиметрії і перенапруг в мережі електропостачання;
- 4) підвищує коефіцієнт потужності.

Для перетворювача частоти ПЧВ103-2К2-А вибираємо мережевий дросель ОВЕН РС0-025-А з номінальним струмом 25 А та індуктивністю 0,7 мГн.

Вибір радіочастотних фільтрів.

Для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) на вході живлення ПЧВ рекомендується застосовувати радіочастотні фільтри (далі РЧ - фільтри). Для перетворювача частоти ПЧВ103-2К2-А вибираємо радіочастотний фільтр EMF011A21A з номінальним струмом 11 А, розрахований на напругу 220В.

Вибір вихідних фільтрів для ПЧВ.

Для підвищення якості керування та терміну служби АД рекомендується застосовувати на виході ПЧВ моторні дроселі, дроселі  $dU/dt$  і синусні фільтри.

Основне призначення дроселів  $dU/dt$  – зниження швидкості наростання напруги і величини перенапруги на клеммах АТ внаслідок імпульсної форми

напруги від ПЧВ. Дроселі  $dU/dt$  встановлюються в безпосередній близькості від виходу ПЧВ та рекомендуються в наступних випадках:

- а) при короткому кабелі між перетворювачем частоти і АД;
- б) зі старими або перемотати АД;
- в) в агресивних або з високою вологістю середовищах.

Для перетворювача частоти ПЧВ103-2К2-А вибираємо дросель  $dU/dt$  ED3du-1,27/7 з номінальним струмом 7 А і індуктивністю 1,27 мГн.

При живленні АД від ПЧВ до його обмоток прикладається імпульсна напруга з широким частотним спектром, який негативно впливає на властивості ізоляційних матеріалів і викликає гармоніки в формі його фазного струму.

Моторні дроселі знижують загрозу пробою ізоляції і величину пульсацій струму АД, а так же компенсують ємнісні струми довгих моторних кабелів і дозволяють збільшити їх довжину.

Для перетворювача частоти ПЧВ103-2К2-А вибираємо мережевий дросель ОВЕН РМО-010-А з номінальним струмом 10 А і індуктивністю 2,1 мГн.

Синусні фільтри являють собою комбінацію ємнісних і індуктивних елементів. Висока частота перетворення інвертора ПЧВ поглинається синусним фільтром і на його виході виходить синусоїдальна напруга без гармонійних складових, що дозволяє значно збільшувати довжину моторних кабелів (до 150 метрів) та виключає необхідність застосування екранованого кабелю. Крім того, при якісній фільтрації напруги, знижується нагрів та акустичний шум АД що збільшує термін його служби. Синусні фільтри встановлюються в безпосередній близькості до ПЧВ.

Для перетворювача частоти ПЧВ103-2К2-А вибираємо синусний фільтр EF3LC-5,5/10 з номінальним струмом 10 А і індуктивністю 5,5 мГн.

Розрахунок значення потужності та опору гальмівного резистора.

Гальмівний резистор застосовується для гальмування двигуна або швидкого зниження його швидкості (особливо, для навантажень з великим моментом інерції). При гальмуванні асинхронний двигун працює в генераторному режимі та віддає електричну енергію в ПЧВ, що викликає перенапруження в ланці постійного струму. Для гасіння перенапруги в ланці постійного струму використовуються гальмівні резистори, які перетворюють електричну енергію в теплову [15].

Для розрахунку опору гальмівного резистора в залежності від циклу навантаження рекомендується використовувати нижчеописаний алгоритм.

Розрахуємо максимальний момент гальмування  $M_{B\max}$ . Даний момент залежить від початкової швидкості уповільнення  $n_1$ , кінцевої швидкості уповільнення  $n_2$ , бажаного часу уповільнення  $t_B$  і загального моменту інерції системи  $J_{\text{tot}}$ .

Необхідний час гальмування та значення гальмівного циклу для забезпечення заданого моменту гальмування:

$$t_g = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot M_{B\max}}; \quad (2.62)$$

$$t_g = \frac{6,28 \cdot 750}{60 \cdot 29} = 2,71 \text{ с.}$$

$$ED = \frac{t_g}{T}; \quad (2.63)$$

$$ED = \frac{2,71}{60} = 4,52\%.$$

Розрахуємо максимальну гальмівну потужність:

$$P_{B\max} = \frac{M_{B\max} \cdot (n_1 - n_2)}{9,55}; \quad (2.64)$$

$$P_{B\max} = \frac{29 \cdot 700}{9,55} = 2,1 \text{ кВт.}$$

Визначимо електричну потужність гальмування:

$$P_{el} = P_{B\max} - k \cdot P_{\text{mol}}; \quad (2.65)$$

$$P_{e1} = 2,1 - 0,2 \cdot 2,2 = 1,66 \text{ кВт.}$$

За графіком, зображеному на рисунку 3.3, вибираємо коефіцієнт  $f_k = 0,15$ . Визначаємо номінальну потужність гальмування:

$$P_{eНОМ} = \frac{P_{e1}}{f_k}; \quad (2.66)$$

$$P_{eНОМ} = \frac{1,66}{9} = 0,18 \text{ кВт.}$$

Визначаємо максимально допустимий опір гальмівного резистора для заданого циклу навантаження:

$$R_{B\max} \leq \frac{U_B^2}{P_{e1}}; \quad (2.67)$$

$$R_{B\max} = \frac{220^2}{1660} = 29,16 \text{ Ом.}$$

Вибираємо гальмівний модуль FCI-BU-50 на 29 Ом.

## 2.6 Розрахунок енергетичних показників електродвигуна

Розраховуємо повну потужність [4]:

$$\Delta R_H = P_H \left( \frac{1}{\eta_H} - 1 \right); \quad (2.68)$$

$$\Delta R_H = 2200 \left( \frac{1}{0,765} - 1 \right) = 675,8 \text{ Вт.}$$

Розраховуємо змінну складову втрати потужності:

$$\Delta R_{V.H} = M_H (\omega_0 - \omega_H) \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right); \quad (2.69)$$

$$\Delta R_{V.H} = 29 \cdot (78,5 - 75,83) \cdot \left( 1 + \frac{3,35}{2,79} \right) = 170,35 \text{ Вт.}$$

Розраховуємо постійну складову втрати потужності:

$$\Delta R_{CH} = \Delta P_H - \Delta P_{VH}; \quad (2.70)$$

$$\Delta R_{CH} = 675,8 - 170,35 = 505,45 \text{ Вт.}$$

Визначення коефіцієнта втрат потужності:

$$a = \frac{\Delta P_{CH}}{\Delta P_{VH}}; \quad (2.71)$$

$$a = \frac{505,45}{170,35} = 2,967.$$

Активна потужність.

Розрахунок корисної витрати енергії:

$$A_2 = M_c \cdot \omega_c \cdot t_c; \quad (2.72)$$

$$A_2 = 29 \cdot 75,83 \cdot 0,8 = 1759,26 \text{ Вт} \cdot \text{с.}$$

де:  $\omega_u, t_u$  – кутова швидкість і час усталеного режиму.

Визначення постійної складової втрати енергії:

$$\Delta A_c \approx \Delta P_{CH} \cdot \left( \frac{\omega_c}{\omega_0} \right)^2 \cdot t_c; \quad (2.73)$$

$$\Delta A_c = 505,45 \cdot \left( \frac{75,83}{78,5} \right)^2 \cdot 0,8 = 377,3 \text{ Вт} \cdot \text{с.}$$

Визначення величини приведенного фазного струму ротора в сталому режимі:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{S_c} \right)^2 + (X_k)^2}}; \quad (2.74)$$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left( 3,35 + \frac{2,79}{0,034} \right)^2 + (9,42)^2}} = 2,56 \text{ А.}$$

Визначення змінної складової втрати енергії:

$$\Delta A_v = 3 \cdot \left[ I_0^2 \cdot R_1 + (I_2')^2 \cdot \sigma \cdot R_1 + (I_2')^2 \cdot \sigma \cdot R_1 + R_2' \right] \cdot t_c; \quad (2.75)$$

де:  $\sigma$  – поправочний коефіцієнт:

$$\sigma = 1 + \frac{2 \cdot I_0 \cdot X_K}{U_1}; \quad (2.76)$$

$$\sigma = 1 + \frac{2 \cdot 6,1 \cdot 9,42}{220} = 1,52.$$

$$\Delta A_v = 3 \cdot [6,1^2 \cdot 3,35 + 2,56^2 \cdot (1,52 \cdot 3,35 + 2,79)] \cdot 0,8 = 347,58 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

Споживана з мережі енергія:

$$A_1 = A_2 + \Delta A_c + \Delta A_v; \quad (2.77)$$

$$A_1 = 1759,26 + 377,3 + 347,58 = 2484,14 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

Споживання реактивної енергії за цикл [7]:

$$\sum A_p = \sum_{i=1}^n 3 \left[ I_0^2 \cdot (X_1 + X_\mu) + (I'_{2i})^2 \cdot (X_1 + X'_2) \right] \cdot t_{ci}; \quad (2.78)$$

$$A_p = 3 \cdot [6,1^2 \cdot 57,7 + 2,56^2 \cdot 9,42] \cdot 0,8 = 5300,96 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_e = \frac{\sum A_2}{\sum A_1} \cdot 100\%; \quad (2.79)$$

$$\eta_e = \frac{1759,26}{2484,14} \cdot 100 = 70,8\%.$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_e = \frac{\sum A_1}{\sqrt{(\sum A_1)^2 + (\sum A_p)^2}}; \quad (2.80)$$

$$\cos \varphi_e = \frac{2484,14}{\sqrt{(2484,14)^2 + 5300,96^2}} = 0,42.$$

## РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

### 3.1 Математична модель і структурна схема асинхронного двигуна транспортера

Побудувати структуру системи керування частотним електроприводом можливо завдяки новому сучасному підходу, що заснований на повних диференціальних рівняннях асинхронного двигуна. Така система називається системою частотного керування. Аналіз та синтез асинхронного електродвигуна можна виконати простішими методами. Диференціальні рівняння для узагальненої машини записуються в різних системах координат. Прийнято вісі координат  $\alpha, \beta$  нерухомі щодо статора і вісі  $d, q$  – нерухомі відносно ротора. Запис рівнянь в цих вісях є окремим випадком математичного опису процесів машини [4].

$$\left. \begin{aligned}
 U_{1u} &= i_{1u} R_1 + \frac{d\psi_u}{dt} - \omega_k \psi_{1g} \\
 U_{1g} &= i_{1g} R_1 + \frac{d\psi_g}{dt} - \omega_k \psi_{2u} \\
 0 &= i_{2u} R_2 + \frac{d\psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_{BT}) \psi_{2g} \\
 0 &= i_{2g} R_2 + \frac{d\psi_{2g}}{dt} - (\omega_k - \omega_{BT}) \psi_{2u} \\
 M &= P_n L_{12} (i_{1g} i_{2u} - i_{1u} i_{2g}) \\
 \psi_{1u} &= L_1 i_{1u} + L_{12} i_{2u} \\
 \psi_{1g} &= L_2 i_{1g} + L_{12} i_{2u} \\
 \psi_{2u} &= L_2 i_u + L_{12} i_u \\
 \psi_{2g} &= L_2 i_{2g} + L_{12} i_{1g}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

У загальному випадку рівняння записуються щодо довільних координатних вісей, наприклад  $u, v$ , що обертаються зі швидкістю  $\omega_k$ , з яких можна отримати будь-які приватні випадки роботи електричної машини. Якщо прийняти вісь  $u$  за дійсну, а вісь  $v$  – за уявну, то диференціальні рівняння можуть бути записані в векторній формі [7].

Математична модель двофазного асинхронного двигуна в вісях  $u-v$  вид:

$$\left. \begin{aligned} \omega_k &= 0 \\ \bar{U}_1 &= \bar{i}_1 R_1 + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} - j\omega_{en} \bar{\psi}_2 \\ 0 &= \bar{i}_2 R_2 + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} - j\omega_{en} \bar{\psi}_2 \\ M &= p_n L_{12} \operatorname{Im} \left( \bar{i}_1 \cdot \bar{i}_2^* \right) = p_n L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де:  $\omega_k$  – швидкість системи координат;

$i_v, i_u$  – складові струму;  $\psi_v, \psi_u$  – потокозчеплення;

$R_1$  – опір статора;  $M$  – електромагнітний момент двигуна;

$L_1, L_2$  – індуктивності фаз статора і ротора;  $L_{12}$  – індуктивність взаємодії;  $U_1$  – напруга на статорі.

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{1\alpha}}{dt} &= K_1 (U_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) + K_3 i_{2\alpha} + K_2 e_{1\beta} \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} &= K_1 (U_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) + K_3 i_{2\beta} - K_2 e_{1\alpha} \\ \frac{di'_{2\alpha}}{dt} &= -K_2 (U_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) - K_5 i'_{2\alpha} - K_4 e_{1\beta} \\ \frac{di'_{2\beta}}{dt} &= -K_2 (U_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) - K_5 i'_{2\beta} - K_4 e_{1\alpha} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{j} (M - |M_c| \operatorname{sign} \omega) \\ M &= K_6 (i_{\beta} i'_{2\alpha} - i_{1\alpha} i'_{2\beta}) \\ e_{1\alpha} &= \omega_{en} (L_2 i'_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) \\ e_{1\beta} &= \omega_{en} (L_2 i'_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) \\ \omega_{en} &= p_n \omega \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

де:

$$K_1 = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2}; K_2 = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}; \quad (3.4)$$

$$K_3 = K_2 R_2'; K_4 = \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}; \quad (3.5)$$

$$K_5 = K_4 R_2'; K_6 = \frac{3}{2} p_m L_{12}; \quad (3.6)$$

$$U_{1\alpha} = U_{1m} \cos[\phi_{el}(t)]; \quad (3.7)$$

$$U_{1\beta} = U_{1m} \cos[\phi_{el}(t)]; \quad (3.8)$$

$$\phi_{el} = 2\pi f_{1ном} \int \alpha(t) dt; \quad (3.9)$$

$$\alpha(t) = \frac{f_1(t)}{f_{1ном}}; \quad (3.10)$$

де:  $M$ ,  $M_c$  – момент двигуна і статичний момент опору механізму;

$J_\Sigma$  – сумарний момент інерції механізму.

Всі змінні цієї моделі змінюються з частотою струму статора.

