

Заклад вищої освіти „Подільський державний університет”
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Навчально-науковий інститут заочної і дистанційної освіти
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ»

Виконав:

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

ГОРОБЕЦЬ Олександр Володимирович

Керівник канд. техн. наук, доцент

ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« ___ » _____ 2025 р.

Допускається до захисту:

« ___ » _____ 2025 р.

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

Павло ПОТАПСЬКИЙ

м. Кам'янець-Подільський, 2025

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| ВСТУП | 7 |
| 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ | 9 |
| 1.1. Аналіз технічних засобів виробництва твердопаливних пелет | 9 |
| 1.2. Технологічні вимоги до систем керування потоковими лініями пресування твердопаливних пелет | 16 |
| 1.3. Електрообладнання поточкових ліній приготування сумішей | 20 |
| 1.4. Способи та технічні засоби для забезпечення регульованих характеристик дозаторів безперервної дії | 24 |
| Висновки до розділу 1 | 29 |
| 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ | 30 |
| 2.1. Вихідні положення | 30 |
| 2.2. Енергоефективність виробництва твердопаливних пелет | 31 |
| 2.3. Статистичний аналіз процесу дозування сировини | 35 |
| 2.4. Дослідження процесу утворення твердопаливних пелет | 45 |
| Висновки до розділу 2 | 50 |
| 3. СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УЗГОДЖЕНОГО ДОЗУВАННЯ | 51 |
| 3.1. Аналізу робочих режимів регульованого електроприводу потокової лінії | 51 |
| 3.2. Налагодження динамічних та енергетичних параметрів | 61 |
| 3.3. Моделювання інтелектуальної системи управління потоковою лінією | 72 |
| Висновки до розділу 3 | 80 |
| 4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА | 81 |
| 4.1. Розробка способу та пристрою контролю продуктивності дозаторів | 81 |
| 4.2. Розробка нового операційного методу виробництва твердопаливних пелет | 86 |
| 4.3. Розробка інтелектуальної системи для управління виробничим потоком | 89 |
| Висновки до розділу 4 | 95 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 96 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 98 |
| ДОДАТКИ | 100 |

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри,

Ігор ГАРАСИМЧУК

« ____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**
здобувачу вищої освіти

ГОРОБЦЮ Олександр Володимировичу

1. Тема роботи: «РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ»

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

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

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

Строк подання закінченої роботи 25 листопада 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Правила влаштування електроустановок.
2. Аналіз іноземних та вітчизняних публікацій.
3. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів

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

ВСТУП

1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ
3. СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УЗГОДЖЕНОГО ДОЗУВАННЯ
4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Презентаційні матеріали по розділах роботи

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 2 | Доцент КОЗАК О.В. | | |

7. Дата видачі завдання 01 липня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Етапи кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів | Підпис керівника |
|-------|---|------------------------|------------------|
| 1 | ВСТУП | 07.07.2025 | |
| 2 | СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ | 15.07.2025 | |
| 3 | ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ | 25.08.2025 | |
| 4 | СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УЗГОДЖЕНОГО ДОЗУВАННЯ | 10.09.2025 | |
| 5 | СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА | 20.10.2025 | |
| 6 | ВИСНОВКИ | 10.11.2025 | |
| 7 | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 25.11.2025 | |

Здобувач вищої освіти

Олександр ГОРОБЕЦЬ

Керівник, к.т.н., доцент

Олександр ДУМАНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

ГОРОБЕЦЬ Олександр Володимирович. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Факультет енергетики та інформаційних технологій. Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025.

У роботі обґрунтовано методи та технічні засоби підвищення енергетичної ефективності лінії виробництва паливних пелет шляхом оптимізації швидкісних режимів електроприводів і узгодженого регулювання продуктивності дозаторів. Визначено раціональні діапазони швидкостей робочих механізмів і частот обертання електродвигунів, що забезпечують зниження енерговитрат і покращення якості пелет.

Запропоновано метод регулювання подачі сировини за струмом статора асинхронного двигуна, який дозволяє зменшити енергоспоживання до 20 %. Розроблено спосіб приготування двоскладових пелет із соломи та кукурудзяних качанів, що розширює допустимий діапазон вологості сировини та покращує фізико-хімічні характеристики продукції. Показано ефективність застосування нечіткого контролера інтелектуальної системи керування, який забезпечує високу точність дозування та швидкодію.

Ключові слова: паливні пелети, біомаса, електропривод, енергоефективність, дозатор, асинхронний двигун, узгоджене регулювання, нечіткий контролер, інтелектуальна система керування, вологість сировини.

АНОТАЦІЯ

Роботу присвячено комплексному дослідженню та підвищенню енергетичної ефективності сучасної лінії виробництва паливних пелет шляхом оптимізації швидкісних режимів електроприводів електротехнологічного обладнання. Основну увагу приділено розробленню методів і технічних засобів узгодженого регулювання продуктивності дозаторів, що забезпечує зменшення питомих енерговитрат.

На основі статистичного аналізу процесу безперервного введення сировини та математичного моделювання визначено раціональні параметри роботи робочих механізмів, знижено потужність приводів і оптимізовано конструктивні параметри бункера-змішувача. Запропоновано енергоефективний метод керування подачею сировини за електричними параметрами асинхронних двигунів, а також інноваційний спосіб приготування двоскладових пелет із рослинної біомаси. Розроблено інтелектуальну систему керування на основі нечіткого контролера, яка забезпечує високу точність дозування та швидкодію.

ABSTRACT

The work is devoted to a comprehensive study and improvement of the energy efficiency of a modern fuel pellet production line by optimizing the speed modes of electric drives of electrotechnological equipment. The main attention is paid to the development of methods and technical means of coordinated regulation of the productivity of batchers, which ensures a reduction in specific energy consumption.

Based on the statistical analysis of the process of continuous raw material input and mathematical modeling, rational parameters of the working mechanisms were determined, the power of the drives was reduced and the design parameters of the mixer hopper were optimized. An energy-efficient method of controlling the feed of raw materials using the electrical parameters of asynchronous motors was proposed, as well as an innovative method of preparing two-component pellets from plant biomass. An intelligent control system based on a fuzzy controller was developed, which provides high dosing accuracy and speed.

ВСТУП

Актуальність теми. Енергетична безпека України критично залежить від нарощування власних потужностей, зважаючи на значне річне споживання енергоресурсів (210–230 млн т умовного палива). Вирішення цієї проблеми можливе через масштабне використання біомаси, теоретичний надлишок якої в країні оцінюється у 27 млн тонн на рік. Це підтверджує стратегічну перспективність біопалива, що також відображено в останнім часом прийнятих урядових нормативних актах.

Постановка проблеми. Попри високу ефективність ударних пресів (порівняно з гідравлічними та екструдерними) для брикетування соломи, виробництво твердого біопалива залишається високоенергоємним, а якість кінцевого продукту є посередньою. Головні причини цих недоліків — значна нерівномірність дозування сировини та суттєві коливання її вологості.

В аграрному секторі України, де понад 4 мільйони асинхронних електродвигунів є основними споживачами електроенергії, існує значний потенціал для енергозбереження за рахунок впровадження регульованих електроприводів. Світовий досвід показує скорочення енергоспоживання на 20–30% при регулюванні понад 50% електроприводів. В Україні ж цей процес перебуває лише на початковій стадії.

Це створює необхідність у наукових дослідженнях, сфокусованих на підвищенні енергетичної ефективності виробництва твердого біопалива через застосування частотно-регульованих електроприводів (ЧРЕП) для контролю швидкості технологічних процесів.

Мета роботи: Зменшення споживання енергії та підвищення якості твердопаливних пелет шляхом цілеспрямованого керування швидкостями електропривода конвеєрної лінії.

Завдання дослідження:

1. Аналіз технології виробництва біопалива та визначення критеріїв якості пелет.

2. Встановлення закономірностей формування параметрів пелет для забезпечення стабільного дозування сировини.

3. Розробка математичних моделей ЧРЕП та синтез структурної схеми системи управління конвеєрною лінією.

4. Визначення ключових вимог до збору даних про продуктивність дозаторів безперервної дії на основі методів математичної статистики.

5. Оцінка методів корекції жорсткості механічних характеристик зчеплених електродвигунів дозаторів з критерієм максимізації енергетичних показників.

6. Проєктування алгоритму функціонування та структурної схеми інтелектуальної системи управління швидкісними режимами конвеєрної лінії.

7. Проведення експериментальної апробації та аналіз техніко-економічної ефективності розробленого рішення.

Об'єкт дослідження: Процес перетворення енергії в електроприводі обладнання, що використовується у конвеєрній лінії для виготовлення твердопаливних пелет.

Предмет дослідження: Закономірності впливу оптимізованого керування швидкісними режимами електропривода конвеєрної лінії на обсяг споживаної енергії, втрати та якісні метрики виробленої продукції.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз технічних засобів виробництва твердопаливних пелет

Оцінка потенціалу України для використання біомаси як джерела енергії включає дослідження обсягів цих ресурсів, а також визначення найбільш підходящих територій для організації виробництва енергетичних ресурсів із різних видів біомаси. Біомасу розуміють як побічні продукти та відходи органічного походження, які можуть бути використані як паливо для виробництва енергії. Це можуть бути такі матеріали, як стебла сільськогосподарських культур, скошена трава, солома, деревні відходи, а також тверді побутові відходи.

Твердопаливні пелети, на відміну від традиційного палива, є майже вуглецево-нейтральними з точки зору парникових газів, оскільки рослинна маса, що використовується для їхнього виробництва, поглинає CO₂ з атмосфери і випускає кисень. Таким чином, споживання пелет може сприяти уповільненню глобальних кліматичних змін. З енергетичної, економічної та екологічної точок зору виробництво енергії на основі біомаси є надзвичайно важливим напрямом розвитку.

Біомаса займає четверте місце серед глобальних паливних ресурсів, щорічно забезпечуючи близько 2 мільярдів тонн умовного палива, що становить близько 15% світового споживання первинних енергоносіїв. При цьому понад 70% усієї відновлювальної енергії припадає саме на біомасу. Спостерігається швидке впровадження більш ефективних технологій для використання твердопаливних пелет. Наразі до 30% твердих біоматеріалів можна залучати для енергетичних потреб без значного впливу на родючість ґрунтів.

Серед країн ЄС лідерами у використанні твердих біоматеріалів для енергетичних цілей є Данія та Швеція. Більшість країн Центральної Європи та Північної Америки також активно розвивають цей сектор. Біомаса є важливим джерелом енергії для наших сусідів — Польщі, Угорщини, Словаччини, Чехії та

держав Балтії. У цих країнах щорічно переробляється до 25% твердих біоматеріалів на енергетичні потреби. Такий потенціал використання пелет може значно покращити енергетичну ситуацію в Україні. Наприклад, з кожного гектара енергетичних посівів можна отримати 2–3 тонни соломи, що дорівнює одній тонні кам'яного вугілля. Якщо використовувати лише 10% посівних площ для вирощування сировини, це дозволить щорічно отримувати 6–9 мільйонів тонн соломи для місцевих енергетичних потреб.

Твердопаливні пелети вже відіграють важливу роль у енергозабезпеченні розвинутих індустріальних країн: якщо у США їхня частка становить близько 5% від загального обсягу енергоресурсів, то в Австрії та Швеції цей показник сягає 20%, що у чотири рази більше (Рисунок 1.1) [2].

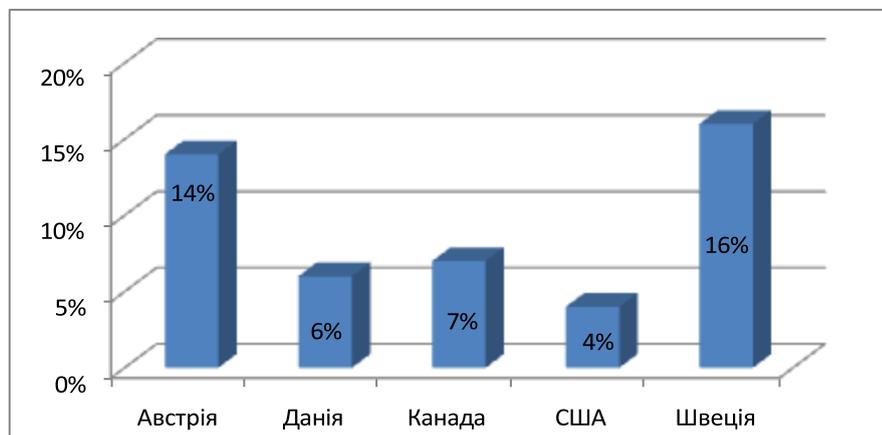


Рисунок 1.1. Частка використання твердопаливних пелет у промислово розвинених країнах

Згідно з прогнозами Програми ООН, до 2050 року частка енергії з відновлювальних джерел у глобальному паливно-енергетичному балансі може досягти 50%, тоді як Світова енергетична Рада очікує, що до кінця століття цей показник збільшиться до 80–90%. Відповідно, деревні пелети займають четверте місце за значенням серед усіх видів палива, забезпечуючи близько 15% світового споживання первинної енергії. У країнах, що розвиваються, цей показник може перевищувати 30%, а в деяких випадках навіть сягати 50–80% [3].

Світова тенденція розвитку енергетичного сектора демонструє сталий ріст значення біоресурсних джерел енергії в загальному обсязі виробленої енергії. Європейський Союз активно впроваджує використання біоенергетичних сировин,

які мають річний цикл відновлення, таких як солома та відходи від насінневих і елеваторних комплексів.

В Україні ж, за оцінками, економічно доцільний потенціал виробництва деревних пелет становить близько 27 мільйонів тонн на рік. Основними джерелами цієї сировини є аграрні залишки та енергетичні культури.

Серед основних методів обробки біомаси варто зазначити: пряме спалювання, газифікацію, отримання біогазу через анаеробне бродіння, а також виробництво спиртів та олій, які можуть використовуватися як моторне паливо [4].

Детальний аналіз обсягів рослинних відходів у сільському господарстві України (Таблиця 1.1) підтверджує, що обсяги сировини, доступної для виробництва твердопаливних пелет, стрімко зростають за останні п'ять років. Це безумовно підтверджує актуальність розвитку вітчизняної індустрії виробництва та використання твердих біоматеріалів.

Таблиця 1.1. Кількість основних рослинних відходів за 2019–2024 рр.

| Вид сировини | Роки | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Кількість рослинних відходів, тис. т. | | | | | | |
| Солома зернових і зернобобових (без кукурудзи) | 19435,4 | 17534,6 | 13780,5 | 26361,3 | 22391 | 17210,3 |
| Солома ріпаку | 461,4 | 981,2 | 1696,8 | 4653,9 | 3034,7 | 2380,9 |
| Солома сої | 716,7 | 1040,8 | 845,4 | 951 | 1220,9 | 1965,8 |
| Кукурудза | 6449,9 | 5783 | 6679 | 10302,1 | 9437,7 | 10757,7 |
| Соняшник | 12292,3 | 14306,9 | 10903,6 | 17046,4 | 16622,8 | 17687,2 |
| Всього | 25637,2 | 39355,7 | 33905,3 | 59314,7 | 52707,1 | 50001,9 |

Однією з основних характеристик цієї технології є те, що транспортування біомаси на відстань понад 50 км є непрактичним. Тому переробка таких матеріалів, як солома зернових культур, стебла і качани кукурудзи, соняшнику, гілки фруктових дерев, живці виноградної лози, а також залишки після переробки очерету, повинна здійснюватися безпосередньо на місцях їх збору. Основними компонентами технічної інфраструктури для технологій переробки біомаси є:

Технічне обладнання для спалювання біомаси;
 Спеціалізовані машини для збору біомаси;
 Складські приміщення та обладнання для зберігання сировини;
 Системи управління, що контролюють операційні процеси на всіх етапах виробництва та використання твердопаливних гранул.

Однією з ключових характеристик біомаси для виробництва твердопаливних гранул є її теплотворна здатність, яка залежить від багатьох факторів, таких як генетичні особливості енергетичних культур, умови навколишнього середовища, спосіб зберігання, вміст вологи тощо. У таблиці 1.2 наведено середні показники теплотворної здатності для кількох видів сировини, за умови, що вміст вологи в них становить 20%.

Таблиця 1.2 Середня теплотворна здатність енергетичної сировини

| Назва енергетичної сировини | Теплотворна здатність, МДж/кг |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Солома зернових культур | 10,5 |
| Стебла кукурудзи | 12,5 |
| Гілки плодкових дерев | 10,5 |
| Стебла соняшника | 12,5 |
| Виноградна лоза | 14,2 |

Ключовим параметром при використанні деревної біомаси як енергоносія є зольність (Таблицю 1.3). Цей показник відображає відсоток незгорілого залишку (відносно сухої маси), який утворюється з мінеральних домішок палива після його повного спалювання.

Вміст кисню в біопаливі значно впливає на його енергетичний потенціал. Високий рівень кисню у твердому біопаливі зменшує потребу в повітрі для горіння та знижує обсяг утворених димових газів у порівнянні з процесом спалювання різних видів кам'яного вугілля.

Наявність води в біопаливі має негативний вплив не лише на його теплотворну здатність. Зі збільшенням вологості збільшується обсяг водяної пари, що утворюється під час горіння. Це, в свою чергу, ускладнює видалення диму

через процес конденсації водяної пари.

Таким чином, зольність (Таблиця 1.3) визначає вміст залишку, що утворюється з мінеральних домішок палива під час його повного спалювання, і є важливим фактором, що впливає на ефективність використання біомаси як палива. Водночас, вміст кисню в біопаливі покращує горіння, зменшуючи потребу в повітрі та обсяг димових газів, а підвищений рівень вологості ускладнює процес спалювання і видалення диму.

Таблиця 1.3. Потреба твердих паливних матеріалів у повітрі

| Паливо | Питома потреба в повітрі під час горіння, м ³ /кг | Вміст золи, % |
|-----------------|--|---------------|
| Солома | 5,65 | 4–10 |
| Дерево | 7,63 | 1–2 |
| Деревне вугілля | 10,52 | 0,8 |
| Буре вугілля | 8,33 | 0,8 |
| Кам'яне вугілля | 10,85 | 0,08 |

Серед основних типів біомаси, які використовуються як тверде паливо у вигляді пелет для прямого спалювання, можна виділити деревину, матеріали з енергетичних культур, а також солому та залишки після обрізки з різних територій (наприклад, уздовж доріг або після догляду за плодовими насадженнями). Для того щоб деревину та солому можна було використовувати в топках, необхідно провести їх заготівлю, зневоднення та зберігання.

Однією з важливих характеристик різних видів біомаси є їх насипна густина. Зазвичай сухі біологічні субстрати мають щільність, яка втричі-чотири рази нижча за щільність вугілля, що робить технологію підготовки біомаси перед спалюванням критично важливою для визначення експлуатаційних параметрів твердопаливних пелет. Цей фактор визначає конструктивні та технологічні рішення для теплотехнічного устаткування і значною мірою впливає на економічну ефективність його роботи.

Енергетичні характеристики твердопаливних пелет, залежно від способів їх попередньої обробки (Таблиці 1.4), дозволяють оцінити потенційну енергетичну

насиченість конкретної сировини. Наприклад, питома енергоємність пелет в десять разів вища, ніж у необробленої соломи, а питома об'ємність пелет зменшується в 10–15 разів.

Переробка сільськогосподарських залишків для подальшого виготовлення твердопаливних пелет може здійснюватися шляхом пресування в бали (тюки) або перетворення на пелети чи гранули.

