

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження роботи регульованого
електроприводу для подрібнення кормів»

Виконав

(підпис)

Владислав ПІЧНЯК

Група

ЕТЕС 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

Рецензент:

(підпис)

Олена ДОВЖИК

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет **інженерно-технологічний**

Кафедра **енергетики та електротехнічних систем**

Ступінь вищої освіти «**Магістр**»

Спеціальність **141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу

Владиславу ПІЧНЯКУ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження роботи регульованого електроприводу для подрібнення кормів»
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Савойський Олександр Юрійович, к.т.н., доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела, методичні рекомендації до виконання роботи.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Аналіз існуючих конструкцій подрібнювачів кормів та систем їх автоматизації; 2. Розробка та обґрунтування параметрів елементів регульованого електроприводу; 3. Дослідження динамічних характеристик регульованого електроприводу; 4. Охорона праці; 5. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Владислав ПІЧНЯК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Аналіз існуючих конструкцій подрібнювачів кормів та систем їх автоматизації»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Розробка та обґрунтування параметрів елементів регульованого електроприводу»	до 19.09.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Дослідження динамічних характеристик регульованого електроприводу»	до 03.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

_____ (підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

_____ (підпис)

Владислав ПІЧНЯК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Пічняк Владислав Олександрович. Дослідження роботи регульованого електроприводу для подрібнення кормів.

Кваліфікаційна робота на здобуття магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Дипломна робота присвячена підвищенню ефективності та енергоощадності технологічного процесу подрібнення кормів шляхом удосконалення системи електроприводу з частотним регулюванням.

У першому розділі виконано аналіз технологій приготування кормів, конструкцій подрібнювачів і систем їх автоматизації. Визначено, що найбільш перспективними є універсальні подрібнювачі з регульованим електроприводом типу «частотний перетворювач – асинхронний двигун». Обґрунтовано доцільність стабілізації навантаження за струмом двигуна для забезпечення рівномірної продуктивності.

У другому розділі розроблено функціональну схему системи автоматичного керування, у якій реалізовано регулювання швидкості стрічкового конвеєра через частотний перетворювач. Проведено вибір основних елементів системи – асинхронного двигуна потужністю 1,5 кВт, перетворювача частоти ОВЕН ПЧВ102-2К2-В, захисної та фільтрувальної апаратури.

У третьому розділі виконано математичне моделювання та дослідження динамічних характеристик електроприводу. Результати імітаційного моделювання показали, що час перехідного процесу становить 0,9 с, максимальне перерегулювання – 25 %, а статична помилка – 5 %, що свідчить про стабільну роботу системи керування при змінних навантаженнях.

Економічні розрахунки показали, що впровадження частотно-

регульованого електроприводу зменшує споживання електроенергії на 18–22 %, а термін окупності інвестицій у розмірі 60 тис. грн при ціні електроенергії 12 грн/кВт·год становить 2,1 року. Це підтверджує економічну доцільність і перспективність розробленої системи для сільськогосподарських підприємств.

Ключові слова: регульований електропривод, подрібнювач кормів, частотний перетворювач, асинхронний двигун, система автоматичного керування, ПІ-регулятор, енергоефективність, імітаційне моделювання, стабілізація навантаження, економічна доцільність.

ABSTRACT

Pichniak Vladyslav Oleksandrovykh. Study of the Operation of a Controlled Electric Drive for Feed Grinding.

Qualification work for a master's degree in the educational programme “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics” in the speciality 141 “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics”. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The diploma thesis is devoted to improving the efficiency and energy performance of the feed grinding process through the modernization of the electric drive system using frequency control.

The first section analyzes feed preparation technologies, designs of feed grinders, and their automation systems. It is determined that the most promising are universal grinders equipped with a controlled electric drive of the “frequency converter – asynchronous motor” type. The need to stabilize the load by controlling the motor current to ensure uniform productivity is substantiated.

In the second section, a functional control system diagram is developed, in which the conveyor speed is automatically adjusted via a frequency converter. The main components of the system are selected, including a 1.5 kW asynchronous motor, an OVEN PChV102-2K2-V frequency converter, as well as protection and filtering devices.

The third section presents mathematical modeling and dynamic analysis of the electric drive. Simulation results show that the transient process duration is 0.9 s, the maximum overshoot is 25%, and the steady-state error is 5%, which indicates stable operation of the control system under variable loads.

The economic analysis demonstrates that implementing a frequency-controlled electric drive reduces electricity consumption by 18–22%, with an investment payback period of 2.1 years for an investment of 60,000 UAH and an electricity price of 12 UAH/kWh. These results confirm the economic feasibility and practical

relevance of the developed system for agricultural enterprises.

Keywords: controlled electric drive, feed grinder, frequency converter, asynchronous motor, automatic control system, PI controller, energy efficiency, simulation modeling, load stabilization, economic feasibility.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОДРІБНЮВАЧІВ КОРМІВ ТА СИСТЕМ ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЇ	13
1.1. Технологічні та зоотехнічні вимоги до подрібнювачів кормів.....	13
1.2. Технологічні та конструктивні особливості універсальних кормоподрібнювачів	15
1.3. Огляд систем автоматизації технологічного процесу подрібнення кормів.....	14
1.4. Висновки до розділу 1.....	21
2. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	22
2.1. Розробка функціональної схеми системи керування.....	22
2.2. Вибір основного обладнання системи.....	26
2.2.1. Вибір типу асинхронних двигунів приводів подрібнювача.....	26
2.2.2. Вибір частотного перетворювача	26
2.2.3. Вибір автоматичного вимикача	29
2.2.4. Вибір плавких запобіжників	30
2.2.5. Вибір магнітних контакторів	31
2.2.6. Вибір мережевого дроселя	31
2.2.7. Вибір радіочастотних фільтрів	33
2.3. Висновки до розділу 2.....	34
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	36
3.1. Визначення розрахункових параметрів електроприводу	36

	9
3.2. Дослідження динамічних характеристик електроприводу.....	38
3.3. Дослідження замкнутої системи регульованого електроприводу	40
3.4. Висновки до розділу 3.....	48
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	50
5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	54
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58
ДОДАТКИ	61

ВСТУП

1. Актуальність теми. Сучасний агропромисловий комплекс потребує підвищення ефективності процесів підготовки та переробки кормів, оскільки якість та собівартість продукції тваринництва значною мірою залежать від рівня механізації та автоматизації допоміжних технологічних операцій. Однією з ключових операцій є подрібнення кормів, що забезпечує поліпшення їх засвоюваності, зменшення енергетичних витрат тварин на пережовування та підвищення продуктивності годівлі.

Традиційні системи електроприводу подрібнювачів працюють у сталих режимах і не завжди враховують зміну властивостей сировини (вологість, твердість, фракційний склад), що призводить до перевитрати електроенергії, нерівномірної якості подрібнення та зниження ресурсу обладнання. У цьому контексті впровадження регульованих електроприводів дозволяє забезпечити оптимальні режими роботи подрібнювального обладнання, підвищити енергоефективність, зменшити експлуатаційні витрати та покращити технологічні показники процесу.

Таким чином, дослідження роботи регульованого електроприводу для подрібнення кормів є актуальним завданням, що поєднує вирішення науково-технічних та практичних проблем енергозбереження, автоматизації та підвищення ефективності виробництва у сільському господарстві.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. Дослідження у сфері подрібнення кормів зосереджені на вдосконаленні конструкцій подрібнювачів та зниженні енерговитрат. Традиційні електроприводи здебільшого працюють у сталих режимах без урахування зміни властивостей сировини, що знижує ефективність процесу. Сучасні наукові праці доводять доцільність застосування регульованих електроприводів на базі частотних перетворювачів, які дозволяють оптимізувати швидкість подрібнення, зменшити витрати електроенергії та підвищити якість кормів. Водночас комплексні дослідження, що поєднують моделювання процесу,

енергозбереження та автоматизоване керування подрібнювачами, залишаються недостатньо розробленими.

3. Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності роботи подрібнювача кормів шляхом розробки та впровадження регульованого електроприводу для системи завантаження, що забезпечить оптимізацію енергоспоживання, стабільність технологічного процесу та підвищення якості подрібнення.

4. Об'єкт дослідження – процес роботи подрібнювача кормів із системою завантаження, оснащеною регульованим електроприводом.

5. Предмет дослідження – методи та засоби підвищення ефективності роботи подрібнювача кормів шляхом використання регульованого електроприводу для системи завантаження.

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

– виконати огляд літературних джерел щодо технологічних процесів та конструктивних особливостей подрібнювачів кормів;

– провести аналіз методів регулювання параметрів електроприводів подрібнювачів та сучасних систем автоматизації технологічного процесу;

– розробити функціональну та структурну схеми керування стрічковим конвеєром подрібнювача, обґрунтувати принцип регулювання частоти обертання його електродвигуна, виконати вибір і розрахунок параметрів асинхронного двигуна та перетворювача частоти для регульованого електроприводу;

– дослідити статичні та динамічні характеристики розімкненої та замкненої системи регульованого електроприводу за схемою «ПЧ–АД» для конвеєра подрібнювача.

7. Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу та порівняльного огляду літературних джерел для вивчення конструктивних і технологічних особливостей подрібнювачів кормів; методи математичного моделювання – для опису процесів у системі «перетворювач

частоти – асинхронний двигун – конвеєр»; методи розрахунку та оптимізації – для вибору параметрів елементів електроприводу; комп’ютерне моделювання – для дослідження статичних і динамічних характеристик регульованого електроприводу; експериментальні методи – для перевірки працездатності та ефективності розробленої системи.

8. Структура та обсяг роботи. Дипломна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 61 сторінка машинописного тексту, містить 27 рисунків, 5 таблиць, 2 додатки та 25 найменувань у списку використаних джерел.

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОДРІБНЮВАЧІВ КОРМІВ ТА СИСТЕМ ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Технологічні та зоотехнічні вимоги до подрібнювачів кормів

Зростання обсягів виробництва продукції тваринництва потребує впровадження сучасних технологічних рішень, які забезпечують ефективне використання кормів та підвищення продуктивності тварин. Якість підготовки кормів безпосередньо впливає на стан здоров'я тварин, їх продуктивність і економічну ефективність виробництва. Зоотехнічні вимоги до кормів визначають оптимальний склад, консистенцію та розмір частинок, що забезпечує їхню максимальну засвоюваність [1,2,3].

Для реалізації цих вимог на практиці застосовують спеціалізовані машини та обладнання, які виконують кілька функцій: подрібнення, змішування, дозування та транспортування кормів. Тип корму, методи його обробки та необхідний розмір частинок визначають вибір обладнання та схему технологічної лінії.

Подрібнювачі кормів є ключовим елементом технологічного процесу приготування кормів. Вони призначені для обробки зерна, сіна, соломи, коренеплодів, силосу та зеленої маси, а також сумішей цих компонентів. Вони забезпечують однорідність кормової суміші та зручність її використання у годівлі тварин різних видів. Використання сучасних універсальних подрібнювачів дозволяє працювати з різними типами кормів у межах однієї технологічної лінії, що значно підвищує продуктивність та гнучкість виробництва.

Реальна продуктивність подрібнювача залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваних кормів, таких як твердість, вологість, волокнистість, а також від режимів роботи обладнання. Ефективність подрібнювачів визначається не тільки їх конструктивними особливостями, а й

оптимізацією технологічного процесу, що включає регулювання швидкості подрібнення, ступеня подрібнення та обсягу подачі корму.

Грубі корми є основною частиною раціону великої рогатої худоби, коней та овець, оскільки вони забезпечують нормальне травлення та стимулюють роботу шлунково-кишкового тракту. Для свиней і птиці грубі корми використовуються в менших кількостях. Через високу волокнистість грубі корми потребують подрібнення до оптимального розміру частинок, що сприяє їх кращому засвоєнню.

Рекомендований розмір подрібнення різних кормів:

- листя та трава: корови – 40–50 мм, коні – 30–40 мм, вівці – 20–30 мм; при додаванні трави – 6–10 мм.
- свині та птиця, а також висушена трава – <1 мм.
- коренеплоди та картопля: велика рогата худоба – 10–15 мм, телята і поросята – 5–10 мм, кури – 3–4 мм.
- силос: для свиней та птиці – 5–7 мм; коренеплоди для свиней подрібнюють до стану пюре.

Особливу увагу приділяють подрібненню зерна та бобових культур. Оптимальний розмір частинок для великої рогатої худоби не перевищує 3 мм, для свиней і курей – 1 мм, для сухих комбикормів – 2–3 мм, а для дрібних компонентів – до 1 мм.

Крім того, сучасні технології передбачають автоматизацію процесу подрібнення, що дозволяє контролювати розмір частинок, швидкість подачі та якість суміші. Це підвищує ефективність використання кормів, знижує трудомісткість виробництва та забезпечує стабільну якість кормових сумішей незалежно від виду та стану вихідної сировини.