Імітаційна модель двофазного асинхронного двигуна в вісях  $\alpha$ ,  $\beta$  має

вигляд:

На рисунку 3.1 показана структурна схема асинхронного двигуна, побудована на основі моделі двофазного асинхронного двигуна в вісях  $\alpha - \beta$

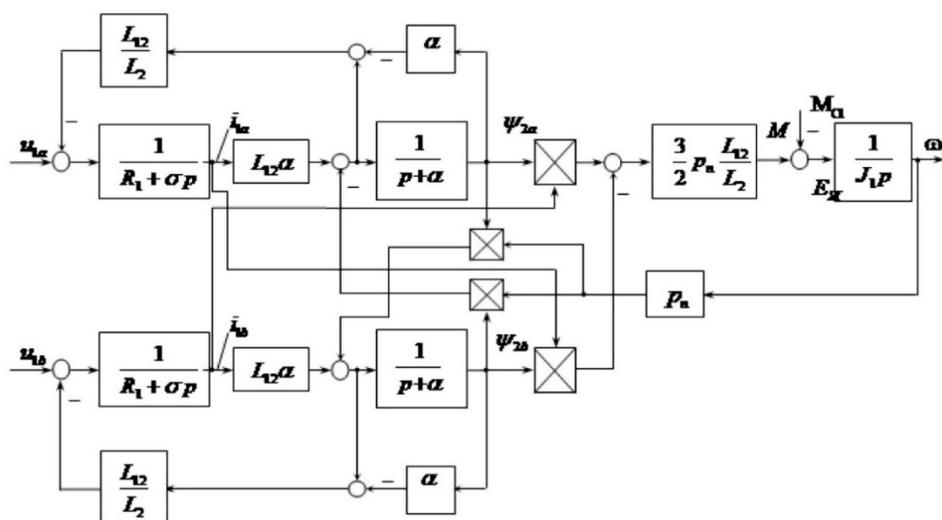


Рисунок 3.1 – Структурна схема асинхронного двигуна

### 3.2 Розрахунок параметрів об'єкта керування

Для визначення коефіцієнтів  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  та  $K_6$  для двофазної моделі АД потрібно розрахувати необхідні параметри:

– індуктивність статора:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{2\pi f}; \quad (3.11)$$

$$L_1 = \frac{1,119 + 79,88}{314} = 0,184 \text{ Гн.}$$

– індуктивність ротора:

$$L_2 = \frac{X_2 + X_\mu}{2\pi f}; \quad (3.12)$$

$$L_2 = \frac{2,249 + 79,88}{314} = 0,19 \text{ Гн.}$$

– взаємна індуктивність:

$$L_{12} = \frac{X_\mu}{2\pi f}; \quad (3.13)$$

$$L_{12} = \frac{54}{314} = 0,172 \text{ Гн.}$$

– еквівалентна індуктивність ланцюга статора:

$$L_e = L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2}; \quad (3.14)$$

$$L_e = 0,184 - \frac{0,172^2}{0,19} = 0,0283 \text{ Гн.}$$

$$K_1 = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2}; \quad (3.15)$$

$$K_1 = \frac{0,19}{0,184 \cdot 0,19 - 0,172^2} = 35,34 \text{ 1 / Гн.}$$

$$K_2 = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}; \quad (3.16)$$

$$K_2 = \frac{0,172}{0,184 \cdot 0,19 - 0,172^2} = 31,994 \text{ 1 / Гн.}$$

$$K_3 = K_2 R_2; \quad (3.17)$$

$$K_3 = 31,994 \cdot 2,79 = 89,261 \text{ / Гн.}$$

$$K_4 = \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}; \quad (3.18)$$

$$K_4 = \frac{0,184}{0,184 \cdot 0,19 - 0,172^2} = 34,226 \text{ 1 / Гн.}$$

$$K_5 = K_4 R_2; \quad (3.19)$$

$$K_5 = 34,226 \cdot 2,79 = 95,491 \text{ / Гн.}$$

$$K_6 = \frac{3}{2} p_n L_{12}; \quad (3.20)$$

$$K_6 = \frac{3}{2} \cdot 4 \cdot 0,172 = 1,032 \text{ Ом.}$$

$$K_e = R_1 + R_2 \left( \frac{L_{12}^2}{L_2^2} \right); \quad (3.21)$$

$$K_e = 3,35 + 2,79 \left( \frac{0,172^2}{0,19^2} \right) = 5,64 \text{ Ом.}$$

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}; \quad (3.22)$$

$$T_e = \frac{0,0283}{5,64} = 0,005 \text{ с. } \psi_1 = \frac{E_{e \text{ ном}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1 \text{ ном}}}; \quad \psi_1 = \frac{217}{314} = 0,69 \text{ Вб.}$$

### 3.3 Структурна схема системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» і розрахунок її параметрів

Структурна схема АД та динамічна ланка на її вході з передавальною функцією ТПЧ зображена на рисунку 3.2 та є структурною схемою лінеаризованої системи ТПЧ-Д, що має наступний вигляд:

$$W_{\text{ТПЧ}} = \frac{\omega_0(P)}{U_{\text{УЧ}}(P)} = \frac{K_{\text{УЧ}} \cdot 2\pi}{P_H}; \quad (3.23)$$

де:  $U_{\text{УЧ}}$ ,  $K_{\text{УЧ}}$  – напруга керування частотою і коефіцієнт посилення ТПЧ по каналу частоти.

За формулою [18] розраховують модуль статичної жорсткості таким чином:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_K}{\omega_{\text{ОН}} \cdot S_K} \cong \frac{M_H}{\omega_{\text{ОН}} - \omega_H}; \quad (3.24)$$

$$\beta = \frac{29}{78,5 - 75,83} = 10,86.$$

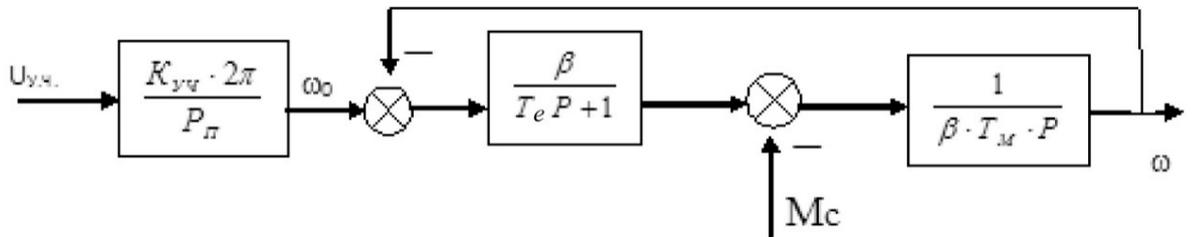


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи ТПЧ-АД

Електромагнітна постійна часу визначається за формулою:

$$T_E = \frac{1}{314 \cdot S_K}; \quad (3.25)$$

$$T_E = \frac{1}{314 \cdot 0,28} = 0,0114.$$

Електромеханічна стала часу електродвигуна розраховується таким чином:

$$T_M = J \frac{\omega_0}{M_{\text{max}}}; \quad (3.26)$$

$$T_M = 0,017 \frac{78,5}{63,8} = 0,021.$$

### 3.4 Вибір віртуальної моделі електроприводу і дослідження перехідних процесів

Найбільш доцільним та ефективним програмним пакетом для моделювання напівпровідникових електроприводів є система MatLab або матрична лабораторія зі своїми пакетами розширення Toolboxes. Матрична лабораторія прийнята в якості основного інструменту вивчення напівпровідникового електропривода, згідно зарубіжних та вітчизняних вчень розробників [18].

При дослідженні напівпровідникового електропривода основними пакетами розширення слід вважати Simulink та Power System Blockset.

Пакет Simulink зі своїми розширеними доповненнями все ж таки є основним інструментом вивчення різних електромеханічних систем. За допомогою цього пакету вирішується ряд питань, пов'язаних з дослідженням систем електроприводу. Пакет Simulink має ряд високоефективних можливостей від структурного (математичного) представлення системи до генерування кодів для програмування мікропроцесора відповідно до структурної схеми моделі.

Бібліотека Simulink є набором візуальних об'єктів, за допомогою яких можна дослідити будь-яку систему автоматичного регулювання. Практично для всіх блоків існує можливість налаштування параметрів. Параметри налаштування відображаються в панелі вікна налаштування обраного блоку.

У досліджувану модель (рис. 3.3) увійшли такі елементи:

- Asynchronous Machine SI  $U_{nit}$  – готова модель асинхронного двигуна параметрами, відповідними номінальним паспортним даним двигуна 4A112MA8У3.

- Трифазне джерело синусоїдальної напруги 3Phase ProgrammableVoltage Source з номінальними параметрами:,  $U_m = 380 \text{ В}$ ;

зсунуті по фазі один відносно одного на 120°, моделюючи трифазну систему напруг з номінальними значеннями:  $U_{\phi} = 220 \text{ В}$ ,  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

- Three-Phase V-I Measurement – трифазний мультиметр для здійснення замірів мережевого струму і напруги.

- елементи типу Scope – моделі осцилографів для перегляду графіків мережевих струму і напруги, а також зміни в часі частоти обертання ротора двигуна і моменту на його валу.

- елементи типу Display для контролю сталого значення тих же параметрів.

- Scope – елемент, за допомогою якого можливо зняти осцилограми зміни швидкості обертання ротора двигуна і моменту на валу в часі.

- Constant – елемент, за допомогою якого можливо змоделювати постійні навантаження на вал двигуна.

- Timer – елемент, за допомогою якого можливо змоделювати накид і скидання навантаження на вал двигуна в певний момент часу.

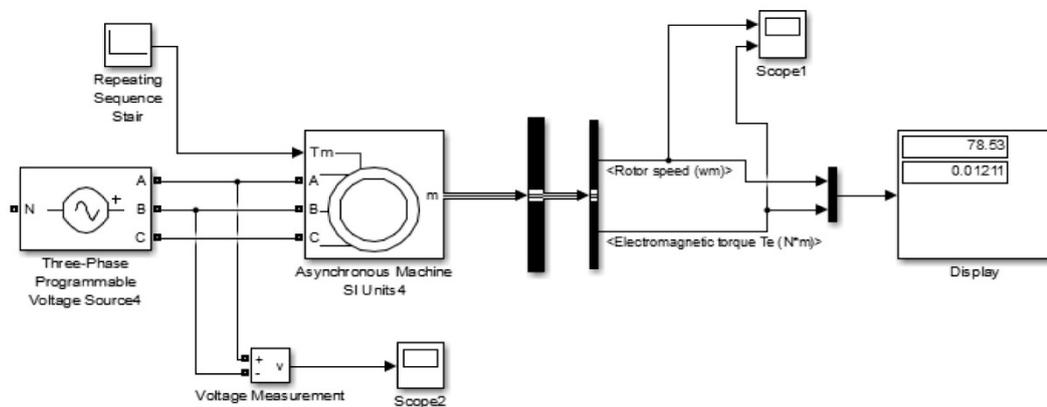


Рисунок 3.3 – Віртуальна модель пуску асинхронного двигуна

У вікно введення введемо параметри обраного електродвигуна 4A112MA8У3, відповідні номінальним паспортним даним (рис. 3.4).

Моделюємо пуск двигуна під навантаженням при трьох різних частотах напруги живлення  $f_1 = 50$  Гц,  $f_2 = 30$  Гц,  $f_3 = 15$  Гц, використовуючи закон

$$\frac{U}{f} = const.$$

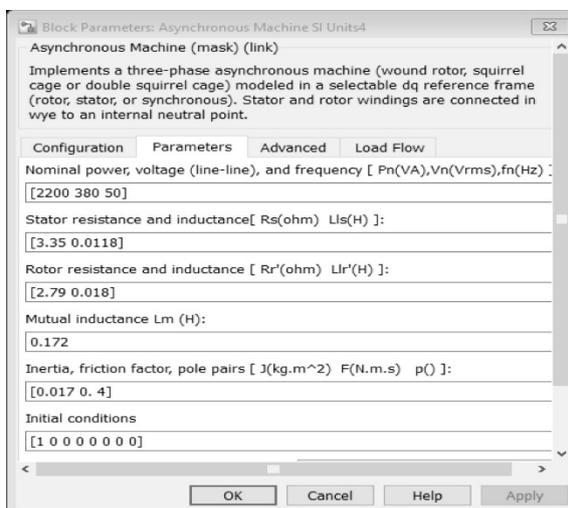


Рисунок 3.4 – Параметри електродвигуна 4А112МА8У3

На рисунку 3.5 показані перехідні характеристики швидкості і моменту електродвигуна при пуску без навантаження, при  $f = 50$  Гц  $U_{л} = 380$  В.

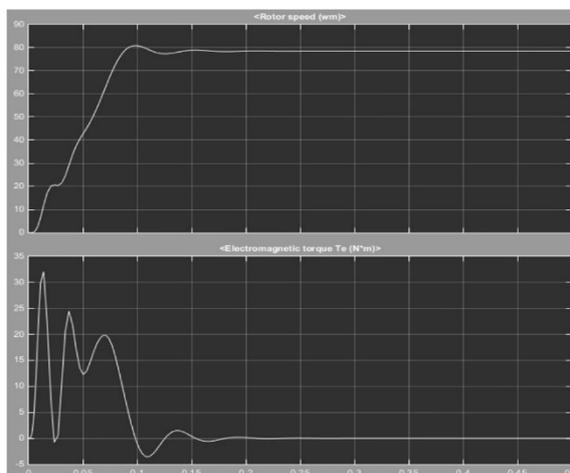


Рисунок 3.5 – Перехідні характеристики швидкості і моменту при пуску 50 Гц без навантаження

На рисунку 3.6 показані перехідні характеристики швидкості і моменту електродвигуна при пуску без навантаження,  $f = 50$  Гц  $U_{л} = 380$  В; при  $f = 30$  Гц  $U_{л} = 228$  В; при  $f = 20$  Гц  $U_{л} = 152$  В;  $f = 15$  Гц  $U_{л} = 114$  В.

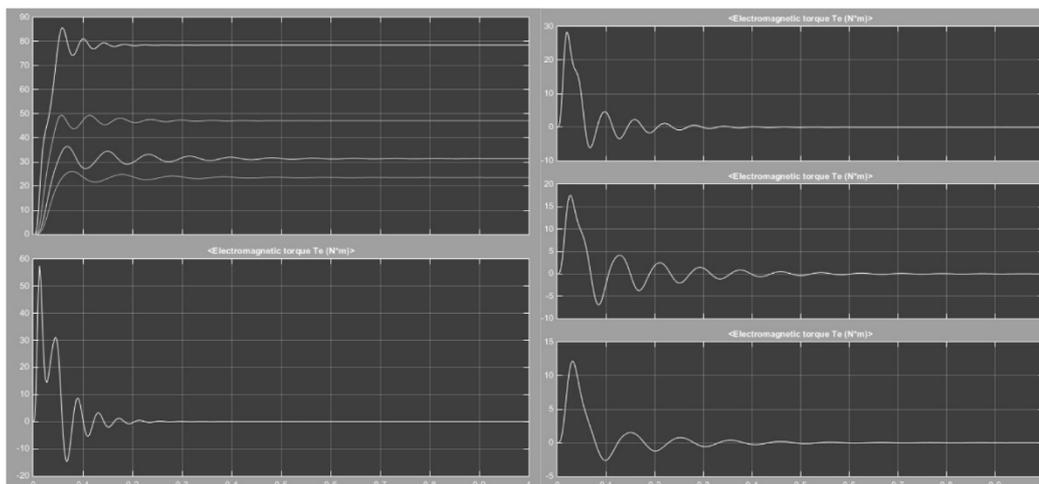


Рисунок 3.6 – Перехідні характеристики швидкості і моменту при пуску 50,30,20,15 Гц без навантаження

На рисунку 3.7 показані перехідні характеристики швидкості і моменту електродвигуна при пуску під навантаженням 10; 5; 0 Нм, кожні 2 с при  $f = 50; 30; 20; 15$  Гц.