Таблиця 1.4. Характеристика енергоємності твердих біопалив в залежності від технологій їх приготування до спалювання.

| Вид твердопаливних пелет | Об'ємна маса, кг/м ³ | Питомий об'єм, м ³ /т | Питома енергоємність, МВт/м |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Солома | | | |
| Звичайна | 20–50 | 20–50 | 0,07–0,16 |
| подрібнена | 40–60 | 16–25 | 0,13–0,19 |
| блоки | 70–130 | 7,7–14 | 0,23–0,43 |
| рулони | 60–90 | 11–16 | 0,19–0,29 |
| в'язанки | 50–110 | 9–20 | 0,16–0,36 |
| пелети | 300–450 | 2,2–3,3 | 0,99–1,48 |
| Деревина | | | |
| поліна | 200–500 | 2,0–5,0 | 0,86–2,15 |
| тріски | 200–300 | 3,3–5,0 | 0,86–1,29 |
| тирса | 150–200 | 5,0–6,6 | 0,65–0,86 |
| зрубки | 250–400 | 2,0–3,0 | 0,70–0,90 |
| пелети | 600–800 | 1,3–1,6 | 2,58–3,44 |

Залежно від обраної технології ущільнення біомаси, пресовані брикети можуть бути двох типів: гранули і пелети. Гранулювання та пелетування — це процеси, під час яких подрібнені залишки, такі як тирса, піддаються високому тиску та температурі. Зі збільшенням температури матеріал розм'якшується, що сприяє розплавленню лігніну, який склеює окремі частинки. В результаті формуються паливні елементи (гранули чи пелети), де при найменшому обсязі міститься найбільша частка деревини.

Гранула — це циліндричний елемент, виготовлений з подрібненої, спресованої деревини. Її стандартні розміри варіюються від 10 до 30 мм у довжину і від 6 до 10 мм в діаметрі. В залежності від якості, гранули поділяються на два типи: високоякісні гранули першого класу і промислові гранули. Гранули

першого класу є еталоном якості, і для їх виготовлення категорично заборонено використовувати кору, оскільки це підвищує зольність продукту. У складі промислових гранул допускається до 10% кори (таб. 1.5).

Таблиця 1.5. Властивості гранул

| № н/п | Властивості гранул | Гранули I класу | Гранули промислові |
|-------|-------------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | Щільність, кг/м ³ | 1000–1200 | 1000–1200 |
| 2 | Вологість, % | до 10 | 10–12 |
| 3 | Розміри, мм | d = 6; l = 10–30 | d = 10; l = 10–30 |
| 4 | Вміст кори, % | не допускається | до 10 |
| 5 | Вміст попелу, % | менше 0,7 | більше 1,5 |
| 6 | Теплотворна здатність, МДж/кг | 16,9 | 15,1 |



Рисунок 1.2. Гранули

Популярність паливних гранул обумовлена їхніми відмінними властивостями горіння. Під час згоряння ці гранули вивільняють значну кількість теплової енергії, а їхня теплотворна здатність порівнянна з традиційними видами палива. Водночас обсяг виділення шкідливих речовин є мінімальним. Процес виробництва гранул із деревини включає кілька етапів, що залежать від типу вихідного матеріалу: підготовка сировини, сушіння, зменшення розміру частинок, формування гранул, охолодження та пакування.

На першому етапі, підготовка сировини, відходи подрібнюються до технологічної тріски, а потім перетворюються на стружку. Спочатку ця стружка

має вологість 80–90%. Після сушіння оптимальна вологість не повинна перевищувати 12%. У технології виробництва гранул важливу роль відіграє фракційний склад деревинних елементів. Для забезпечення необхідної якості перед пресуванням деревину додатково подрібнюють молотковими подрібнювачами. Чим менший діаметр гранул, тим дрібніше повинна бути вихідна маса.

Ще одним важливим критерієм якості гранул є їхня густина, яка залежить від вологості попередньо обробленої деревини. Найвищу густину можна досягти, коли вологість сировини становить не більше 20%. Для цього перед гранулюванням вологість сировини коригується шляхом додавання води або пари до рівня 2–3%. Ця поверхнева волога сприяє кращому зчепленню частинок та ущільненню деревини. Під впливом високого тиску в пресі частинки деформуються, а поверхнева волога також служить мастилом і елементом охолодження для матриці гранулятора.

Тривалість зволоження не повинна перевищувати 10–15 секунд, щоб волога не проникла всередину клітин, інакше гранули можуть стати занадто пружними.

1.2 Технологічні вимоги до систем керування потоковими лініями пресування твердопаливних пелет

Виготовлення гранул палива здійснюється за допомогою пресів, які поділяються на типи з кільцевою або плоскою матрицею. У пресах кільцевого типу матеріал продавлюється через матрицю обертовими барабанами, після чого гранули обрізається. Енергетичні витрати на процес пресування подібні для обох типів пресів. Після цього гранули піддаються охолодженню та фасуванню.

Для формування пелет використовуються різні типи пресів: гідравлічні (Рисунок 1.3), ударно-механічні (Рисунок 1.4) та шнекові (Рисунок 1.5). Тип пресового апарату безпосередньо впливає на конфігурацію та габарити пелет, що виробляються.

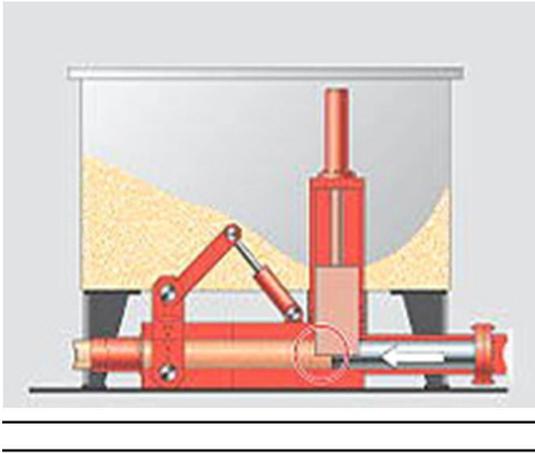


Рисунок 1.3. Гідравлічний прес

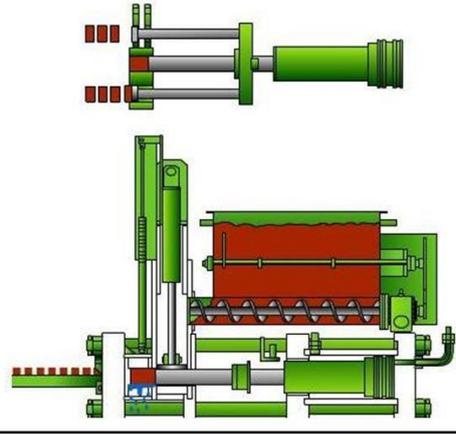


Рисунок 1.4. Ударно-механічний прес

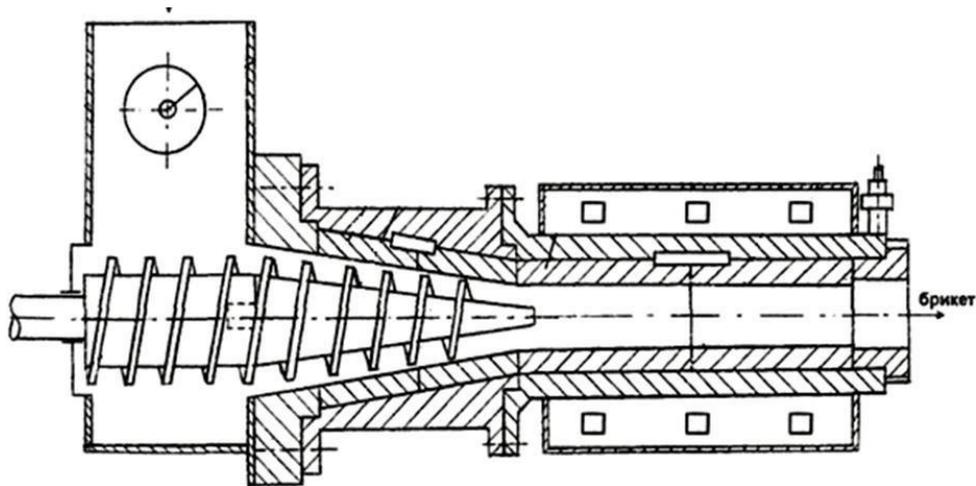


Рисунок 1.5. Шнековий прес

Гранули, виготовлені на гідравлічних пресах, під дією значного тиску, мають форму маленьких цеглинок. Цей тип гранул забезпечує високу щільність та стійкість до механічних пошкоджень.

Гранули, що виробляються на пресах ударно-механічного типу, які працюють за принципом кривошипно-шатунного механізму, мають циліндричну форму. Перевагою цього типу гранул є мінімальні вимоги до підготовки персоналу та організації виробництва, а також невисока вартість кінцевого продукту. Проте, мінусами є схильність цих гранул до зволоження. Такий тип гранул активно використовується на промислових електростанціях, і попит на циліндричні гранули демонструє стабільне зростання.

Шнекові преса використовують комбінацію високого тиску та процесу випалювання для формування гранул у вигляді багатогранників з центральним

отвором. Головними перевагами цього типу гранул є їх висока стійкість до механічних пошкоджень і добра вологостійкість. Однак процес виробництва таких гранул є високозатратним, потребує висококваліфікованих спеціалістів і значної енергетичної витрати.

У світі та Україні існує ряд потокових технологічних ліній для виробництва твердопаливних гранул. Загальним недоліком усіх цих технологій є недостатня якість кінцевого продукту, оскільки неможливо механічно усунути непередбачувані характеристики біосировини. Це підкреслює необхідність розробки системи управління потоковими лініями, здатними виробляти гранули з належними теплотворними та товарними властивостями, що є важливим завданням для енергетики агропромислового сектору.

З економічної точки зору, найбільш ефективним є використання ударно-механічних пресів для виготовлення гранул. Аналіз існуючих грануляційних ліній дозволив визначити перспективність технології, запропонованої компанією Wektor (Рисунок 1.6). Головною перевагою цієї технології є можливість виготовлення двоскладових паливних матеріалів, що значно підвищує ефективність виробництва.

Конструкція преса дозволяє забезпечити безперешкодний доступ до всіх робочих вузлів і агрегатів, що значно спрощує обслуговування та ремонт обладнання. Це дозволяє проводити поточний ремонт за мінімальний час у безпечних умовах. Крім того, скорочено перелік швидкозношуваних елементів і вузлів, а їхня конструкція оптимізована для виготовлення на металообробному обладнанні, що доступне в будь-яких умовах.



Рисунок 1.6. Лінія пелетування VT-60

Електричні механізми преса забезпечують автоматичне керування робочими режимами, що дозволяє м'яко коригувати параметри та гарантує належний захист та індикацію. Після налаштування на робочий режим апаратура функціонує автономно і не потребує постійної уваги персоналу.

Згідно з проведеним аналізом типів паливних брикетів, найкращою сировиною для їх виготовлення є солома. В Україні існує надлишок соломи, що оцінюється в 3–4 мільйони тонн на рік, що надає вагомі підстави для подальшого розвитку виробництва таких брикетів. Однак, одним із недоліків використання соломи є високий вміст золи. Тому пропонується комбінувати солону з кукурудзою для виготовлення двокомпонентних пелет, що дозволить поліпшити їх характеристики. Для цієї мети найбільш підходящими є пресувальні лінії для формування брикетів, зокрема ударно-механічні преси. Вибір технології визначається такими критеріями, як вартість обладнання, обсяг виробництва, надійність, енергетична ефективність і якість кінцевого продукту.

Серед технологічних недоліків, які виникають при використанні таких пресів, слід зазначити нерівномірність подачі матеріалу в прес, що може сягати 25–35 % за коефіцієнтом варіації. Це безпосередньо впливає на якість брикетів — їх густину, зчеплення та теплоту згорання. Крім того, солома в несприятливі погодні умови може мати вологість до 30–35 %, що вимагає додаткового сушіння сировини до рівня 15–16 %, що в свою чергу призводить до значних енергетичних витрат та технологічних складнощів.

Спроби вирішити проблему зволоження соломи за допомогою пресів та додаткового сушіння не дають бажаного ефекту, оскільки це призводить до великих перевитрат електроенергії. Одним із можливих рішень є впровадження системи регульованого дозування вихідних матеріалів для досягнення оптимального рівня вологості. Це можна реалізувати через аналіз і коригування чинників, що викликають коливання в подачі сировини в процесі роботи шнекових подавачів.

В Україні та Європейському Союзі розроблені кілька апаратурних рішень для стабільної та безперервної подачі сировини в різні етапи процесу (сушильні

камери, змішувачі, гранулятори, преси). Найбільше поширення отримали дозувальні пристрої з асинхронними електроприводами, які дозволяють регулювати інтенсивність подачі сировини. Це допомагає автоматизувати процес дозування та підвищити ефективність виробництва.

Процеси подачі сировини, як правило, мають стохастичний характер і високий ступінь невизначеності. Для оптимізації процесу та створення автоматизованої системи керування доцільно використовувати інтелектуальні методи, такі як нейронні мережі або логіку нечітких множин (Fuzzy-логіку). Ці методи дозволяють оптимізувати технологічний процес, зменшити енергетичні витрати та підвищити якість готового продукту.

1.3 Електрообладнання поточкових ліній приготування сумішей

Електрообладнання поточкових ліній приготування сумішей є ключовим елементом у технологічному процесі виробництва пелет та брикетів. Якість кінцевого продукту залежить від точності дозування компонентів суміші. Для досягнення необхідного рецептурного співвідношення застосовуються "зв'язані системи", де пристрої дозування взаємодіють між собою, а один з компонентів виконує роль "провідного" елемента. Це забезпечує стабільну точність дозування і дозволяє досягти оптимальних характеристик готового продукту.

На сьогодні понад п'ятдесят компаній, таких як Siptron (США), Lewa (Німеччина), та Dozapro (Франція), розробляють апаратуру для безперервного дозування, зокрема для формування сумішей. Ці компанії активно працюють над поліпшенням точності та ефективності дозувальних пристроїв, що є важливим етапом для забезпечення високої якості паливних брикетів та пелет.

При готуванні суміші, для досягнення необхідного рецептурного співвідношення між складовими, інтенсивність потоків задається заздалегідь. У таких ситуаціях застосовуються так звані "зв'язані системи", де пристрої керування усіх дозаторів функціонують взаємозалежно, а один із компонентів виконує роль "провідного" елемента, тоді як решта є "ведомими". Цей метод зважування іменується пропорційним і гарантує наступну залежність:

$$Q_i = k_1 Q_1 + k_2 Q_2 + \dots + k_{n-1} Q_{n-1}, \quad (1.1)$$

де Q_1 і Q_n – витрати матеріалу першого і n-того виду;

k – коефіцієнт пропорційності.

При наявності одного «веденого» компонента подібні схеми здатні вирішувати поставлені перед ними задачі [10]. При умові наявності коливань [2]

$$\sum_1^n Q_i(t) \pm 25 \% \quad (1.2)$$

У цьому випадку бажано використовувати багатозв'язну систему керування з нерегульованим дозатором основного компонента. Тоді сигнал, що впливає на інші дозатори буде пропорційним

$$I = k \left[Q_i(t) - Q_{0\text{зад.}} \right] + Q_i(t), \quad (1.3)$$

де $Q_{0\text{зад.}}$ – задане значення продуктивності основного потоку;

k_i – коефіцієнт пропорційності.

У системах автоматичного регулювання поточкових ліній для виготовлення пелет або брикетів з біомаси, важливим аспектом є забезпечення стабільного контролю продуктивності на всіх етапах, зокрема на етапах дозування та зважування. При більш жорстких вимогах до точності та величини вимірюваних потоків необхідно використовувати багатозв'язні системи з автоматичним регулюванням, які можуть коригувати продуктивність на різних етапах обробки. Однак, збільшення кількості компонентів у таких системах неминуче веде до ускладнення їх конструкції, підвищення вартості та зниження надійності обладнання, що є серйозним недоліком.

Відзначено, що наявні системи мають значні недоліки, зокрема через їх заснування на конвеєрних лініях для масового вимірювання. Особливістю таких систем є те, що динаміка процесу зважування створює нелінійність у характеристиках сигналів на виході всіх блоків структурної схеми: від стрічки, що приймає вагу, через первинний перетворювач до підсилювача та інтегратора. Це призводить до труднощів у реалізації первинних перетворювачів без значних похибок, особливо при роботі з легкими компонентами, такими як тирса, солома чи вата, що мають низьку пропускну здатність.

Типи дозаторів можна класифікувати за принципом регулювання: на ті, що контролюють рівень навантаження на конвеєрній стрічці, і на ті, що контролюють швидкість подачі матеріалу. Дозатори, які регулюють навантаження на стрічку, працюють при фіксованій швидкості її руху, змінюючи її лише під час переналаштування на новий рівень продуктивності. Проте регулювання обсягу матеріалу за допомогою затвора, що змінює площу випускного отвору, не забезпечує необхідної точності дозування, особливо для біомаси, яка є матеріалом з низькою сипучістю.

Дозатори зі швидкісним регулюванням, в яких зміна маси на конвеєрі впливає на швидкість руху стрічки, також мають свої недоліки: зміна швидкості руху стрічки може призвести до погіршення точності дозування та коливань продуктивності, оскільки подача матеріалу та його зважування не відбуваються одночасно. Це створює віялові коливання продуктивності, що погіршує контроль над процесом виготовлення пелет або брикетів.

Сучасні технологічні рішення дозволяють усунути ці недоліки. Зокрема, дозатори з розділенням функцій подачі та зважування, наприклад, розроблені компанією Schenk (Німеччина), мають незалежні модулі для подачі та зважування матеріалу. У таких системах конвеєр рухається з фіксованою швидкістю, а вимірювальний конвеєр тільки знімає показники, передаючи дані до контролера. Це дозволяє досягти стабільної подачі матеріалу без затримок між зважуванням і подачею в змішувач, що значно підвищує точність дозування.

Проте навіть такі системи не позбавлені деяких обмежень, зокрема:

Висока затримка в передачі даних від пристроїв масового вимірювання може призводити до затримок в процесі контролю.

Вібрації, які виникають при падінні матеріалу зі шнека на стрічку, можуть погіршити точність вимірювань, особливо при високій чутливості первинного перетворювача.

Електричні коливання в роботі електроприводів можуть також впливати на стабільність роботи системи.

Ці фактори зумовлюють необхідність використання інтелектуальних методів для оптимізації систем управління, зокрема таких, як нейронні мережі або нечітка

логіка, що дозволяє зменшити вплив стохастичних факторів та підвищити ефективність процесу дозування та виготовлення пелет чи брикетів.

Загалом, підвищення точності та стабільності системи дозування є критичним для забезпечення високої якості кінцевого продукту, особливо у виробництві паливних гранул та брикетів з біомаси, що повинні мати оптимальні теплофізичні характеристики для енергетичних цілей.

Такі дозатори забезпечують більш стабільну подачу матеріалу, оскільки час між моментом зважування речовини та її відправкою у змішувач практично відсутній (рис. 1.10).

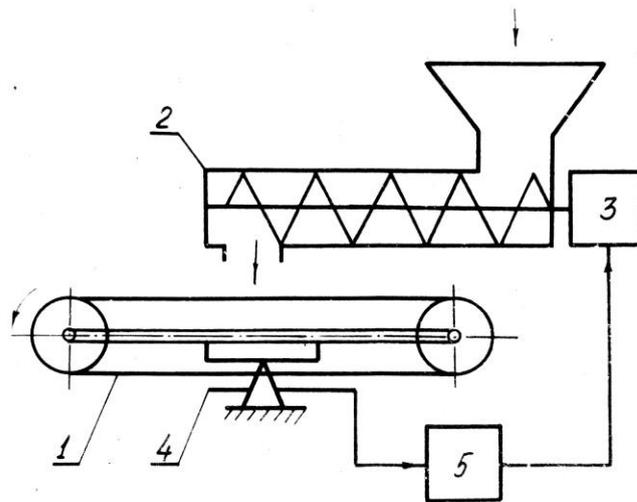


Рисунок 1.10. Дозатор сипучих матеріалів фірми «Schenk» :

1 – масовимірювальний транспортер; 2 – шнековий бункер – живильник; 3 – регульований електропривод; 4 – масовимірювальний пристрій; 5 – блок керування

У багатьох випадках, для забезпечення стабільного та ефективного подавання матеріалу, важливо орієнтуватися на питому вагу матеріального потоку (наприклад, стружки або тирси). Питома вага в даному контексті визначає обсяг сухого компонента, що міститься в потоці матеріалу, і є критично важливим параметром у таких сферах, як лісопереробка та виробництво пресованого твердого палива (пелет).