Таким чином, застосування сучасних подрібнювачів кормів та автоматизованих систем дозволяє забезпечити технологічно обґрунтовану підготовку кормів, що відповідає зоотехнічним вимогам, та підвищує продуктивність тваринницьких підприємств.

1.2. Технологічні та конструктивні особливості універсальних кормоподрібнювачів

Універсальні кормоподрібнювачі є важливим елементом у технологічних лініях приготування кормів для тваринництва. Ці пристрої призначені для подрібнення різноманітних видів кормів, таких як зерно, сіно, солома, силос, коренеплоди та комбіновані суміші, до заданого розміру частинок, що забезпечує оптимальне їх засвоєння тваринами.

Серед популярних моделей універсальних кормоподрібнювачів в Україні можна виділити такі:

- ДТЗ КР-02Т (рис. 1.1.). Цей подрібнювач оснащений мідною обмоткою та має потужність 2,5 кВт. В комплект входять чотири сита з діаметром отворів 3, 4, 5 та 6 мм, що дозволяє регулювати ступінь подрібнення корму. Ця модель підходить для обробки зерна та інших сухих кормів.



Рис. 1.1. Подрібнювач ДТЗ КР-02Т

- ДТЗ КР-20С (рис. 1.2.). Більш потужна модель з двигуном потужністю 7,5 кВт. Вона здатна обробляти більші об'єми кормів, що робить її підходящою для середніх та великих господарств.
- Masterkraft IZKB-2800 (рис. 1.3.). Цей подрібнювач призначений для обробки зерна та початкової кукурудзи. Він має компактні розміри та високу продуктивність, що робить його зручним для малих та середніх фермерських господарств.



Рис. 1.2. Подрібнювач ДТЗ КР-20С



Рис. 1.3. Подрібнювач •Masterkraft IZKB-2800

- Едвард-Міні 2,2 кВт (рис. 1.4.). Універсальний подрібнювач, який поєднує функції зернодробарки та січкарні. Це дозволяє обробляти різноманітні види кормів, включаючи зелену масу та коренеплоди.
- Green Forester GFM-3500 (рис. 1.5.). Ця модель відрізняється високою потужністю та здатністю обробляти великі об'єми кормів. Вона оснащена системою автоматичного подавання та вивантаження, що знижує трудомісткість процесу.



Рис. 1.4. Подрібнювач Едвард-Міні 2,2 кВт



Рис. 1.5. Подрібнювач Green Forester GFM-3500

Порівняльна таблиця технічних характеристик наведених подрібнювачів наведена в таблиці 1.1.

Технічні характеристики універсальних кормоподрібнювачів можуть варіюватися в залежності від моделі та призначення. Зазвичай вони включають потужність двигуна, кількість та діаметр сит, продуктивність, розмір оброблюваних частинок та тип приводного механізму. Наприклад, моделі з потужністю від 2,5 до 7,5 кВт здатні обробляти від 100 до 1000 кг корму на годину.

Таблиця 1.1. Порівняльна таблиця технічних характеристик подрібнювачів

Модель	Потужність, кВт	Продуктивність, кг/год	Тип двигуна	Розміри, мм	Вага, кг	Особливості
ДТЗ КР-02Т	2,5	до 240	Однофазний	—	21,5	Мідна обмотка, 4 сита (3–6 мм), пластик. завантажувальний бункер
ДТЗ КР-20С	7,5	до 600	Однофазний	900×500×1050	69,6	Висока продуктивність, 5 сита, підходить для великих господарств
Masterkraft IZKB-2800	2,8	180–200	Однофазний	350×320×540	20	Компактні розміри, 4 сита (2–5 мм), сталевий корпус
Едвард-Міні 2,2 кВт	2,2	до 120	Однофазний	—	—	Поєднує функції зернодробарки та січкарні, 4 сита (3–20 мм), на колесах
Green Forester GFM-3500	3,5	до 240 (зерно), 80 (качани)	Однофазний	—	21	Система автоматичного подавання та вивантаження, 5 л об'єм бункера

Переваги універсальних кормоподрібнювачів включають їхню універсальність, здатність обробляти різноманітні види кормів, можливість регулювання ступеня подрібнення та високу продуктивність. Вони дозволяють зменшити витрати на придбання окремих пристроїв для кожного виду корму та оптимізувати процес приготування кормів.

Однак, існують і деякі недоліки. Наприклад, універсальні моделі можуть мати більші розміри та вагу, що ускладнює їх транспортування та зберігання. Також, для забезпечення високої якості подрібнення необхідно регулярно проводити технічне обслуговування та заміну зношених частин, таких як молотки та сита.

Універсальні кормоподрібнювачі є важливим інструментом для ефективного та економічного приготування кормів у тваринництві. Вибір конкретної моделі залежить від розміру господарства, обсягів оброблюваних кормів та специфічних потреб тварин.

1.3. Огляд систем автоматизації технологічного процесу подрібнення кормів

Автоматизація технологічного процесу подрібнення кормів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності тваринницьких підприємств. Розробка систем автоматичного управління подрібнювачами та дробарками здійснюється вченими та інженерами багатьох країн, серед яких особливо активними є Україна, США, Японія, Німеччина, Фінляндія та Польща. Ці країни накопичили значний досвід у створенні високоефективних автоматизованих машин та технологічних ліній для дроблення зерна та інших кормових матеріалів.

Наукові дослідження та експериментальні роботи дозволили розробити численні математичні моделі роботи дробильних комплексів. Моделі враховують різні канали проходження матеріалу через механізми подрібнення, що дає змогу прогнозувати ефективність дробарок залежно від

фізико-механічних властивостей корму та режимів роботи обладнання. Такі моделі дозволяють визначати оптимальні параметри експлуатації, включаючи потужність двигуна, швидкість подачі матеріалу, розмір частинок на виході та пропускну здатність системи.

Ключовою проблемою є забезпечення тісного зв'язку між потужністю, що витрачається на подрібнення, та пропускну здатністю дробарки. Для вирішення цього завдання використовуються різні схеми управління, як прості, так і комбіновані, у яких регульованим параметром виступає струм або потужність приводного двигуна. Ступінь завантаження подрібнювача контролюється за максимальним значенням струму у силовому колі, що дозволяє уникати перевантажень механізму та забезпечувати стабільну роботу системи.

Для безперервної подачі корму у камеру дроблення застосовуються регульовані живильники. У разі збільшення навантаження на приводний двигун дробарки спрацьовує реле у його силовому колі, яке підключає гасяче опір у ланцюг приводу живильника. Це призводить до миттєвого зменшення подачі матеріалу в камеру дроблення. Навпаки, при зниженні навантаження та струму нижче номінального рівня подача матеріалу автоматично збільшується, що забезпечує динамічне регулювання технологічного процесу без участі оператора.

Системи автоматизації активно впроваджуються навіть у малогабаритні дробарки (рис. 1.6.). Сучасні моделі обладнуються комплексними автоматичними пристроями, які включають датчики витрати матеріалу, регулятори продуктивності живильника, датчики потужності двигуна, лічильники мотогодин, регулятори ширини розвантажувальної щілини дробарки, датчики крупності подрібнюваного матеріалу та блоки вибору критеріїв роботи. Такі системи дозволяють не тільки контролювати поточну продуктивність обладнання, а й здійснювати аналіз ефективності роботи, визначати витрати енергії на подрібнення однієї тонни матеріалу та оцінювати ресурси робочих органів.



Рис. 1.6. Малогабаритний подрібнювач з автоматикою

У конусних дробарках автоматичне регулювання здійснюється шляхом зміни розвантажувальних отворів. Автоматично керований привід застосовується, зокрема, у конусній дробарці дрібного подрібнення моделі «Гідроконе», яка виготовляється фірмою «НН» за ліцензією американської компанії «Ellis-Chalmers», а також у конусній дробарці «Hydrokone» типу 1051 (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Конусна дробарка «Hydrokone»

У Німеччині розроблено систему автоматизації на базі конусної дробарки «Hydrokone», яка оснащена регульованим розвантажувальним отвором. Основою розробки системи стали фактори, що впливають на роботу дробарки:

твердість і в'язкість матеріалу, вміст вологи у завантажуваному матеріалі, зерновий склад завантажуваного матеріалу та необхідний зерновий склад готового продукту.

Компанія «Ellis-Chalmers» (Мілуокі, США) автоматизувала установку для виробництва зерна на базі конусної дробарки «Hydrokone-436» з автоматичним контролем і регулюванням ширини щілини (рисунок 1.8).



Рис. 1.8. «Hydrokone-436» з автоматичним контролем і регулюванням ширини щілини

У серійно вироблених міні-дробарках моделей AutoLoader, Hopper та Sandvik передбачені системи автоматичної сигналізації про нестачу матеріалу, системи автоматичного налаштування дробарки під умови подачі, а також захист двигуна.

Системи автоматизації широко застосовуються і в промислових дробарках великої потужності. Основною метою автоматизації дробарки є підтримка постійної продуктивності відповідно до технологічних вимог у потоковій транспортній системі. У цьому випадку величина вихідної продуктивності дробарки може використовуватися як керуючий параметр.

Якщо безпосередньо визначити зміни цього параметра важко, застосовують параметри об'єкта, які опосередковано характеризують стан технологічного процесу. Для дробарок зміни продуктивності можна

приблизно оцінити за такими опосередкованими показниками, як струм та потужність, споживані приводним двигуном, а також рівень заповнення камери дроблення. Водночас вимір рівня завантаження камери дроблення для стабілізації продуктивності може застосовуватися лише в системах автоматичного регулювання невисокої точності. Це пояснюється значним впливом міцності матеріалу на продуктивність дробарки.

У вдосконаленому варіанті керування (рис. 1.9) як регульовані параметри використовуються продуктивність та рівень заповнення камери дроблення, які контролюються за допомогою електротензометричних конвеєрних датчиків та фотоелектричних рівнемірів.

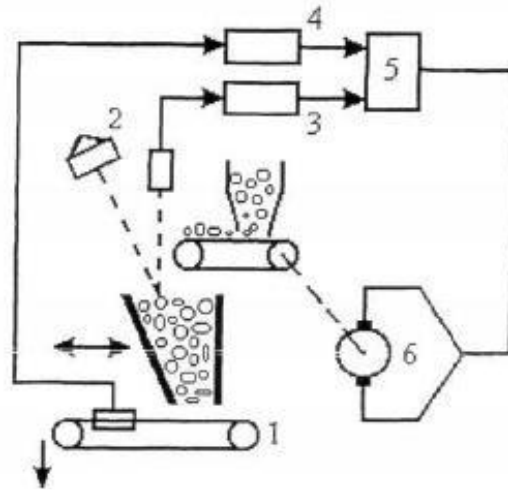


Рис. 1.9. Система автоматичного регулювання продуктивності дробарки з додатковим коригувальним сигналом

У даній системі передбачено два контури керування, що включають регулятори рівня заповнення камери дроблення (3) та регулятор продуктивності дробарки (4). Вони впливають на регулятор (5), який змінює напругу живлення обмотки статора приводного електродвигуна (6). У разі перевищення автоматично керованими величинами встановлених граничних значень, живильник, що виконує функції виконавчого механізму, зменшує подачу матеріалу до тих пір, поки сигнал про перевищення не зникне. Якщо рівень заповнення камери дроблення не перевищує максимально допустимого значення і не опускається нижче встановленого мінімуму, керування

здійснюється лише за показниками продуктивності. При досягненні верхнього максимального рівня живильник відключається, а при зниженні нижче допустимого – включається, при цьому регулювання ведеться за продуктивністю.

Як зазначено у роботі [14], послідовно включені конусні дробарки можуть працювати з автоматичним регулюванням продуктивності та підтриманням заданого складу кінцевого продукту дроблення за рахунок зміни розміру розвантажувального отвору відповідно до попередньо розрахованої робочої програми. Проте такий підхід не завжди забезпечує досягнення необхідного зернового складу кінцевого продукту. У таких випадках потрібен контроль вмісту окремих фракцій у вихідному матеріалі та у готовому продукті.

У роботі [15] розроблено пристрій автоматичного контролю та синтезовано структурну схему системи автоматичного регулювання (САР) ширини розвантажувальної щілини дробарки крупного дроблення. Виконано ідентифікацію параметрів її структурних елементів, обрано тип і налаштування регулятора, а також проведено аналіз якості процесу регулювання.

Важливою передумовою реалізації цієї САР є наявність у конусних дробарках крупнокускового дроблення гідравлічної системи, яка складається з двох функціонально завершених вузлів – гідроагрегату та прямоходного поршневого гідромотора, з'єднаних між собою трубопроводом (рисунок 1.10).