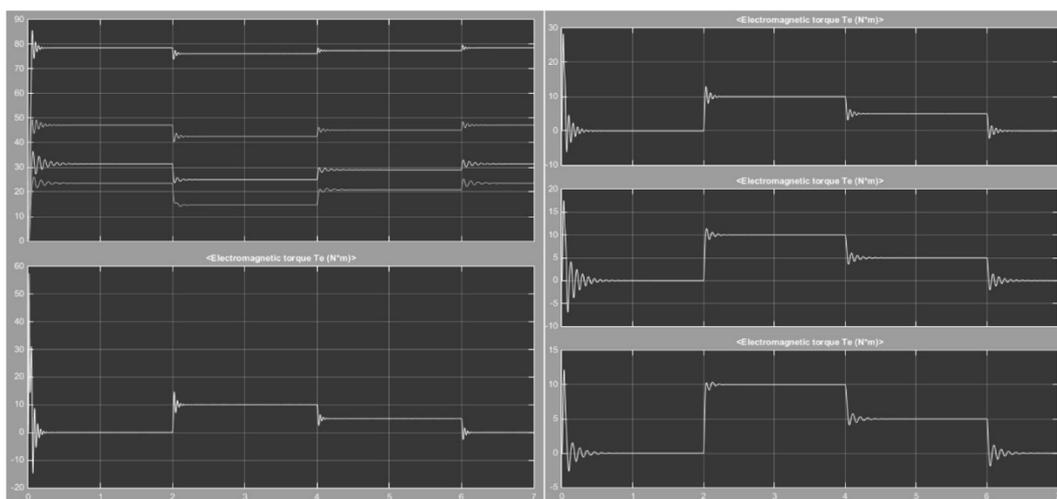


Рисунок 3.7 – Перехідні характеристики швидкості і моменту при пуску під навантаженням ( $M = 10; 5; 0$  Н · м) і при  $f = 50; 30; 20; 15$  Гц

На рисунку 3.8 показані перехідні характеристики швидкості і моменту електродвигуна при пуску під навантаженням 7 Нм через 1 с після пуску при  $f = 50; 30; 20; 15$  Гц

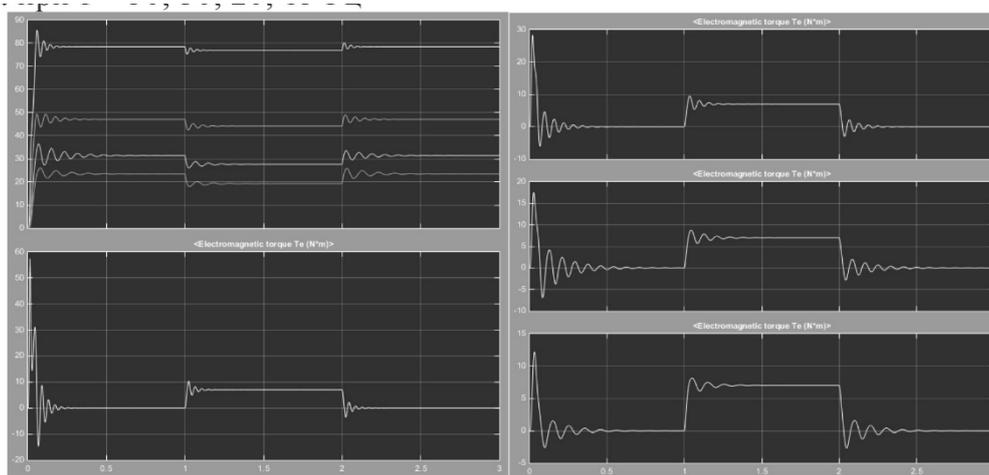


Рисунок 3.8 – Перехідні характеристики швидкості і моменту при пуску під навантаженням ( $M = 7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ) і при  $f = 50; 30; 20; 15 \text{ Гц}$ .

Враховуючи отримані перехідні характеристики можемо стверджувати, що при пропорційному зниженні напруги та частоти знижується відповідно значення номінальної швидкості та час досягнення цієї швидкості. Електродвигун може забезпечити номінальний момент.

### 3.5 Вибір реле контролю рівня

Дистанційне керування електричними ланцюгами в однофазних електричних мережах постійного або змінного струму можливе завдяки реле. Реле контролю рівня має широкий діапазон регулювань, а також дає можливість регулювати діапазони спрацьовування по кожній контактній групі

Для збільшення терміну служби реле, його рекомендовано зберігати від впливу кліматичних факторів в упаковці виробника, у приміщеннях з природною вентиляцією при температурі навколишнього повітря від  $-35^\circ$  до  $+75^\circ$ . Рекомендується дотримуватись умов зберігання реле, а саме не допускати конденсацію вологи та зледеніння.

Реле контролю рівня призначено для контролю рівня рідини в цистернах, ємностях, колодязях тощо з видачею сигналу керування для

включення насоса, що відкачує або закачує. Суть роботи реле полягає в зміні опору провідної рідини між датчиками електродами. Датчики в комплект постачання не входять. Два контрольовані рівні.

Тип: Реле рівня ORL 24-240 В АС/DC ІЕК

- Тип підключення: гвинтове з'єднання.
- Номінальна напруга живлення ланцюга керування  $U_s$  АС 50 Гц: 24 В.
- Номінальна напруга живлення ланцюга керування  $U_s$  постійного струму DC: 240 В.
- Тип напруги керування: Змін/постій. (АС/DC).
- Мінімальна затримка на включення: 1.5 с.
- Максимальна затримка включення: 1.5 с.
- Принцип вимірювання: будь-який.
- Ширина: 18 мм.
- Висота: 90 мм.
- Глибина: 64 мм.

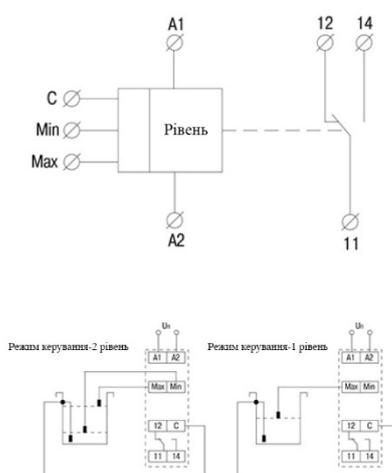


Рисунок 3.9 – Схема підключення реле рівня

Перевагами використання реле контролю рівня є реалізація схем роботи дренажних насосів та систем контролю рівня рідини лише за допомогою одного реле, монтаж на стандартну 35мм DIN-рейку та гарантія від виробника складає 5 років.

## РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Техніко-економічне обґрунтування

Основною метою магістерського дослідження є модернізація та дослідження електропривода тросошайбового транспортера для вигодовування свиней на свинокомплексах. Як зазначалося вище, у нашій країні свинарство є ефективною галуззю сільського господарства, тому на державному рівні їй приділяється значна увага. Через те, що основні технологічні процеси виробництва сільськогосподарської продукції пов'язані з біологічними процесами, де необхідно враховувати умови утримання тварин, автоматизація в сільському господарстві є особливою. Автоматизація в сільському господарстві, а саме у свинарстві, призведе до збільшення обсягів виходу продукції, підвищення її якості та утримання на належному рівні.

Після модернізації електропривода тросошайбового транспортера:

- зменшиться кількість ремонтів чи технічних обслуговувань за міжремонтний період;
- зменшиться споживання електричної енергії за рахунок оптимального керування електроприводом;
- подовжиться термін придатності механічних частин електропривода за рахунок зниження впливу динамічних навантажень.

### 4.2 Визначення витрат на модернізація електропривода транспортера

Для модернізації електропривода транспортера закуплені комплектуючі, перелік яких зведений у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік необхідних комплектуючих

Найменування комплектуючого	Кількість на одиницю, шт.	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Двигун 4A112M8У3	1	6000	6000
ПЧ E2-8300S3L	1	3700	3700
Контролер Mitsubishi AL2-24MR-D	1	10 000	10 000
Реле рівня ORL 24-240 В AC/DC ІЕК	1	600	600
Разом			20 300

Таким чином, витрати на придбання комплектуючих для модернізації електропривода транспортера дорівнюють:

$$Z_k = 20\,300 \text{ грн.}$$

Розрахунок заробітної платні з нарахуваннями.

Для встановлення системи необхідно виконати роботи по встановленню, монтажу системи керування, демонтажу старого обладнання, налагодці та пуску системи. Вказані роботи будуть проводити бригада з 2-х слюсарів 5-го розряду протягом 2-х днів.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{ЗПМ} = K_{нз} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ti} (1 + H); \quad (4.1)$$

де:  $K_{нз}$  – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату,  $K_{нз} = 1,3$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує премії,  $\lambda = 1,25$ ;

$t$  – час виконання робіт, год;

$C_{ti}$  – часова тарифна ставка працівника  $i$ -го розряду.

$H$  – норма нарахування на заробітну плату,  $H = 0,22$ ;

$m$  – кількість робочих, чол.

$$S_{\text{зпм}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 2 \cdot (37,87 \cdot 2) \cdot (1 + 0,22) = 2402,47 \text{ грн.}$$

Визначення загальної суми витрат.

Витрати на модернізацію електропривода транспортера як суму витрат на купівлю комплектуючих та витрат на заробітну плату з нарахуваннями робітникам, які проводять модернізацію:

$$Z_M = Z_K + Z_{\text{зпм}}; \quad (4.2)$$

$$Z_M = 20\,300 + 2402,47 = 22702,47 \text{ грн.}$$

### 4.3 Розрахунок річного фонду роботи транспортера

Розрахунок річного фонду часу роботи транспортера проведемо за формулою:

$$T_P = \frac{T_\Phi}{\frac{1}{t_{\text{см}} \cdot K_{\text{см}}} + D_P}; \quad (4.3)$$

де:  $T_\Phi$  – річний фонд робочого часу,  $T_\Phi = 251$  днів;

$t_{\text{см}}$  – тривалість зміни в машино-годинах,  $t_{\text{см}} = 8$ ;

$K_{\text{см}}$  – коефіцієнт змінності роботи устаткування,  $K_{\text{см}} = 2$ ;

$D_P$  – простой в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходить на одну машино-годину, визначимо за формулою:

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^n d_{pi} \cdot a_i}{T_{\text{ц}}}; \quad (4.4)$$

де:  $n$  – число різновидів технічних обслуговувань та ремонтів за міжремонтний період;

$d_{pi}$  – тривалість перебування в  $i$ -му ремонті чи технічному обслуговуванні;

$a_i$  – кількість  $i$ -х ремонтів чи технічних обслуговувань за міжремонтний період;

До та після модернізації час міжремонтного циклу складає 8760 годин. До удосконалення САК проводилось 15 оглядів впродовж 1,0 години, а після 5 оглядів впродовж 1,0 години. Враховуючи наведене, розраховуємо простої в машино-днях при всіх видах технічного обслуговування до та після модернізації:

$$D_{pl} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 15}{8760} = 0,0017 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}};$$

$$D_{pl} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 5}{8760} = 0,0006 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}};$$

Тоді річний фонд часу роботи транспортера дорівнюватиме відповідно:

$$T_{pl} = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 2} + 0,0017} = 3909,66 \text{ год},$$

$$T_{pl} = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 2} + 0,0006} = 3977,81 \text{ год},$$

#### 4.4 Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності транспортера

Річна експлуатаційна продуктивність транспортера визначається за формулою:

$$B = B_{E.G.P} \cdot T_p \cdot K_{PP}; \quad (4.5)$$

де:  $B_{E.G.P}$  – годинна експлуатаційна продуктивність, (1,5 т/год),

$K_{PP}$  – коефіцієнт, що враховує простій, не враховане в годинній експлуатаційній продуктивності.

Після модернізації електропривода транспортера та встановлення датчика рівня продуктивність транспортера не зміниться.

Таким чином, до та після модернізації електропривода транспортера річна продуктивність складає:

$$V_1 = 1,5 \cdot 3909,66 \cdot 0,9 = 5688,56 \text{ т/рік.}$$

Після модернізації:

$$V_2 = 1,5 \cdot 3977,81 \cdot 0,9 = 5787,71 \text{ т/рік.}$$

#### 4.5 Розрахунок поточних річних витрат

Поточні річні експлуатаційні витрати визначаються для транспортера до та після модернізації.

За процесом роботи транспортера спостерігає один оператор 5-го розряду, після модернізації електропривода транспортера склад не зміниться.

Витрати на заробітну плату до та після модернізації складають:

$$S_{ЗП} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3909,66 \cdot 37,87 \cdot 1 \cdot (1 + 0,22) = 293526,62 \text{ грн.}$$

$$S_{ЗП} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3977,81 \cdot 37,87 \cdot 1 \cdot (1 + 0,22) = 298643,14 \text{ грн.}$$

Визначення витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт САК транспортера.

Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт САК визначимо за формулою:

$$S_{ТО} = S_{ТОЗ} + S_{ТОМ}; \quad (4.6)$$

де:  $S_{ТОЗ}$  – витрати на заробітну плату ремонтників з нарахуваннями;

$S_{ТОМ}$  – витрати на матеріали та запасні частини.

Витрати на заробітну плату ремонтних робітників з нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{ТОЗ} = \frac{T_P}{T_{Ц}} \cdot K_{НЗ} \cdot \lambda \cdot C_P \cdot \sum_{i=1}^m a_{pi} \cdot \tau_{pi} \cdot (1 + H); \quad (4.7)$$

де:  $C_P$  – середня тарифна ставка ремонтного робітника, що обслуговують установку, грн/год;

$a_{pi}$  – кількість техобслуговувань і поточних ремонтів без капітального ремонту;

$ч_{pi}$  – трудємкість і-го технічного обслуговування та поточного ремонту, до і після –  $ч_{pi} = 7,58$ ;  $ч_{pi} = 6,25$ .

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{\text{ТОМ}} = K_{\text{П}} \cdot \frac{S_{\text{ТОЗ}} \cdot (1 - H)}{K_{\text{НЗ}}} \cdot K_{\text{ЗР}}; \quad (4.8)$$

де:  $K_{\text{П}}$  – норма накладних розходів за всіма видами витрат, крім заробітної плати,  $K_{\text{П}} = 1,1$ ;

$K_{\text{ЗР}}$  – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини,  $K_{\text{ЗР}} = 1,25$ .