Для досягнення бажаного результату можна застосовувати властивості ультразвуку, зокрема його здатність знижувати власну потужність під час проходження через різні матеріали [4, 5]. Рівень акустичних коливань, що проходять через масу матеріалу при його вільному скиді з вихідного отвору дозуючого

механізму, зменшується за певною залежністю:

$$I_k = I_0 \exp(-a x),$$

де I_0 – початкова потужність акустичних коливань, Вт·м⁻²;

I_k – кінцева потужність на приймачі витратоміра, Вт·м⁻²;

a – коефіцієнт поглинання хвиль середовищем в технологічному проміжку між випромінювачем і приймачем, м⁻¹;

x – відстань між випромінювачем і приймачем, м.

Зазначена методика дозування має переваги перед іншими, оскільки введення реагенту здійснюється на основі маси сухої речовини в потоці, що є важливим показником для оцінки ефективності дозувальних пристроїв. Крім того, налаштування пропускнуої здатності дозатора шляхом зміни швидкості, завдяки використанню витратоміра без інерційних ефектів, значно покращує експлуатаційні характеристики таких систем [6].

1.4 Способи та технічні засоби для забезпечення регульованих характеристик дозаторів безперервної дії

Конвеєри, дозувальні апарати та змішувальне обладнання, різноманітні за конструкцією, є одними з найпоширеніших видів виробничого механізму, для яких зазвичай застосовується нерегульований асинхронний електричний привід. Такий підхід є доцільним у технологічних процесах, де стабільна продуктивність є основною вимогою.

Однак, у деяких випадках виникає необхідність у зміні швидкості обертання, зокрема, коли потрібно точно налаштувати послідовне дозування складових суміші під час гранулювання паливних пелет.

Використання частотно-регульованих електричних приводів для таких технологій дозволяє не лише значно знизити витрати електроенергії [8], а й покращити якісні характеристики кінцевого продукту. Основні напрямки впровадження енергозберігаючих режимів роботи для регульованих

електроприводів виробничих механізмів (шнекових та секційних дозаторів, конвеєрів, пресів тощо) включають:

Оптимізацію енергетичних умов роботи асинхронного привода, що дозволяє мінімізувати енергетичні втрати під час функціонування;

Регулювання швидкості обертання робочих елементів, що сприяє значному зниженню енергоспоживання (особливо для шнекових екструдерів та пресів);

Налаштування механічних характеристик електродвигуна відповідно до потреб технологічного процесу шляхом зміни швидкості обертання електричного приводу.

Розглянемо доступні методи управління асинхронним електричним приводом робочих механізмів ліній виробництва твердого палива на основі їх вхідних та вихідних параметрів [8,7]. Для асинхронного електродвигуна, що живить робочий механізм, необхідно встановити закономірність зміни його статичного моменту залежно від частоти обертання $M_c = f(\omega)$. Для більшості механізмів зв'язок між сталим навантаженням моменту та кутовою швидкістю в межах регульованої зони може бути описаний як степенева функція.

$$M_c = M_0 + (M_n - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^q, \quad (1.4)$$

або у відносних одиницях:

$$M_{c*} = M_{0*} + (1 - M_{0*}) \omega_*^q, \quad (1.5)$$

де M_0 – момент статичного навантаження, при $\omega = 0$. З урахуванням того, що $\omega \equiv f_1$, а $\omega_* = f_*$ останній вираз можна записати у вигляді:

$$M_{c*} = M_{0*} + (1 - M_{0*}) f_*^q$$

У досліджуваній технології найбільш часто зустрічаються типи статичного навантаження, що підпорядковуються залежності $M_c = f(\omega)$.

Момент статичного навантаження не залежить від швидкості (Рисунок 1.11). Таку характеристику мають конвеєри з постійною масою вантажу, що транспортується, а також змішувачі і дробарки.

З деяким припущенням сюди ж можна віднести всі механізми, в яких основним навантаженням є момент опору тертя, оскільки в діапазоні робочих швидкостей момент тертя майже не змінюється. Для такого типу навантаження, де $q=0$, $M_0 = M_c = const$, статичний момент дорівнюватиме

$$M = \frac{M_c}{M_n^{c^*}} = \frac{M_0}{M_n^{0^*}} = M \quad (1.6)$$

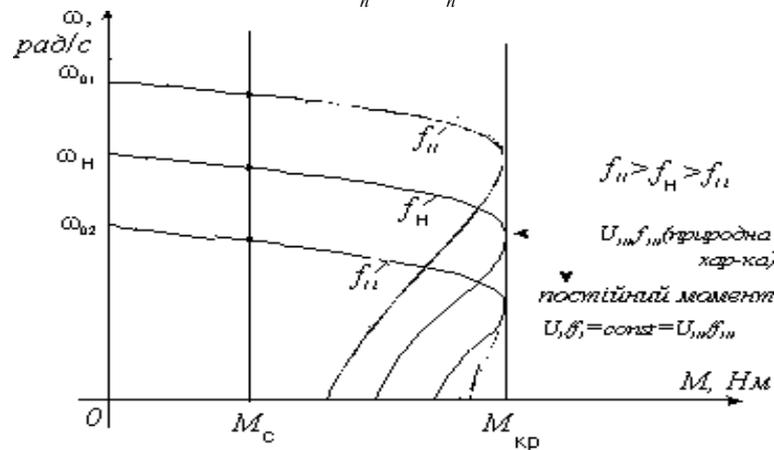


Рисунок 1.11. Сумісні механічні характеристики електродвигуна та робочого механізму при $M_c = const$

Гвинтові преси, екструдери та деякі типи змішувального обладнання (див. рис. 1.12) піддаються підвищеним механічним навантаженням, оскільки крутний момент у цих пристроях безпосередньо залежить від кутової швидкості. Оскільки робочі елементи цих апаратів обертаються на помірних швидкостях, загальний момент інерції всієї системи, приведений до валу електродвигуна, значною мірою визначається моментом інерції ротора електродвигуна.

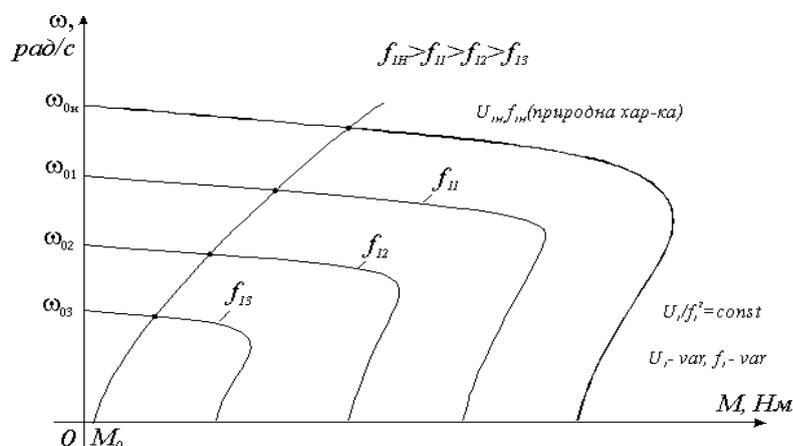


Рисунок 1.12. Сумісні механічні характеристики електродвигуна при зростаючому навантаженні на валу

Таким чином, можна пояснити, чому запуск електродвигуна займає кілька секунд, а нагрівання під час пуску залишається мінімальним. Оскільки електродвигуни, що приводять у дію преси, мають велику потужність, для обмеження пускових струмів їх часто запускають за допомогою зміни конфігурації обмоток з "зірки" на "трикутник".

Експлуатація електродвигунів відбувається в умовах тривалого режиму роботи зі змінним навантаженням. Сили, що діють на пресуючі елементи, залежать від ряду факторів, чий вплив може змінюватися під час роботи обладнання (таких як обсяг і склад сировини, вологість, робоча температура матриці тощо). Це призводить до значних коливань потужності, що подається на вал двигуна, включаючи ситуації перевантаження.

Для вказаних типів робочих машин приймається $M_0 = M_x$, де M_x – момент тертя холостого ходу, q – показник степеня ($q = 1 \dots 3$). Підставляючи значення, одержимо $M_c = f_{1*}^2$ або ж у розгорнутому вигляді: $M_c = M_n \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$.

Аналіз механічних властивостей робочих частин машин технологічного процесу та отримані емпіричні залежності між статичним моментом і швидкістю обертання електродвигуна відкривають можливість впровадження обґрунтованого контролю асинхронного двигуна. Це можна досягти через застосування адаптивних методів для створення вольт-частотних залежностей для кожного конкретного випадку.

Для реалізації таких методів управління доцільно використовувати системи, які дозволяють регулювати електропривод, засновані на частотних перетворювачах (ЧП). Ці пристрої забезпечують підтримку високого коефіцієнта потужності в силовому контурі незалежно від робочого стану електроприводу, автоматизуючи процес, і забезпечують оптимальні параметри як у статичному, так і в динамічному режимах системи корекції. Схема функціонального призначення електроприводу з частотним контролем представлена на рис. 1.13.

Рисунок 1.13. Функціональна схема частотно-регульованого автоматизованого електропривода : М – мережа, ВП – випрямляч, С_f – ємнісний фільтр, АІН – автономний інвертор напруги, АД – асинхронний двигун, РМ – робоча машина.

Отримані результати чітко демонструють значні переваги використання електроприводів з частотним регулюванням (на основі перетворювачів частоти) в процесах виробництва гранул з біомаси, де потрібні значні варіації швидкості. Покращення швидкісних режимів роботи конвеєрів, дозуючих механізмів та їх узгодження з безперервними змішувачами є перспективним підходом для зниження енергоспоживання. Економія електричної потужності (спожитої енергії), позначена як ΔP_e , для конвеєра з постійним навантажувальним моментом, але змінною пропускнуою здатністю, може бути розрахована (у пропорційних одиницях) за такою формулою:

$$\Delta P_e = M^* (1 - Q^*), \quad (1.7)$$

де M^* – відносний момент неробочого ходу транспортера;

Q^* – відносна продуктивність транспортера.

Якщо потужність транспортера знижується на 30–50 %, при цьому робота виконується з мінімальним навантаженням ($M^* = 0,4$), то економія електричної енергії може становити від 12 до 20 %.

В умовах безступеневого регулювання подачі сировини у вигляді твердих гранул (пелет) можна ефективно регулювати щільність їхніх потоків у частотному спектрі, а також використовувати функцію згладжування, що реалізується механізмами дозування. Дослідження роботи дозаторів, наведених у роботах [4, 5], показують, що крім покращення технологічних характеристик, можна досягти значного зниження споживання енергії в динамічному режимі — в 2–2,5 рази. Ці результати підтверджують наявність необхідних умов для ефективного впровадження частотно-регульованих автоматизованих електроприводів у процеси виробництва паливних пелет. Реалізація цього потенціалу стає можливою завдяки

створенню адаптивних алгоритмів та інтелектуальних систем керування. З урахуванням економії енергії в системі приводу, що поєднується з покращенням технологічних параметрів, у певних умовах загальна економія може досягати 50 %.

Висновки до розділу 1

Згідно з наведеними даними, можна зробити висновок, що впровадження раціонального управління швидкостями електроприводів на виробничій лінії для виробництва двокомпонентних твердопаливних пелет дозволяє вирішити низку важливих наукових і практичних завдань:

Дослідити, як пропорції компонентів у двокомпонентних пелетах впливають на ефективність подачі сировини.

Детально розглянути етапи виготовлення твердопаливних пелет та визначити ключові параметри процесу.

Розробити математичні моделі для роботи електроприводу з регульованою швидкістю та створити структурну схему системи управління для виробничої лінії.

Використовуючи методи математичної статистики, визначити основні вимоги до вимірювання пропускної здатності безперервно діючих дозаторів.

Оцінити технічні підходи до коригування механічних характеристик зчеплених електричних моторів на основі критерію максимального енергозбереження.

Розробити логіку функціонування та створити структурну схему інтелектуальної системи контролю швидкості для виробничої лінії твердопаливних пелет.

Провести практичну перевірку розроблених рішень через експериментальні дослідження.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ

2.1. Вихідні положення

Існують різні методи переробки біомаси, зокрема її пресування в тюки, формування в пелети (невеликі циліндри) або гранули, які згодом використовуються як тверде біопаливо. Економічна привабливість таких рішень зростає в умовах зростання вартості традиційних енергоносіїв.

Основною перевагою твердопаливних пелет порівняно з іншими видами палива є їхній нульовий вплив на підвищення парникового ефекту. Це пояснюється тим, що рослинна сировина, з якої виготовляються пелети, поглинає вуглець із атмосфери, вивільняючи при цьому кисень. Таким чином, використання пелет допомагає уповільнити процеси зміни клімату на планеті.

Згідно з останніми даними, теплотворна здатність трьох тонн соломи еквівалентна тисячі кубометрів природного газу. Пелети, виготовлені із соломи і маючи насипну густину $400\text{--}500\text{ кг/м}^3$, демонструють питому теплоту згоряння в межах $16,5\text{--}17,5\text{ МДж/кг}$.

На сьогоднішній день існуючі виробничі лінії для виготовлення твердопаливних пелет в Україні та Польщі мають низьку ефективність через непередбачувану продуктивність обладнання та відсутність злагодженої системи управління. Це призводить до високого рівня енергоспоживання та нестабільної якості кінцевого продукту. Виявлені проблеми вимагають створення енергоефективної інтелектуальної системи для контролю роботи потокової лінії виробництва пелет. Для цього необхідно дослідити робочі цикли ліній, розробити математичні моделі технологічних етапів, визначити оптимальні енергозберігаючі швидкості роботи машин і впровадити систему регульованого електроприводу для точного дозування компонентів пелет, застосовуючи нейронний контролер на основі нечіткої логіки (fuzzy-технологій).

2.2. Енергоефективність виробництва твердопаливних пелет

З точки зору ефективності використання енергії, результативність виробництва багатоконпонентних пелет з твердого палива оцінюється як за кінцевими характеристиками продукції, так і з урахуванням витрат електроенергії на одиницю виготовленої продукції. Теплові властивості та комерційна привабливість готових пелет безпосередньо залежать від точності складу початкової суміші [2].

Одним із ключових чинників, що визначає питому енергомiсткiсть процесу виготовлення пелет iз бiомаси, є рiвень залученостi електричних двигунiв, що живлять змiшувачi, дозуючi механiзми та безперервнi преси. Згiдно з джерелом [8], енергоємнiсть цього процесу можна розрахувати за допомогою наступної формули:

$$E = \sum_i^n E_i + E_{зм}, \quad (2.1)$$

$$E = \sum_i^n \frac{W_i}{Q_i} + \frac{W_{зм}}{\sum_i^n Q_{зм}} + \frac{W_{пр}}{\sum_i^n Q_{пр}} \quad (2.2)$$

де i – номер компонента; n – кiлькiсть компонентiв;

E_i – питома енергоємнiсть дозування i -го компонента, кВт·год·т⁻¹;

Q_i – продуктивнiсть i -го компонента, т·год⁻¹;

$E_{зм}$ – енергоємнiсть процесу змiшування, кВт·год·т⁻¹;

W_i , $W_{зм}$ i $W_{пр}$ – витрати електроенергiї пiд час дозування i -го компонента, змiшування i пресування сумiшi вiдповiдно, кВт·год.

Електроспоживання є безпосередньо залежним вiд потужностi, яку електроприводи отримують з мережi, i визначається продуктивнiстю обладнання або режимами роботи електродвигунiв, якi, як правило, мають варiативний характер. Враховуючи стохастичний характер навантаження на асинхронний двигун (АД), кiлькiсть спожитої електроенергiї можна розрахувати за наступною формулою:

$$W = W_{xx} + k(Q + \Delta Q) \quad (2.3)$$

де W_{xx} – витрати електроенергії у режимі холостого ходу електродвигуна, кВт·год;

k – коефіцієнт пропорційності споживаної потужності від продуктивності, кВт·год. т⁻¹;

\bar{Q} – середня продуктивність, т·год⁻¹;

ΔQ – випадкові відхилення продуктивності, т·год⁻¹.

Для підвищення ефективності системи W_{xx} вкрай важливо правильно обрати потужність електричних двигунів, які приводять у рух робочі механізми, що функціонують в умовах змінного навантаження. Для цього необхідно проводити вимірювання часових залежностей струму, після чого обчислюються спектральні густини випадкових навантажувальних процесів. На основі цього, згідно з методикою, наведеній у [8], визначаються еквівалентний струм і необхідна потужність.

Зменшення другої частини формули (2.3) досягається завдяки вдосконаленню точності і стабільності дозування компонентів у потоці. Це завдання може бути успішно вирішене через впровадження систем узгодженого керування продуктивністю дозаторів для виробництва твердопаливних пелет [5].

Енергоспоживання безпосередньо залежить від потужності, яку електроприводи отримують від мережі, і має тісний зв'язок з пропускнуою здатністю робочих машин. Режими навантаження на електричні двигуни в існуючих виробничих лініях часто відзначаються значною нерівномірністю.

Аналіз графіків навантаження електроприводів дозаторів показав, що момент навантаження $M_c = \text{const}$ залишається сталим для всіх механізмів. Це означає, що їх робота значною мірою визначається процесами переходу під час порційного подавання компонентів. З урахуванням сталісності моменту навантаження $M_c = \text{const}$, можна сформулювати рівняння для сумарних втрат приводного двигуна дозатора: $P_{\text{втрати}} = f(M_c, \eta, n)$ де M_c — момент навантаження, η — коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна, а n — швидкість обертання приводу.

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{ct} + \Delta P_{mex} + I^2 R ,$$

де ΔP_{ct} – втрати у сталі;

ΔP_{mex} – механічні втрати;

$I^2 R$ – втрати в міді електродвигуна.

Так як в перехідному режимі постійні втрати значно менші за змінні, в подальшому аналіз їх можна не враховувати.

Оскільки змінні втрати при регулюванні швидкості обертання АКД складаються із затрат енергії на розгін і гальмування шнека, складемо рівняння, які характеризують вказаний процес

$$\Delta A_p = \int_{m_{\omega} - \sigma_{\omega}}^{m_{\omega} + \sigma_{\omega}} J_{\Sigma} (m_{\omega} + \sigma_{\omega} + \omega) d\omega + M_c \int_0^{t_p} \omega dt \quad (2.5)$$

$$\Delta A_T = \int_{m_{\omega} + \sigma_{\omega}}^{m_{\omega} - \sigma_{\omega}} J_{\Sigma} (m_{\omega} - \sigma_{\omega} - \omega) d\omega + M_c \int_0^{t_T} \omega dt , \quad (2.6)$$

де ΔA_p – втрати енергії при розгоні привода;

ΔA_T – втрати енергії при гальмуванні привода;

m_{ω} – математичне сподівання швидкості привода;

J_{Σ} – сумарний приведений момент інерції привода;

σ_{ω} – середньоквадратичне відхилення швидкості привода;

ω – швидкість привода;

M_c – статичний момент навантаження;

t_p – час розгону;

t_T – час гальмування.

Враховуючи те, що при роботі системи в режимі управління буде виконуватись рівність $\omega_3 \approx m_{\omega}$, а $t_p \approx t_T$, визначимо сумарні змінні втрати електроенергії замінивши межі інтегрування: $\omega_3 + \sigma_{\omega}$.