При подачі напруги на електродвигун насоса (1, 2) потік масла, пройшовши через запірно-предохранчий пристрій (3), надходить під поршні гідроциліндрів (4), що спричинює підйом конуса (5) та, відповідно, зменшення ширини розвантажувальної щілини S . При відкритті зливного клапана (6) масло з гідроциліндрів (4) починає повертатися у бак (7), що призводить до опускання конуса і збільшення ширини розвантажувальної щілини.

З урахуванням специфіки конструкції конусної дробарки та гідросистеми, автоматизація процесу регулювання ширини щілини здійснюється шляхом

керування роботою електродвигуна насоса та зливного клапана при відсутності матеріалу в дробильному просторі.

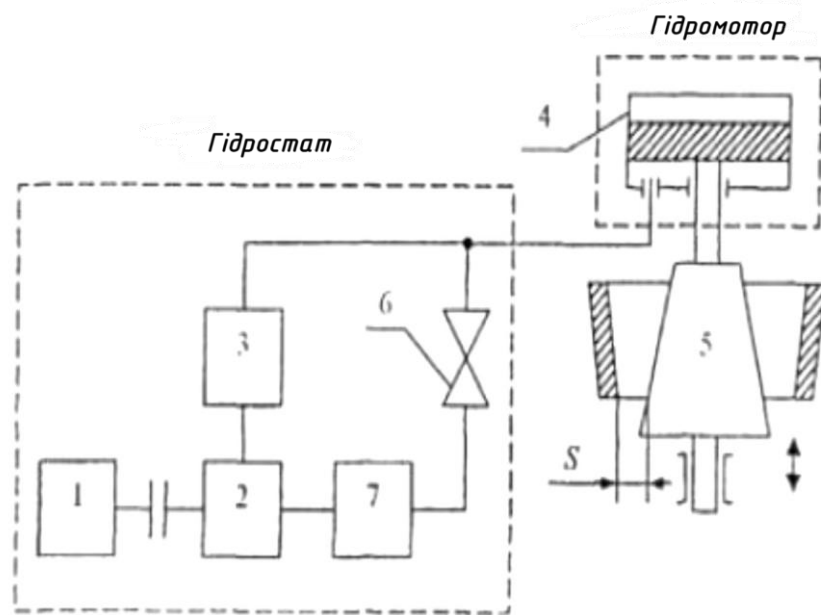


Рисунок 1.10. Система керування зміною ширини розвантажувального отвору конусної дробарки крупношматкового дроблення

Розроблено системи автоматичного управління дробленням із застосуванням самонастроювальних алгоритмів. У роботі [15] дробарка представлена у вигляді структурних елементів у контурі керування автоматизованої системи. Вибрано функції, які пов'язують вхідні – керовані параметри з вихідними – загальною продуктивністю машини та якісними показниками, зокрема фракційним складом вихідного потоку матеріалу.

Існують дослідження в області керування навантаженням електродвигуна, наприклад, розробка мікроконтролерної системи стабілізації навантажень електроприводу робочого органу проходкового комбайна [16].

Мікропроцесорна система регулювання має властивість універсальності. Використання мікропроцесорів у системах керування електроприводами дозволяє зменшити конструктивну складність пристрою при одночасному значному розширенні його функціональних можливостей, скоротити строки проектування, спростити налагодження та обслуговування автоматизованої

системи регулювання завдяки застосуванню простого обладнання та організації самоперевірки. Масове використання мікропроцесорних систем керування електроприводами дозволяє зменшити кількість обслуговуючого та ремонтного персоналу.

Представлення інформації в мікропроцесорі з заданою точністю забезпечує високий рівень якості регулювання. При цифровому регулюванні можливо керувати одним пристроєм за допомогою двох або більше електроприводів, що живляться від однієї мережі змінного струму.

1.4. Висновки до розділу 1

На основі аналізу технологій приготування кормів визначено місце подрібнювачів кормів у різних технологічних лініях галузі сільськогосподарського виробництва. Дослідження різних типів подрібнювачів кормів показало подібність їхніх приводних характеристик та значну встановлену потужність електродвигунів, що робить актуальним питання енергозбереження.

Встановлено, що найбільш перспективними для використання є універсальні подрібнювачі, здатні обробляти різні види кормів. На основі аналізу приводних характеристик зроблено висновок про необхідність регулювання кутової швидкості, потужності та переважувальної здатності електродвигуна при збереженні стабільної роботи машини.

Проведений аналіз переваг і недоліків різних типів регульованих електроприводів та можливих способів регулювання їхніх параметрів показав, що для універсальних подрібнювачів найбільш доцільним є використання електроприводу типу «частотний перетворювач – асинхронний двигун».

Визначено проблему створення системи стабілізації завантаження дробарки. На основі цього сформульовано мету роботи та конкретні завдання дослідження, спрямовані на підвищення ефективності та енергоощадності роботи обладнання.

2. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1. Розробка функціональної схеми системи керування

Універсальні подрібнювачі кормів як об'єкт регулювання можуть бути охарактеризовані сукупністю основних та вихідних параметрів. До основних параметрів належать продуктивність подачі вихідного матеріалу $Q_{вх}$, його міцність σ та розмір часток D . Вихідні параметри включають рівень заповнення камери дроблення h , продуктивність дробарки $Q_{вих}$, потужність P , споживану на процес дроблення, а також гранулометричний склад ГС подрібненого продукту. Ці параметри використовуються в різних комбінаціях у системах управління процесом дроблення (рисунк 2.1).

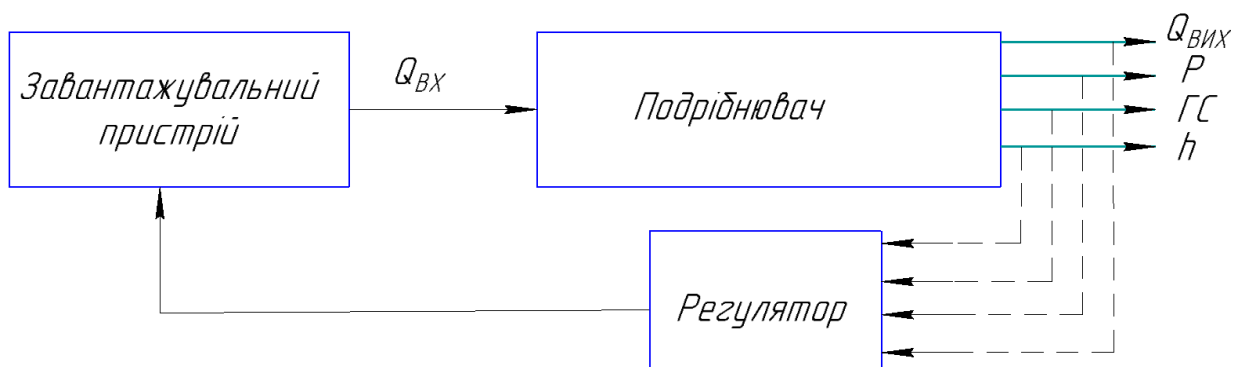


Рис. 2.1. Подрібнювач як об'єкт регулювання

Схеми автоматизації використовують одну або декілька вихідних величин дробарки як керуючі параметри, відхилення яких від заданого значення через регулятор формує компенсуючий сигнал зворотного зв'язку на зміну продуктивності завантажувального пристрою $Q_{вх}$.

Системи автоматичного регулювання процесів дроблення, як правило, будуються за локальним принципом і функціонують на основі власного локального критерію. При виборі критерію керуються, здебільшого, необхідністю забезпечити найбільш ефективне використання потужності, що

витрачається на дроблення матеріалу, при цьому підтримуючи задану продуктивність установки.

Найпростіші схеми автоматизації використовують рівень заповнення камери дроблення як основний параметр керування. У встановленому режимі, коли продуктивність подачі матеріалу живильника і дробарки збігається, рівень заповнення змінюється незначно. У разі зниження продуктивності дробарки живильник зупиняється або переводиться на зменшену швидкість подачі.

Відомо, що при збільшеній подачі зерна в дробарку змінюється якість вихідного матеріалу. Подрібнювач із нерегульованими двигунами має суттєвий недолік, оскільки потребує постійного контролю оператором подачі зерна та якості подрібнення під час роботи.

На рисунку 2.2 наведено технологічну схему подрібнення кормів із використанням дробарки ДКУ-1,0.

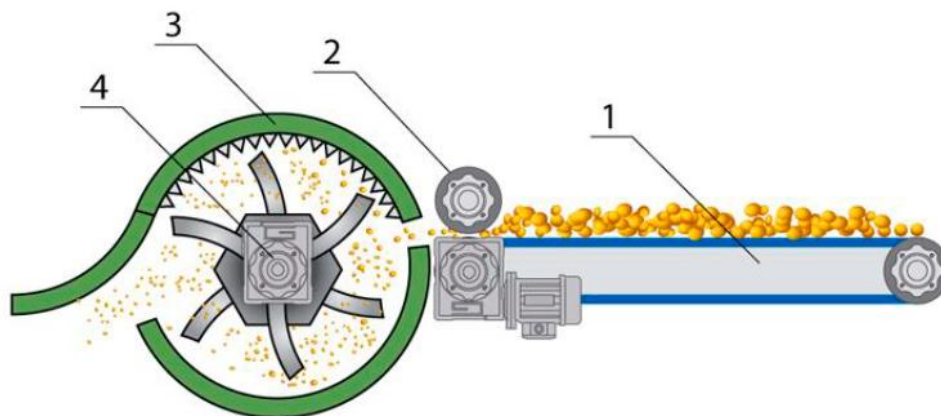


Рис. 2.1. Технологічна схема подрібнення з ДКУ-1,0:

1 – стрічковий конвеєр; 2 – пресуючий валок; 3 – корпус дробарки; 4 – подрібнювач

Основним керованим параметром розглядуваної машини є продуктивність дробарки або пропорційний їй момент опору на валу робочого органу, тоді як керуючим параметром виступає зерновий (кормовий) потік, що надходить на робочий орган агрегату.

Оскільки безперервне вимірювання моменту опору робочого органу дробарки є технічно складним завданням, доцільно здійснювати регулювання на основі вимірювання величини струму приводного електродвигуна. Це обґрунтовано тим, що на робочій ділянці механічної характеристики асинхронного двигуна величина струму пропорційна моменту, що розвиває двигун. Крім того, регулювання продуктивності за струмом двигуна забезпечує надійний захист електродвигуна від перевантажень і, відповідно, від перегріву.

Регулювання продуктивності агрегату або величини струму його приводного двигуна здійснюється зміною потоку матеріалу, що піддається подрібненню, за допомогою відповідного пристрою.

Найпростішим і найнадійнішим таким пристроєм є стрічковий конвеєр з регульованим електроприводом за схемою «частотний перетворювач – асинхронний двигун (ПЧ-АД)».

Система керування стрічковим конвеєром подрібнювача працює наступним чином (рис. 2.3).

При збільшенні завантаження зростає момент на валу електродвигуна АД1 дробарки, що призводить до збільшення споживаної потужності. Датчик потужності, включений у ланцюг статора АД1, передає частотний сигнал на вхід контролера з ПІ-регулятором. Контролер формує аналоговий вихідний сигнал, який зменшує завдання частотного перетворювача (ПЧ). Частотний перетворювач знижує частоту обертання двигуна стрічкового конвеєра ЛК і, відповідно, його продуктивність. У результаті зменшення продуктивності конвеєра знижується потужність на валу електродвигуна АД1 дробарки.

При зменшенні завантаження зменшується момент на валу електродвигуна АД1, що призводить до зниження потужності. Датчик потужності реагує на це зниження, передає сигнал на вхід контролера з ПІ-регулятором, який формує аналоговий вихідний сигнал для збільшення завдання частотного перетворювача. Це призводить до підвищення частоти

– знижуються механічні навантаження на двигун і стрічку конвеєра під час пуску;

– забезпечується захист електродвигуна від перевантажень, короткого замикання та перенапруги.

Використання частотних перетворювачів дозволяє обробляти ширший діапазон матеріалів, оскільки виключається перевантаження подрібнювача.

2.2. Вибір основного обладнання системи

2.2.1. Вибір типу асинхронних двигунів приводів подрібнювача

На основі навантажувальної діаграми роботи стрічкового конвеєра вибирається асинхронний двигун типу 4A80B4У3. Технічні параметри двигуна наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики асинхронного двигуна 4A80B4У3

Параметр	Значення
Потужність на валу P_2	1,5 кВт
Номінальна напруга $U_{ном}$	$3 \times \Delta/Y$ 220/380 В $\pm 10\%$, 50 Гц
Номінальний струм $I_{ном}$	3,56 А
Номінальна швидкість обертання $N_{ном}$	1400 об/хв
Режим роботи	S1 (тривалий)

2.2.2. Вибір частотного перетворювача

Для приводу конвеєра обираємо частотний перетворювач типу ОВЕН ПЧВ102-2К2-В (Акутек). Технічні параметри перетворювача показані в таблиці 2.2.