До модернізації для технічного огляду та поточного ремонту необхідно один слюсар КВПіА 5-го розряду. Після модернізації їх склад не змінився. Огляд проводиться 15 разів на рік до модернізації та 5 після.

$$S_{\text{ТОЗ1}} = \frac{3909,66}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 7,58 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 3809,81 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{ТОЗ2}} = \frac{3977,81}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 6,25 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 1065,37 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини до модернізації складають:

$$S_{\text{ТОМ1}} = 1,1 \cdot \frac{3809,81 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 3143,09 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини після модернізації:

$$S_{\text{ТОМ2}} = 1,1 \cdot \frac{1065,37 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 878,93 \text{ грн.}$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт транспортера до модернізації склали:

$$S_{\text{ТО1}} = 3809,81 + 3143,09 = 6952,90 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ТО2}} = 1065,37 + 878,93 = 1944,30 \text{ грн.}$$

Величину витрат на електроенергію визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЕЛ}} = K_{\text{ш}} \cdot W_{\text{ЕЛ}} \cdot B_{\text{ЕЛ}} \cdot T_{\text{р}}; \quad (4.9)$$

де:  $B_{\text{ЕЛ}}$  – ціна 1 кВт/год електроенергії – 5,5 грн;

$W_{\text{ЕЛ}}$  – витрата за годину енергії, кВт/год.

Енергообладнання тросошайбового транспортера споживало 2,2 кВт/год, після модернізації електропривода транспортера, а саме встановлення енергозберігаючого електропривода по системі ПЧ-АД енергоспоживання зменшиться 20 %.

Виходячи з цього витрати на електроенергію до модернізації склали:

$$S_{\text{ЕЛ1}} = 1,1 \cdot 2,2 \cdot 5,5 \cdot 3909,66 = 52037,57 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ЕЛ2}} = 1,1 \cdot 2,2 \cdot 0,80 \cdot 5,5 \cdot 3977,81 = 42355,72 \text{ грн.}$$

Розрахунок суми річних витрат на експлуатацію транспортера зведений у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Сума річних витрат на експлуатацію

Найменування статті витрат	Величина витрат	
	До впровадження САК, грн.	Після впровадження САК, грн.
Зарплата з нарахуваннями	293526,62	298643,14
ТО та поточний ремонт	6952,90	1944,30
Електроенергія	52037,57	42355,72
<b>Разом</b>	<b>352517,09</b>	<b>342943,16</b>

#### 4.6 Розрахунок вартості машино–години роботи транспортера

Розрахунок вартості машино–годин розраховуємо за формулою:

$$S_{\text{МГ}} = \frac{S}{T_{\text{р}}}. \quad (4.10)$$

До модернізації вартість однієї машино-години складала:

$$S_{\text{МГ1}} = \frac{352517,09}{3909,66} = 90,17 \text{ грн. / год}$$

Після модернізації вартість однієї машино-години змінилась і складає:

$$S_{\text{МГ2}} = \frac{342943,16}{3977,81} = 86,21 \text{ грн. / год}$$

#### 4.7. Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції

Вартість технологічної операції визначається за формулою:

$$S_{\text{П}} = \frac{S}{B}. \quad (4.11)$$

До модернізації вартість складала:

$$S_{\text{П1}} = \frac{352517,09}{5688,56} = 61,97 \text{ грн. / т.}$$

Після модернізації вартість складає:

$$S_{\text{П2}} = \frac{342943,16}{5787,71} = 59,25 \text{ грн. / т.}$$

#### 4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації

Річний економічний ефект від проведення модернізації визначається за формулою:

$$E = (S_{\text{П1}} - S_{\text{П2}}) \cdot B; \quad (4.12)$$

$$E = (61,97 - 59,25) \cdot 5787,71 = 15742,57 \text{ грн / рік.}$$

Термін окупності витрат по модернізації розраховуємо за формулою:

$$T = \frac{Z_{\text{М}}}{E}; \quad (4.13)$$

$$T = \frac{22702,47}{15742,57} = 1,44 \text{ років.}$$

Отже, термін окупності приблизно 1,44 років.

Таблиця 4.3 – Техніко-економічні показники модернізації та дослідження електропривода транспортера

Показники	Одиниці виміру	Значення		
		до модернізації	після модернізації	абсолютне відхилення
1. Капітальні витрати на модернізацію	грн.	х	22702,47	х
2. Річний фонд часу роботи	год.	3909,66	3977,81	-68,15
3. Річна експлуатаційна продуктивність	т	5688,56	5787,71	-99,15
4. Річні експлуатаційні витрати, усього:	грн.	352517,09	342943,16	+9573,93
у тому числі:				
витрати на оплату праці	грн.	293526,62	298643,14	-5116,52
витрати на ТО та ТР	грн.	6952,90	1944,30	+5008,60
витрати на електроенергію	грн.	52037,57	42355,72	+9681,85
5. Вартість однієї машино-години роботи	грн./год.	90,17	86,21	+3,96
6. Вартість технологічної операції	грн./ т	61,97	59,25	+2,72
7. Річний економічний ефект	грн.	х	15742,57	х
8. Строк окупності капітальних вкладень	років	х	1,44	х

Висновки за розділом

Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електрообладнання зменшились на 72,04 %.

Витрати на електроенергію електропривода зменшились на 18,61%.

Вартість машино-години роботи електропривода зменшились на 4,39%.

Вартість технічної операції для одиниці продукції після модернізації знизилась на 4,39%.

Економічна ефективність від проведеної автоматизації склала 15742,57 грн.

Строк окупності витрат складає 1,44 рік.

## ВИСНОВКИ

Завдяки проведеним у магістерській роботі дослідженням технологічного процесу приготування та роздачі кормів виявлено, що у сучасному свинарстві, в основному, застосовуються напівавтоматизовані кормороздавачі. Тобто, у процес годування та роздавання корму втручається оператор, що зазвичай негативно впливає на кінцевий результат, а отже на всю ефективність технологічного процесу вигодовування на свинокомплексі.

Доведено, що доцільним буде виконання аналізу призначення, типу та конструкції конвеєрів. Розглянуто умови та режими роботи конвеєрів, проаналізовано системи електроприводів, що застосовуються у транспортерах.

Проведено розрахунок приводу тросошайбового транспортера, за результатами якого обрано асинхронний двигун відповідної потужності. Побудовано природні та штучні механічні та електромеханічні характеристики електродвигуна. Було обрано перетворювач частоти та проведено розрахунок його параметрів та підібране додаткове обладнання. Наведено схему підключення перетворювача частоти до асинхронного двигуна та електричної мережі. Здійснено розрахунок енергетичних показників електродвигуна.

Складено структурну схему замкнутої системи автоматизованого електроприводу та визначено передавальні функції основних силових елементів. Вивчено перехідні характеристики асинхронного двигуна та змодельовано віртуальну модель електроприводу в пакеті прикладних програм Matlab.

У економічному розділі виконали техніко-економічне обґрунтування модернізації електропривода тросошайбового транспортера та доведена економічна ефективність запропонованих заходів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Авдєєв П.В. Вимоги до системи автоматизації процесу приготування і роздачі кормів на свинофермі / Авдєєв П.В. // Молодь і сільськогосподарська техніка у ХХІ сторіччі: XVII Міжнародному форумі молоді.-2021.- С. 217.
2. Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 2: Перехідні процеси у лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами.– К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2008.–224с.
3. Дегтерев, Г.П. Технологии и средства механизации животноводства./Г.П. Дегтерев. - М.: Столичная ярмарка, 2010. - 384 с.
4. Галай М. В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, –2002. – 222 с.
5. Галай М. В. Лінійні неперервні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, – 2001. – 140 с.
6. Гевко Б.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б.М. Гевко, Р.М. Рогатский, Львов: Вища школа., 1989.- 175 с.
7. Голуб А. П. Системи керування електроприводами : навч. посібник / А. П. Голуб, Б. І. Кузнецов, І. О. Опришко, В. П. Соляник. – К. : НМК ВО, 1992. – 352 с.
8. Грабко В. В. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Розрахунок цифрової системи керування електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 97 с.
9. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом постійного струму.

Курсове та дипломне проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 89 с.

10. Ивановский К.Е., Раковщик А.Н., Цоглин А.Н. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства - М.: Машиностроение 1973. — 216 с.

11. Лисиченко М. Л. Посібник "Електропривод у питаннях і відповідях" / М. Л. Лисиченко, П. І. Савченко, О. К. Тищенко, В. В. Гузенко — Х: ХНТУСГ; Факт, 2012., 2012. – 500 с.

12. Механизация и технология животноводства: учебник /В.В. Кирсанов, Д.Н. Мурусидзе, В.Ф. Некрашевич, В.В. Шевцов, Р.Р. Филонов - М.: ИНФРА, 2013. - 585 с.

13. Онушко В. В., Шефер О. В., Скрильник О. М. Асинхронні машини: посібник із модуля «Асинхронні машини»: – Полтава, ПолтНТУ, –2008. – 183 с.

14. Онушко В. В., Шефер О. В. Електричні машини: Навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, – 2015. – 536 с.

15. Павленко Т. П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 132 с.

16. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією / Г. Г. Півняк, О. В. Волков. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006. – 470 с.

17. Ромакин Н.Е. Конструкция и расчёт конвейеров Справочник / - Старый Оскол: ТНТ, 2011. - 504 с.

18. Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по

дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы электропривода» – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с.

19. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 448 с.

20. Федоренко И.Я. Курсовое проектирование по механизации животноводства: учебно-методическое пособие/ И.Я. Федоренко, В.И. Земсков, В.В. Садов и др. - Барнаул: РИО АГАУ, 2013. - 149.

21. Шебітченко В. Г., Стрижеус Д. Розрахунок статичних параметрів елементів автоматизованого електропривода: навчальний посібник: – Полтава: ПОЛТНТУ, – 2010. - 107 с.

22. Шебітченко В. Г., Шефер О. В., Бороздін М. К. Датчики й регулятори в автоматизованому електроприводі: навчальний посібник: – Полтава: ПОЛТНТУ, – 2011. - 88 с.

23. Шульга О. В. Навчальний посібник із грифом МОН «Автоматизоване керування електроприводами» з дисципліни «Системи керування електроприводами» для студентів вищих навчальних закладів: – Полтава: ПолтНТУ, – 2007. – 352 с.

24. Якубовская, Е.С. Автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства: практикум/ Е.С. Якубовская, Е.С. Волкова. – Минск: БГАТУ, 2008. – 319 с.

# Додатки

## Додаток А

## SECTION 1 ANALYTICAL PART

## 1.1 General information

Consider the pig farm as a place to keep a large number of pigs, feed and long-term storage of organic waste. In other words, it is a series of technologically integrated facilities and facilities designed for the full technological cycle of pig farming – from birth to slaughter and processing of pig meat. In Figure 1.1. the master plan of a typical pig complex is schematically given.

Animals are kept in special rooms – piggeries. Feed mills produce feed mixtures. In the future, feed mixtures are sent by conveyor to the feeders, where pigs kept in the pig farm are fed directly.

Traditionally, in pig breeding, stationary systems of distribution of dry and liquid feed mixtures are used for, respectively, dry (80% of farms use) and liquid (20% of farms use) type of feeding. Dry type of pig feeding is more popular, due to lower investment costs for the installation of equipment, easy maintenance of such equipment and a high level of sanitary and hygienic condition of the pigsty. For fast and high-quality distribution of compound feeds, automated technical means are used at all modern world and domestic pig farms when feeding all sex-age groups of pigs. It should be noted that pigs are fed to fattening and piglets on rearing. All other sex-age groups of pigs are fed a clear portion diet.

For constant automatic feeding, feeders should be made so that as the food is eaten by animals, it came again according to the established diet. Through special feed wires, feed enters the pigsty from the outer hopper. If the room of a pigsty has a difficult configuration, it is necessary to apply chain and washer conveyors.

Sows with suckling piglets and single-pregnant sows are on special feeding. For sows with suckling piglets, the feeder is fixed in the fence, and at a certain time

in a given amount through the dispenser they are fed the feed mixture. Similarly, single-pregnant sows are fed individually.

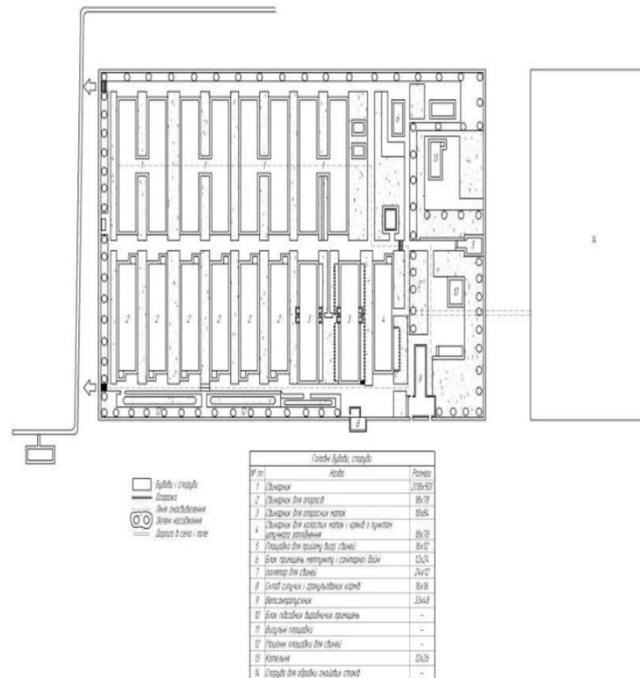


Figure 1.1 – General plan of the pig farm

When group sows are kept in a pig farm, the feeding technology is more complicated, because each sow is clearly measured and fed her dose. This is the main feature and technology of feeding sows in group keeping. It is also necessary to prevent weaker animals from pushing weak animals away from their feeding grounds. The distribution of the feed mixture is organized quickly enough so that the sow eats it without leaving the other feeder. To do this, the feed distribution system is equipped with individual dosing devices.

## 1.2 Preparation of feed

One of the important and time-consuming technological operations is the technology of preparation of feed for pigs. If we take into account the total labor costs per unit of output, then 50–60 % is spent on feed preparation. Note that 60–80 % of the unit cost is the cost of finished feed. Usually, own pigs are prepared with feed mixtures of own production.

All feed mixtures require pre-treatment. This procedure is necessary to increase the efficiency of nutrient use – better absorption of pigs, increase nutrition and reduce animal diseases. Feed processing is one or more successive technological operations at the appropriate level.

Before feeding the animals feed, they are prepared for consumption. Such preparation can be mechanical, thermal, chemical or biological.

Consider mechanical methods of feed preparation. These include grinding and spraying, moistening and thorough cleaning of impurities, as well as direct preparation of feed mixtures. If the feed is steamed before feeding the animal, it is heat treatment of feed mixtures. Liming, treatment with alkali or acid is a chemical treatment of feed. If there is ensiling or fermentation of feed, it is a biological method involving microorganisms.

The key to the productivity of animals, reducing their morbidity and, as a result, obtaining the greatest economic benefit, is the right choice of a method of preparing feed for consumption.

Thus, the technological schemes of preparation and distribution of feed today include:

- 1) production of own high-grade compound feeds or their delivery from specialized plants, distribution of feeds and feeding them in dry form.