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_p + \Delta A_T = \int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} J_{\Sigma} (\omega_3 + \sigma_{\omega} + \omega) d\omega - \int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} J_{\Sigma} (\omega_3 - \sigma_{\omega} - \omega) d\omega \quad (2.7)$$

Виконавши дію сумування, отримаємо:

$$\Delta A_{\Sigma} = 2J_{\Sigma} \left(\int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} \sigma_{\omega} d\omega + \int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} \omega d\omega \right), \quad (2.8)$$

Визначивши суму інтегралів рівняння (5), отримаємо

$$\Delta A_{\Sigma} = 4J_{\Sigma} (\omega_3 \sigma_{\omega} + \sigma_{\omega}^2), \quad (2.9)$$

де σ_{ω}^2 – дисперсія швидкості електропривода.

Отже, аналіз (6) показує, що потужності, які втрачаються в електродвигунах шнекових живильників для порційного подавання компонентів пелет з твердого палива, залежать як від інертності механізму шнека, так і від обраної швидкості його обертання. Крім того, на ці втрати впливає дисперсія швидкості, зростання якої веде до збільшення споживання електроенергії електроприводом.

У ході дослідження операції дозування складових пелет було встановлено, що з підвищенням швидкості дозування збільшується енергоспоживання, але зниження цієї швидкості дозволяє досягти економії енергоресурсів та покращення рівномірності суміші пелет. Тому система управління повинна включати первинні датчики пропускної здатності дозаторів, регульований електропривід для безперервно працюючих дозаторів, а також нейроконтролер, що базується на мікропроцесорній техніці і може бути налаштований відповідно до характеристик технологічного обладнання та рецептури пелет. Аналіз показав, що впровадження такої системи дозволяє знизити енергозатратність процесу виготовлення твердопаливних пелет на 15–20 %.

Ключовим фактором, що впливає на енергоємність процесу пелетизації, є вологість основного компонента. У більшості випадків вологість перевищує 20–30 %, що ускладнює обробку подрібненої пшеничної соломи. У таких випадках виробники змушені порушувати технологічний процес, пропускаючи біомасу через дозатор, екструдер та прес для зниження вологості лише на 3–4 %. Повторне пропускання (2–3 цикли) дозволяє знизити вологість на 7–9 %, але це вимагає витрат електроенергії в 1,5–2 рази більше, ніж при нормальній вхідній вологості, яка не перевищує 15–16 %.

Якщо ж вологість сировини перевищує 25 %, для її обробки застосовують попереднє висушування в циклонних сушарках, що призводить до значного

перевитрачання теплової та електричної енергії.

Наші дослідження підтвердили, що при вологості понад 25% та максимальній продуктивності дозатора для виготовлення однієї тонни пелет енергоспоживання зростає в 2–3 рази, що робить експлуатацію конвеєрної лінії нерентабельною (Рис. 2.1).

Таким чином, розширити допустимий діапазон вологості сировини можна лише за умови додавання другого компонента з низьким початковим рівнем вологості, наприклад, подрібнених кукурудзяних качанів після насіннезаводів або відходів елеваторного господарства, вологість яких не перевищує 15%.

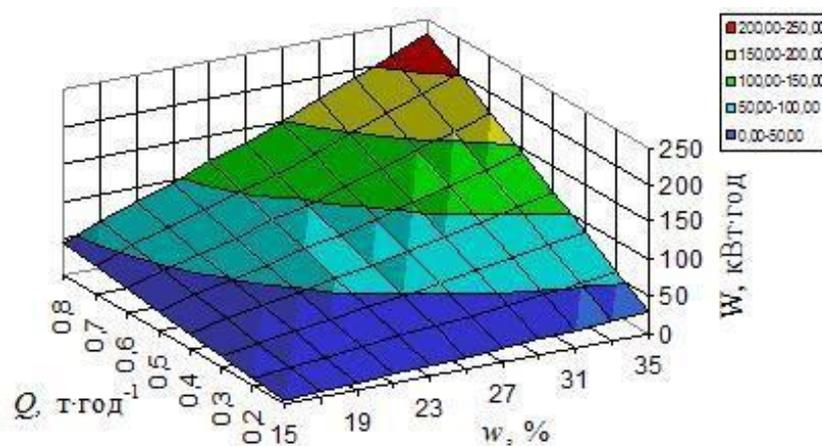


Рисунок 2.1. Залежність енерговитрат на виробництво пелетів від вологості базової біосировини і продуктивності потокової лінії

2.3. Статистичний аналіз процесу дозування сировини

На даний момент розроблено низку машин та обладнання для рівномірної безперервної подачі сировини до змішувачів, сушильних камер, грануляторів, пресів тощо. У більшості дозаторів основним елементом є регульований асинхронний електропривод, що створює умови для автоматизації процесу дозування.

Однак загальним недоліком цього обладнання є суттєва нерівномірність об'ємного дозування подрібненої сировини, зокрема стебельної (коефіцієнт варіації може досягати 35%), що негативно впливає на якість кінцевого продукту та збільшує енерговитрати на технологічний процес [3]. Така нерівномірність

пов'язана з випадковим характером потокового процесу дозування сировини та відсутністю чітко розроблених методик для математичного аналізу флуктуацій, властивих цим технологіям [7].

Отже, необхідно розробити раціональні математичні інструменти, які б точно описували процеси безперервного дозування матеріалів з випадковими функціональними властивостями. Це дозволить створити міцну основу для розробки систем управління технологічними процесами виробництва твердопаливних пелет.

Основною характеристикою дозатора безперервної дії є його продуктивність, що визначається як інтеграл від поточних витрат матеріалу за одиницю часу. Тому аналіз і визначення критеріїв оцінки ефективності дозуючих пристроїв безперервної дії доцільно проводити за допомогою аналітичного виразу (2.3).

$$P = \chi \int_t^{t+t_1} Q(t) dt = \chi \int_t^{t+t_1} S_0(t) V_0(t) \cdot \rho(t) dt \quad (2.10)$$

де χ – коефіцієнт часового інтервалу інтегрування;

S_0 – площа визначального перерізу, m^2 ;

V_0 – швидкість матеріалу, що дозується, $m \cdot c^{-1}$;

ρ – щільність потоку матеріалу, $kg \cdot m^{-3}$.

Згідно з рівнянням (2.10) складові $S_0(t)$ та $V_0(t)$ є технічними параметрами дозатора і в першому наближенні залежать виключно від його конструкції. Якщо прийняти параметри об'ємного дозування $S_0(t)$ і $V_0(t)$ постійними, то продуктивність дозатора залежатиме, в основному, від характеристики матеріалу. Цією характеристикою є щільність матеріалу. Помноживши об'ємну продуктивність дозатора на середню щільність потоку матеріалу ρ , отримаємо значення масової продуктивності, яка найбільше застосовується на практиці:

$$P_M = P_V \cdot \bar{\rho}, \quad (2.11)$$

де $P_V = \chi S_0 \cdot V_0$ – об'ємна продуктивність;

$\bar{\rho}$ – середнє значення щільності потоку матеріалу, $kg \cdot m^{-3}$.

Виходячи з наведеного вище і враховуючи те, що щільність безперервно коливається навколо свого середнього значення $\bar{\rho}$, вираз (2.11) набуває виду

$$\bar{P}_1 = \chi \int_t^{t+t_1} Q(t) dt = \int_t^{t+t_1} P_V(t) \bar{\rho}(t) dt \quad (2.12)$$

де P – середнє значення продуктивності.

Якщо вважати \bar{P} випадковою величиною і обчислити його середнє значення, отримаємо

$$\bar{P}_2 = \int_0^{t+t_1} P_V(t) \bar{\rho}(t) + P_V \sigma_\rho, \quad (2.13)$$

де σ_ρ – середньоквадратичне відхилення щільності від середнього значення.

Порівнюючи (2.12) і (2.13) можна побачити, що ми помилились на величину $P_V \sigma_\rho$ і таким чином занизили продуктивність дозатора. У цьому випадку похибка збільшується при збільшенні відхилення від продуктивності P_M , а значить і витрат $Q(t)$ від свого середнього значення. Таким чином, зміни P_M і $Q(t)$ носять у функції часу випадковий характер. Тому випадкову функцію витрат $Q(t)$, визначену в інтервалі T з великим ступенем тотожності можна розкласти в ряд Фур'є:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^k (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (2.14)$$

де t – час; ω_k – частота;

a_0, a_k, b_k – коефіцієнти Фур'є.

У нашому випадку коефіцієнти визначимо із залежності:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt; \quad a_k = \frac{2}{T} \int_0^T Q(t) \cos \omega_k t dt; \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T Q(t) \sin \omega_k t dt \quad (2.15)$$

Чим більше складових в залежності (2.15), тим точніше характеризує спектральний аналіз $x(t)$ початкову функцію $Q(t)$.

Оскільки при $n \rightarrow \infty$ коефіцієнти a_k і b_k наближаються до нуля, то в залежності (2.14) можна брати обмежену кількість складових. Виходячи з вказаної

умови робимо висновок, що

$$Q(t) \approx x(t) \quad (2.16)$$

Під час досліджень дозаторів безперервної дії значення функції $Q(t)$ фіксують через рівні проміжки часу Δt .

Для визначення коефіцієнтів a_k і b_k використано коефіцієнти Беселя

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N x_l; \quad a_k = \frac{2}{N-1} \sum_{l=1}^{N-1} x_l \cos \frac{2\pi}{N-1} kl \\ b_k &= \frac{2}{N-1} \sum_{l=1}^{N-1} x_l \sin \frac{2\pi}{N-1} kl \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

де N – кількість зафіксованих точок;

$$k=1,2,3,\dots$$

Знайдені за формулами (2.17) коефіцієнти визначають тригонометричний поліном

$$x_l^* = a_0 + \sum_{k=1}^n \left(a_k \cos \frac{2\pi}{N-1} kl + b_k \sin \frac{2\pi}{N-1} kl \right), \quad (2.18)$$

який, згідно методу найменших квадратів дає найкраще наближення до функції $x(t)$, що задана дискретним рядом ординат x_l , зафіксованих через відрізки часу Δt , тобто

$$\sum_{l=1}^{N-1} (x(t) - x_l^*)^2 \rightarrow \min$$

Якщо $n = \frac{N-1}{2}$ то сума (2.18) при $t=l\Delta t$ набуде точно заданого значення x_l

Перед кожною оцінкою функції необхідно визначити інтервал частот, що досліджується $f_{\min} \dots f_{\max}$. Найбільша частота визначається

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta t}, \quad (2.19)$$

а найменша частота, яка служить кроком квантування частотної ординати, буде рівна

$$f_{\min} = \frac{1}{T}, \quad (2.20)$$

де $T = \Delta t(N - 1)$ – час реалізації з вибірками в N - точках.

Для обчислення характеристик випадкової функції потоку подрібненої біомаси (соломи, кукурудзяних качанів, відходів елеваторного виробництва та ін.) під час безперервного дозування необхідно щоб вона була стаціонарною, тобто її властивості не повинні суттєво змінюватися у функції часу.

Однією з достатніх умов стаціонарності процесу є вимога, щоб нормоване середнє значення і середнє квадратичне відхилення нормованого випадкового процесу приймали значення $m = 0, \sigma \approx 1$.

Найбільш доцільно перевірку стаціонарності процесу здійснювати шляхом аналізу змін кореляційної функції в заданому проміжку часу. Якщо впродовж визначеного інтервалу спостереження $R(\tau) \rightarrow 0$, то цього достатньо, щоб вважати процес стаціонарним [2]. Після апробації процесу безперервного дозування сировини твердопаливних пелет для встановлення стаціонарності обчислюємо статистичні характеристики функції $Q(t)$: математичне сподівання m_x ; дисперсію D_x функції $x(t)$; середньоквадратичне відхилення σ ; коефіцієнт варіації s ; спектральну густину $S(\omega)$; кореляційну функцію $R(\tau)$; третій центральний момент (асиметрію) M_3 ; четвертий центральний момент M_4 .

Наведені вище оцінки дозволяють найбільш повно охарактеризувати безперервне подавання дози та забезпечують точний математичний опис процесу дозування. Такий опис залишається чинним при будь-яких умовах експлуатації, дає підґрунтя для обґрунтування технічних вимог до апаратури та визначення заходів для досягнення поставленої практичної мети. Крім того, застосування теорії випадкових функцій разом із результатами експериментальних випробувань виробничого обладнання [4] дає змогу на початковому етапі прогнозувати необхідні параметри електричної частини лінії з виробництва пелет із твердого палива.

Ключовим показником для безперервного дозатора є стабільність подачі заданого обсягу матеріалу з потрібною достовірністю, що формалізується відповідними вимогами.

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Q(t)dt - \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Q_{\text{зад}}(t)dt \leq \pm \Delta, \quad (2.21)$$

а при $Q_{\text{зад}}(t) = \text{const}$

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Q(t)dt - Q_{\text{зад}}\Delta t \leq \pm \Delta, \quad (2.22)$$

де $Q(t)$ – реалізація витрат у часовому інтервалі Δt ;

$Q_{\text{зад}}(t)$ – задане значення витрат;

Δ – допустиме відхилення.

Враховуючи вираз (2.19) можна записати

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_{\text{max}}}, \quad (2.23)$$

де ω_{max} – максимальна частота, що визначає потік матеріалу.

З огляду на те, що у нашій ситуації швидкість обертання шнекового конвеєра ($V = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) є ключовим фактором, що залежить від частоти, відповідно до джерела [2] встановлюється проміжок часу $\Delta t = 5 \text{ с}$. Цей інтервал був обраний на основі аналогічних дозувальних механізмів, що підлягали дослідженню.

Застосувавши метод, детально викладений у праці [4], ми виконали серію вимірювань, які підтвердили належні регульовальні характеристики шнекового дозатора. Оцінка продуктивності агрегату при роботі з двома основними компонентами (подрібнена пшенична солома та помелені качани кукурудзи) виявила пряму залежність (лінійність), що представлено на рисунку 2.2.

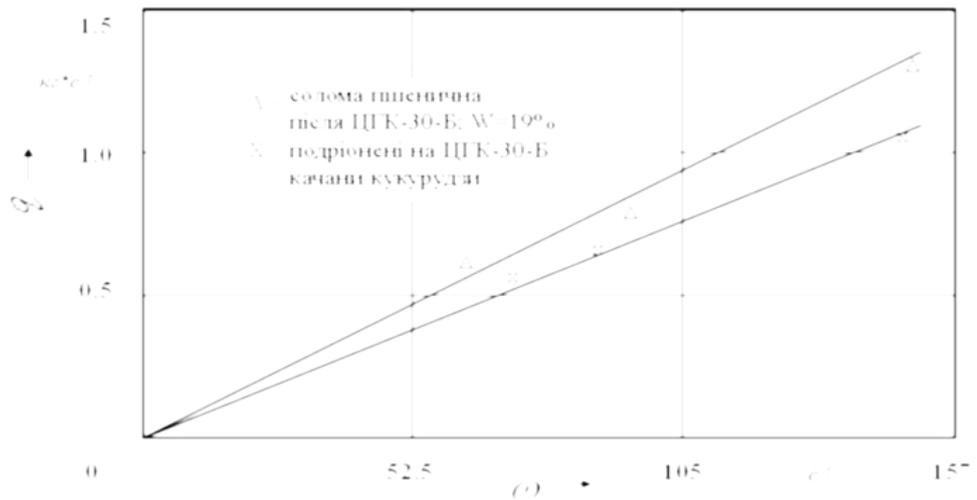


Рисунок 2.2. Шкала продуктивності шнекового дозатора

Побудовані за експериментальними даними кореляційні функції потоків матеріалу для трьох швидкостей шнека дозатора $\omega_1 = 52,2 \text{ c}^{-1}$, $\omega_2 = 105 \text{ c}^{-1}$, $\omega_3 = 157 \text{ c}^{-1}$ показали, що з плином часу τ вони затухають. Це підтверджує гіпотезу стаціонарності, що заангажована раніше (рис. 2.3).

Побудувавши залежність $c = f(\omega)$ (рисунок 2.4) можна переконатися в правильності отриманої інформації за допомогою $R_x(t)$.

Збільшення продуктивності шнекового дозатора призводить до зменшення коефіцієнта варіації c , оскільки збільшується m_x . Тому технологи рекомендують для покращення якості біопаливних пелетів працювати у верхньому діапазоні продуктивності дозаторів.

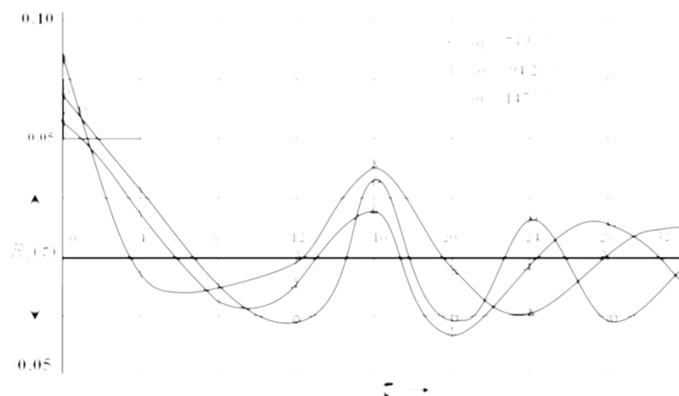


Рисунок 2.3. Кореляційні функції потоків сировини при різних швидкостях шнекового дозатора

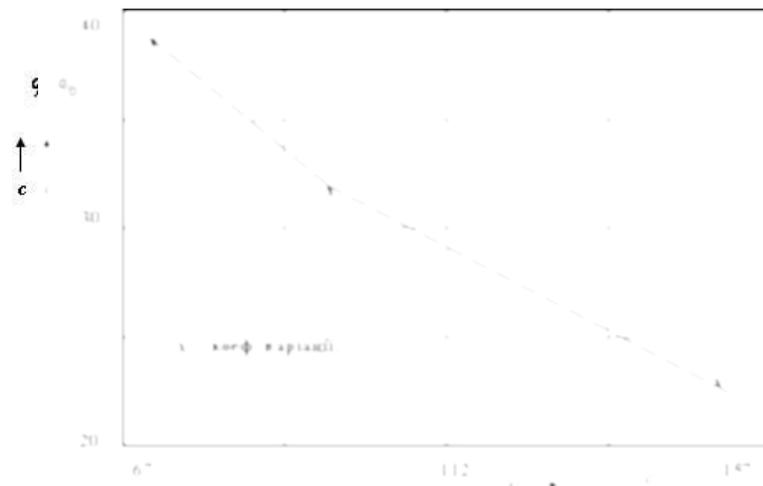


Рисунок 2.4. Залежність коефіцієнта варіації від швидкості шнекового дозатора

Здійснений аналіз стадії порціонування подрібненої стерні за допомогою об'ємного живильника безперервної роботи виявив, що домінуючим чинником, що спричиняє розсіювання, є механізм гвинтового конвеєра.

Відповідно, виміряна спектральна густина розподілу, піддається апроксимації за допомогою функціональних залежностей експоненціально-косинусного типу, а саме:

$$S(\omega) = \frac{\alpha_1 Dx}{\pi} \left[\frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega - \beta_1)^2} + \frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega + \beta_1)^2} \right], \quad (2.24)$$

де Dx – дисперсія, кг^2 ;

α_1, β_1 – параметри автокореляційної функції (АКФ);

ω – частота, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$.