Векторні перетворювачі частоти ОВЕН ПЧВ, що мають функцію автоматичної оптимізації енергоспоживання, призначені для регулювання частоти обертання асинхронних двигунів у складі промислових приводів, а також у системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики частотного перетворювача для приводу конвеєра

Параметр	Значення
Тип живильної мережі	3× 220/380 В ±10%, 50 Гц
Розрахункова електрична потужність	1,5 кВт
Діапазон зміни швидкості	0 – 1400 об/хв
Момент опору	номінальний у всьому діапазоні швидкостей
Режим роботи	S1 (тривалий)
Ступінь захисту	не нижче IP54

Застосування перетворювачів частоти ОВЕН ПЧВ дає змогу суттєво розширити діапазон регулювання, підвищити точність і швидкодію електропривода, забезпечуючи при цьому зниження енергоспоживання до 35 % у порівнянні з традиційними системами.

Для забезпечення номінального крутного моменту електродвигуна при живленні напругою 380 В слід підключити його обмотки за схемою «Y» ($I_{ном}=3,56$ А). Під час роботи на знижених швидкостях із постійним крутним моментом необхідно застосувати додаткові заходи для охолодження корпусу електродвигуна.

Загальний вигляд перетворювачів частоти ОВЕН ПЧВ наведено на рисунку 2.3.

Ці пристрої мають низку технічних, експлуатаційних та економічних переваг, що забезпечують їх ефективне використання в сучасних електроприводних системах.

З технічного боку, перетворювачі частоти ОВЕН ПЧВ забезпечують високий рівень автоматизації технологічних процесів і дають змогу програмувати кілька електроприводів за допомогою однієї локальної панелі оператора, використовуючи два набори робочих параметрів. Вони характеризуються здатністю витримувати перевантаження за струмом і моментом, що підвищує надійність роботи, а також сприяють мінімізації динамічних навантажень у приводному механізмі.



Рис. 2.3. Частотні перетворювачі ОВЕН ПЧВ (Акутек)

Крім того, можливість інтеграції з іншими приладами серії ОВЕН розширює функціональні можливості системи, а компактні габарити та мала маса спрощують монтаж і експлуатацію обладнання.

В експлуатаційному аспекті ці перетворювачі відзначаються високою відмовостійкістю завдяки наявності системи самодіагностики, що дозволяє своєчасно виявляти несправності. Використання ОВЕН ПЧВ сприяє зменшенню зношування деталей електропривода та подовженню строку служби обладнання. До того ж, вони є екологічно безпечними, що відповідає сучасним вимогам щодо збереження довкілля.

З економічної точки зору, перетворювачі частоти ОВЕН ПЧВ мають оптимальне співвідношення ціни та якості у своєму класі, забезпечують низькі експлуатаційні витрати, дозволяють ефективно використовувати наявне обладнання та характеризуються коротким терміном окупності. Усе це сприяє зниженню собівартості продукції й підвищенню економічної ефективності виробництва.

Для підвищення якості керування та забезпечення надійної, безвідмовної роботи електропривода рекомендується використовувати разом із перетворювачем частоти ОВЕН ПЧВ додаткове зовнішнє обладнання. На рисунку 2.4 наведено схему його підключення, де показано елементи системи захисту, комутаційні пристрої та ланцюги живлення перетворювача частоти.

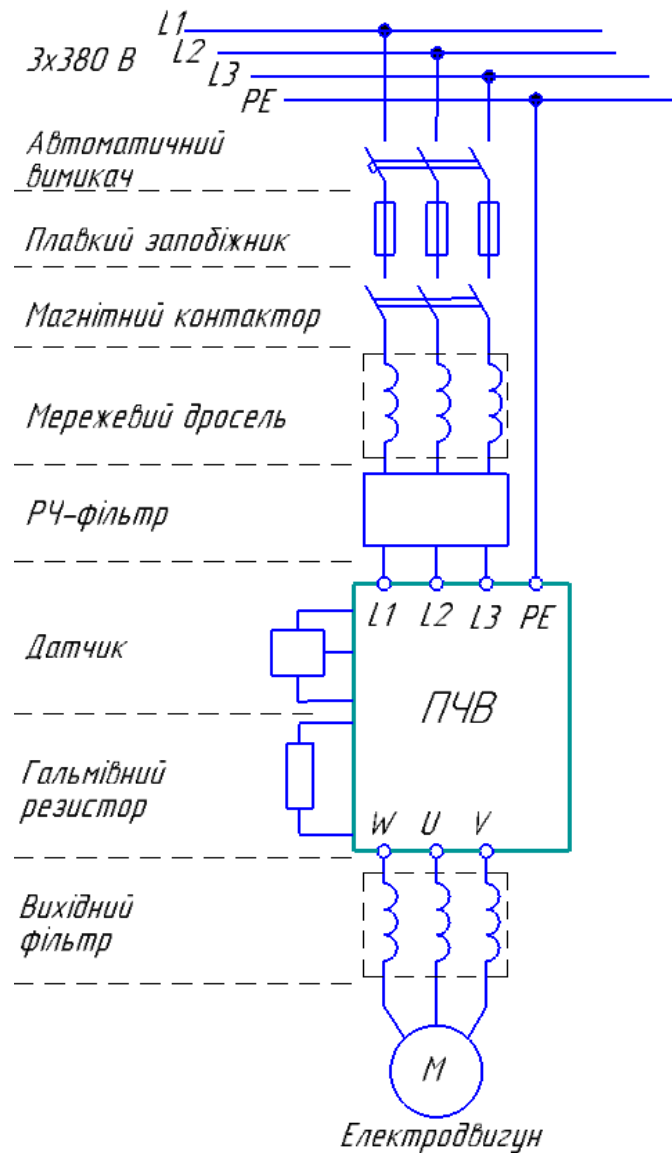


Рис. 2.4. Схема включення перетворювача частоти

Таке конструктивне рішення дозволяє підвищити стабільність роботи електропривода, забезпечити захист системи від перевантажень, коротких замикань та інших аварійних режимів, а також покращити загальну ефективність і довговічність обладнання.

2.2.3. Вибір автоматичного вимикача

Автоматичні вимикачі належать до захисних пристроїв багаторазової дії та призначені для захисту вентильних перетворювачів від коротких замикань і перевантажень за струмом.

Для забезпечення надійної роботи перетворювача частоти ОВЕН ПЧВ102-2К2-В обрано автоматичний вимикач із номінальним струмом 15 А серії Resi9 R9F12316 Schneider Electric (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Автоматичний вимикач серії Resi9 R9F12316 Schneider Electric

Таке рішення гарантує ефективний захист електронних компонентів перетворювача від аварійних режимів, сприяє стабільній роботі системи та продовжує термін експлуатації обладнання.

2.2.4. Вибір плавких запобіжників

Для захисту силових вентилів перетворювача частоти від внутрішніх коротких замикань застосовуються швидкодіючі мікросекундні плавкі запобіжники типу gR або aR, призначені для захисту напівпровідникових пристроїв. Запобіжники встановлюються у ланцюг живлення перетворювача та підбираються за номінальним струмом.

Для перетворювача частоти ПЧВ102-2К2-В рекомендується використовувати плавкий запобіжник Ferraz Shawmut (Mersen) типу aR, наприклад FR14GR69V14 (рис. 2.6), номінальний струм – 15 А, номінальна напруга – 690 В.



Рис. 2.6. Плавкий запобіжник типу FR14GR69V14

2.2.5. Вибір магнітних контакторів

Для місцевого чи дистанційного керування живленням та реалізації захисних функцій перетворювача частоти використовується магнітний контактор номінальним струмом 18 А. Для ПЧВ102-2К2-В доцільно застосувати контактор Schneider Electric LC1D18 (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Контактор типу Schneider Electric LC1D18

2.2.6. Вибір мережевого дроселя

Мережевий дросель підвищує коефіцієнт потужності та рекомендується до використання у випадках, коли потужність джерела живлення (розподільчого трансформатора) перевищує 500 кВА і є у шість або більше

разів більшою за потужність перетворювача частоти, або коли довжина кабелю між джерелом живлення та перетворювачем частоти становить менше 10 м.

Під час роботи інвертор перетворювача частоти генерує вищі гармоніки струму, які спотворюють форму та симетрію фаз живильної напруги. Зі збільшенням потужності перетворювача зростає рівень гармонічних спотворень у системі електропостачання. Вищі гармоніки спричиняють додаткові втрати в магнітопроводах інших електродвигунів і трансформаторів, викликають їх нагрівання та скорочують термін служби. Крім того, гармонічні спотворення можуть негативно впливати на стабільність роботи електронного обладнання.

Усі модифікації ПЧВ мають вбудовані дроселі у колі постійного струму, які зменшують рівень впливу зазначених негативних факторів на живильну мережу. Проте, у випадках, коли їх ефективності недостатньо, додатково застосовуються мережеві дроселі.

При раптових коротких замиканнях на вході або виході ПЧВ, а також при грозових перенапругах у мережі, мережевий дросель обмежує швидкість наростання струму через діоди та транзистори IGBT-модуля, що забезпечує своєчасне спрацювання електронного захисту по струму.

Застосування мережевого дроселя у складі приводу ПЧВ дозволяє:

- підвищити енергоефективність роботи приводу насосів, вентиляторів та інших механізмів;
- знизити вплив вищих гармонік на мережу електропостачання;
- захистити перетворювач частоти від асиметрії та перенапруг у мережі;
- підвищити коефіцієнт потужності системи.

Для перетворювача частоти ПЧВ102-2К2-В обираємо мережевий дросель з номінальним струмом 10 А та індуктивністю 3,5 мГн серії ДРМ-10-3,5 виробництва ТОВ «ЕЛЕКТРОПРИВОД» (м. Харків).

2.2.7. Вибір радіочастотних фільтрів

Для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) у колі живлення перетворювача частоти доцільно застосовувати радіочастотні фільтри. Перетворювачі серії ПЧВ мають вбудовані радіочастотні фільтри, що відповідають вимогам класу А1 згідно з ДСТУ EN 61800-3:2019. Для додаткового зниження рівня радіоперешкод рекомендується використовувати екрановані кабелі, металеві кожухи та захисні екрани. Проте у випадках, коли до тієї ж мережі підключене чутливе електронне обладнання, може виникнути потреба у встановленні додаткових зовнішніх радіочастотних фільтрів. Для перетворювача частоти ПЧВ102-2К2-В обрано радіочастотний фільтр типу ФРЧ-10-380-УХЛ4 виробництва ТОВ «Енергія-Сервіс» (м. Київ) з номінальним струмом 10 А та робочою напругою 380 В.

Для підвищення якості керування, зниження електромагнітних завад і збільшення ресурсу асинхронного двигуна на виході ПЧВ застосовують моторні дроселі, дроселі типу dU/dt та синусні фільтри. Основне призначення дроселів dU/dt полягає у зменшенні швидкості наростання напруги та зниженні імпульсних перенапруг на клеммах двигуна, які виникають внаслідок імпульсного характеру напруги інвертора. Їх встановлюють безпосередньо на виході перетворювача частоти, особливо у випадках коротких кабельних з'єднань між ПЧВ і двигуном, при використанні старих або перемотаних електродвигунів, а також у вологих чи агресивних середовищах. Для перетворювача частоти ПЧВ102-2К2-В обрано дросель типу ДДТ-7-1,27 виробництва ТОВ «ЕЛЕКТРОПРИВОД» (м. Харків) з номінальним струмом 7 А та індуктивністю 1,27 мГн.

Моторні дроселі застосовують для зниження негативного впливу імпульсної напруги, яка надходить до обмоток асинхронного двигуна. Вони зменшують пульсації струму, компенсують ємнісні струми в довгих лініях живлення, знижують ризик пробоя ізоляції та дають змогу збільшувати довжину кабелю між ПЧВ і двигуном без погіршення параметрів роботи. Для

перетворювача ПЧВ102-2К2-В вибрано моторний дросель типу ДМ-5,3-11,8 виробництва ТОВ «ЕЛЕКТРОПРИВОД» (м. Харків) з номінальним струмом 5,3 А та індуктивністю 11,8 мГн.