- 2) production of own liquid feed mixtures in the feed mill on the basis of compound feeds and distribution of feed mixtures by pumps. In this case, a combination of feed and waste from sugar factories, dairies, meat plants, breweries, etc. is possible. The productivity of pigs increases to 15 %, because the digestibility of liquid feed is higher. Since the humidity of liquid feed mixtures is about 80%, you can completely give up drinking, which, in turn, will reduce the cost of feeding pigs. Along with such advantages, there are disadvantages of liquid feed distribution system. First of all, they are related to the cleaning of pipelines and feeders from the remains of fermented feed. Due to the corrosion of the elements of the feed distribution system, it quickly fails.

3) preparation of own nutritious wet mixes with humidity up to 75 %. Such mixtures are made with the addition of silage, concentrates, hay flour, etc. Their preparation requires the construction of a separate feed shop, so this scheme is less used in practice.

4) collection near large food processing plants and large cities, preparation and disinfection of food waste in a special feed shop and distribution by special mobile distributors.

### 1.3 Means of feed distribution on pig farms

Figure 1.2 shows a typical HYDROMIX automatic liquid feeding system manufactured in Germany by Bigdutchman (Figure 1.2).

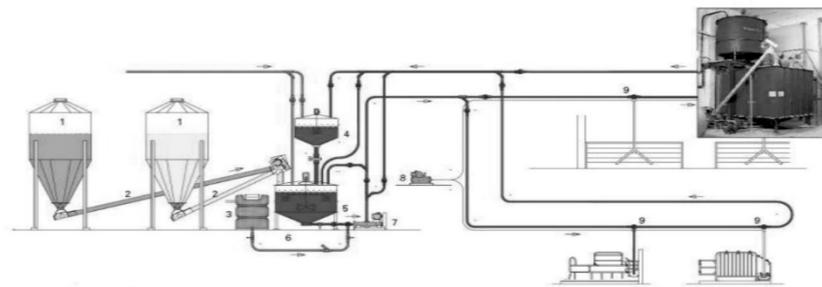


Figure 1.2 – HYDROMIX system with flushing pipes

1 – the bunker for compound feed; 2 – feed auger; 3 – capacity for fresh water; 4 – capacity for technical water; 5 – mixing capacity; 6 – electronic scales; 7 – feed pump; 8 – compressor; 9 – feed valve

The technological scheme of liquid feeding of pigs has a more complex technological scheme than dry feed. Figure 1.3 shows the technological scheme of the process of distribution of dry feed mixtures in the pigsty.

Dry feeding systems, in turn, according to the options are divided into a dry feeding system with the distribution of feed in volumetric dispensers (feeding sows) or distribution of feed in feed machines for feeding piglets). With the help of feed machines, dry feed mixtures for piglets of all ages are distributed. Feed machines

are designed for group feeding of pigs. Depending on the age of the animal, each feed machine can feed up to 60 pigs.

Dry feed is usually granular. Let's highlight the basis of the benefits of dry feeding pigs. These include digestibility and partial disinfection, a simpler mechanism to automate the feed distribution process, reduce feed loss by pigs, and directly reduce feed volumes, which in turn will reduce the need for storage and transportation.

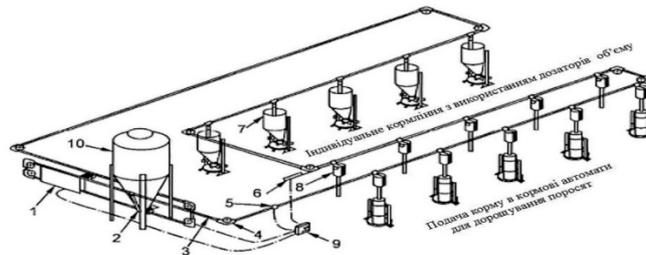


Figure 1.3 – Technological scheme of the process of distribution of dry feed in pigsty

1 – drive of the cable washer feeder; 2 – receiving funnel 3 – cable conveyor; 4 – rotary device; 5 – sensor to turn off the feed; 6 – drive bulk feed dispensers; 7 – downpipe; 8 – volume dispenser; 9 – control device; 10 – hopper for storage of dry fodder

A typical automatic feed distribution system is a set of the following elements: a pipeline consisting of a galvanized steel thin-walled feed pipe and plastic corners through which the feed is transported in volumetric dispensers or feed machines. A washer is stretched through such a pipeline. A washer cable is a steel cable with cast plastic discs. The height of the feed line is about two meters.

The principle of operation of the feeding system is to work until all feed devices are filled with feed. When the feeders or dispensers are filled with the last feed dose, the stop system sends a signal to the control unit to stop the conveyor. The above process is the main function of the pig feeding system.

Special bunkers are located near the livestock premises, where the operational stock of dry mix is stored. Such hoppers can be made of metal or fiberglass, be smooth or corrugated.

In the premises of the pig farm with a large number of bends, turns and differences in levels, a contour system of transporting feed to dispensers and feeders is used. In this case, you can use such types of feed conveyors as spiral, chain or cable (Fig. 1.4).

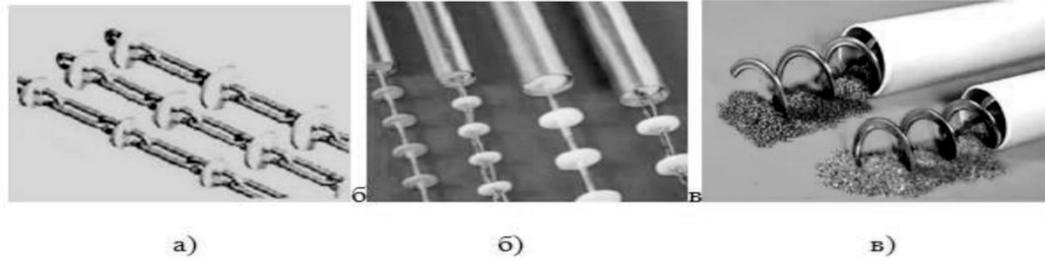


Figure 1.4 – Feed conveyors  
and – chain; б – cable; in – spiral

In foreign and domestic pig farms, in practice, a transport spiral is usually used to transport bulk feed. The transport spiral is made of flexible high-quality steel. Therefore, the main advantages of spiral conveyors are:

- they are universal for each type of room, have a quick and easy installation, have a gear motor;
- their goal is increased productivity in general, along with saving corner wheels;
- have an idle line to the feed hopper and the ability to group one flexible auger with two, as well as more contours.

Dispensers with vertical filling up to the set volume of the dispenser are usually used in animal cages (Fig. 1.5).



Figure 1.5 – Premises with vertical filling dispensers

These dispensers are part of a single remote-controlled automated feed distribution system. They simply and clearly set the doses and volumes of feed mixtures. The dispenser is opened through the control bullets of the system of automated distribution of pig feed.

In the modern world and in domestic pig farms, mobile feeders are used alongside stationary ones. Their function is to transport and distribute feed in individual racks.

In piggeries, animals are fed repeatedly. If it is a fattening pig, the pigs are fed 5 times a day with an interval of 4, 8, 12, 16 or 20 hours. The mixture is automatically dispensed in small portions according to the established norm by volume dispensers for each age group (for example, 1 ... 3.5 kg per dose). The full feed rate for all complete feeder cycles is fed into the machine. Depending on the zonal characteristics, the method of feeding, the conditions of keeping pigs and the organization of work on the pig farm, the choice of the type of feeder is made. It is clear that as pigs grow, feed norms increase.

Note that the mixers KS-1,5, KES-1,7, RS-5A are popular mobile electrified feeders around the world. They can mix and distribute feed mixtures with a humidity of 60 ... 80%.

For normalized distribution of compound feeds in sow pens and sows and suckling piglets, mobile electrified feeder KSP-0,8. Such feeders are loaded with feed that comes ready from the feed shop, using a conveyor. The principles of feed distribution in all feed distributors are almost similar.

The KS-1,5 mobile forage distributor is used for mixing and distribution of semi-liquid forage mixes on farms. In fact, it is a rail self-propelled cart with two pairs of wheels in the form of a bunker. The cart is equipped with a mechanism of drive, control and electrical equipment. The electric motor is connected to the mains by a cable located in a special gutter. The feed mixture is loaded through a hole in the top of the hopper. In the middle of the hopper there are unloading augers and a mixer with shovels. Note that the control of the distributor is semi-automatic. Activation and deactivation of the agitator with blades, the unloading auger and

control of movement of the forage distributor is carried out by means of cam couplings which are switched by the operator. By turning the valves at the connection points of the unloading augers, the rate of feed distribution is regulated according to the set dose. When the valve of one of the augers overlaps completely, the feed is not on one side.

Figures 1.6 and 1.7 show the feed mixer KS-1,5 and its scheme. In fact, it is a bunker on a trolley with support wheels, which moves on special rails by electric drive.

For dosed distribution of feed mixture with a moisture content of up to 75% with particle sizes not exceeding 10 mm in group feeders on pig farms used feed distributor of wet feed mixtures KVK-F-15.

As you can see in Figure 1.7, the feeder consists of a feed hopper 1, a control cabinet 2, an electric pump unit 3, a flow switch 4, a feed line 5, a valve opening mechanism 6, a guide 7, taps 8 and an electrical pressure gauge 9.

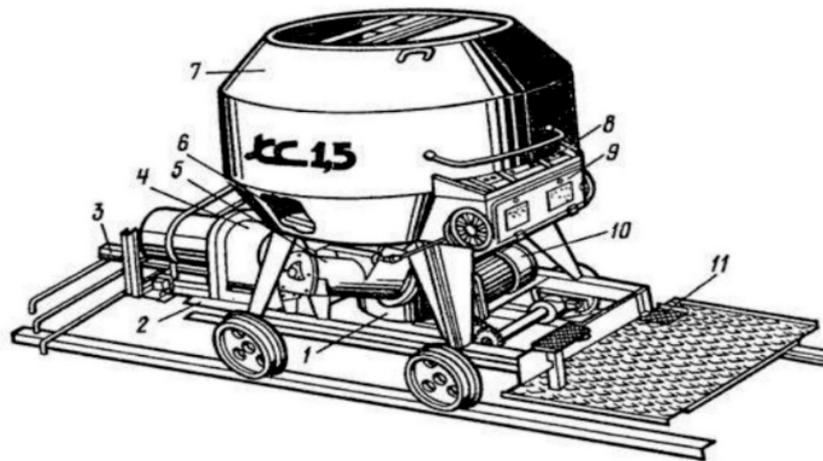


Figure 1.6 – Feeder-mixer KS-1,5

1 – junction box; 2 – running gear; 3 – device for stopping the feeder in the event of a collision with obstacles; 4 – reducer-mixer; 5 – unloading augers; 6 – stirrer; 7 – hopper-mixer; 8 – control panel; 9 – dashboard; 10 – electric motor of the movement mechanism; 11 – brake pedal

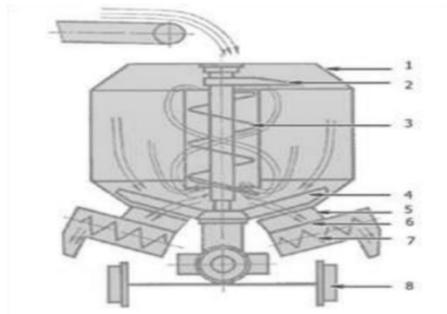


Figure 1.7 – Structural and technological scheme of the feeder KS-1,5  
 1 – bunker; 2 – leveler; 3 – vertical auger; 4 – paddle stirrer; 5 – camera; 6 – damper; 7 – unloading auger; 8 – running gear

The electric pump unit IP 20/10 is a combination of the electric motor, the screw pump and the intermediate case. The three-way valve, which consists of a housing, lids and a drum, is a flow switch.

The feed pipe is a steel pipe with a diameter of 80 mm with windows for feed outflow and holes for exhaust valve cables.

It is determined that the electric motor, rod with stops, worm reducer, guide, two-arm levers and rack are part of the valve opening mechanism included.

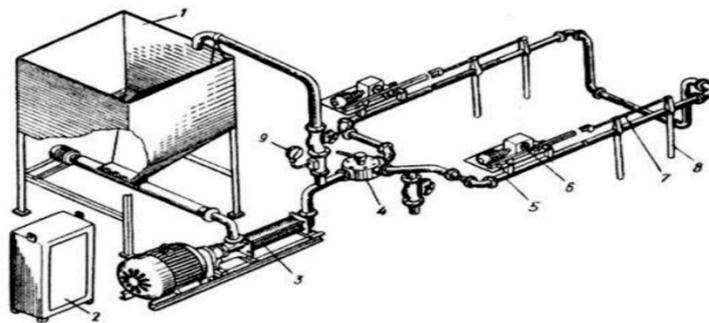


Figure 1.8 – General view of the feeder of wet feed mixtures KVN-F-15  
 1 – feeder hopper; 2 – control cabinet; 3 – electric pump unit 4 – switch; 5 – feed line; 6 – valve opening mechanism; 7 – guide; 8 – branch; 9 – electrocontact manometer

The exhaust valve is a plastic cone with a rigidly attached coaxial cable on which the stop is fixed.

The sequence of the process of operation of the feed hydraulic system is shown in Figure 1.9.

Therefore, the screw pump is pumped through the flow switch into the feed line feed. Then the exhaust windows are successively opened and the feed is diverted to the feeder, according to the program installed by the timer. The boom automatically returns to its original position, after the feed mixture has been dispensed, due to the switching off of the electric pumping unit. The process is repeated after installing the flow switch to fill the next feed line.

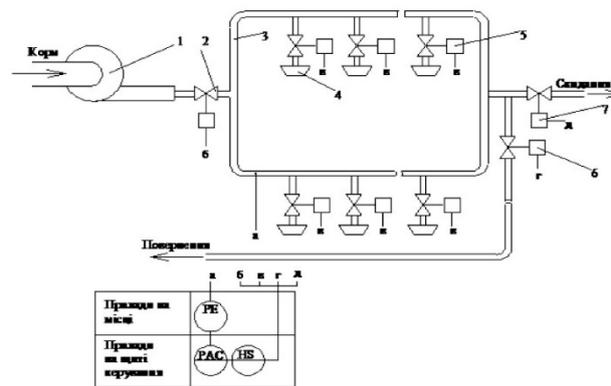


Figure 1.9 – Functional diagram of feed automation hydraulic system  
 1 – hydraulic pump; 2 – the main valve; 3 – feed distribution line; 4 – feeder; 5 – local dosing valve; 6 – return valve; 7 – reset valve

Cable-washer feeders are used for normalized feeding with dry fodder. Feed distribution is managed in the same way as shown in the functional diagram of automation (Fig. 1.10).

From the hopper of the daily rate of feed BSK1 screw auger feed is fed to the intermediate hopper 2. BSK1 is outside the livestock room, and the hopper 2 is located in the pig farm. From the intermediate hopper, the feed is moved along the feed line by a cable-washer conveyor. Through the holes in the feed line feed is fed into individual or group dispensers 3.