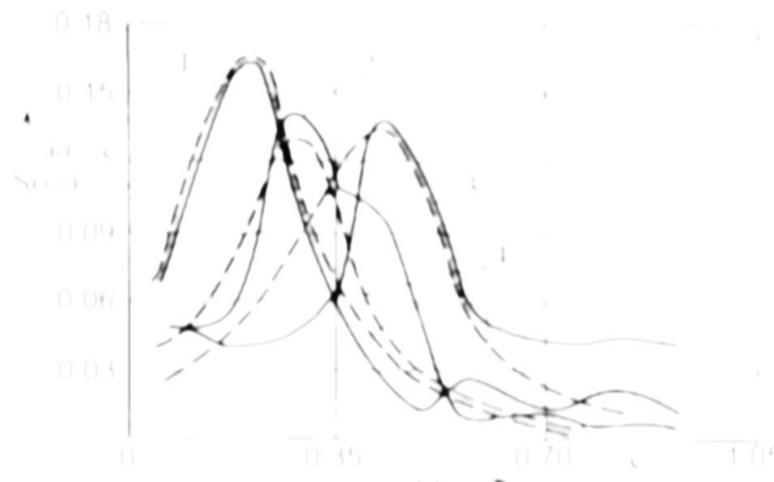


Рисунок 2.5. Спектральні щільності потоків подрібненої соломи

сформованих шнековим дозатором для частот обертання двигуна:

1 – $\omega_1 = 75 \text{ c}^{-1}$, 2 – $\omega_2 = 95 \text{ c}^{-1}$, 3 – $\omega_3 = 147 \text{ c}^{-1}$, 4 – апроксимовані.

Аналізуючи криві спектрів розсіювання потоків матеріалу (рис. 2.5), помітно, що міра $S(\omega)$ зменшується зі збільшенням частоти, і при $\omega \geq 0,95 \text{ рад} \cdot \text{c}^{-1}$ вона практично дорівнює нулю. Це зумовлено тим, що 85–95 % загальної енергії розсіювання зосереджено в частотному інтервалі $0,05\text{--}0,95 \text{ рад} \cdot \text{c}^{-1}$. Одночасно найбільші частоти гармонік потоку дозованого матеріалу ледве досягають $0,95 \text{ рад} \cdot \text{c}^{-1}$, що дозволяє визначити максимальний період коливань розсіювання як $T_{\text{макс}} = 2\pi / 0,95 \approx 6,6 \text{ с}$. В межах цього періоду може виникати необхідність коригування продуктивності дозатора і, відповідно, налагодження системи регулювання безперервної подачі сировини до пресуючого вузла. Дозування біомаси з наведеною частотною структурою та з апроксимацією, заданою формулою (2.19), потребує застосування спеціалізованих регуляторів, частотні характеристики яких відповідають вибіркового смуговому фільтру. Спектральні криві 1, 2 і 3 (рис. 2.5) апроксимуються співвідношенням (2.19) з відносною помилкою розсіювання, що не перевищує 5 %. Відповідні значення параметрів автокореляційної функції (АКФ) для кожного спектра такі:

$$\alpha_1 = 0,11, \alpha_2 = 0,12, \alpha_3 = 0,15; \beta_1 = 0,21, \beta_2 = 0,27, \beta_3 = 0,41.$$

Оскільки параметр коливальності β змінюється неістотно, утримуючись у межах $0,21\text{--}0,41 \text{ c}^{-1}$, визначальну роль у формуванні збурюючого сигналу на керуючому пристрої (регуляторі) відіграє параметр загасання.

При збільшенні α спектральна густина потоку біомаси наближається до вигляду $S(\omega) = \text{const}$, і флуктуації продуктивності матеріалу набувають кореляцій, властивих «білому шуму». Навпаки, при зменшенні α спектральна густина спадає швидше, внаслідок чого в коливаннях продуктивності дозатора переважають низькочастотні складові ($0,05\text{--}0,95 \text{ рад} \cdot \text{c}^{-1}$), які піддаються корекції стандартними ПІ-регуляторами, що використовуються в промисловості.

Для контролю процесу дозування стеблової біомаси необхідно виконувати вимірювання продуктивності живильного механізму безпосередньо в потоці. Для цієї мети було обрано акустичний витратомір; випробування показали, що його

похибка при вимірюванні подрібненої соломи зернових та бобових культур не перевищує 5 %.

Оцінка якості процесу дозування здійснювалася шляхом пошуку найменшого значення у рівнянні

$$D_{Q_A} = \frac{1}{\pi} S_{\Delta Q}(\omega) (W_H(p))^2 d\omega, \quad (2.25)$$

де D_{Q_A} – дисперсія витрат матеріалу при роботі регулятора;

$S_{\Delta Q}(\omega)$ – спектр розподілу дозованої біомаси;

$W_H(p)$ – передаточна функція по сигналу навантаження.

Оптимізація рівняння (2.25) проводилася шляхом мінімізації відношення

$$m = \frac{D_{\Delta G_A}(\Delta t)}{D_{\Delta G}(\Delta t)}, \quad (2.26)$$

де $D_{\Delta G_A}(\Delta t)$, $D_{\Delta G}(\Delta t)$ – дисперсія дозування матеріалу при роботі регулятора і без нього відповідно.

Враховуючи те, що $D_{\Delta G_A}(\Delta t)$, $D_{\Delta G}(\Delta t)$ то критерій m в повній мірі є характеристикою $Q(t)$ і $G(t)$ при будь-яких Δt .

Функція $f(\alpha_i, \beta_i, \Delta t)$ залежить від величини спектра $S_{\Delta Q}(\omega)$. В цьому випадку можна допустити, що при регулюванні продуктивності дозатора спектр його розподілу $S_{\Delta Q}(\omega)$ залишається незмінним, а зменшується лише амплітуда її складових, що по факту означає зміну параметру α_i при незначній зміні β_i .

При проходженні матеріалу через дозатор в спектрі його розподілу $S_{\Delta Q}(\omega)$ буде мати місце суттєве ослаблення високочастотних складових, оскільки активні органи (шнек) будуть формувати потік сировини відповідно до своїх частотних характеристик. Визначивши ефективну частоту пропускання системи керування, для передаточної функції шнекового дозатора виду (2.27) $\Omega_f = 1,53 \text{ рад. } C^{-1}$, а для витратоміра $\Omega_f = 5 \text{ рад. } C^{-1}$, отримаємо вихідні дані для визначення

граничних частот регулятора.

Для спектру розподілу потоку біомаси отриманого при технологічних дослідженнях (Рисунок 2.5) в частотному діапазоні $\omega \leq 1 \text{ рад. с}^{-1}$, виконується умова $\omega_i \geq \omega_{\delta\dot{e}}$, де $\omega_{\delta\dot{e}}$ – частота флуктуацій потоку матеріалу.

Це свідчить про те, що по своїх динамічних властивостях акустичний витратомір і шнековий дозатор задовольняють вимоги, що ставляться до замкнених систем регулювання дозаторів [5].

Вибір регульованого електроприводу здійснюється за параметрами затухання спектрів (1, 2, 3) згідно з рекомендаціями [2]. Для дозування матеріалів з $\alpha_i \approx 0,1$ рекомендується застосовувати серійні ПІ – регулятори, які в процесі роботи суттєво зменшують $D_{GA}(\Delta t)$ за рахунок відсутності статичної похибки.

Тому у нашому випадку, коли $\alpha_{1,2,3} \approx 0,1$, вибір ПІ – регулятора на базі частотно-регульованого електроприводу буде технічно адекватним і в повній мірі дозволить зменшити дисперсію дозованої біосировини при пелетуванні соломи

2.4 Дослідження процесу утворення твердопаливних пелет

Використання пелет із твердої біомаси сьогодні розглядається як один із ключових підходів до зменшення споживання традиційних енергоресурсів, що підтверджується економічними, технічними та екологічними перевагами. Теплотехнічне обладнання, яке працює на такому паливі, характеризується швидкою окупністю, відсутністю викидів сполук сірки, хлору та інших шкідливих компонентів, а також щорічним відновленням ресурсної бази біомаси [8].

За даними сучасних наукових досліджень, солома зернових культур, відходи елеваторної промисловості та кукурудзяні качани є перспективними видами сировини для виробництва таких пелет. Їхні енергетичні показники майже рівноцінні. Відомо [4], що за тепловим еквівалентом приблизно 2,7–2,9 тонни цієї біомаси здатні замінити 1000 м³ природного газу. На даний момент солома, качани

кукурудзи та інші відходи не мають усталеної ринкової вартості: ціна на них коливається в межах 150–300 грн за тонну залежно від регіону України. Це значно дешевше, ніж газ, мазут чи пічне паливо, які традиційно використовуються в аграрному секторі.

Отже, розроблення ефективних технологій виробництва пелет із твердої біомаси, які б відповідали вимогам сучасних теплогенераційних систем, є надзвичайно важливим завданням для енергетичної галузі.

Фахівці у сфері теплоенергетики особливу увагу приділяють двом основним параметрам пелет із соломи та відходів: вологості, яка має бути не більшою за 15%, та вмісту лужних металів, що впливають на температуру термічного розкладання та плавлення палива, спричиняючи надмірне утворення шлаку у камерах згоряння. Вартість виробництва пелет зазвичай визначається їх теплотою згоряння, що перебуває у межах 14–16 МДж/кг.

Одним із перспективних способів поліпшення енергетичних властивостей пелет із біомаси є використання багатокомпонентних сумішей, що дозволяє: скоротити кількість золи, що утворюється; підвищити температуру розкладання та плавлення біомаси; знизити вологість готових пелет.

Дослідження засвідчили, що на сучасному етапі розвитку виробництва пелет найбільш перспективною є технологічна лінія Wektor (Польща), яка працює на основі пресів ударної дії. Її переваги визначаються низкою критеріїв: відносно невисокою вартістю обладнання, високою якістю готової продукції, належною продуктивністю, помірним енергоспоживанням, низькою металомісткістю та широкою поширеністю, що забезпечує доступне сервісне обслуговування. Лінія має сертифікацію ЄС і активно використовується у Польщі, Чехії, Румунії та Україні [7].

Метою наших досліджень був пошук найбільш ефективного двокомпонентного твердопаливного пелета для застосування у теплогенераторах. Об'єктом роботи стали процеси формування багатокомпонентних пелет із твердої біомаси з метою визначення оптимального складу та формування вимог до наявного технологічного обладнання.

Як вихідні матеріали застосовували подрібнені кукурудзяні качани з різним ступенем помелу та подрібнену пшеничну солому («сіру»). У ході експериментів

виготовляли як однокомпонентні гранули, так і двокомпонентні пелети, варіанти яких наведені на відповідному рисунку.

Результати досліджень показали, що гранули, отримані шляхом пресування подрібнених кукурудзяних качанів, хоча й мають прийнятні показники тепловиділення, є непридатними для транспортування та тривалого зберігання. Це пояснюється нестачею лігніну — природного зв'язувального компонента. На відміну від качанів, солома містить достатню кількість лігніну, і без його участі гранули з кукурудзяної сировини втрачають товарні властивості.

Пелети із соломи, хоч і характеризуються хорошими фізичними показниками, мають підвищену зольність (до 4,5 %) та недостатню термостійкість біомаси — схильність до деформації й термічного розкладання при температурах близько 1000 °С. Ці фактори негативно позначаються на їх ефективності як твердого палива.

Натомість двокомпонентні паливні суміші, завдяки поєднанню властивостей обох матеріалів, демонструють вищі комерційні та теплотехнічні показники. Додавання подрібнених кукурудзяних качанів дозволяє зменшити зольність до 2,3 % та підвищити температуру плавлення біомаси до 1300 °С, що позитивно впливає на функціонування теплогенераційних систем (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 Характеристики палива

| Характеристики палива | Однокомпонентні | | Двокомпонентні | |
|---------------------------|-----------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | K ₁ | C ₁ | K ₂ / C ₂ | K ₃ / C ₃ |
| Вологість, % | 12,5 | 20 | 15,5 | 14,5 |
| Зола | 1,7 | 4,5 | 2,5 | 2,3 |
| Летючі компоненти | 67 | 77 | 71 | 70 |
| Сірка | 0,07 | 0,13 | 0,09 | 0,08 |
| Теплота згоряння, Ккал/кг | 4450 | 4200 | 4400 | 4500 |
| Температура золи, °С: | | | | |
| деформація | — | 1000 | 1100 | 1100 |
| розщеплення | — | 1100 | 1200 | 1150 |
| розплавлений стан | — | 1250 | 1300 | 1300 |

K₁ – кукурудзяні качани зі ступенем подрібнення 5,0 мм;

C1 – пшенична солома «сіра» з робочою фракцією 30...50 мм;

C2, C3 – пшенична солома «сіра» з подрібненням 30...50 мм та вагою 1 кг;

K2 – кукурудзяні качани, подрібнені до 1,5 мм, масою 3 кг;

K3 – кукурудзяні качани з фракцією помелу 5,0 мм та вагою 4 кг.

Відповідно технології виготовлення двокомпонентного альтернативного палива у вигляді пелет, процес передбачає безперервну подачу підготовленої сировини до гранулятора з подальшим формуванням гранул. Послідовність розміщення обладнання у виробничому ланцюгу подана на рисунку 2.10.

Використання потокових виробничих ліній для отримання двоскладових твердопаливних гранул дозволяє суттєво скоротити тривалість виробничих операцій та зменшити експлуатаційні витрати приблизно на 30–40 % порівняно з обладнанням періодичної дії аналогічної продуктивності [8].

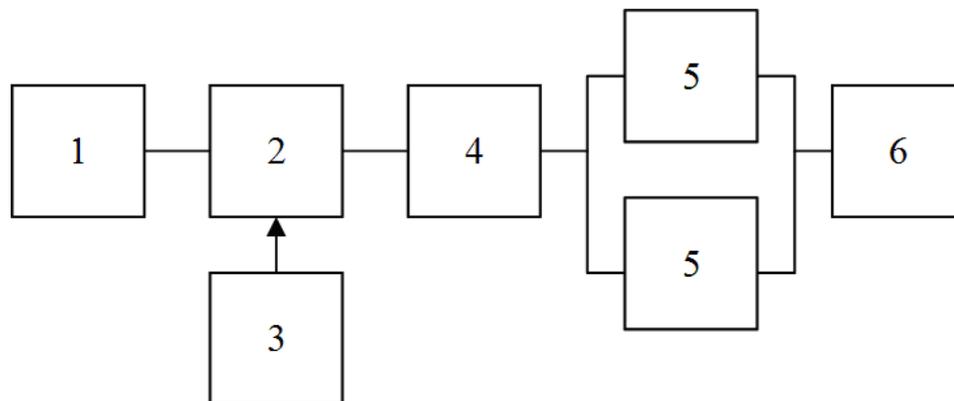


Рисунок 2.10. Структурна схема потокової лінії приготування двокомпонентного твердопаливних пелет: 1 – подрібнювач соломи; 2 – дробарка; 3 – дозатор 2-го компоненту; 4 – силос-дозатор твердопаливних пелет; 5 – преси; 6 – накопичувач готової продукції

Принцип безперервної подачі складників для формування паливних гранул полягає у створенні партій визначеного об'єму протягом проміжку часу, тривалість якого залежить від робочого об'єму змішувального апарата. Оскільки витрата кожного компонента є стохастичною величиною, для мінімізації похибок дозування підбирають оптимальні параметри дозаторів і змішувача, що забезпечують найефективнішу конфігурацію потокової виробничої лінії.

Вивчення процесів у потокових системах із заздалегідь визначеною структурою та обраним обладнанням здійснюється шляхом аналізу характеристик

потоків, сформованих дозуючими пристроями, та побудови їхніх автокореляційних функцій. За формою цих функцій встановлюють, чи є процеси стаціонарними та ергодичними, а також оцінюють, наскільки правильно підібрано дозатор для конкретної лінії, що використовує певний тип змішувача.

Спектральну густину потоків біомаси визначають на основі отриманих експериментальних даних, застосовуючи нашу спеціально розроблену методику [2]. Вона подається у вигляді графіка, який демонструє залежність дисперсій від частотних характеристик компонентів потоку. Суть запропонованого спектрального аналізу полягає у визначенні діапазонів частот коливань потоків біомаси та оцінці загальної дисперсії (або середньоквадратичного відхилення) кожного з компонентів. Основним критерієм відповідності є відсутність у спектрі дисперсії пікових коливань на частотах, що нижчі за критичні значення.

$\omega_{кр}$, яка визначається характеристикою змішувача:

$$\omega_{\min} \geq \omega_{кр} = 2\pi (\Delta t)^{-1} \quad (2.27)$$

де ω_{\min} – частота низькочастотних флуктуацій; $\omega_{кр}$ – частота пропускання дозатора; Δt – час дози.

У процесі безперервного виробництва двокомпонентних паливних гранул особливо важливо вдосконалювати систему контролю технологічних операцій. Наявні рішення спрямовані переважно на оптимізацію окремих елементів автоматизованої системи керування (АСК) для підвищення точності дозування та рівномірності подачі біомаси. Для цього використовують регульовані приводи, вимірювальні прилади та відповідні контролери. Застосування АСК дозволяє підвищити якість гранул і зменшити витрати праці та електроенергії порівняно з дистанційним управлінням.

Підвищення теплотехнічних і товарних характеристик пелет, а також зниження енерговитрат можливі завдяки точнішому дозуванню компонентів, що забезпечується узгодженою роботою дозуючих механізмів. Статистичний аналіз процесу дає змогу визначити основні технологічні параметри та встановити вимоги до обладнання: інтенсивність потоку в межах 0,2–0,7 т/год та швидкість обертання шнека від 30 до 157 с⁻¹.

Експериментальні дослідження двокомпонентних гранул, які поєднують високий вміст лігніну у соломі та низьку зольність кукурудзяних качанів, показали, що оптимальним є співвідношення компонентів 1/2,5. Межовим, але прийнятним для комерційного використання, є співвідношення 1/5. Подальше зменшення частки соломи погіршує якість гранул, роблячи їх непридатними для зберігання та експлуатації.

Висновки до розділу 2

Одним із ключових чинників, що визначає питому енергомісткість процесу виготовлення пелет із біомаси, є рівень залученості електричних двигунів, що живлять змішувачі, дозуючі механізми та безперервні преси.

Для підвищення ефективності системи W_{xx} вкрай важливо правильно обрати потужність електричних двигунів, які приводять у рух робочі механізми, що функціонують в умовах змінного навантаження.

Потужності, які втрачаються в електродвигунах шнекових живильників для порційного подавання компонентів пелет з твердого палива, залежать як від інертності механізму шнека, так і від обраної швидкості його обертання. Крім того, на ці втрати впливає дисперсія швидкості, зростання якої веде до збільшення споживання електроенергії електроприводом.

Розширити допустимий діапазон вологості сировини можна лише за умови додавання другого компонента з низьким початковим рівнем вологості, наприклад, подрібнених кукурудзяних качанів після насіннезаводів або відходів елеваторного господарства, вологість яких не перевищує 15%.

Розроблення ефективних технологій виробництва пелет із твердої біомаси, які б відповідали вимогам сучасних теплогенераційних систем, є надзвичайно важливим завданням для енергетичної галузі.

РОЗДІЛ 3

СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УЗГОДЖЕНОГО ДОЗУВАННЯ

3.1 Аналізу робочих режимів регульованого електроприводу потокової лінії

Новітні розробки у галузі виробництва напівпровідникових і мікроелектронних компонентів забезпечують можливість створення електроприводів, здатних повністю відповідати вимогам будь-якого технологічного процесу. Застосування керованих частотних перетворювачів, зокрема обладнання SIEMENS, дає змогу впроваджувати системи з високими динамічними показниками та мінімальними енергетичними втратами. Завдяки високій швидкодії контролерів, що входять до систем керування такими перетворювачами, характеристики електроприводу можуть бути точно адаптовані до потреб конкретного виробничого устаткування. Тому надзвичайно важливим є забезпечення оптимального діапазону регулювання та високої точності керування робочими параметрами. У цьому розділі розглядаються питання аналізу та оптимізації структур регульованих електроприводів, що дозволяють гарантувати виконання встановлених технологічних вимог як у частині діапазону керування, так і його точності.

Серед впроваджуваних систем переважають електроприводи зі швидкісним регулюванням, розраховані на роботу у стаціонарних режимах за постійного або змінного навантаження. Для таких електроприводів проводиться оптимізація усталених режимів на основі енергетичних критеріїв, зокрема мінімізації споживання електроенергії у зв'язці «частотний перетворювач – асинхронний двигун». У цьому контексті важливою стає задача енергетичної оптимізації, що спирається на принципи векторного керування асинхронним двигуном і концепцію підпорядкованого управління магнітним потоком, реалізовані, зокрема, у системах компанії Rockwell Automation.