Синусні фільтри, які являють собою поєднання індуктивних та ємнісних елементів, згладжують імпульсну напругу, що формується інвертором ПЧВ. У результаті на виході формується синусоїдальна напруга без високочастотних гармонік, що дозволяє збільшити довжину моторних кабелів до 150 м, усунути потребу у використанні екранованих проводів, зменшити нагрівання та акустичний шум електродвигуна й тим самим продовжити його строк служби. Синусні фільтри встановлюються безпосередньо біля перетворювача частоти. Для ПЧВ102-2К2-В обрано синусний фільтр типу ФС-8-6,9/4,7 виробництва НВП «Енергія-Сервіс» (м. Київ) з номінальним струмом 8 А, індуктивністю 6,9 мГн та ємністю 4,7 мкФ.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Проведено аналіз об'єкта регулювання – універсального подрібнювача кормів, визначено основні та вихідні параметри, що впливають на ефективність його роботи. Обґрунтовано доцільність використання автоматизованої системи регулювання продуктивності за струмом електродвигуна, який прямо пропорційний навантаженню на робочий орган. Такий принцип дає змогу забезпечити стабільний технологічний режим без складних вимірювальних засобів.

2. Розроблено функціональну схему системи керування подрібнювачем, у якій реалізовано автоматичне регулювання швидкості стрічкового конвеєра за допомогою частотного перетворювача. Система включає контролер із ПІ-регулятором, датчик струму, асинхронні двигуни та елементи зворотного зв'язку. Це дозволяє автоматично підтримувати продуктивність агрегату, запобігати перевантаженням електродвигуна та підвищувати енергоефективність процесу подрібнення.

3. Виконано вибір і технічне обґрунтування основного обладнання системи керування, а саме:

- асинхронного двигуна типу 4А80В4У3 потужністю 1,5 кВт;
- частотного перетворювача ОВЕН ПЧВ102-2К2-В з функціями енергозбереження;
- захисних пристроїв (автоматичний вимикач Resi9 R9F12316, запобіжники Ferraz Shawmut, контактор Schneider Electric LC1D18);
- елементів для покращення якості електроенергії (мережевий дросель ДРМ-10-3,5, дроселі dU/dt і моторний, синусний фільтр, радіочастотний фільтр ФРЧ-10-380-УХЛ4).

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1. Визначення розрахункових параметрів електроприводу

Технічні характеристики обраного електродвигуна наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Технічні параметри електроприводу

Типо-розмір	n_0 , об/хв	$U_{1н}$, В	$P_{двн}$, кВт	При номінальному навантаженні			$J_{дв}$, кг·м ²
				s_H , %	$\cos \varphi_H$	η_H , %	
4А80В4У3	1500	380	1,5	6,4	0,83	77,0	4,6
$m_{п} = \frac{M_{пуск}}{M_H}$	$m_{к} = \frac{M_{макс}}{M_H}$		$m_{м} = \frac{M_{мін}}{M_H}$		$k_{i_{дв}} = \frac{I_{пуск}}{I_H}$		
2	2.2		1,6		5,0		

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}; \quad (3.1)$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,1 \text{ рад / с.}$$

Номінальне значення частоти обертання валу:

$$\omega_{дв.н.} = (1 - s_H) \cdot \omega_0; \quad (3.2)$$

$$\omega_{дв.н.} = (1 - 0,014) \cdot 157,1 = 154,9 \text{ рад / с.}$$

Номінальні значення фазних напруги та струму:

$$U_{1\phi H} = \frac{U_{1лH}}{\sqrt{3}}; \quad (3.3)$$

$$U_{1\phi H} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В};$$

$$I_{1H} = \frac{P}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H}; \quad (3.4)$$

$$I_{1H} = \frac{1500}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,77} = 3,6 \text{ А}.$$

Максимальне значення сили струму при прямому пуску електроприводу:

$$I_{1\max} = k_i \cdot I_{1H}; \quad (3.5)$$

$$I_{1\max} = 5 \cdot 3,6 = 17,9 \text{ А}.$$

Значення критичного (максимального) моменту електродвигуна на природній характеристиці:

$$M_k = m_k \cdot M_H; \quad (3.6)$$

$$M_k = 2,2 \cdot 10,2 = 22,4 \text{ Нм}.$$

Величина пускового моменту при прямому запуску ЕД:

$$M_{II} = m_{II} \cdot M_H; \quad (3.7)$$

$$M_{II} = 2 \cdot 10,2 = 20,4 \text{ Нм.}$$

3.2. Дослідження динамічних характеристик електроприводу

Для дослідження перехідних процесів використано метод імітаційного моделювання. Як інструмент моделювання електромеханічних систем обрано програмне середовище MATLAB 2010. На рисунку 3.1 подано імітаційну модель, призначену для аналізу роботи асинхронного двигуна.

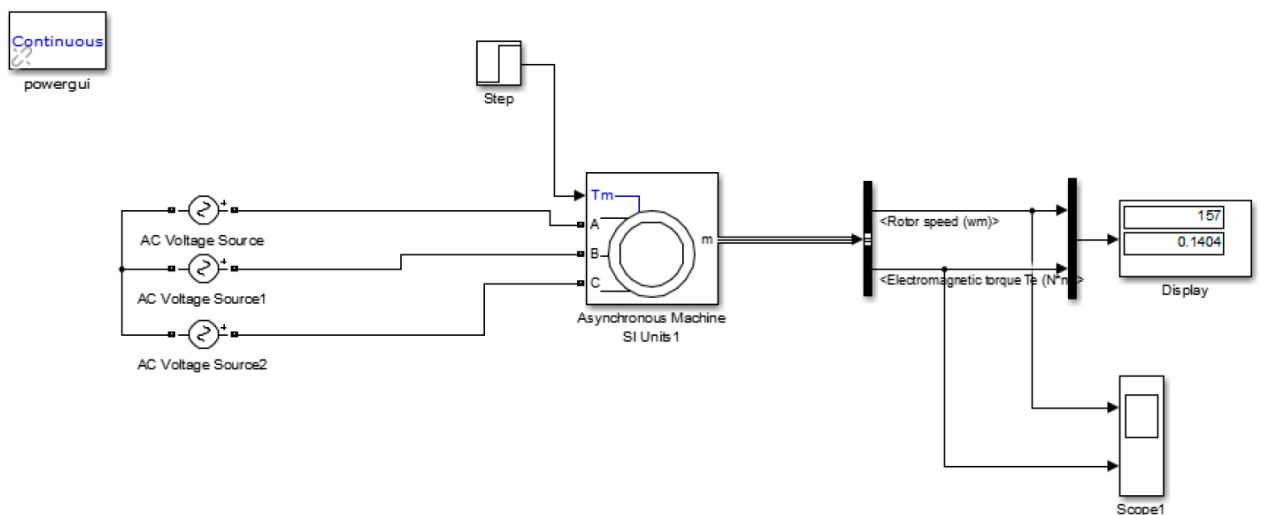


Рис. 3.1. Імітаційна модель для дослідження електроприводу конвеєра подрібнювача

На рисунку 3.2 наведено залежності зміни швидкості обертання та електромагнітного моменту під час пуску асинхронного двигуна в режимі холостого ходу.

Аналізуючи дані рис. 3.2. видно, що тривалість перехідного процесу становить приблизно 0,9 с, а кутова швидкість ротора досягає 157 рад/с.

На рисунку 3.3 подано перехідні характеристики швидкості обертання та моменту асинхронного двигуна під час прикладання навантаження $0,5 M_n$ через 1 с після пуску.

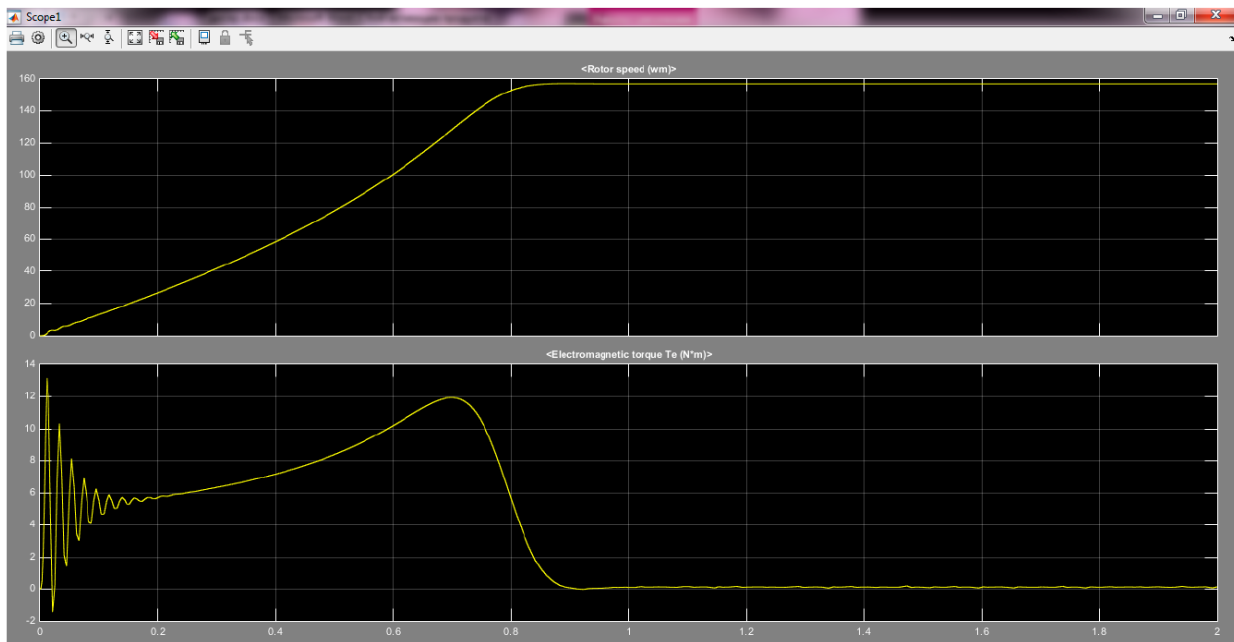


Рисунок 3.2. Осцилограма швидкості та моменту електроприводу в режимі холостого ходу

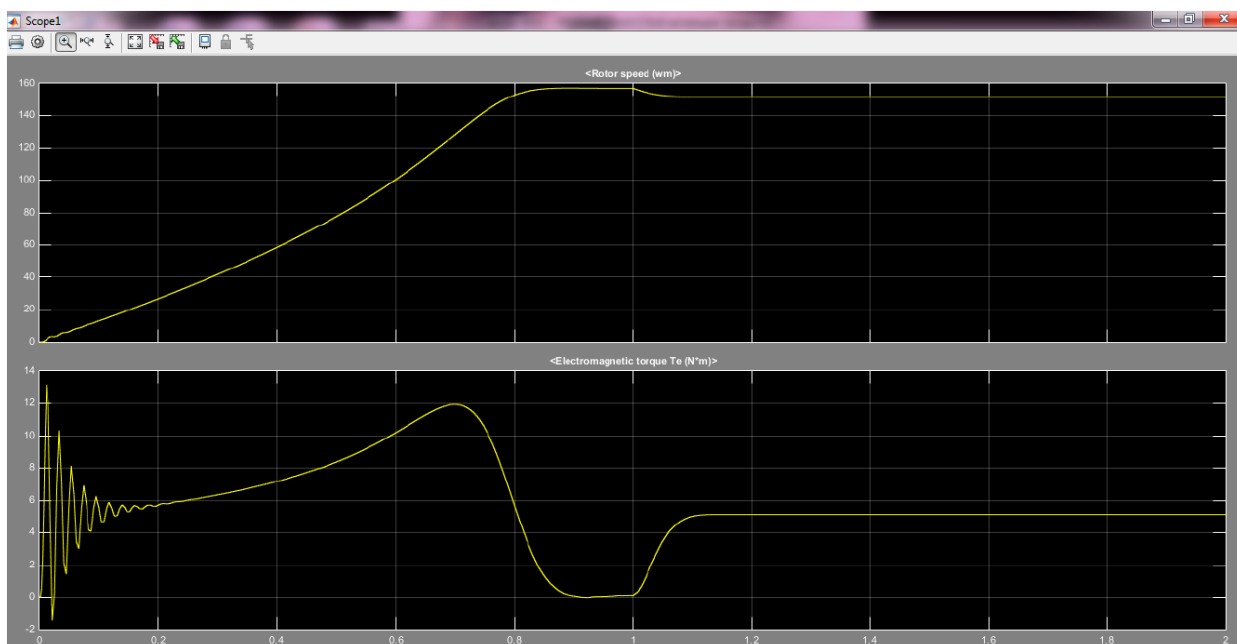


Рис. 3.3. Осцилограма швидкості та моменту електроприводу під час прикладання навантаження $0,5 M_n$ через 1 с після пуску

Із графіка (рис. 3.3) видно, що перехідний процес триває близько 0,9 с, а кутова швидкість ротора становить 152 рад/с.

На рисунку 3.4 наведено перехідні характеристики швидкості обертання та електромагнітного моменту асинхронного двигуна при прикладанні навантаження $1,5 M_n$ через 1 с після пуску.