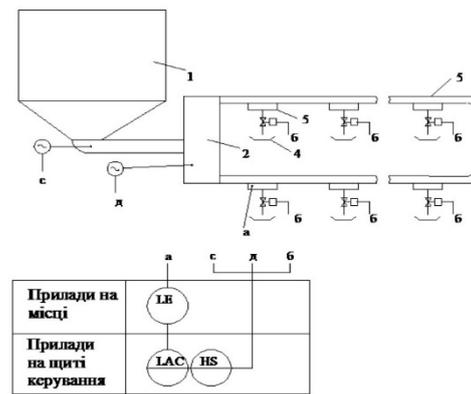


Figure 1.10 – Functional and technological scheme of the cable car feeder

The LE B level sensor is installed in the latest individual dispenser. On the level regulator signaling LAC the signal on readiness of delivery of a forage from the level sensor arrives.

Depending on the level of feed in individual dispensers, the level regulator provides two-position control of the electric drive of the loading auger and a cable-washer conveyor. By simultaneously switching on the electromagnetic actuators, the feed mixtures are dispensed on command from the KS software device at a certain time.

In practice, with unregulated bulk feed in piggeries, it will be appropriate to use spiral feeders, which are similar in structure to cable-washers.

As in the previous system in the BSC bunkers, the daily feed rate is maintained. Compound feed is fed by spiral conveyors from the BSC hopper to the intermediate hopper and dispensers via pipelines. The constant availability of feed in the dispensers is ensured by the electric drive of the spiral conveyor, which has software control. Individual or group dispensers have only control valves, which is why the feed mixture in the feeders is constant and the pig is fed on request. This is a significant difference from the previous system discussed above.

It is not uncommon to use a stationary feeder RKS-3000, which provides uniform distribution of dry, succulent and semi-liquid feed for 3000 pigs in 20 ... 30 minutes. Such a device will be appropriate in the group method of keeping animals.

Figure 1.11 shows that the finished feed enters the feeder, given the one-time feed rate for all pigs.

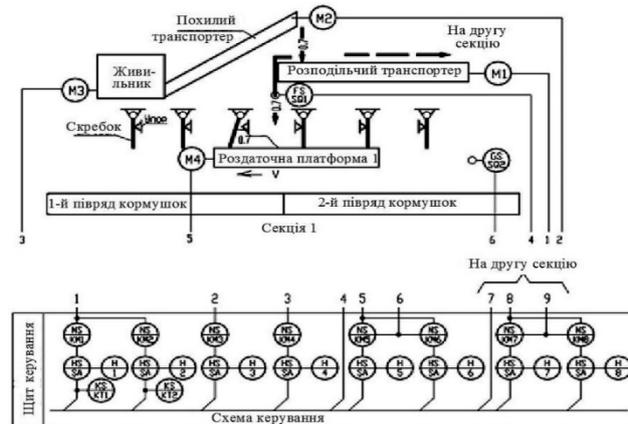


Figure 1.11 – Scheme of automation of the RKS-3000 feeder

Then the feed mixture is fed to the inclined and on the distribution conveyors. In turn, the distribution conveyor loads sections 1 and 2 of the feed dispenser (section 2 is not shown in the figure) using the dispensing platform.

In each section of the dispenser, the dispensing platform reciprocates at a distance equal to half the length of the feeders.

When the dispensing platform moves to the left, it receives food. Scrapers suspended on hinges and turned upwards do not interfere with the advancement of the platform with stern. Scrapers are lowered, hold the feed and dump it in the feeder at the reverse of the platform. At this time, the right half of the platform is loaded with feed.

It is expedient to deliver fodder and distribute fodder directly by pipeline in separate sectors of pig farms.

Thus, pneumatic and hydraulic are two ways to deliver and distribute wet feed mixtures through pipes. Pneumatic method is more expensive, because it is more metal-intensive. In addition, with this method, a lot of feed when unloaded in the feeder is sprayed and sprayed. It will be reasonably expedient to use centrifugal pumps of the NF type when transporting feed mixtures with humidity above 74 %. However, their sensitivity to changes in humidity and pressure in the system does not make them popular for use in global and domestic pig farms.

## 1.4 Description of the automation object

On the basis of the relay-contactor circuit and on the basis of the controller it is possible to implement the given control circuits.

In this master's thesis we implement the scheme on the basis of the controller, taking into account the factors of reliability, ease of implementation, monitoring, functionality and economic feasibility.

Consider in more detail each of the above factors:

- exclusion from the scheme of a large number of relay-contact elements increases reliability, makes it easier to troubleshoot and reduces the possible occurrence of them;

- the presence of a convenient and accessible interface of the controller allows you to implement the necessary tasks with a minimum of effort;

- the controller allows to carry out control and monitoring of technological process in real time;

- in case of change of technological process it is possible not to introduce new elements of the scheme, by reprogramming of the controller;

- the cost of the controller is lower than the cost of the equipment without the use of the controller.

Therefore, the expediency of using the controller in the implementation of the control algorithm is justified.

The scheme of the line of preparation and distribution of feed on the pig farm is shown in Figure 1.12.

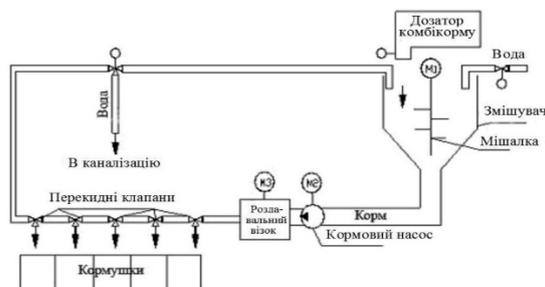


Figure 1.12 – Scheme of the line of preparation and distribution of feed at the pig farm

The line works in two modes: feeding and washing. In feed mode, the line should work as follows. First, the mixer prepares the feed mixture according to the signal from the daily time relay.

For this purpose a certain dose of nutritious liquid is filled in the mixer then at the included mixer the dose of compound feed falls asleep and the mixer mixes mix for additional time. After mixing the feed, the movement of the transfer trolley is switched on, which moves from the initial position to the first check valve of the first feeder, where it opens the valve and stops. At the same time the pump works and unloads a forage dose in the first feeding trough (the dose is measured by a flowmeter). After unloading the dose, the pump is switched off and the transfer truck moves on.

The process of loading the feeders is repeated. When loading of the last feeding trough is provided, it is necessary to provide movement of the cart in initial position and inclusion of the sound alarm system of termination of work of the line in the feeding mode.

### 1.5 Features of the modes of operation of the suspended conveyor and the requirements for electric drives of the conveyor

Consider the operating conditions of the conveyor, including:

- quite long and long mode of operation. Usually, for significant periods of time, with changes, without pauses during the inclusion;
- the possibility of significant static moments during movement, exceeding even the nominal loads ( $M_s, t_r > M_s, n_{0m}$ ). For example, when starting a loaded conveyor after a sudden or emergency stop;
- relatively infrequent starts that do not affect the performance of the conveyor along with the constant direction of rotation of the engine;
- the conveyor motor works in different environmental conditions: in dusty or humid rooms, outdoors, at high or low temperatures, in shops with aggressive environments, etc.

Consider the requirements for the electric conveyor:

- smooth start and braking to prevent the belt from slipping or the load from swinging in the belt and suspension;
- increased starting torque ( $MP / MP_{us} = 1.6 \dots 1.8$ );
- small speed adjustment in the range of 1:2 to change the pace of work in current lines;
- coordinated rotation of electric drives for several conveyors.

Electric drive with three-phase asynchronous motors of long mode of operation - with short-circuited and with phase rotor, satisfies requirements almost completely. However, the disadvantage of motors with a short-circuited rotor is the large starting current, along with cheaper automation of the conveyor. However, it is better to choose engines with high starting torque. For single-motor conveyor drive, the speed of which must be regulated, use multi-speed motors with switching the number of pole pairs, or use additional mechanical variators or adjustable electric and hydraulic couplings. Motors with a phase rotor are installed on the conveyor, requiring increased starting torque, with a multi-motor drive of the conveyor in order to balance the loads of individual motors, as well as if necessary, the coordinated movement of the conveyor PTS.

1.6 Types of electric drives designed for the conveyor. Principles of work, advantages and disadvantages

AD with short-circuit rotor and high starting torque, single-speed or multi-speed with switching the number of pole pairs. We will add that for adjustment of speed of the single-motor drive of the conveyor additional variators mechanical or adjustable electric and hydraulic couplings are applied.

BP with phase rotor:

- on the conveyor requiring the increased starting moment;
- at the multi-engine drive of the conveyor (for equalization of loadings of separate engines);

– while ensuring the coordinated movement of the conveyor.

The multi-motor drive is used for long conveyor lengths. Use of several drive stations allows to avoid big stresses in mechanisms, overload of sites, to reduce dimensions of a traction body and size of traction efforts.

In this case, the traction body of each drive station transmits a force proportional to the static resistance of only one section, not the whole conveyor.

The choice of the location of the drive stations is determined in accordance with the diagram of the change in tension forces.

The optimal number of drive stations is determined by technical and economic calculations.

Driving HELL with short-circuit rotor must have the same parameters, HELL with phase rotor characteristics in accordance can be brought by the introduction of additional resistance in the circuit of their rotors.

Electric drive of synchronous rotation.

There are mechanisms whose drive consists of the same motors (two or more) that require rotation at equal speeds. Examples are the mechanisms of tower cranes, drawbridges, sluice gates, conveyors, where the coordinated rotation of electric motors is required, and their connection by a mechanical shaft is impossible. In this case, the electrical connection between the rotors of asynchronous (AD) or synchronous (SD) motors, called an electric shaft.

There are several special schemes implemented on the principle of «electric shaft».

The scheme includes two main engines (GD1, GD2), which drive, respectively, «mechanism 1» and «mechanism 2». They have the same characteristics.

Auxiliary asynchronous motors «AD1» and «AD2», whose phase rotors are electrically connected, are mounted on each shaft «GD1» and «GD2». The power of auxiliary electric motors is much less than the power of the main ones.



Compared to the previous advantage will be ease of use, cheapness and smaller dimensions of the device.

The circuit includes two drive motors with a phase rotor D1, D2 and a frequency converter (RF). The stator windings of the inverter, D1 and D2 are connected to the mains, and the rotor are electrically connected.

When the inverter rotates, the frequency in the rotors will be proportional to the slip, the speed of rotation of all machines will be the same and equal

$$\omega = \frac{2\pi}{p}(f_1 - f_2).$$

This is true with equal loads on the mechanisms.

As the load on one mechanism (for example, the first) increases, its slip will increase and its speed will decrease. With a new slip, the EMF of the rotor D1 will increase, which will increase the current of the rotor, and hence its torque. The system will return to its original state and will work in concert.

You can install a device for changing the frequency, such as a mechanical variator, to expand the limits of change of speeds of working mechanisms. This will allow you to set and select the value of the agreed speed of the mechanisms without changing the speed of the BP.

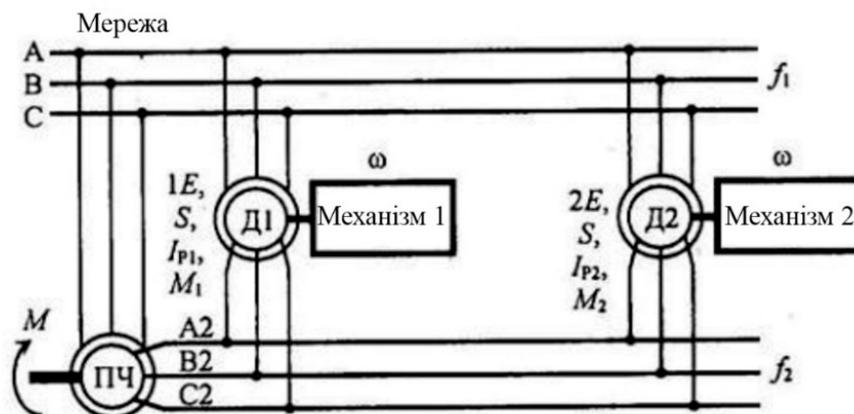


Figure 1.11 – Scheme of «electric shaft» dual power supply

The considered schemes can be applied to any number of coordinated working mechanisms, the principle of work of the scheme does not change.

## 1.7 Prospects for the use of frequency-controlled electric drives

The use of relay-contactor circuits and soft-start devices solves the problem of ensuring the starting processes of conveyor systems. To implement other requirements for conveyor systems, such as adjusting the speed of the belt as a function of freight flow or limiting dynamic loads, requires the use of an adjustable electric drive. In modern conditions, the most promising are frequency-controlled electric drives with asynchronous and synchronous motors. Synchronous frequency-controlled electric drive is based on high-voltage frequency converters with output voltages of 6 and 10 kV. Asynchronous frequency-regulated electric drive is performed with frequency converters of domestic and foreign manufacturers at voltages of 0.4; 0.69; 1.19; 3.0 (3.3); 6.0 (6.3; 6.6); 10.0 (10.5) kV for motors of appropriate voltage. Since belt speed control and dynamic load limitation require a speed control range of at least 10:1, two-transformer frequency converters cannot be used to drive conveyors. Suspended transformer already in the control range of 1.5:1 enters the saturation mode due to the lower frequency of the current relative to the nominal, which leads to increased power loss.

Low-voltage frequency converters with voltage up to 1.19 kV and high-voltage with voltage up to 10 kV are available with voltage inverters based on IGBT transistors and are usually equipped with a PID Controller. High-voltage frequency converters for voltages from 3.0 (3.3) to 10 (10.5) kV are available with current inverters based on closing thyristors.

Figure 1.12 shows a typical circuit of a low-voltage asynchronous frequency-controlled electric drive with a stand-alone voltage inverter based on IGBT transistors. frequency converters are built on the basis of semiconductor power electronics:

- intelligent power modules (IGBT-module), representing the constructive unity of power switches and drivers control them;
- built-in security elements and interface with micro-controller control system.

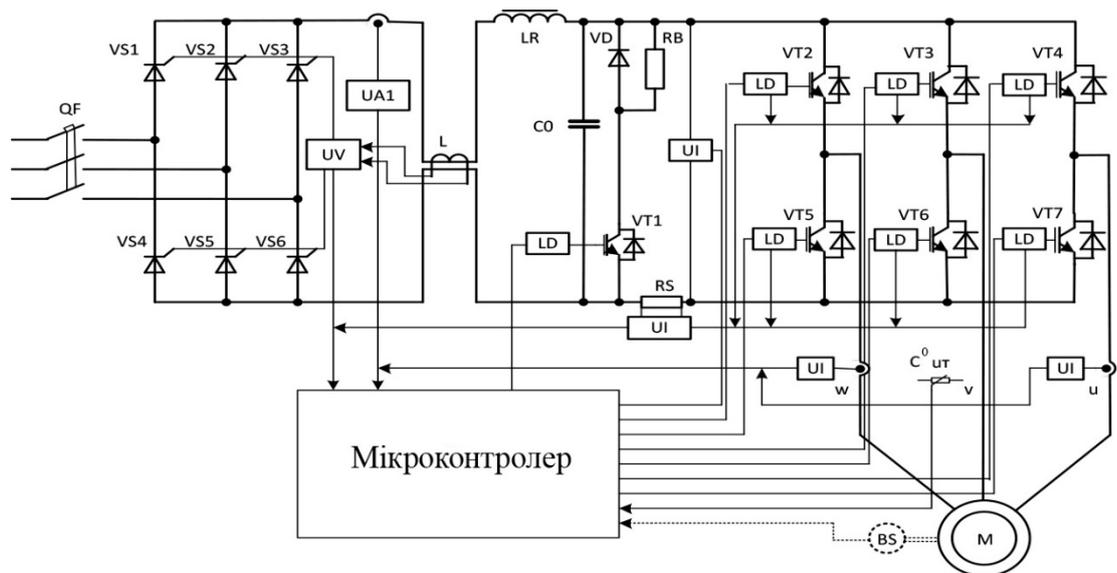


Figure 1.12 – Typical scheme of low-voltage asynchronous frequency controlled electric drive with stand-alone voltage inverter

The frequency converter is designed to regulate the speed of the shaft of induction and synchronous motors to a nominal supply voltage of 6 and 10 kV. The range of stator current frequency from 0.2 to 70 Hz, and voltage – from 0 to 6000 V or from 0 to 10000 V.