Підвищення енергоефективності та динамічних властивостей електроприводу потребує застосування інтелектуальних технологій у системах

його керування. Враховуючи нелінійний характер та параметричну нестационарність асинхронного двигуна як об'єкта управління, а також необхідність узгодження теоретичних та експериментальних даних, виникла потреба у створенні спеціалізованих фізичних моделей (або дослідного стенда) та методики оцінювання впливу різних факторів на ефективність автоматизованого електроприводу.

Розроблення сучасних регульованих електроприводів тісно пов'язане з удосконаленням математичних моделей асинхронних двигунів, які є складовими замкнених систем керування. Під час аналізу й синтезу таких систем модель двигуна використовується як основний інструмент для пошуку оптимальних алгоритмів керування.

Розвиток обчислювальної техніки створив нові можливості для моделювання комплексних електроприводів, зокрема з прямими перетворювачами частоти. Зростання продуктивності ЕОМ дозволило виконувати обчислення складних аналітичних залежностей, що описують систему. Використання MATLAB і середовища Simulink суттєво підвищує ефективність моделювання електромеханічних процесів.

Експериментальні дослідження виготовлення двокомпонентних пелет показали, що вологість сировинної суміші перед подаванням у змішувач і прес має становити 12–16 %, а масове співвідношення сухих компонентів (солома : кукурудзяні качани) — 1:1 до 1:5 [4].

Для дотримання цих умов необхідно точно регулювати продуктивність дозаторів під час подавання кожного компонента у заданій пропорції. Найдоцільніше це реалізувати за допомогою частотно-регульованих асинхронних електроприводів.

З цією метою розроблено структурну схему автоматизованої потокової лінії (рис. 3.1), що містить два дозатори — секторний 1 для соломи та шнековий 2 для кукурудзяних качанів, оснащені регульованими асинхронними двигунами 3 і 4. До складу лінії входять також змішувальний бункер 12, шнек-екструдер із регульованою продуктивністю 14 та прес 15. Керування швидкісними режимами обладнання здійснюється нейроконтролером 11 через частотні перетворювачі 7–

10.

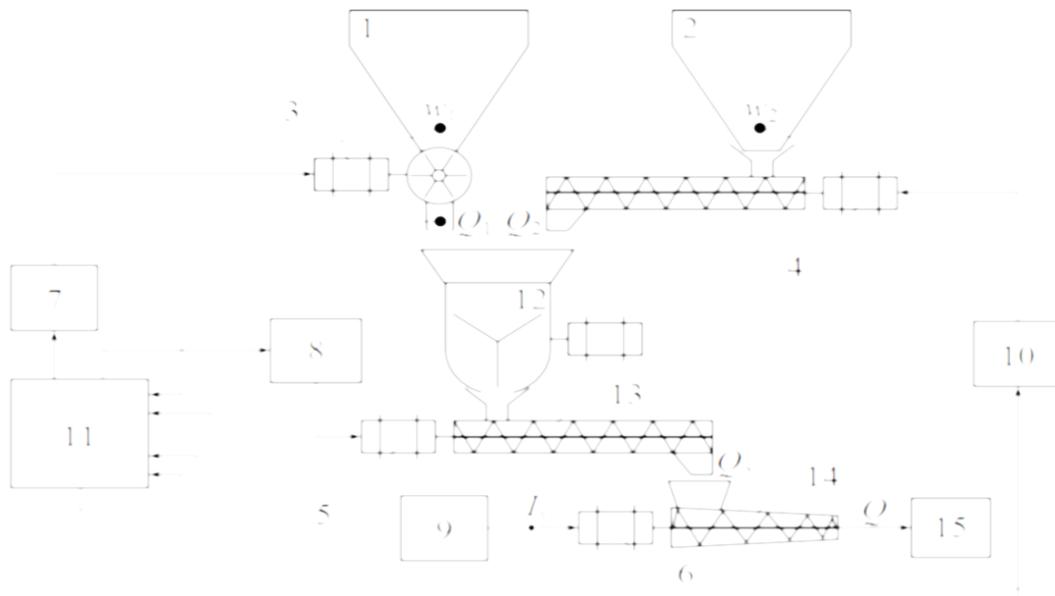


Рисунок 3.1. Схема конвеєра для автоматизованого виготовлення двоскладових пелет на твердому паливі виглядає так: 1 – секторний живильник; 2 – гвинтовий живильник; 3, 4, 5, 6 – двигуни змінного струму з регульованою швидкістю; 7, 8, 9, 10 – частотні перетворювачі; 11 – контролер на основі неймереж; 12 – змішувальний бункер; 13 – дозувальний шнек; 14 – шнек попереднього ущільнення; 15 – формувальний прес; w_1 , w_2 – сенсори вологості; Q_1 – датчик пропускної здатності, I_s – показник струму в обмотці статора асинхронного двигуна.

Для забезпечення стабільного заповнення змішувального бункера та потрібної щільності гранул сумарна продуктивність обох завантажувальних дозаторів (Q_1 і Q_2) повинна точно узгоджуватися з продуктивністю шнека, що подає суміш на прес (Q_3). Усі ці величини мають регулюватися відповідно до пропускної здатності всієї технологічної лінії, тобто бути узалежненими від продуктивності гвинтового конвеєра попереднього стискання та пресувального вузла (Q).

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 = Q \quad (3.1)$$

Об'ємна продуктивність шнекового дозатора через його геометричні параметри

$$Q_v = 0,25\pi ((D + 2\delta)^2 - d^2)ns_i\gamma, \quad (3.2)$$

де D – діаметр шнека, м;

δ – зазор між корпусом і шнеком, м;

d – діаметр вала шнека, м;

n – частота обертання шнека, об/хв;

s_i – крок навивки шнека, м;

γ – коефіцієнт заповнення шнека.

Виразивши продуктивності через щільності компонентів отримаємо:

$$\sum_{i=1}^n S_1 v \rho_{1i} \Delta t_i + \sum_{i=1}^n S_2 k_i v \rho_{2i} \Delta t_i = \sum_{i=1}^n S_3 \alpha (v + k_i v) \rho_{3i} \Delta t_i = S_4 \beta (v + k_i v) \rho_4 T, \quad (3.3)$$

де S_1, S_2, S_3, S_4 – площі поперечних перерізів робочих органів шнекових дозаторів і технологічного отвору преса;

$v, k_i v$ – швидкості руху компонентів сировини;

α, β – коефіцієнти швидкості, що залежать від параметрів вивантажувального шнека та щільності пресування;

$\rho_{1i}, \rho_{2i}, \rho_3$ – насипні щільності компонентів сировини та їх середня щільність;

ρ_4 – щільність після пресування.

Продуктивність шнекових живильників, що працюють за сталої швидкості обертання робочих органів, має випадковий характер і підпорядковується нормальному розподілу. Щоб зменшити ці флуктуації, у сучасних виробничих лініях застосовують змішувальні бункери значного об'єму (2 м^3), які виконують функцію інтеграторів. Змішування в таких бункерах забезпечується електроприводом потужністю 3 кВт. Вибір об'єму бункера та потужності приводу визначається необхідністю стабілізувати якість сировини, що надходить на прес, попри різницю у швидкісних режимах вхідних і вихідного живильників та розсіювання їхньої продуктивності.

Упровадження нейрокерованої інтелектуальної системи регулювання виробництва двокомпонентних пелет дає змогу синхронізувати роботу всіх елементів лінії — подаючих живильників, розвантажувального шнека та екструдерного преса — шляхом адаптивного регулювання швидкісних профілів із урахуванням реальних коливань продуктивності. Це дозволяє мінімізувати час інтегрування у змішувачі до 20 с — значення, що визначається допустимою неоднорідністю змішування. У результаті можливе різке зменшення об'єму бункера (до 0,05 м³) та потужності привідного двигуна (до 0,25 кВт).

Вибраний час інтегрування обумовлений потребою фільтрації високочастотних складових дисперсії вихідного сигналу живильника з урахуванням тривалості змішування. Для мелених кукурудзяних качанів та соломи коефіцієнти варіації становлять 5 % і 15 % відповідно [10]. Тому контроль необхідно зосереджувати на низькочастотних складових сигналу того живильника, який подає компонент із більшою варіабельністю, забезпечуючи тим самим стабільну подачу матеріалу та підтримання вологості суміші, що надходить у прес, на рівні не вище 16 %.

Сучасне виробництво твердопаливних гранул здійснюється за допомогою шнекових або шнеково-ударних пресів (екструдерів), у яких гранули формуються шляхом проштовхування матеріалу невизначеної довжини через матрицю з каналом потрібного профілю. Для отримання пластичного, аморфного стану подрібненої сировини її нагрівають до температури 250–300 °С, використовуючи поєднання внутрішнього та зовнішнього нагрівання або лише внутрішнього (як у випадку з ударним пресом). Внутрішнє нагрівання виникає внаслідок тертя матеріалу об шнек під високим робочим тиском.

Робота такого обладнання пов'язана зі значним споживанням електроенергії, яке прямо залежить від параметрів процесу: швидкості обертання шнека, продуктивності подаючого конвеєра, щільності пресування, властивостей сировини та її вологості.

Дослідження показали, що на питомі енергетичні витрати під час гранулювання впливають усі зазначені фактори. Було проаналізовано

електромеханічні характеристики асинхронних електроприводів ключового обладнання — шнекових живильників, змішувачів і пресів (шнекового та ударного типу), а також їхні робочі швидкості.

Експериментальні дані щодо енергетичного профілю процесу, який включає етапи дозування, змішування та пресування, дозволили встановити залежність питомого споживання енергії від технології виробництва, пропускної здатності лінії та вологості сировини. Цю залежність наочно відображено у вигляді поверхні (рис. 3.2).

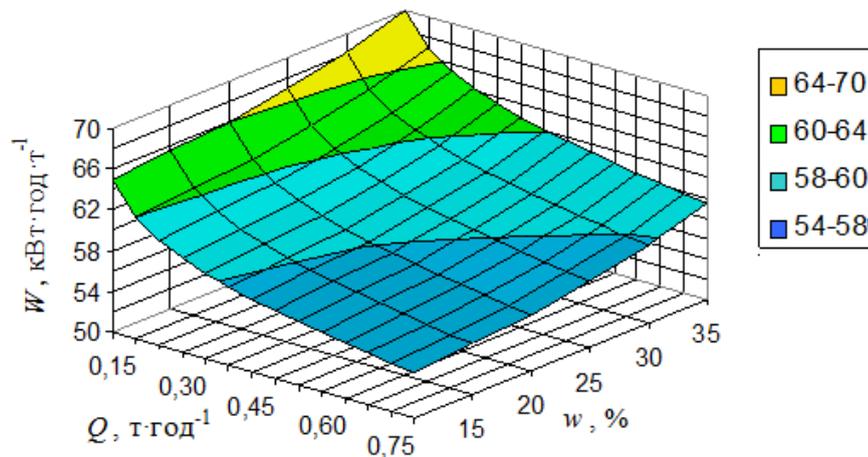


Рисунок 3.2. Залежність питомих витрат електроенергії W від Q та w сировини

Зростання питомого споживання електроенергії (W) при одночасному зниженні продуктивності лінії (Q) пояснюється особливостями механічних характеристик робочих елементів шнекових агрегатів, а також збільшенням втрат у регульованому електроприводі на низьких швидкостях обертання асинхронного двигуна (АД). Підвищена вологість сировини підвищує опір руху матеріалу через в'язке тертя, що виникає під час порційного подавання компонентів твердого палива, їх змішування і особливо на стадії пресування.

Сила струму (I_s) асинхронного двигуна шнека, що здійснює попереднє ущільнення, найбільше залежить від ступеня ущільнення пелет. Цей ступінь визначається пропускною здатністю шнека (Q) та продуктивністю преса і живильного шнека (Q_3) (рис. 3.1). Тому критично важливо синхронізувати роботу дозувальних пристроїв на вході та виході, враховуючи можливу нерівномірність

їхньої роботи.

Практичні випробування показують, що електродвигун шнека на етапі попереднього ущільнення споживає близько 40% від загальної енергії технологічного процесу. Основна частина цієї енергії витрачається на подолання сил тертя під час руху матеріалу в зоні завантаження, формування циркуляційного потоку між витками спіралі та досягнення щільності сировини, необхідної для наступного пресування. Для шнеків із змінною глибиною канавок гвинтової спіралі рівень споживаної енергії визначається згідно з джерелом [1].

$$N_1 = \frac{\pi^3(t-e)l_0 J \mu n^2}{t} + \alpha n \Delta P, \quad (3.4)$$

де J – коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$J = \frac{\pi^2 D_1^2 - 4t^2}{\pi^2} + \frac{(d + D_1)^3 - (d + D_2)^3}{3(D_1 - D_2)} + \frac{2,3\pi^2 D_1^5}{(t^2 + \pi^2 D_1^2)(h_1 - h_2)} \lg \frac{h_1}{h_2}, \quad (3.5)$$

t – крок навивки гвинтової лінії шнека, м;

e – товщина гребеня, м;

l_0 – довжина навивки, м;

n – частота обертання, об/хв;

μ – коефіцієнт в'язкого тертя під час переміщення та ущільнення сировини;

α – стала прямого потоку, м³;

ΔP – перепад тиску за довжиною шнека, Па;

D_1 – зовнішній діаметр шнека в зоні завантаження, м;

D_2 – зовнішній діаметр шнека на виході;

d – діаметр вала, м;

h_1 – висота гребеня гвинтової лінії в зоні завантаження, м;

h_2 – висота гребеня гвинтової лінії на виході шнека, м.

Внаслідок того, що для конкретного конструктиву шнека параметри J , t , e , l_0 є незмінними величинами, енергія механічна, яка витрачається, визначається коефіцієнтом внутрішнього тертя μ , квадратним значенням швидкості обертання n , а також компресійною здатністю, що описується через різницю тисків ΔP .

Ступінь ущільнення у цій технологічній схемі сягає приблизно десяти до одного і встановлюється через відношення об'ємних витрат попереднього шнекового механізму та імпульсного преса, а також шляхом коригування значення сили на вихідній частині робочого отвору під час руху сформованих паливних брикетів.

Механічна потужність шнека-дозатора визначається за формулою:

$$N = 10^3 Q L k, \quad (3.6)$$

де Q – продуктивність дозатора, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

L – довжина шнека, м;

k – коефіцієнт, що враховує опір переміщення сировини в корпусі дозатора ($k = 1,5 \dots 3$).

На сьогоднішній день керування продуктивністю технологічних машин здійснюється вручну за допомогою частотно-регульованого електроприводу. Такий підхід не забезпечує синхронної роботи обладнання, що призводить до порушення умови, визначеної у рівнянні (3.1). Унаслідок значного зростання механічного навантаження на асинхронний двигун (АД) шнека попереднього ущільнення виникає підвищене споживання електроенергії та погіршення якості кінцевої продукції.

Ці висновки підтверджені експериментальними випробуваннями у виробничих умовах, під час яких було зафіксовано перевищення пускового струму статора АД шнека попереднього ущільнення до 15 А при номінальному значенні 11 А. В окремих випадках пікове навантаження призводило навіть до аварійної зупинки двигуна, що пояснюється невідповідністю його швидкості та режиму роботи завантажувального шнека, особливо при підвищеній вологості сировини.

З точки зору енергоефективності технологічного процесу, оптимальним є підтримання робочих параметрів машин на таких швидкостях обертання, які відповідають номінальному струму статора електродвигуна.

Для реалізації цього підходу було впроваджено регулювання продуктивності дозатора Q_3 за допомогою частотно-регульованого асинхронного

електроприводу, де ключовим керуючим параметром слугував струм АД шнека попереднього ущільнення.

Для детального аналізу швидкісних режимів та енергетичних характеристик асинхронного приводу у середовищі MATLAB [8] була створена імітаційна модель установки (рис. 3.3). Модель базується на математичних описах роботи шнекових дозаторів та шнека-екструдера попереднього ущільнення (рівняння 3.2–3.6, рис. 3.4) та відтворює функціонування цих механізмів у замкнутій системі автоматичного контролю продуктивності завантажувального шнека-дозатора Q1, забезпечуючи досягнення заданого номінального струму статора АД.

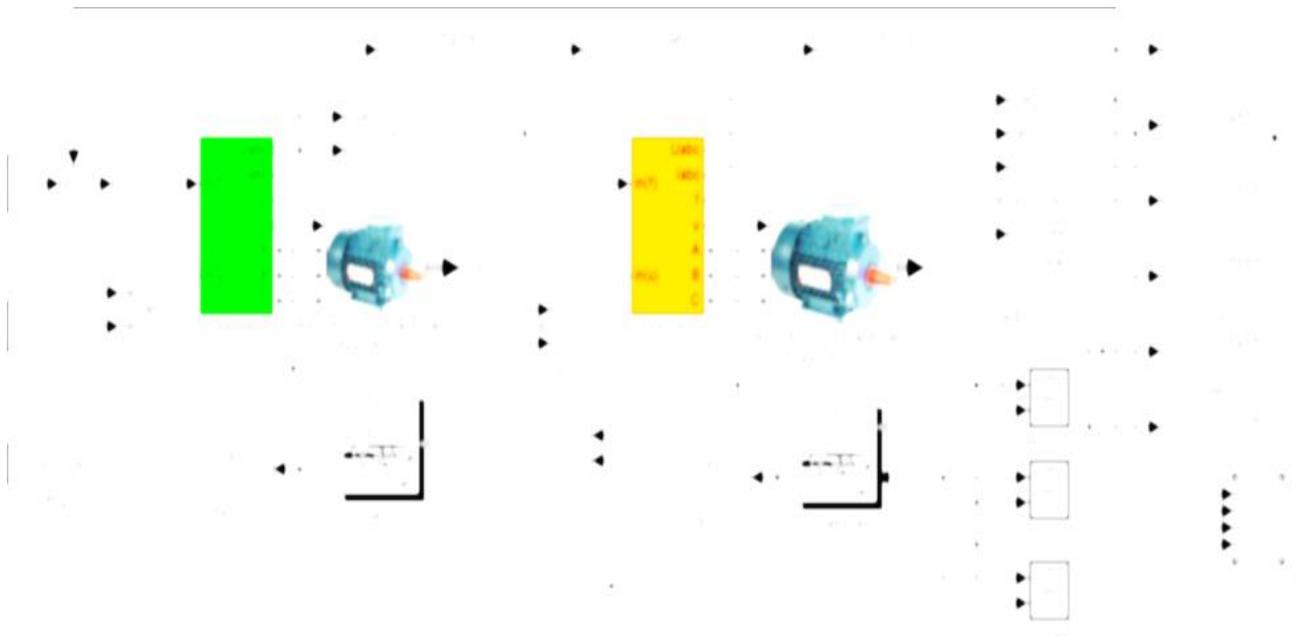


Рисунок 3.3. Імітаційна модель установки для дослідження режимів роботи та енергетики технологічного обладнання

Згідно з результатами моделювання, було виявлено зв'язки між величиною механічного навантаження, що діє на шнек підпресувача АД, та продуктивністю шнека-дозатора Q1, а також струмом статора цього ж двигуна. Ці залежності представлені для двох режимів роботи: ручного та автоматичного (керованого за номінальним струмом АД) (рис. 3.5).