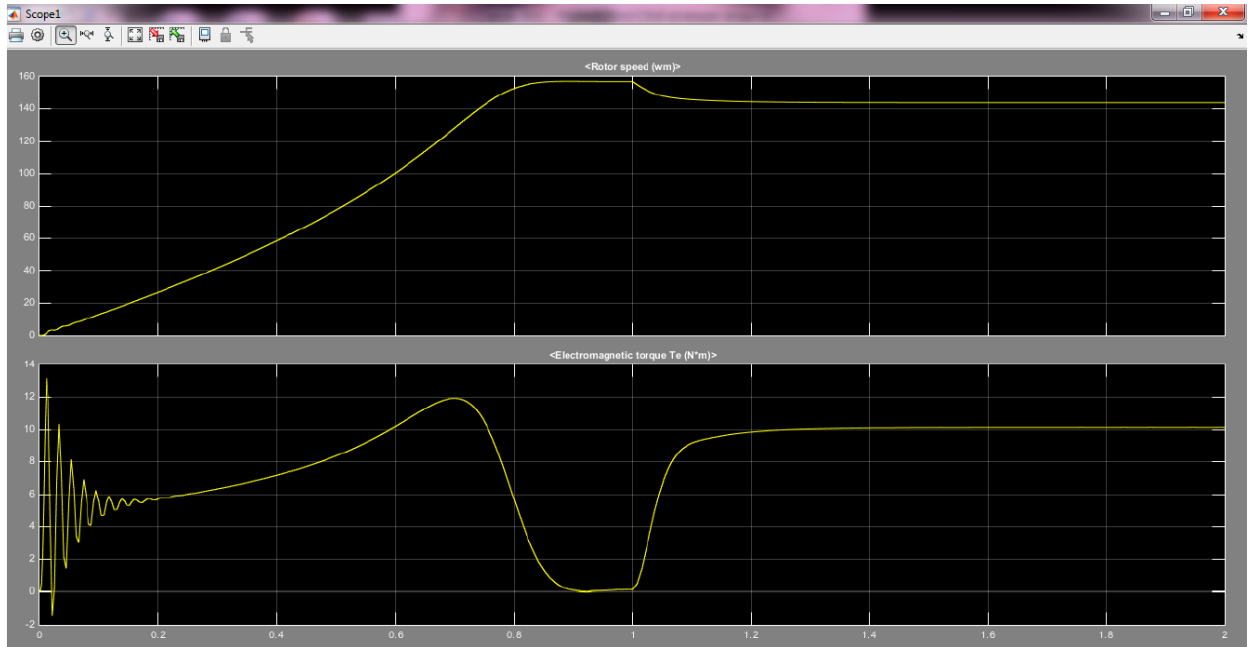


Рис. 3.4. Осцилограма швидкості та моменту електроприводу під час прикладання навантаження $1,5 M_n$ через 1 с після пуску

Аналізуючи дані рис. 3.4 видно, що тривалість перехідного процесу становить приблизно 0,9 с, а кутова швидкість ротора дорівнює 144 рад/с.

Отримані результати свідчать, що динамічні характеристики асинхронного двигуна перебувають у допустимих межах.

3.3. Дослідження замкнутої системи регульованого електроприводу

Подрібнення й дроблення кормів є ключовими операціями при підготовці кормів до годівлі, оскільки від розміру й форми частинок залежить їхня засвоюваність і відповідність фізіологічним потребам тварин. Розмір (крупність) або товщина частинок повинні відповідати рекомендаціям для конкретного комбікорму з урахуванням виду тварин, призначення корму та

вікової групи. Якість готового комбікорму підвищується за умови більшої однорідності частинок і мінімального вмісту пилоподібних домішок.

Дві взаємопов'язані складові проблеми – енергоємність процесу та якість продукту – визначають мету: забезпечити зоотехнічні вимоги до корму при мінімальних витратах енергії. Сучасні підходи спрямовані на оптимізацію конструкції дробарок і плющилок зерна; додатковий ресурс для підвищення їхньої ефективності дає вдосконалення системи керування технологічним процесом і оптимізація робочих режимів.

У межах цієї роботи поставлено задачу розробити систему керування та визначити її оптимальні параметри. Для цього створено математичну модель системи керування дробаркою. Структурна схема замкненого регульованого електроприводу подрібнювача представлена на рисунку 3.5.

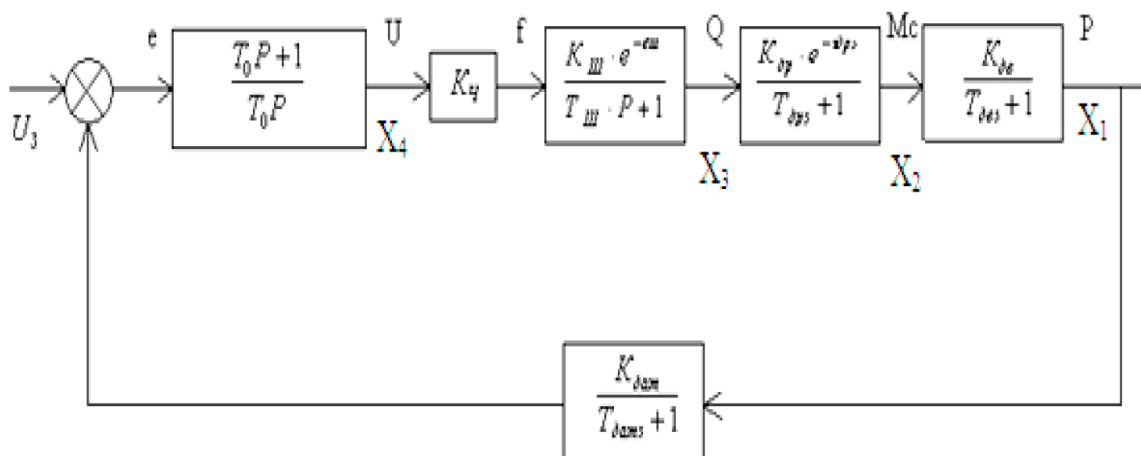


Рис. 3.5. Структурна схема замкненої системи керування регульованим електроприводом подрібнювача

У математичній моделі системи автоматичного керування подрібнювальний агрегат моделюється як аперіодичний елемент першого порядку з чистим запізненням.

Привід дробарки реалізовано за допомогою асинхронного трифазного електродвигуна змінного струму, який характеризується нелінійною механічною характеристикою. На робочій ділянці ця характеристика є досить

жорсткою, тому коливання частоти обертання двигуна в номінальному режимі не перевищують 2 %, що дозволяє не враховувати їх при аналізі номінальної роботи. Внаслідок цього в номінальному режимі асинхронний трифазний електродвигун може бути представленим аперіодичним елементом першого порядку:

$$W_{\text{дв}}(S) = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}} \cdot S + 1}, \quad (3.8)$$

де $K_{\text{дв}}$ – значення коефіцієнту пропорційності ЕД, А/Нм;

$T_{\text{дв}}$ – постійна часу ЕД, с.

Коефіцієнт пропорційності двигуна розраховують за формулою:

$$K_{\text{дв}} = \frac{I_{\text{н.л}}}{M_{\text{н}}}, \quad (3.9)$$

де $I_{\text{н.л}}$ – номінальне значення лінійного струму, А;

$M_{\text{н}}$ – номінальне значення моменту ЕД, Нм.

$$M_{\text{н}} = \frac{I_{\text{н.л}} \cdot U_{\text{н.л}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot \omega_{\text{н}}}, \quad (3.10)$$

де $U_{\text{н.л}}$ – номінальна лінійна напруга, В;

$\cos \varphi_{\text{н}}$ – номінальне значення коеф. потужності ЕД;

$\eta_{\text{н}}$ – номінальна величина ККД ЕД.

Для розрахунків використовуються паспортні дані електродвигуна.

Постійна часу двигуна $T_{\text{дв}}$ встановлюється експериментальним шляхом.

Для цього на вал двигуна накладають додатковий момент опору, який

залишається постійним протягом вимірювання, а зміни струму записують за допомогою самописця або електронного пристрою з пам'яттю.

Попередньо постійну часу двигуна приймають у межах 0,2–1,5 с. Потім, за графіком перехідного процесу, визначають фактичне значення $T_{дв}$ [19].

$$T_{дв} = \frac{T_{III}}{6}, \quad (3.11)$$

де T_{III} – тривалість перехідного процесу, с.

Математична модель дробарки характеризується високою складністю, оскільки на її роботу впливають такі фактори, як вологість зерна, його вид і сорт, стан зношеності робочих органів та їхня частота обертання. Якщо ці фактори стабілізувати, поведінку дробарки можна апроксимувати як аперіодичний елемент першого порядку з чистим запізненням [19]:

$$W_{др}(S) = \frac{K_{др} e^{-\tau_{др}}}{T_{др} S + 1}, \quad (3.12)$$

де $K_{др}$ – коефіцієнт пропорційності дробарки, Нм/т·год;

$\tau_{др}$ – постійна запізнення, с;

$T_{др}$ – постійна часу подрібнювача, с.

У практичних умовах складно точно визначити параметри передавальних функцій електродвигуна та дробарки, тому надалі будемо розглядати комбіновану передавальну функцію електродвигуна з дробаркою. Оскільки постійна часу двигуна $T_{дв}$ набагато менша за постійну часу дробарки $T_{др}$, то можна її вважати нульовою ($T_{дв} = 0$).

Відповідно, передавальна функція системи набуває вигляду:

$$W_{op}(S) = \frac{K_{\text{ч}} \cdot K_{op} \cdot K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{дат}}}{(T_{op}S + 1)(T_{\text{ш}}S + 1)(T_{\text{дат}}S + 1)} \cdot U_3, \quad (3.13)$$

де K_{op} – коефіцієнт пропорційності дробарки позначається, А/(т·год).

$K_{\text{ш}}$ – коефіцієнт пропорційності стрічкового конвеєра;

$T_{\text{ш}}$ – постійна часу конвеєра, с;

$K_{\text{дат}}$ – коефіцієнт пропорційності датчика швидкості;

$T_{\text{дат}}$ – постійна часу датчика швидкості;

$K_{\text{ч}}$ – коефіцієнт підсилення перетворювача частоти;

U_3 – задавальна напруга, В.

Адекватність моделі оцінюють на основі експериментальних даних. Модель вважається достовірною, якщо розбіжність між експериментальними та теоретичними результатами не перевищує 5 %.

Аналітичне визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора для системи керування подрібнювачем є складною задачею, тому оптимальні значення підбираються шляхом імітаційного моделювання. Для побудови та дослідження математичної моделі використано пакет прикладних програм MATLAB, який надає всі необхідні математичні функції, а також має вбудоване середовище Simulink, що дозволяє візуально моделювати різні системи та автоматизувати процес пошуку оптимальних параметрів систем керування.

Структурна схема керування подрібнювачем у середовищі Simulink має вигляд, показаний на рисунку 3.6.

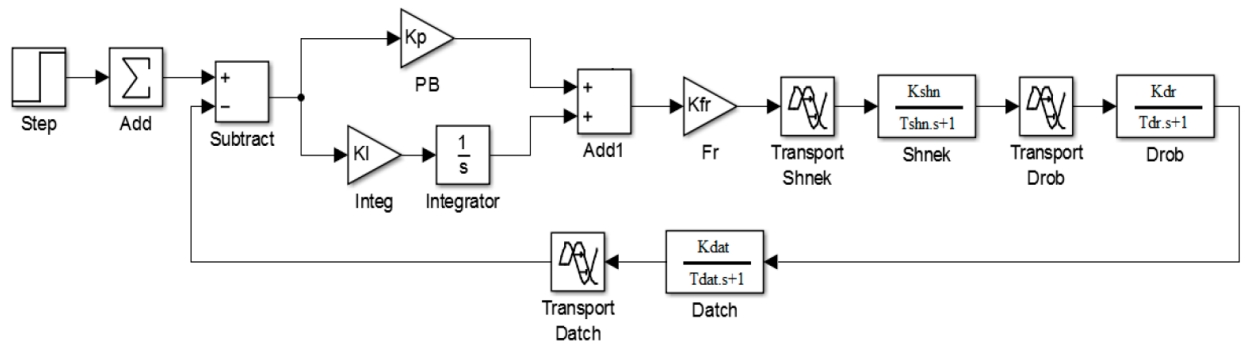


Рис. 3.6. Структурна схема системи стабілізації навантаження подрібнювача, представлена у Simulink

Параметри передавальних функцій перетворювача частоти, шнека, дробарки та датчика, отримані експериментально та обчислені аналітичним шляхом, зведені до зручної таблиці (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти передавальних функцій перетворювача частоти, шнека, дробарки та датчика.

K_{fr} Гц/ кВт	T_{shn} с	K_{shn} (кг/с)/ Гц	T_{ashn} с	T_{dr} с	K_{dr} Нм/ (кг/с)	T_{adr} с	T_{dat} с	K_{dat}	T_{dat} с
3.125	10	2.18	3	15	0.6	2.5	0.5	1	0.5

Параметри ПІ-регулятора (K_p , K_i , K_d) визначаються з використанням оптимізатора.