The control method used in a high-voltage frequency converter with a current inverter is called sensorless direct vector control. This means that the stator current is decomposed into components that determine the torque and current, allowing you to quickly change the torque of the motor without affecting its flow. This method is used without tachometric feedback in cases where long-term operation of the engine at speeds corresponding to more than 6 Hz and the initial starting torque less than 100% of nominal is required.

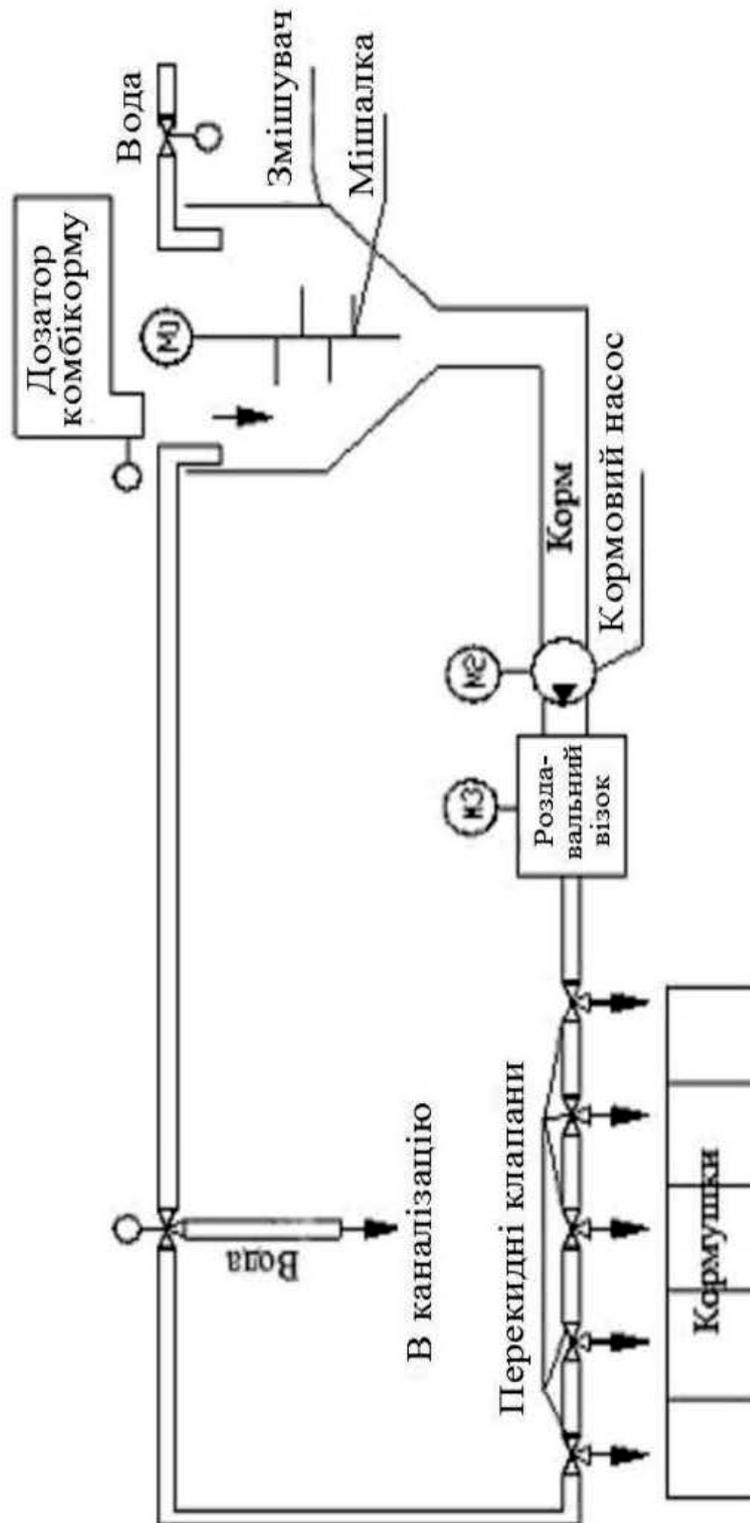
Full vector control can be carried out with tachometric feedback, when you want a long mode of operation of the engine at low speeds corresponding to 0.2 – 6 Hz and with a large initial starting torque – up to 150% of nominal.

Analysis of the existing fleet of frequency converters shows that the entire line of drive motors of conveyors is provided. When choosing frequency converters to regulate the speed of the traction body of the conveyor system must be guided by the following rules:

- the rated voltage of the drive motor must correspond to the rated voltage of the frequency converter;
- rated power (current) of the frequency converter must correspond to the rated power (current) of the frequency converter;
- parallel connection of several motors is allowed only to frequency converters with voltage inverter. Such connection of motors is allowed within the power (current) of the frequency converter (the total rated power of the connected motors must be equal to or less than the rated power of the frequency converter);
- the frequency converter with the current inverter is intended for work with the individual electric drive, ie only one drive motor of the conveyor installation can be connected to it. A number of conveyor units have several drive motors, for which it is necessary to use several frequency converters with a current inverter, the number of which corresponds to the number of motors;
- for mines that are dangerous for gas and dust, it is necessary to use explosion-proof frequency converters. Domestic and foreign industry manufactures special explosion-proof frequency converters with a voltage inverter for mine conveyors up to 500 kW for voltages of 660 and 1140 V. A number of modifications of frequency converters have a built-in dynamic braking function required for the conveyor.

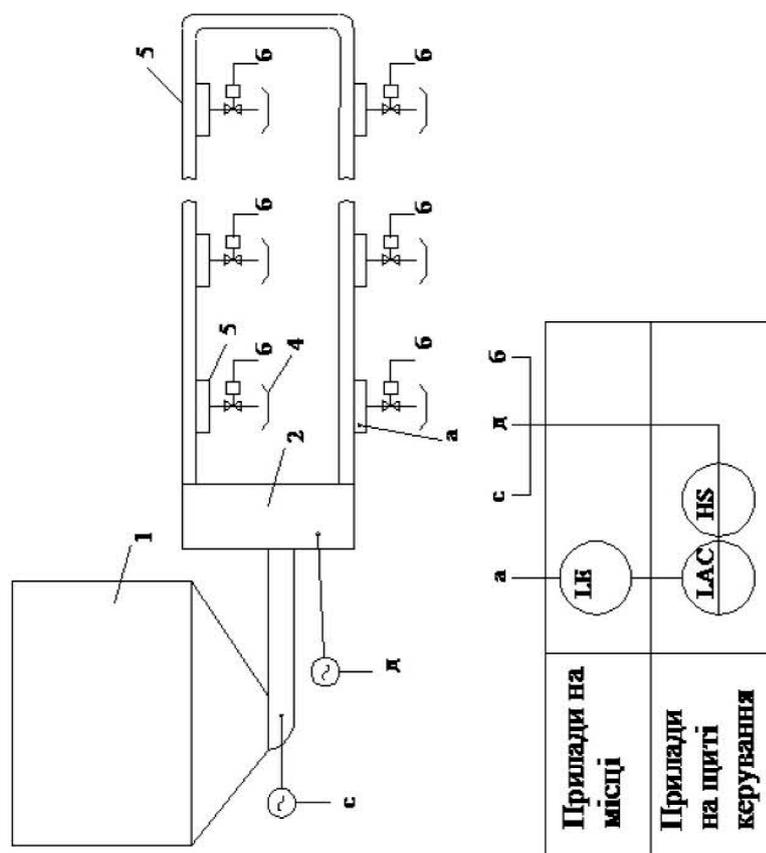
## Додаток Б

Технологічна схема готування та роздачі корму на свинокомплексі



## Додаток В

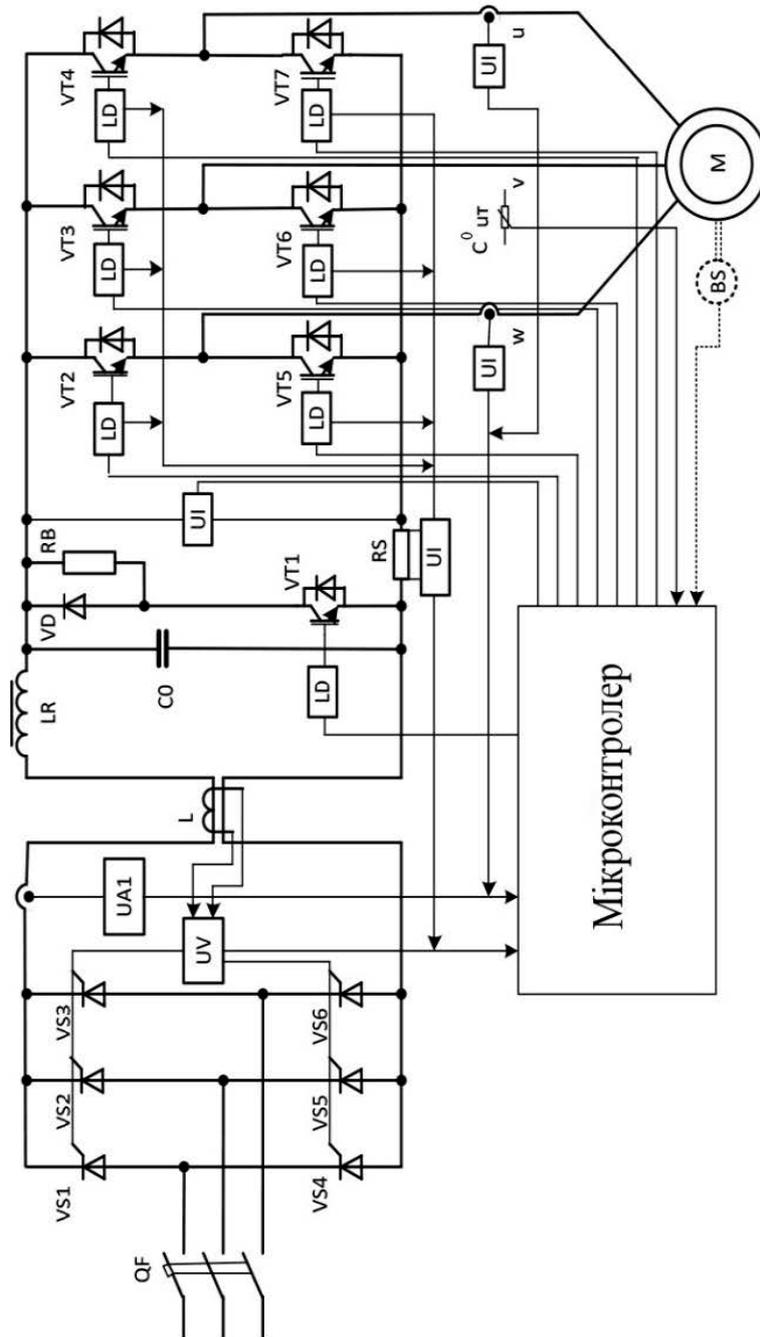
## Функціонально-технологічна схема тросошайбового кормороздавача



ЛАС -регулятор рівня; ЛЕ – датчик рівня; 1 – блок видачі корму; 2 – проміжний бункер;  
 3 – індивідуальні дозатори; 4 – місце для годування; 5 – тросошайбовий транспортер

## Додаток Г

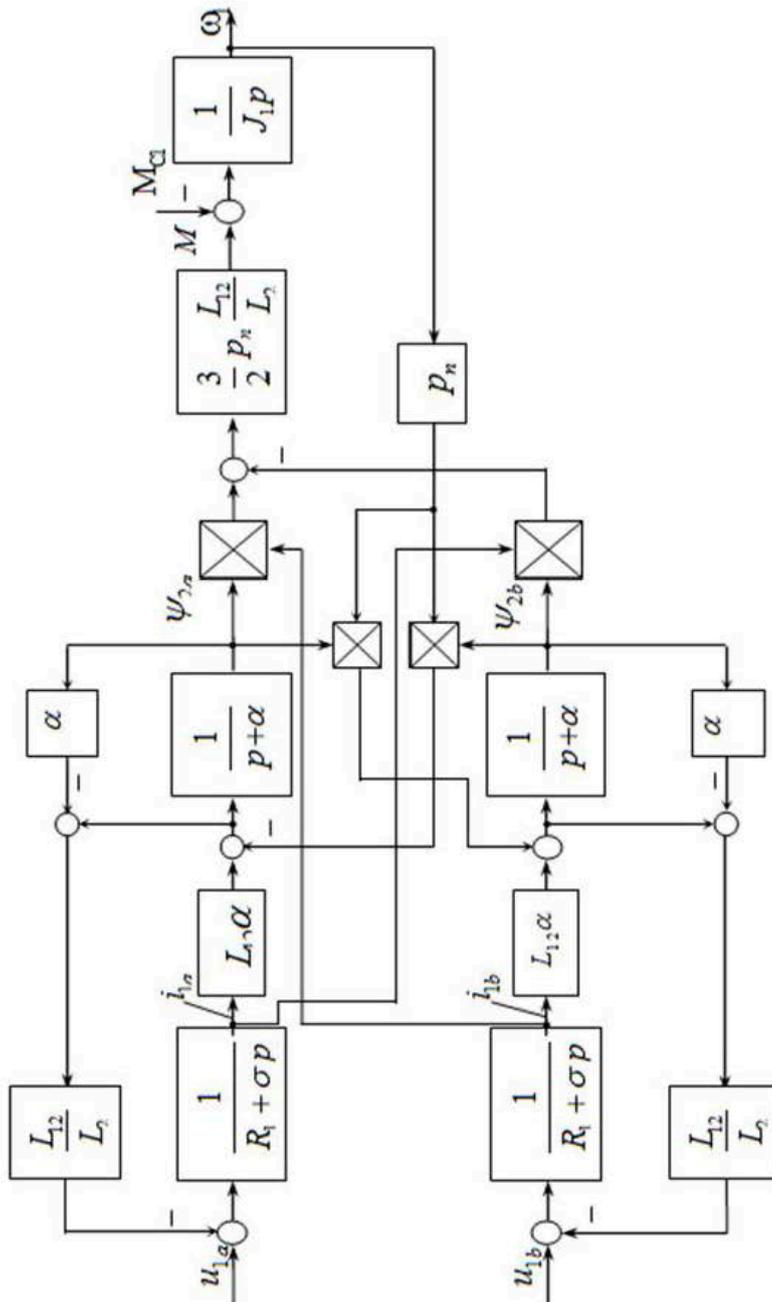
Схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електроприводу тросошайбового транспортера з автономним інвертором напруги