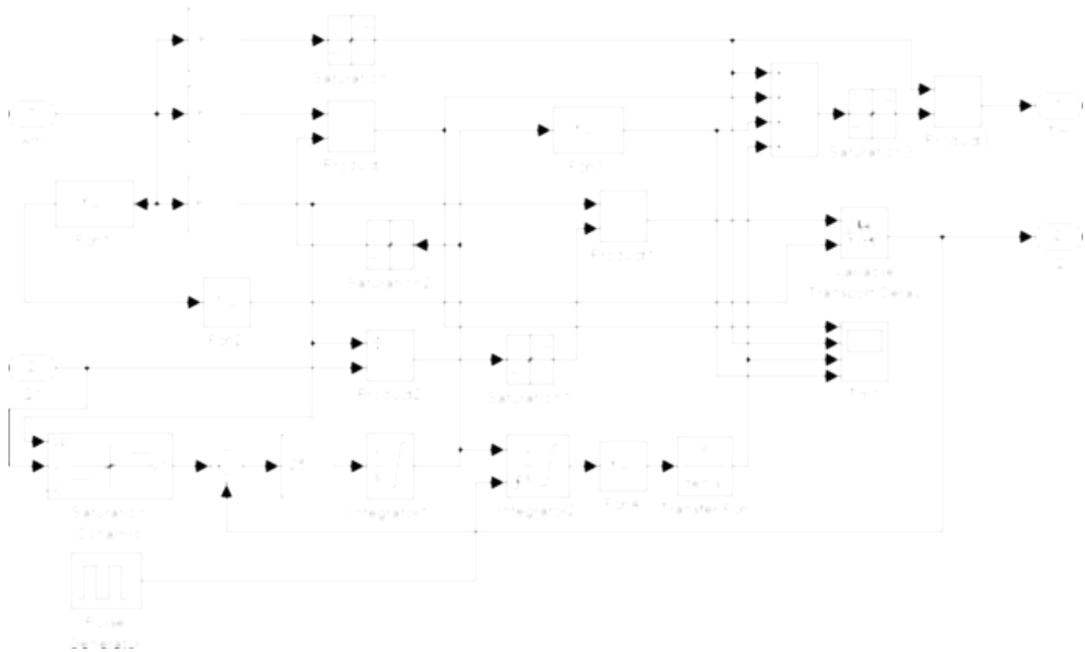


Рисунок 3.4. Структура імітаційної математичної моделі підпресувального шнека-екструдера

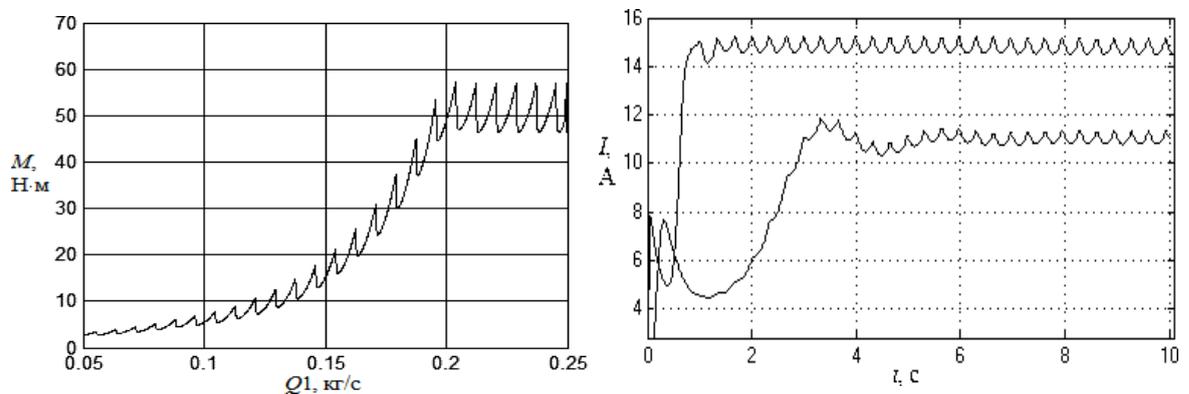


Рисунок 3.5. Результати моделювання режимів роботи шнека-екструдера

Спираючись на наведені вище результати, було створено симуляційну модель обладнання для формування двоскладових твердих гранул, де для регулювання технологічних параметрів задіяно нейромережевий контролер (рис. 3.6).

У збудованій схемі імітаційної моделі цієї інтелектуальної системи управління (рис. 3.6) потужність подачі шнекового дозатора Q3 встановлюється на основі показника струму в статорі асинхронного двигуна, що приводить у рух

шнек ущільнення. Цей показник, у свою чергу, обумовлює загальну пропускну здатність дозаторів Q1 та Q2, яку необхідно підтримувати на рівні показника Q3.

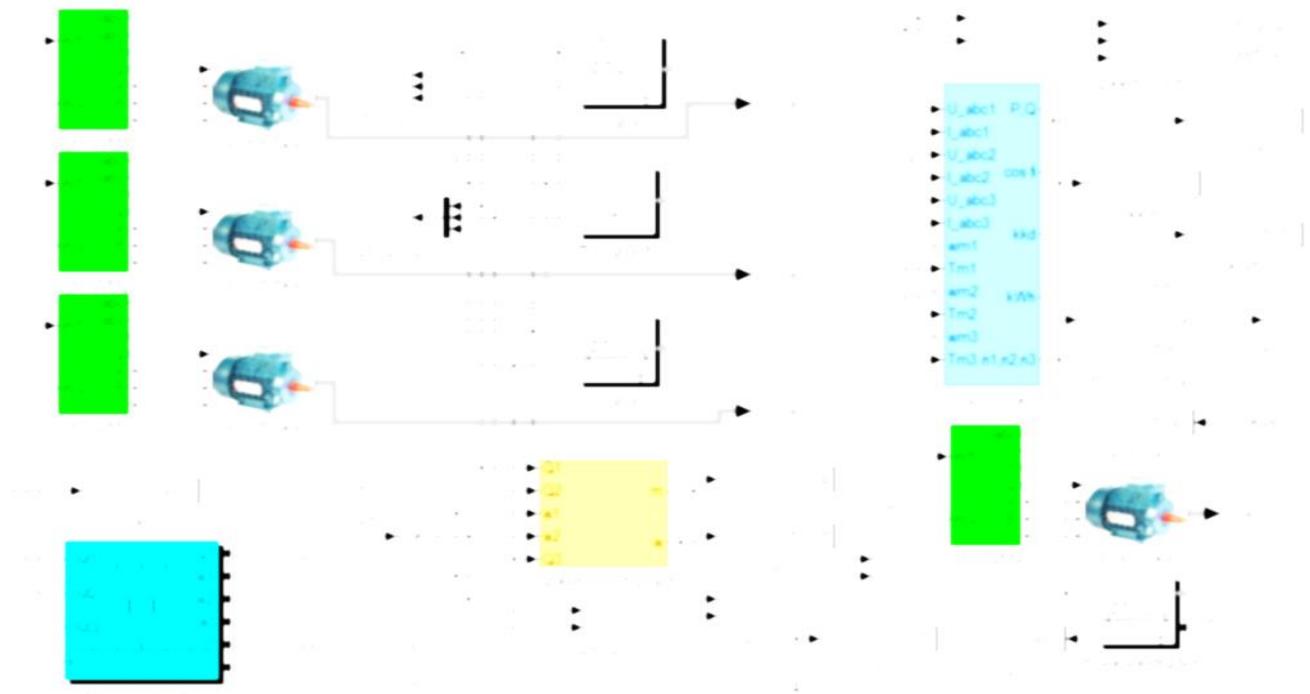


Рисунок 3.6. Імітаційна модель системи керування потоковою лінією

Запропонована інтелектуальна система керування процесом виробництва паливних пелет дозволяє ефективно коригувати склад суміші у широкому діапазоні, що дає змогу вирішувати проблеми підвищеної вологості соломи та зниженої шлаковості кінцевого продукту.

Використання бункера-змішувача з мінімально необхідним об'ємом, що забезпечило десятикратне зменшення потужності електродвигуна, у поєднанні з регулюванням пропускну здатності шнека-дозатора на основі номінального струму статора асинхронного двигуна шнека-екструдера під високим тиском дозволило знизити загальні енерговитрати технології в середньому на 20 %

3.2 Налагодження динамічних та енергетичних параметрів

Налагодження характеристик зчеплених електроприводів на прикладі потокової лінії виробництва твердопаливних пелет дозволяє розглянути кілька варіантів алгоритмів управління.

Перший варіант передбачає відсутність регулювання: подача компонентів у змішувач або прес здійснюється через окремі дозатори з продуктивністю, підбраною відповідно до рецептури. Проте через високий коефіцієнт мінливості дозаторів (до 35 %) отримана суміш часто не відповідає вимогам щодо якості та теплотворної здатності [4].

Другий варіант передбачає оснащення кожного дозатора індивідуальним частотно-регульованим електроприводом, що дозволяє забезпечити точний склад суміші, задовольняючи теплотехнічні критерії. Недоліком цього підходу є значне підвищення вартості системи управління.

Третій варіант полягає у використанні одного частотно-регульованого електроприводу для всіх дозаторів із моніторингом продуктивності головного дозатора. Частота живлення електроприводів змінюється пропорційно, зберігаючи співвідношення компонентів при фіксованій рецептурі. Зміна рецептури потребує механічного переналаштування дозаторів. Цей метод дешевший за другий варіант, але менш гнучкий у випадку частої зміни складу суміші.

Четвертий варіант вважається найбільш ефективним щодо якості суміші. Кожен дозатор оснащується частотним перетворювачем, а живлення системи централізоване через центральний процесор, який коригує швидкість обертання робочих елементів дозаторів відповідно до рецептури. Він дешевший за другий варіант і забезпечує високу точність дозування.

Усі розглянуті варіанти мають обмеження, пов'язані з механічною жорсткістю приводних електродвигунів. При високих показниках варіації продуктивності це призводить до значних похибок у співвідношенні швидкостей обертання електродвигунів, а отже, і продуктивності дозаторів, особливо при зміні частоти живлення частотного перетворювача. Використання одного перетворювача для всіх дозаторів може вимагати додаткового коригування швидкості окремих дозаторів. Натомість реалізація алгоритму з індивідуальними частотними перетворювачами для кожного електроприводу усуває ці недоліки.

При використанні частотних регуляторів на всіх дозаторах із централізованим блоком живлення та центральним процесором з'являється можливість коригувати жорсткість як напругової, так і частотної механічних характеристик.

Різниця у швидкості обертання валів найпоширеніших електродвигунів, встановлених на дозаторах компонентів паливних пелет (АІР80В4УЗ, 2АІР80В6ПА), у номінальних режимах навантаження може досягати 1–1,5 %. Така неточність є критичною для рецептур, де необхідно точно дозувати компонент протягом однієї секунди.

Математичне моделювання динамічних та енергетичних процесів в електроприводі, без урахування електромагнітних процесів у самому електродвигуні, здійснюється за допомогою Т- та Г-подібних схем заміщення та енергетичної діаграми асинхронного двигуна [4, 8]. На основі цих схем рівняння для обчислення моменту електродвигуна набуває вигляду

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{s\omega_0 \left[(R_1 - c''X_2' + c'R_2'/s)^2 + (X_1 + c'X_2' + c''R_2'/s)^2 \right]};$$

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_\mu + R_1)^2 + (X_\mu + X_1)^2}}, \quad (3.7)$$

де U_1 – напруга статора, В;

ω_0 – кутова швидкість поля статора електродвигуна при частоті f_1 підведеної напруги, рад/с;

s – ковзання асинхронного електродвигуна у відносних одиницях (в.о.);

$c' = \frac{X_1 + X_\mu}{X_\mu}$; $c'' = -\frac{R_1}{X_\mu}$; R_1, X_1 ; R_2', X_2' ; R_μ, X_μ – відповідно активний та

індуктивний опори розсіювання статора; приведені значення активного і індуктивного опорів розсіювання ротора; реактивна складова опору кола намагнічування електродвигуна, Ом.

Значення активних і індуктивних опорів приймаються на основі довідкових даних або визначаються експериментально та шляхом розрахунків режимів холостого ходу і короткого замикання. Активний опір кола намагнічування електродвигуна оцінюють приблизно, виходячи з припущення, що втрати в сталевих елементах пропорційні добутку квадрата магнітного потоку в повітряному зазорі та частоти струму першого ступеня [8].

$$P_{cm} \cong k_{cm} \Phi^2 f_n = 3I_0^2 R_{\mu n} \quad (3.8)$$

Визначивши за експериментом холостого ходу номінальні втрати в сталі та струм холостого ходу двигуна, за рівнянням (3.8) можна обчислити значення активного опору намагнічування. Таке ж значення можна отримати, якщо відомі втрати в сталі електродвигуна при номінальному режимі, шляхом розв'язання рівняння (3.8) разом із виразом для струму холостого ходу, який міститься у системі рівнянь (3.7).

Як впливає з рівняння (3.8), активний опір кола намагнічування змінюється пропорційно частоті напруги живлення. Тому при зміні частоти живлення в систему рівнянь (3.7) слід відповідним чином коригувати значення активного опору намагнічування електродвигуна.

$$R_{\mu n} \frac{f_1}{f_{1n}} = R_{\mu n} f^*.$$

Механічні втрати в електродвигуні приймаються пропорційними швидкості ротора в степені 2 [18]. Додаткові втрати приймають рівними 5 % від P_2 .

Реалізацію системи рівнянь (3.7) в MATLAB зручніше здійснювати у відносних одиницях, які повинні бути наслідком основних вихідних рівнянь асинхронного електропривода й утворювати єдину систему.

Прийемо за базові одиниці номінальні значення струму статора I_{1n} , синхронної швидкості ω_{0n} і частоти f_{1n} підведеної напруги. Вихідні співвідношення:

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1n}}; f^* = \frac{f_1}{f_{1n}}; \omega^* = \frac{\omega}{\omega_{0n}}; f^* = \frac{\omega_0}{\omega_{0n}}; U_{\bar{6}} = \omega_{0n} L_m I_{1n}; Z_{\bar{6}} = \omega_{0n} L_m;$$

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{\bar{6}}}; M = U_{\bar{6}} \cdot I_{1n} / \omega_{0n}; l_1 = \frac{L_1}{L_{1n}}; l_2 = \frac{L_2}{L_m},$$

де ω_0 – кутова швидкість поля статора електродвигуна при частоті f_1 підведеної напруги, рад/с;

L_1, L_2, L_m – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора та індуктивність кола намагнічування, Гн.

Тоді система рівнянь (3.7) у відносних одиницях матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{3u_1^2 r_2' s f^*}{f^{*2} [s(1+l_2) \cdot r_1 + (1+l_1) \cdot r_2']^2 + f^{*2} [s(l_1+l_2+l_1 l_2) - r_1 r_2']^2}; & (3.9) \\ i_2'^2 &= \frac{\mu s f^*}{3r_2'}; \quad i_2''^2 = k i_2'^2; \quad i_{2a}'' = \frac{(r_1 + r_2' / s)(i_2'')^2}{u_1}; \quad i_{2p}'' = \frac{f^*(l_1+l_2)(i_2'')^2}{u_1}; \\ i_0 &= \frac{u_1}{\sqrt{(r_1 + r_\mu f^*)^2 + (f^*)^2(1+l_1)^2}}; \quad i_{0a} = \frac{u_1(r_\mu f^* + r_1)}{(r_\mu f^* + r_1)^2 + (f^*)^2(1+l_1)^2}; \\ i_{0p} &= \frac{u_1 f^*(1+l_1)}{(r_\mu f^* + r_1)^2 + (f^*)^2(1+l_1)^2}; \quad i_{1p} = i_{0p} + i_{2p}''; \quad i_{1a} = i_{0a} + i_{2a}''; \\ i_1 &= \sqrt{i_{1a}^2 + i_{1p}^2}; \quad P^* = f^* \mu; \quad P_2^* = P^* - P^* S - P_{\text{мех.н}}^* (f^*)^{\frac{3}{2}} - P_g; \\ \cos \varphi &= \frac{i_{1a}}{i_1}; \quad P_1^* = 3u_1 i_1 \cos \varphi; \quad \mu - \mu_c = J \omega_{0н} / M_\sigma \frac{d\omega^*}{dt}; \quad s = 1 - \frac{\omega^*}{f^*}. \end{aligned}$$

Розглянемо можливості корекції зв'язних систем регулювання електроприводом за діапазонами зміни швидкості й енергетичними характеристиками.

Якщо рівняння (3.7) перевести у відносні одиниці і знехтувати відношенням $\frac{r_1}{x_\mu}$, як величиною малого значення, то залежність моменту електродвигуна від його параметрів, напруги і частоти живлення матиме вигляд:

$$\mu = \frac{3u_1^2 r_2'}{(f^* - \nu) \left([r_1 + (1+l_2)r_2'/s]^2 + [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)]^2 \right)}. \quad (3.10)$$

З цього випливає, що обертовий момент асинхронного електродвигуна може регулюватися шляхом зміни напруги живлення u_1 та її частоти f^* , а також за рахунок варіювання відносного або абсолютного ковзання ротора. У загальному випадку обертовий момент електродвигуна в диференційній формі можна записати у вигляді рівняння:

$$d\mu = \frac{\partial\mu}{\partial f^*} df^* + \frac{\partial\mu}{\partial u} du + \frac{\partial\mu}{\partial v} dv. \quad (3.11)$$

Оскільки в процесі корекції зміна координат електропривода відносно невелика, то, змінивши в (3.11) повні диференціали кінцевими приростами відповідних величин, визначимо рівняння, які характеризують види корекції, що розглядаються.

Враховуючи, що частотна корекція виконується при $u = const$,

$$\Delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial\mu}{\partial v} \Delta v, \quad (3.12)$$

а корекція за напругою для $f^* = const$,

$$\Delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial\mu}{\partial v} \Delta v. \quad (3.13)$$

Оскільки, в результаті застосування будь-якої корекції електродвигун повинен реалізовувати новий обертовий момент $\mu_1 = \mu \pm \Delta\mu$ при новій частоті обертання ротора $\nu_1 = \nu + \Delta\nu$, то

$$\frac{\partial\mu}{\partial f^*} \Delta f^* = \frac{\partial\mu}{\partial u} \Delta u. \quad (3.14)$$

Величина корекції за напругою визначається з виразу (3.13) після підстановки значень частинних похідних моменту за напругою і частотою обертання ротора, матиме вигляд:

$$\Delta u = \frac{u}{2} \left(\frac{\Delta\mu}{\mu} + \frac{B\Delta\nu}{\nu \cdot s} \right) \quad (3.25)$$

або

$$\Delta u = \frac{u}{2} \left(\frac{\Delta\mu \cdot \nu \cdot s + B \cdot \Delta\nu \cdot \mu}{\mu \cdot \nu \cdot s} \right). \quad (3.26)$$

Оскільки в процесі застосування корекції електродвигун реалізує новий обертовий момент μ_1 при частоті обертання ν_1 , це спричиняє зміну потужності на валу електродвигуна

$$\Delta P_2^* = \mu_1 v_1 - \mu v = (\mu + \Delta\mu)(v + \Delta v) - \mu v = \Delta\mu v + \mu \Delta v$$

від попереднього значення $P^* = \mu v$. З урахуванням викладеного вище вираз (3.26) запишемо у вигляді

$$\Delta\mu = \frac{u}{2} \frac{\frac{\Delta\mu v + \Delta v B \mu / s}{\Delta\mu v + \Delta v \mu} (\Delta\mu v + \Delta v \mu)}{P_2^*} = \frac{u}{2} \frac{K \Delta P_2^*}{P_2^*}, \quad (3.27)$$

де
$$K = \frac{\Delta\mu v + \Delta v B \mu / s}{\Delta\mu v + \Delta v \mu}.$$

Величина зміни частоти живлення $f_1^* = f^* + \Delta f^*$ або корекція за частотою за умови рівності вихідних механічних параметрів електродвигуна визначається за виразом (3.12) з урахуванням значень частинних похідних.

$$\Delta\mu = \frac{\mu}{(f^* - v)} A \Delta f^* - \frac{\mu B}{v s} \Delta v, \text{ звідси } \Delta f^* = \frac{(f^* - v)}{A} \frac{\Delta\mu v + \mu \Delta v B / s}{\mu v},$$

або, як і у випадку отримання виразу (3.27),

$$\Delta f^* = \frac{k(f^* - v) \Delta P_2^*}{A P_2^*} = \frac{k f_2^* \Delta P_2^*}{A P_2^*}. \quad (3.28)$$

Оцінимо енергетичні характеристики електродвигуна при цих корекціях і визначимо режими роботи електропривода, при яких доцільно застосовувати корекції за напругою або частотою.