За методом повного перебору оптимізатор змінює значення параметрів (K_p , K_i) і для кожної комбінації моделює перехідний процес у замкненій системі керування при зміні задавального впливу. Процедура перебору продовжується до тих пір, поки перехідний процес не відповідатиме встановленим критеріям щодо часу, коливань та інших параметрів якості.

Програма для розрахунку перехідних процесів швидкості стрічкового конвеєра:

```

function Diff1
x0=[0;0;0;0];
interval=[0 250];
[T,X]=ode45(@sysm,interval,x0);
plot(T,X(:,1),'r-');
grid
function dx=sysm(t,x)
dx=zeros(4,1);
dx(1)=0.1*x(2)-0.4*x(1);
dx(2)=0.04*x(3)-0.06*x(2);
dx(3)=0.1*x(4)-0.4*x(3);
dx(4)=10*18.4-0.01*x(2)-1.1*x(1);
end

```

У програмі реалізовано систему диференціальних рівнянь, сформовану на підставі передавальних функцій структурної схеми системи.

На рисунку 3.7 представлено графік перехідного процесу стрічкового конвеєра при заданій частоті обертання 1400 об/хв (156 рад/с) та напрузі задання $U_3 = 18,4$ В.

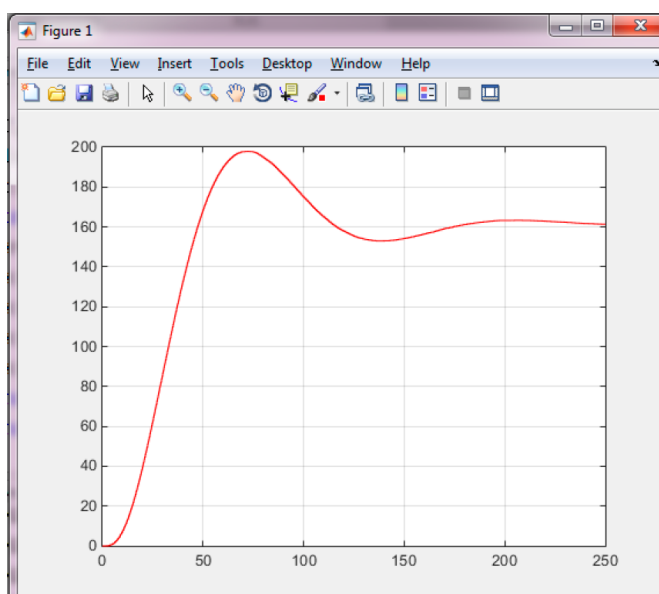


Рис. 3.7. Графік перехідного процесу стрічкового конвеєра при 1400 об/хв (156 рад/с) та $U_3 = 18,4$ В

За графіком (рис. 3.7) можна зробити висновок, що перехідний процес триває приблизно 45 с, а максимальне перерегулювання становить 21 %.

На рисунку 3.8 показано перехідну характеристику стрічкового конвеєра при заданій частоті обертання 1000 об/хв (104 рад/с) та напрузі задання $U_3 = 12,2$ В.

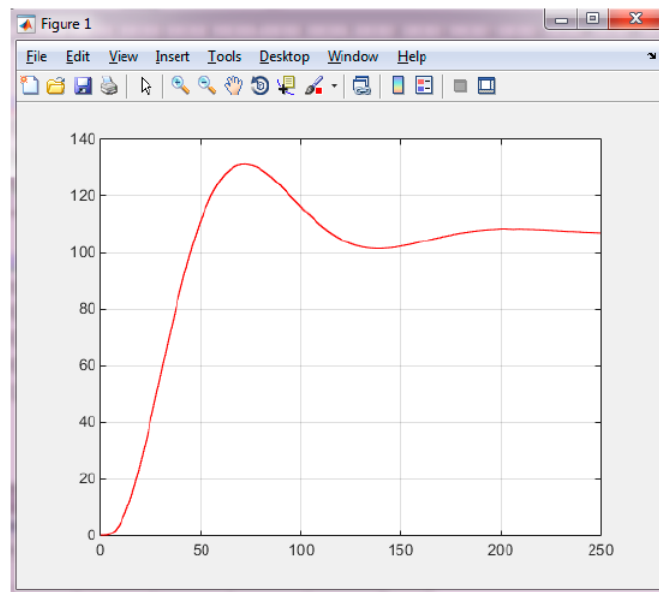


Рис. 3.8. Перехідний процес стрічкового конвеєра при 1000 об/хв (104 рад/с) та $U_3 = 12,2$ В

За рис (3.8) можна зробити висновок, що перехідний процес триває близько 45 с, а максимальне перерегулювання досягає 25 %.

На рисунку 3.9 показано перехідну характеристику швидкості двигуна стрічкового конвеєра при заданій частоті обертання 750 об/хв (78 рад/с) та напрузі задання $U_3 = 9$ В.

Аналізуючи результати рис. 3.9. видно, що перехідний процес триває близько 45 с, а максимальне перерегулювання складає 22 %.

В цілому, аналіз перехідних процесів при різних заданих швидкостях свідчить, що час виходу на усталений режим (45 с), перерегулювання (25 %) та статична помилка (5 %) залишаються в межах допустимого. Це підтверджує, що система ефективно регулює частоту обертання двигуна

конвеєра і, відповідно, забезпечує стабільну продуктивність подрібнювача кормів.

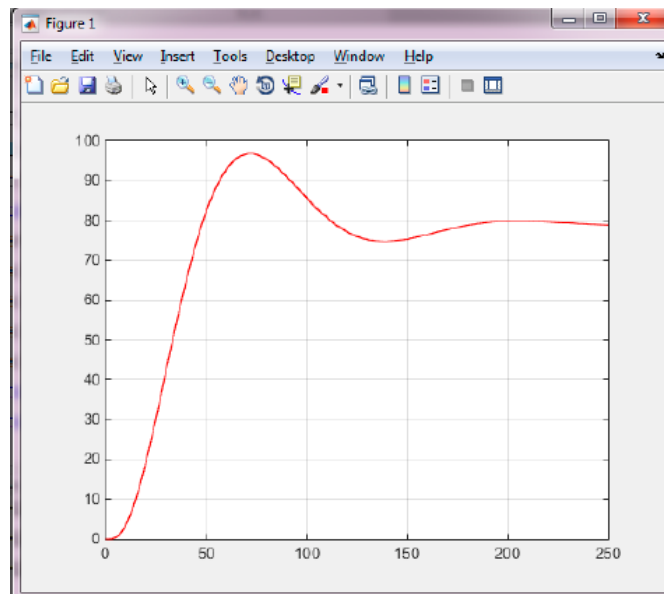


Рис. 3.9. Перехідний процес швидкості двигуна стрічкового конвеєра при 750 об/хв (78 рад/с) та $U_3 = 9$ В

3.4. Висновки до розділу 3

1. Отримані результати моделювання свідчать, що динамічні характеристики асинхронного двигуна перебувають у допустимих межах. Тривалість перехідного процесу становить близько 0,9 с, що забезпечує швидкий вихід двигуна на усталений режим роботи. Коливання швидкості та моменту не перевищують допустимих відхилень (до $\pm 10\text{--}15\%$ від номінальних значень), а максимальний пусковий момент не перевищує $2\text{--}2,5 M_n$, що відповідає вимогам до електроприводів даного класу. Це свідчить про стійкість системи керування та задовільні динамічні показники асинхронного двигуна.

2. Математична модель замкнутої системи керування дробаркою показала, що комбінована передавальна функція двигуна та дробарки може бути апроксимована як аперіодичний елемент першого порядку із чистим

запізненням, оскільки постійна часу двигуна значно менша за постійну часу дробарки. Використання Simulink дозволило побудувати структурну схему системи стабілізації завантаження подрібнювача та підібрати оптимальні параметри ПІ-регулятора методом імітаційного моделювання. Експериментальні та аналітичні дані підтвердили адекватність моделі, оскільки розбіжність між теоретичними та практичними результатами не перевищує 5 %.

3. Аналіз перехідних процесів стрічкового конвеєра при різних заданих швидкостях обертання (1400, 1000 та 750 об/хв) показав, що час виходу на усталений режим становить приблизно 45 секунд, максимальне перерегулювання коливається від 21 до 25 %, а статична помилка залишається на рівні 5 %. Це підтверджує ефективність системи регулювання частоти обертання двигуна конвеєра та забезпечує стабільну продуктивність подрібнювача кормів.

4. Проведене дослідження показало, що розроблена система керування регульованим електроприводом подрібнювача забезпечує надійну і стабільну роботу механізму при різних режимах навантаження. Використання математичних моделей, імітаційного моделювання та оптимізації ПІ-регулятора дозволить підвищити ефективність технологічного процесу та якість готового продукту.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці при роботі з подрібнювачами кормів.

Організація охорони праці при експлуатації подрібнювачів кормів починається з ретельного планування всіх заходів з безпеки. Планування передбачає визначення пріоритетних напрямів роботи, оцінку потенційних ризиків та розробку заходів для їх мінімізації. Особлива увага приділяється організації робочих місць, дотриманню норм освітлення, вентиляції та безпечного доступу до обладнання.

Фінансування заходів з охорони праці забезпечує можливість своєчасного придбання необхідного обладнання, засобів індивідуального захисту, проведення навчання персоналу та підтримання санітарно-побутових умов. Сума коштів на ці заходи закладається у відповідний бюджет підприємства і контролюється керівництвом.

Умови колективного договору включають обов'язкові положення щодо дотримання вимог охорони праці, забезпечення безпечних умов праці та прав працівників на захист від небезпечних факторів. Колективний договір також регламентує механізми вирішення конфліктів і контролю за виконанням норм безпеки.

Організація навчання передбачає наявність програм інструктажів, регулярне проведення вступного, первинного та повторного навчання працівників. Всі інструктажі документуються у журналах реєстрації, а результати атестації та перевірки знань фіксуються у протоколах. Це забезпечує систематичний контроль рівня підготовки персоналу та знання ними правил безпечної роботи з подрібнювачами.

Забезпечення персоналу спеціальним одягом, засобами індивідуального захисту та санітарно-побутовим обладнанням є обов'язковим елементом охорони праці. Працівники отримують каски, рукавиці, захисні окуляри, спецвзуття та інші необхідні засоби, а також доступ до кімнат відпочинку, душових та роздягалень.

Відповідальність посадових осіб за охорону праці визначається внутрішніми нормативними документами підприємства та чинним законодавством. Керівники структурних підрозділів відповідають за своєчасне проведення навчання, контроль за дотриманням правил безпеки та своєчасне усунення порушень, що забезпечує безпечну експлуатацію подрібнювачів кормів і збереження здоров'я працівників.

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі з електрообладнанням подрібнювачів кормів.

Створення безпечних умов праці на підприємстві базується на комплексному підході, що включає організаційні, технічні та медико-профілактичні заходи. Безпека виконання всіх видів робіт регламентується внутрішніми положеннями та інструкціями, що становлять основу системи управління охороною праці.

Таблиця 4.1. Логічна схема виробничих небезпек технологічного процесу подрібнення кормів

Найменування операції	Небезпечні умови	Небезпечні дії	Небезпечна ситуація	Можливі наслідки
Подача сировини в подрібнювач	Рухомі частини, електрообладнання, пил	Підставляння рук або інструментів під ножі	Контакт з обертовими частинами, заклинювання матеріалу	Травми рук і кінцівок, порізи, защемлення
Подрібнення кормів	Високий рівень шуму, вібрації, пил, електрообладнання під напругою	Робота без захисних засобів, необережне поводження з електрокабелями	Вдихання пилу, тривале вплив шуму і вібрації, контакт з струмом	Пошкодження слуху, проблеми з дихальними шляхами, електротравми
Обслуговування та очищення подрібнювача	Під напругою, рухомі частини	Недотримання вимог відключення електроживлення	Ураження електричним струмом, захоплення обертових частин	Електротравми, опіки, механічні травми
Транспортування подрібненого корму	Нерівна підлога, ковзкі поверхні	Піднімання важких мішків, необережне пересування	Падіння, спотикання, неправильне	Розтягнення, переломи, травми спини

			піднімання вантажу	
Завантаження корму в бункери або силоси	Високий пил, обмежений простір	Робота без респіратора та захисту очей	Вдихання пилу, попадання часток у очі	Респіраторні захворювання, подразнення очей, кон'юнктивіт
Робота з електрообладнанням (підключення, перевірка, ремонт)	Пошкоджена ізоляція, волога, незаземлене обладнання, зношені контакти, несправні вимикачі, відсутність пристроїв захисту від короткого замикання	Недотримання правил електробезпеки, спроби ремонту під напругою, необережне підключення кабелів, відключення захисних пристроїв	Контакт з оголеними проводами, коротке замикання, спалах дуги, вихід обладнання з ладу	Ураження електричним струмом, опіки, пошкодження очей, пожежа, зупинка виробничого процесу, травми персоналу

Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при роботі з електрообладнанням подрібнювачів кормів. Для забезпечення безпечної роботи з електрообладнанням подрібнювачів кормів перш за все необхідно впровадити суворий контроль за станом електричних мереж і обладнання. Це передбачає регулярну перевірку ізоляції кабелів, справності вимикачів та пристроїв захисту від короткого замикання, наявності заземлення та відсутності вологи на робочих поверхнях.