М – двигун; BS – тахогенератор; QF – вимикач

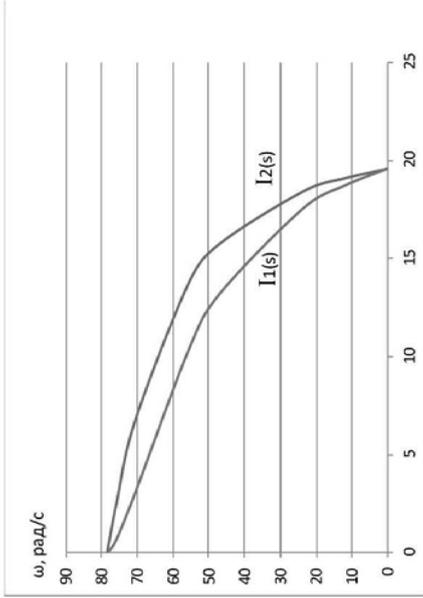
## Додаток Г

## Структурна схема електропривода транспортера

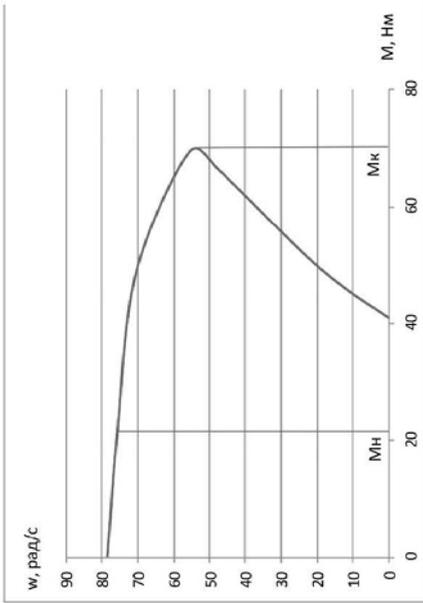


Додаток Д

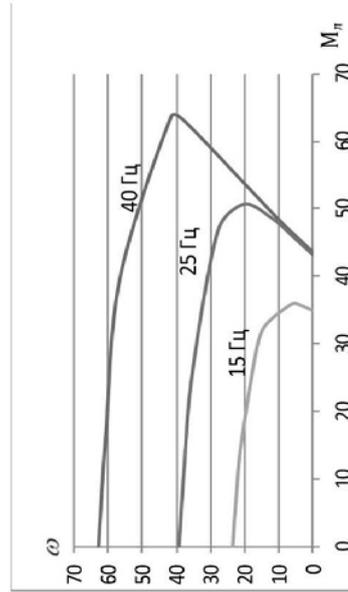
Дослідження статичного режиму роботи електропривода транспортера



Графіки залежностей  $I_2(\omega)$  і  $I_1(\omega)$  (електромеханічних характеристик)



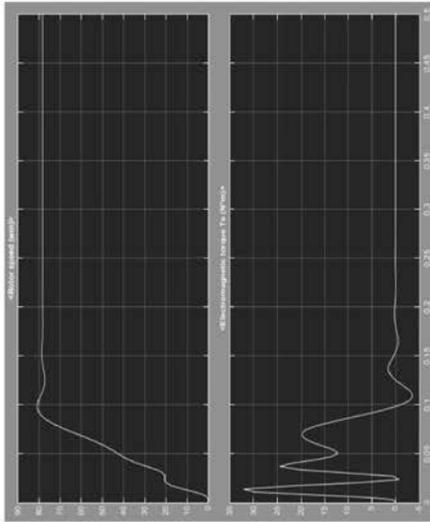
Природна механічна характеристика асинхронного електродвигуна транспортера



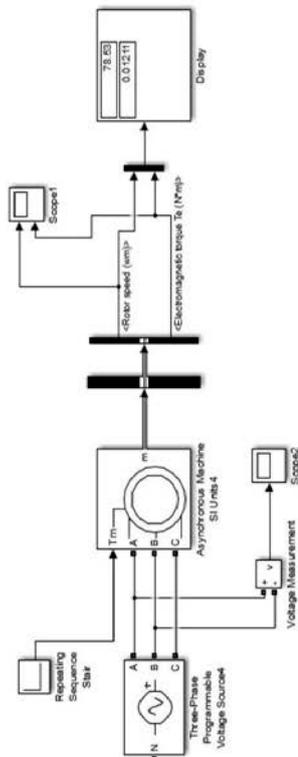
Механічні характеристики АД при частотному регулюванні

Додаток Е

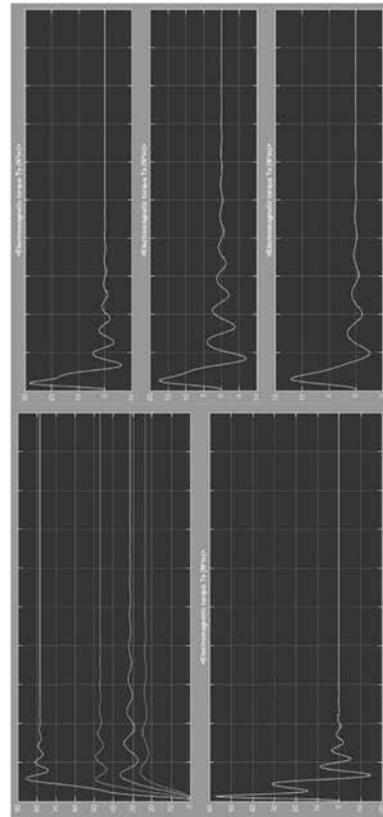
Дослідження динамічного режиму роботи електропривода транспортера



Перехідні характеристики швидкості і моменту при пуску 50 Гц без навантаження



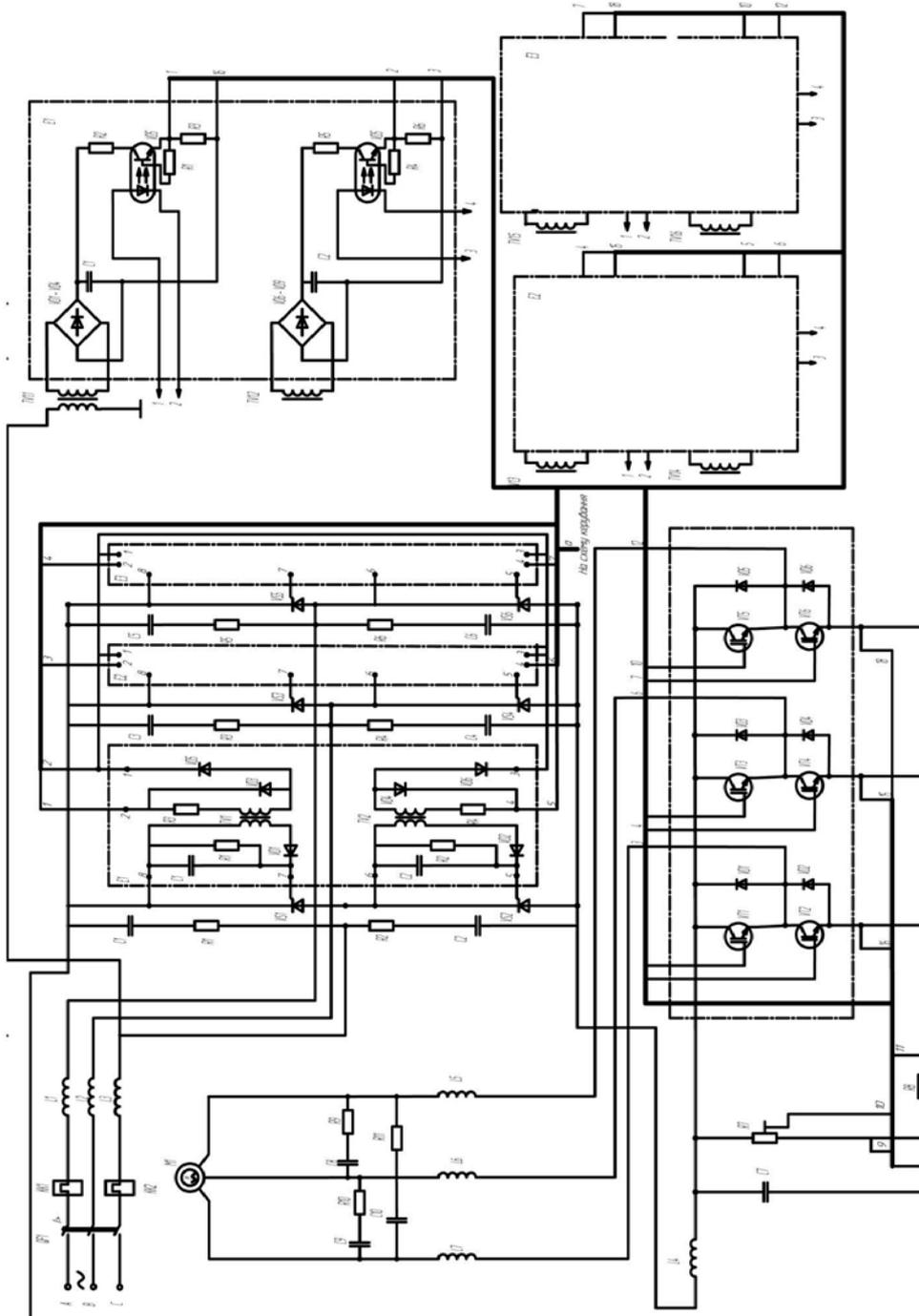
Віртуальна модель пуску асинхронного двигуна



Перехідні характеристики швидкості і моменту при пуску 50,30,20,15 Гц без навантаження

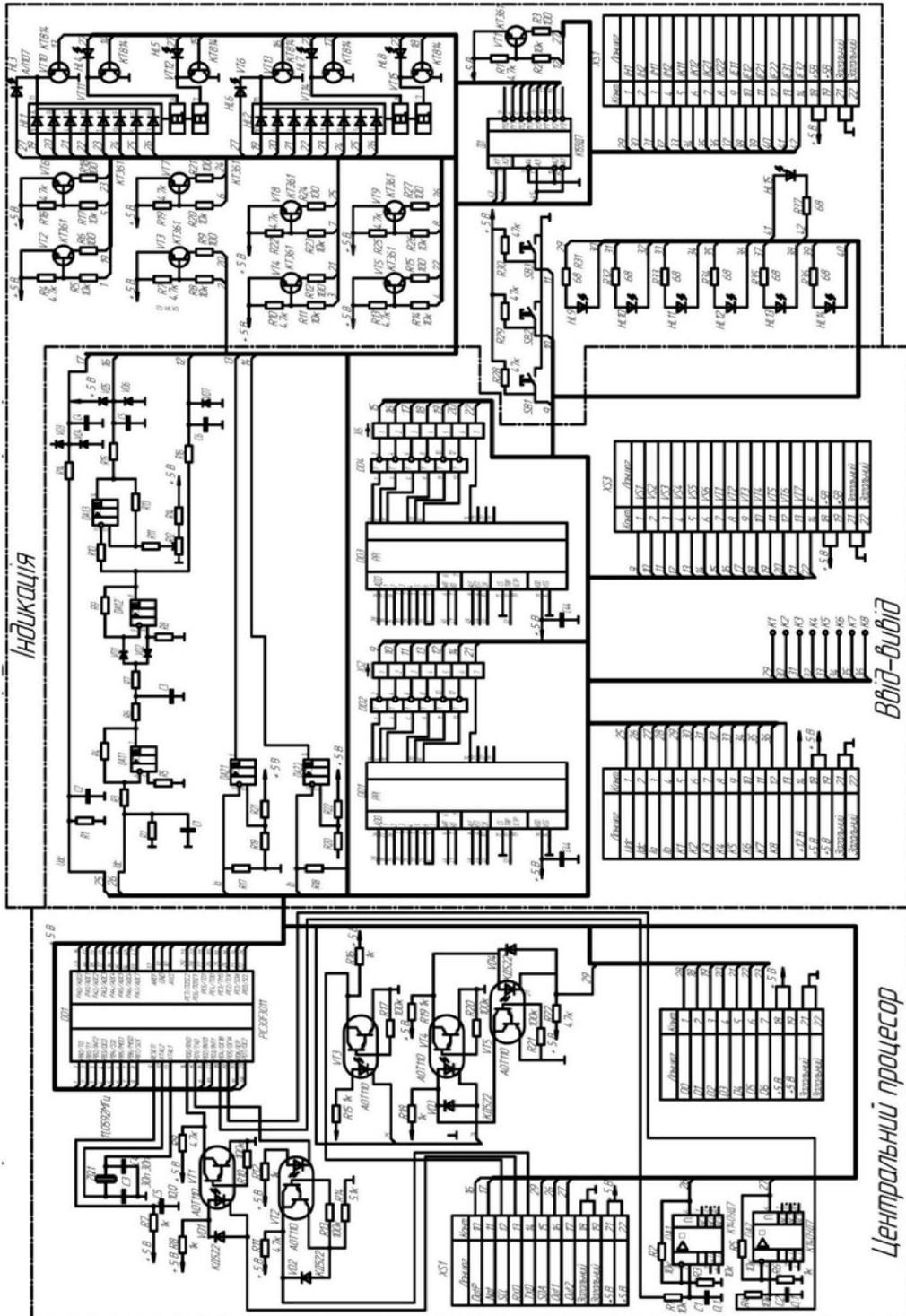
## Додаток Є

Схема електрична принципова силової частини електропривода  
тросошайбового транспортера



Додаток Ж

Схема електрична принципова електропривода тросошайбового транспортера



## Додаток З

Таблиця техніко-економічних показників

Показники	Одиниці виміру	Значення		
		до модернізації	після модернізації	абсолютне відхилення
1. Капітальні витрати на модернізацію	грн.	х	22702,47	х
2. Річний фонд часу роботи	год.	3909,66	3977,81	-68,15
3. Річна експлуатаційна продуктивність	т	5688,56	5787,71	-99,15
4. Річні експлуатаційні витрати, усього:	грн.	352517,09	342943,16	+9573,93
у тому числі:				
витрати на оплату праці	грн.	293526,62	298643,14	-5116,52
витрати на ТО та ТР	грн.	6952,90	1944,30	+5008,60
витрати на електроенергію	грн.	52037,57	42355,72	+9681,85
5. Вартість однієї машино-години роботи	грн./год.	90,17	86,21	+3,96
6. Вартість технологічної операції	грн./ т	61,97	59,25	+2,72
7. Річний економічний ефект	грн.	х	15742,57	х
1. Строк окупності капітальних вкладень	років	х	1,44	х