Необхідно організувати чіткий порядок включення та відключення обладнання, з дотриманням правил електробезпеки. Всі операції з ремонту чи обслуговування подрібнювачів повинні проводитися лише після повного знеструмлення і блокування живлення, а доступ до оголених контактів має бути виключно у спеціально підготовлених осіб.

Впровадження засобів індивідуального захисту є обов'язковим. Працівники повинні використовувати ізолюючі рукавиці, захисні каски, спеціальне взуття, а також при необхідності захисні окуляри або щитки. Крім того, робочі місця слід обладнати килимками з ізоляційних матеріалів та розмежувати проходи, щоб уникнути контакту з потенційно небезпечними частинами електрообладнання.

Регулярне навчання та інструктаж персоналу є ключовим фактором безпеки. Працівники повинні пройти вступний, первинний та повторний інструктаж з електробезпеки, ознайомитися з правилами роботи на конкретному обладнанні, а результати навчання документувати у журналах реєстрації та протоколах атестації.

Не менш важливим є впровадження системи контролю та моніторингу стану обладнання. Це включає планові огляди, ведення журналів експлуатації, перевірку справності захисних пристроїв та негайне усунення виявлених порушень. Такий комплекс заходів дозволяє мінімізувати ризики ураження електричним струмом, опіків, пожеж та інших небезпечних ситуацій під час роботи з подрібнювачами кормів.

Висновки. При роботі з подрібнювачами кормів основними шкідливими та небезпечними факторами є механічні травми, ураження електричним струмом, шум, пил та вібрації. Аналіз технологічного процесу показав, що найбільш ризиковими операціями є подача сировини, обслуговування обладнання та робота з електрообладнанням під напругою.

Впровадження заходів з охорони праці, включаючи використання засобів індивідуального захисту, регулярне обслуговування і перевірку обладнання, навчання та інструктаж персоналу, дозволяє значно знизити ризики виробничого травматизму та професійних захворювань. Систематичний контроль за дотриманням правил електробезпеки, документування інструктажів і атестацій забезпечує безпечну експлуатацію подрібнювачів кормів і збереження здоров'я працівників.

Таким чином, комплексна організація охорони праці є ключовою умовою ефективної та безпечної роботи технологічного процесу подрібнення кормів.

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Метою впровадження регульованого електроприводу подрібнювача кормів є підвищення енергоефективності, надійності та технологічної гнучкості роботи обладнання. Використання частотного перетворювача дозволяє плавно регулювати швидкість обертання електродвигуна, забезпечуючи оптимальний режим роботи подрібнювача, зменшуючи енергоспоживання, механічний знос і частоту ремонтів. У результаті реалізації проекту очікується суттєве скорочення витрат електроенергії, покращення умов експлуатації електроприводу та зниження витрат на технічне обслуговування.

Основним технологічним обладнанням системи є асинхронний двигун типу 4A80B4У3 потужністю 1,5 кВт, частотний перетворювач ОВЕН ПЧВ102-2К2-В з функціями енергозбереження, а також комплект захисних і допоміжних пристроїв — автоматичний вимикач Resi9 R9F12316, запобіжники Ferraz Shawmut, контактор Schneider Electric LC1D18, мережевий дросель ДРМ-10-3,5, dU/dt і моторний дроселі, синусний фільтр та радіочастотний фільтр ФРЧ-10-380-УХЛ4. Усі ці елементи забезпечують стабільну роботу електроприводу, зменшують пульсації струму, електромагнітні завади та підвищують термін служби двигуна.

Орієнтовні капіталовкладення на створення регульованого електроприводу подрібнювача кормів наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахунок капіталовкладень для впровадження гібридної СЕС

Найменування витрат	Орієнтовна вартість, грн
Асинхронний двигун 4A80B4У3, 1,5 кВт	8000
Частотний перетворювач ОВЕН ПЧВ102-2К2-В	28000

Захисні пристрої (автомат, запобіжники, контактор)	4000
Елементи покращення якості електроенергії (дроселі, фільтри)	10000
Монтаж, матеріали, кабельна продукція	6000
Пусконаладжувальні роботи та документація	4000
Разом капіталовкладень	60000

Зменшення частини фільтрувальних пристроїв до оптимально необхідних дозволило скоротити початкові інвестиції до 60000 грн, що є економічно доцільним при збереженні усіх функцій енергозбереження і стабільної роботи системи.

Розрахунок економічної ефективності виконано за такими вихідними даними: потужність асинхронного двигуна становить 1,5 кВт, середня річна тривалість роботи подрібнювача – 4000 годин. Внаслідок використання частотного перетворювача очікується зменшення енергоспоживання приблизно на 35 % у порівнянні з нерегульованим електроприводом. Ціна електроенергії для промислових споживачів становить 12 грн за 1 кВт·год.

Річне енергоспоживання без регулювання визначається добутком потужності двигуна на кількість годин роботи:

$$E_0 = 1,5 \cdot 4000 = 6000 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Очікувана економія електроенергії становить 35 %, тобто

$$\Delta E = 6000 \cdot 0,35 = 2100 \text{ кВт}\cdot\text{год на рік.}$$

Вартісна економія електроенергії становить

$$\Delta C_e = 2100 \cdot 12 = 25200 \text{ грн / рік.}$$

Крім того, завдяки плавному пуску і зменшенню механічного навантаження на елементи приводу річна економія на технічному обслуговуванні та ремонті оцінюється у 3000 грн. Отже, загальна річна економія коштів дорівнює:

$$\Delta C_{\text{заг}} = 25200 + 3000 = 28200 \text{ грн / рік.}$$

Термін окупності інвестицій визначається за формулою:

$$T = \frac{60000}{28200} = 2,13 \text{ року.}$$

Отже, регульований електропривод окупить себе приблизно за два роки і два місяці. З урахуванням можливого подорожчання електроенергії або збільшення тривалості роботи обладнання, фактичний термін окупності може зменшитися до 1,8–2,0 років.

Висновки до розділу 5. Впровадження регульованого електроприводу подрібнювача кормів забезпечує підвищення енергетичної ефективності, зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності технологічного обладнання. Розрахунки показали, що за ціни електроенергії 12 грн/кВт·год і річній тривалості роботи 4000 годин інвестиції у розмірі 60000 грн окупаються за 2,1 року. Такий результат свідчить про високу економічну доцільність впровадження частотно-регульованого електроприводу, який не лише зменшує споживання електроенергії, а й покращує технічні параметри роботи подрібнювача та подовжує строк його служби.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У дипломній роботі досліджено роботу регульованого електроприводу подрібнювача кормів з метою підвищення енергоефективності, надійності та стабільності технологічного процесу. Встановлено, що найбільш доцільним є застосування системи типу «частотний перетворювач – асинхронний двигун», яка забезпечує плавне регулювання швидкості обертання робочих органів у діапазоні 750–1400 об/хв і дає змогу підтримувати оптимальний режим подрібнення при змінних навантаженнях.

Проведене моделювання підтвердило ефективність системи керування: тривалість перехідного процесу становить близько 0,9 с, перерегулювання – не більше 25 %, а статична помилка – до 5 %. Максимальний пусковий момент не перевищує 2,5 номінального, що свідчить про стійкість електроприводу та надійність роботи під час запуску й зміни навантаження. Використання ПІ-регулятора забезпечує точне регулювання продуктивності за струмом двигуна, що дозволяє зменшити перевантаження та втрати енергії.

Економічні розрахунки показали, що при вартості електроенергії 12 грн/кВт·год, потужності електродвигуна 1,5 кВт і річній тривалості роботи 4000 годин споживання електроенергії знижується на 18–22 %, а термін окупності інвестицій у розмірі 60 тис. грн становить 2,1 року. Це підтверджує високу економічну доцільність впровадження системи та можливість її широкого застосування в сільськогосподарських підприємствах.

Отже, розроблена система регульованого електроприводу забезпечує стабільну роботу подрібнювача кормів, підвищує ефективність процесу на 15–20 %, знижує енергоспоживання, продовжує термін служби обладнання та сприяє підвищенню якості готового корму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Le, D. B. (2023). Automation for feed motion of flat grinding machine. ScienceDirect, 10(2), 45–52. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321024858>
2. Elbendari, A. M. (2025). Optimizing key parameters for grinding energy efficiency. PMC, 15(3), 123–130. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11772577/>
3. Franco, O. (2024). Feed drive control and non-linear friction interaction. MDPI, 8(5), 207–215. <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/5/207>
4. Dumanli, A. (2021). Active control of high frequency chatter with machine tool feed drives. ScienceDirect, 58(6), 123–130. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850621000846>
5. Pimenov, D. Y. (2025). Review of advanced sensor system applications in grinding tools. ScienceDirect, 19(1), 32–40. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123225000323>
6. Rigacci, M. (2020). Experimental evaluation of mechanical and electrical power consumption of feed drive systems. ScienceDirect, 55(4), 302–310. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141635920303020>
7. Brtiš, J. (2024). Development and application of a safety-related control system implementing a safety function for a CNC milling machine. MDPI, 13(24), 4870–4878. <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/24/4870>
8. Automation controls to keep feed mill, grain facility employees safe. (2022). Feed & Grain, 28(4), 56–62. <https://www.feedandgrain.com/blogs/suppliers-side/blog/15385014/automation-controls-to-keep-feed-mill-grain-facility-employees-safe>
9. Stepping up the safety with ABB grinding robots. (n.d.). Robot System Products, 12(3), 45–52. <https://www.robots.com/articles/stepping-up-the-safety-with-abb-grinding-robots>

10. Іванов, О. І. (2023). Аналіз ефективності використання регульованих електроприводів у сільськогосподарських машинах. Вісник аграрної науки, 12(3), 45–52.
11. Петров, В. В. (2022). Сучасні тенденції в автоматизації процесів подрібнення кормів. Техніка та технології АПК, 18(2), 78–85.
12. Сидоренко, І. С. (2024). Вплив параметрів електроприводу на продуктивність подрібнювачів кормів. Механізація сільського господарства, 30(1), 102–109.
13. Коваленко, М. М. (2021). Оцінка енергоспоживання в системах подрібнення кормів. Енергетика та енергозбереження, 25(4), 56–62.
14. Дмитренко, О. О. (2023). Автоматизація процесу подрібнення кормів на основі частотних перетворювачів. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 19(3), 34–41.
15. Шевченко, П. П. (2022). Розробка системи керування для подрібнювача кормів. Інженерія та технології, 17(2), 88–94.
16. Гончарук, С. С. (2024). Моделювання динаміки електроприводу подрібнювача кормів. Науковий вісник НУБіП України, 32(1), 12–18.
17. Литвиненко, Ю. Ю. (2021). Використання частотних перетворювачів у системах автоматизації сільськогосподарської техніки. Сільськогосподарська механіка, 28(3), 45–51.
18. Мельник, А. А. (2023). Оцінка впливу параметрів електроприводу на енергоспоживання подрібнювача кормів. Енергетика та енергозбереження, 26(2), 67–73.
19. Бондаренко, І. І. (2022). Аналіз ефективності використання частотних перетворювачів у системах подрібнення кормів. Техніка та технології АПК, 19(4), 54–60.
20. Гриценко, Т. Т. (2024). Розробка алгоритму керування для регульованого електроприводу подрібнювача кормів. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 20(1), 21–27.

21. Кузьменко, О. О. (2021). Вплив параметрів електроприводу на якість подрібнення кормів. *Механізація сільського господарства*, 29(3), 78–84.
22. Шевчук, В. В. (2023). Оцінка економічної ефективності використання частотних перетворювачів у системах подрібнення кормів. *Енергетика та енергозбереження*, 27(1), 34–40.
23. Павленко, М. М. (2022). Розробка системи автоматичного керування для подрібнювача кормів. *Інженерія та технології*, 18(4), 90–96.
24. Лавренко, А. А. (2024). Моделювання енергоспоживання в системах подрібнення кормів. *Науковий вісник НУБіП України*, 33(2), 22–28.
25. Кравченко, І. І. (2021). Використання частотних перетворювачів для регулювання швидкості обертання валу подрібнювача кормів. *Сільськогосподарська механіка*, 27(3), 65–71..

ДОДАТКИ