Оскільки коефіцієнти потужності і корисної дії залежать від частоти напруги живлення та абсолютної частоти ковзання ротора, то знайдемо частинні похідні вказаних параметрів від цих змінних.

$$\frac{\partial \cos \varphi}{\partial f^*} = -\sin^2 \varphi \cos \varphi \left(\frac{(1+l_1)\eta}{f^* - v} - \frac{1}{f^*} \right). \quad (3.29)$$

Частинна похідна за абсолютною частотою ковзання

$$\frac{\partial \cos \varphi}{\partial (f^* - v)} = -\cos \varphi \sin^2 \varphi \frac{(1+l_1)\eta}{s v}. \quad (3.30)$$

Частинна похідна коефіцієнта корисної дії за частотою живлення

$$\frac{\partial \eta}{\partial f^*} = -\frac{\eta}{f \cdot s} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{f \cdot s} = -\eta \frac{1-(1+l_1)\eta}{f \cdot s}. \quad (3.31)$$

Враховуючи те, що у випадку корекції напруги $f^* = const$, а $f_2^* = var$, зміну η і

$$\cos \varphi \quad \Delta \cos \varphi_u = \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f_2^*} \Delta f_2^*; \quad \Delta \eta_u = \frac{\partial \eta}{\partial f_2^*} \Delta f_2^*.$$

При зміні напруги нова абсолютна частота ковзання буде рівною

$$f_{2_u}^* = f^* - v_1, \text{ а її зміна } \Delta f_{2_u}^* = f_{2_u}^* - f_2^* = f^* - v_1 - f_2^* + v = -\Delta v,$$

а зміна $\cos \varphi$ і ККД при корекції напругою:

$$\Delta \cos \varphi_u = \cos \varphi \sin^2 \varphi \frac{(1+l_1)\eta}{vs} \Delta v; \quad (3.33)$$

$$\Delta \eta_u = \frac{\partial \eta}{\partial f_2^*} \Delta f_2^* = \left(\frac{\eta}{f^* - v} - \frac{(1+l_1)\eta^2}{vs} \right) \Delta v. \quad (3.34)$$

При частотній корекції $f^* = var$ і $f_2^* = var$, тому зміна коефіцієнта потужності дорівнює

$$\Delta \cos \varphi = \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f_2^*} \Delta f_2^*. \quad (3.35)$$

При корекції за частотою абсолютна частота ковзання

$$f_{2_f}^* = f_1^* - v = f_1^* - v + \Delta f_1^*,$$

а її зміна

$$\Delta f_{2_f}^* = f_{2_f}^* - f_2^* = f_1^* - v + \Delta f_1^* - f_2^* + v = \Delta f_1^* - \Delta v. \quad (3.36)$$

Різниця між частотами абсолютного ковзання при корекції за частотою і напругою дорівнює

$$f_{2_u}^* - f_{2_f}^* = \Delta f^* - \Delta v + \Delta v = \Delta f^*. \quad (3.37)$$

Підставляючи значення частинних похідних і зміни абсолютної частоти ковзання, отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta \cos \varphi_f &= \sin^2 \varphi \cos \varphi \left(\frac{1+l_1}{f^* - v} \eta - \frac{1}{f^*} \right) \Delta f^* + \left(-\cos \varphi \sin^2 \varphi \frac{(1+l_1)\eta}{vs} \right) (\Delta f^* - \Delta v) = \\ &= \frac{(1+l_1)\eta}{vs} \Delta v \cos \varphi \sin^2 \varphi + \sin^2 \varphi \cos \varphi \left(\frac{(1+l_1)\eta}{f^* - v} - \frac{1}{f^*} - \frac{(1+l_1)\eta}{vs} \right) \Delta f^* = \\ &= \cos \varphi_u - \left(\frac{(1+l_1)}{v} \eta + \frac{1}{f^*} \right) \Delta f^* \cos \varphi \sin^2 \varphi. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Зміна коефіцієнта корисної дії при частотній корекції

$$\Delta \eta_f = \frac{\partial \eta}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial \eta}{\partial f_2^*} \Delta f_2^*.$$

Підставивши у це рівняння значення частинних похідних за (3.31) і (3.32), а зміну абсолютної частоти ковзання за виразом (3.36), отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta \eta_f &= \left(\frac{-\eta}{f^* - v} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{f^* - v} \right) \Delta f^* + \left(\frac{-\eta}{f^* - v} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{vs} \right) (\Delta f^* - \Delta v) = \\ &= \left(\frac{\eta}{f^* - v} - \frac{(1+l_1)\eta^2}{vs} \right) \Delta v + \left(\frac{-2\eta}{f^* - v} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{f^* - v} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{vs} \right) \Delta f^* = \\ &= \Delta \eta_u - \eta \left(\frac{2}{f^* - v} - \frac{(1+l_1)\eta}{vf^*} \right) \Delta f^*. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Порівнявши вирази для $\cos \varphi$ і η при корекції за напругою, за умови $\Delta f^* > 0$, $\Delta f_2^* > 0$, при корекції за частотою, відповідно, вирази (3.33) і (3.38) та (3.34) і (3.39), робимо висновок, що корекція за напругою енергетично більш ефективна, ніж за частотою, оскільки

$$\Delta \cos \varphi_u > \Delta \cos \varphi_f \text{ і } \Delta \eta_u > \Delta \eta_f.$$

У системах частотного керування електроприводами реалізовано обмеження струму. У зв'язку з цим, розглянемо зміну струму електродвигуна при різних видах корекції механічних характеристик електродвигуна.

Зміна фазного струму під час використання обох видів корекції залежить від зміни напруги живлення і повного опору фази електродвигуна.

При корекції за напругою $u = \text{var}$ і $z = \text{var}$, оскільки змінюється f_2^*

$$\Delta i_u = \frac{\partial i}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial i}{\partial z} \Delta z_u.$$

Знайдемо частинні похідні загального опору електродвигуна z при зміні частоти живлення і частоти абсолютного ковзання

Зміна струму при корекції за напругою (3.40) з урахуванням (3.24) матиме вигляд

$$\Delta I_u = I \left(\frac{A \Delta f^*}{2 f_2^*} - \frac{\Delta z_u}{z} \right). \quad (3.45)$$

При частотній корекції зміна струму залежить тільки від зміни опору електродвигуна

$$\Delta i_f = \frac{\partial i}{\partial z} \Delta z_f = -i \frac{\Delta z_f}{z} = i \left\{ \left[(1 + l_1) \eta \cos^2 \varphi - s \cdot \sin^2 \varphi \right] \frac{\Delta f^*}{f_2^*} - \frac{\Delta z_u}{z} \right\}. \quad (3.46)$$

Різниця зміни струму при корекції за напругою і частотою

$$\begin{aligned} \Delta i_u - \Delta i_f &= i \left\{ \frac{A \Delta f^*}{2 f_2^*} - \frac{\Delta z_u}{z} - \left[(1 + l_1) \eta \cos^2 \varphi - s \cdot \sin^2 \varphi \right] \frac{\Delta f^*}{f_2^*} + \frac{\Delta z_u}{z} \right\} = \\ &= i \left[\frac{A}{2} - (1 + l_1) \eta \cos^2 \varphi + s \cdot \sin^2 \varphi \right] \frac{\Delta f^*}{f_2^*}. \end{aligned}$$

Підставивши у цей вираз значення A за (3.20) і врахувавши (3.22), отримаємо

$$\Delta i_u - \Delta i_f = -i \Delta \frac{\Delta f^*}{2(f^* - \nu)} = -i \frac{K \Delta P_2^*}{2 \Delta P_2^*}. \quad (3.47)$$

Із (3.39) видно, що при $\Delta P^* > 0$ корекція за напругою призводить до меншої зміни струму електродвигуна.

На основі наведених вище співвідношень для оцінки енергетичних характеристик електродвигунів при зміні механічних характеристик шляхом регулювання напруги та частоти були проведені розрахунки для приводних механізмів дозаторів типів АІР80В4УЗ (1413 об/хв) та 2АІР80В6ПА (1387 об/хв), при цьому за основу брали більш круту характеристику. Результати показали, що для двигуна АІР80В4УЗ застосування корекції за напругою призводить до збільшення ККД на 3,4 % та коефіцієнта потужності – на 6,4 %.

Таким чином, за умови $\Delta R_2 > 0$ регулювання напруги дозволяє досягти вищих значень коефіцієнта потужності та корисної дії електродвигуна, при цьому струм не перевищує номінального рівня.

При збільшенні навантаження на електропривод та збереженні незмінним потокозчеплення ротора межі зміни швидкості визначаються номінальною величиною ковзання. Оскільки жорсткість механічної характеристики електроприводу прямо пропорційна активному опору ротора та обернено пропорційна квадрату його потокозчеплення, впровадження додатного зворотного зв'язку за моментом суттєво підвищує жорсткість характеристики, розширюючи діапазон регулювання швидкості.

Було обґрунтовано метод корекції жорсткості механічних характеристик для зчеплених електроприводів. Встановлено, що виходячи з критерію максимізації енергетичних показників (ККД та коефіцієнта потужності), регулювання напругою є більш ефективним при підвищеному навантаженні, тоді як при зниженому навантаженні доцільніше застосовувати частотну корекцію. Так, підвищення навантаження з використанням корекції напругою дозволяє збільшити ККД на 3,4 % та коефіцієнт потужності на 6,4 %, тоді як частотна корекція в цих умовах призводить до зниження зазначених показників

3.3 Моделювання інтелектуальної системи управління потоковою лінією

Керуючий комплекс технологічного процесу виробництва двоскладових композитних паливних брикетів повинен забезпечувати можливість оперативної корекції складу шихти з метою запобігання надмірному зволоженню компонентів та мінімізації залишкової золи у готовому виробі.

До основних вимог до системи зчепленого дозування складових твердопаливних гранул належать:

час корекції не перевищує 7 секунд;

відхилення встановленого рівня вологості суміші від цільового у стабілізованому стані не перевищує 5 %;

перевищення заданого рівня вологості – не більше 3 %.

Головне завдання управляючої системи полягає у підтриманні заданого рівня вологості суміші на виході змішувального апарату за умов зміни вологості та обсягів подачі вихідних компонентів.

Необхідний рівень вологості досягається шляхом змішування двох надхідних фракцій: пресованої соломи та подрібнених кукурудзяних качанів. Під час роботи змішувача контролюються об'ємні потоки обох компонентів за допомогою регулювання пропускної здатності дозаторів Q_1 та Q_2 , при цьому сумарна продуктивність на виході змішувача Q_3 підтримується постійною.

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (3.48)$$

У сталому режимі значення вологості w_3 і продуктивності дозаторів Q_3 зв'язані наступними залежностями:

$$Q_1(w - w_1) + Q_2(w - w_2) = 0 \quad (3.49)$$

$$w = (Q_1 w_1 + Q_2 w_2) / Q \quad (3.50)$$

При заданій вологості w_3 і продуктивності Q_3 на виході змішувача необхідні продуктивності дозаторів кукурудзи Q_1 та соломи Q_2 обчислюються згідно залежностей:

$$= \frac{Q_3(w_3 - w_2)}{w_1 - w_2}; \quad Q_2 = \frac{Q_3(w_1 - w_3)}{w_1 - w_2} \quad (3.51)$$

Структурна схема системи керування вологістю та продуктивністю суміші представлена на рисунку 3.7, де підсистема 1 реалізовує залежність (3.50) – визначення кінцевої вологості, а підсистема 2, яка безпосередньо під'єднується до регуляторів, що визначають оптимальні значення Q_1 та Q_2 , – залежності (3.51).

Вологості кукурудзи та соломи на вході системи позначені, відповідно, $w_{1\epsilon}$ та $w_{2\epsilon}$, а виміряні – w_1 та w_2 .

Динамічні властивості датчиків вологості компонентів (кукурудзи та соломи) описуються передавальною функцією

$$G_1(s) = G_2(s) = \frac{a}{s + a} \quad (3.52)$$



Рисунок 3.7. Структурна схема системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет

У сталому режимі, при $w_1 = w_{1\epsilon}$ і $w_2 = w_{2\epsilon}$ маємо:

$$Q_{1p} = \frac{Q_3(w_3 - w_{2\epsilon})}{w_{1\epsilon} - w_{2\epsilon}}; \quad Q_{2p} = \frac{Q_3(w_{1\epsilon} - w_3)}{w_{1\epsilon} - w_{2\epsilon}} \quad (3.53)$$

$$w_p = (Q_{1p}w_{1\epsilon} + Q_{2p}w_{2\epsilon}) / Q_3 \quad (3.54)$$

Інерційні властивості датчика вологості суміші і динаміка встановлення вологості на виході змішувача з урахуванням часу проходження сировини від виконавчих механізмів до датчика вологості суміші характеризується передавальною функцією

$$G_0(s) = \frac{b}{s+b} e^{-r \cdot s} \quad (3.55)$$

Динамічні властивості виконавчих механізмів, в якості яких використовуються двигуни, керуючі заслінками, описуються передавальною функцією

$$G(s) = \frac{a}{s(s+c)} \quad (3.56)$$

Аналіз співвідношень продуктивності дозаторів (3.53), необхідних для підтримання заданої продуктивності на виході змішувача при встановлених значеннях вологості w_1 та w_2 , дозволяє визначити коефіцієнт пропорційності k_{kk} . Оптимальні значення цього коефіцієнта перебувають у діапазоні від 1 до 5 (рис. 3.8).

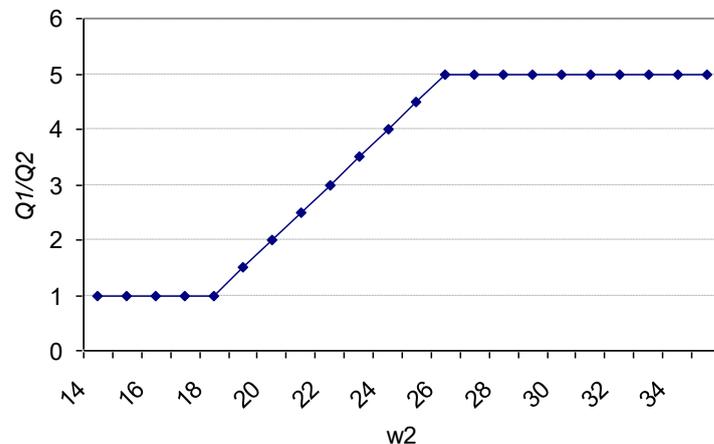


Рисунок 3.8. Співвідношення продуктивності для значень вологості $w_1 = 14\%$; $w_2 = 14\text{...}35\%$

Дослідження технологічного процесу виробництва паливних гранул показало, що основні входні параметри, зокрема рівень вологості компонентів суміші (подрібнені кукурудзяні качани та солома) та пропускна здатність

дозаторів, проявляють виражену нелінійність і нестабільність у часі. Встановлення точних залежностей між цими параметрами за допомогою традиційних аналітичних методів є практично неможливим. У таких умовах найбільш доцільним шляхом підвищення ефективності управління автоматизованими електромеханічними системами стає використання інтелектуальних методів. Серед них особливо поширеною для розробки адаптивних алгоритмів регулювання є технологія нечіткого управління (Fuzzy-control).

Впровадження нечітких систем дозволяє спростити побудову складних функціональних залежностей, уникаючи громіздких математичних обчислень. Нейронечіткі мережі поєднують досвід та знання експертів із можливістю самонавчання, що значно розширює потенціал у моделюванні та контролі нелінійних динамічних систем. Крім того, такі інтелектуальні алгоритми скорочують час на створення моделей, забезпечуючи при цьому високий рівень точності [9].

Принцип роботи нечіткого регулятора базується на простих мовних правилах, а не на класичних математичних формулюваннях. Для апробації регулятора використано апарат гібридних мереж, реалізований у середовищі MATLAB за допомогою інструментарію ANFIS.

З огляду на взаємозалежність параметрів, для мінімізації похибок управління дозуванням була запропонована структура з трьох незалежних підсистем, кожна з яких керується окремим регулятором:

Щоб створити fuzzy-регулятор НР, було використано два вхідні лінгвістичні параметри: рівень вологості кукурудзи, w_k – охоплює 5 термів, з діапазоном визначення від 10 до 14 одиниць; рівень вологості соломи, w_s – включає 3 терми, з діапазоном визначення від 14 до 35 одиниць;

Вихідним параметром є коефіцієнт пропорційності k , який може набувати значень у межах $[0.5, 5]$ та встановлює масовий розподіл елементів суміші. У цьому контексті більш доречним є застосування гібридної мережі, що розробляється згідно з алгоритмом Sugeno (рис. 3.9).

Моделювання було здійснено, використовуючи три набори даних: для

тренування (Training data – файл wk_ws_k_d.dat), для тестування (Testing data – файл test_k.dat) та для верифікації (Checking data – файл check_k_d.dat) (рис. 3.10).

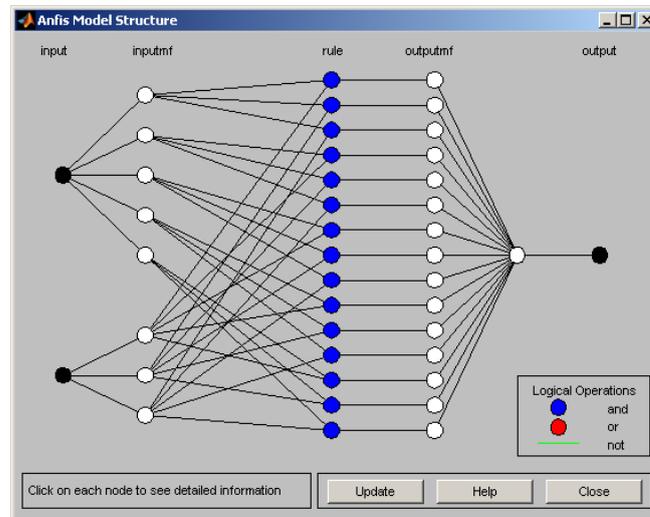


Рисунок 3.9. Структура Anfis-моделі типу Sugeno для знаходження коефіцієнта масового співвідношення компонентів суміші k

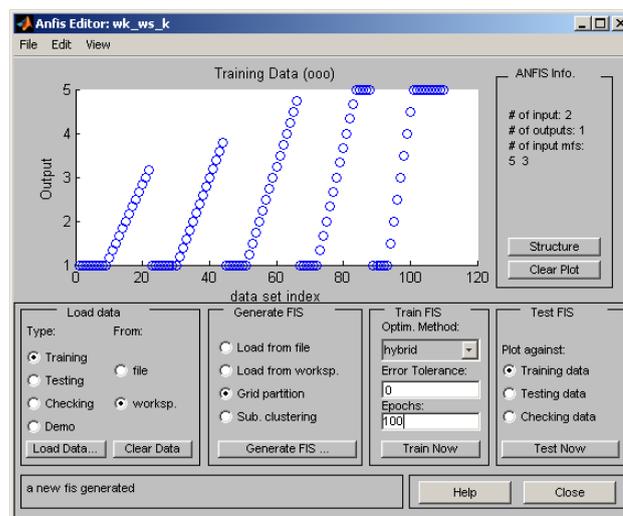


Рисунок 3.10. Розподіл даних для навчання нечіткої системи НР

Для підготовки експертної системи було використано сто автоматизованих електроприводів, при цьому середньоквадратична помилка становила 0,2248. Після валідації на контрольному наборі даних та оптимізації архітектури мережі шляхом підбору оптимальної кількості нейронів помилка знизилася до 0,19978. Спостережувані залежності виявилися явно нелінійними (рис. 3.11). Порівняння результатів традиційного моделювання з даними гібридної мережі підтвердило правильність висновків.

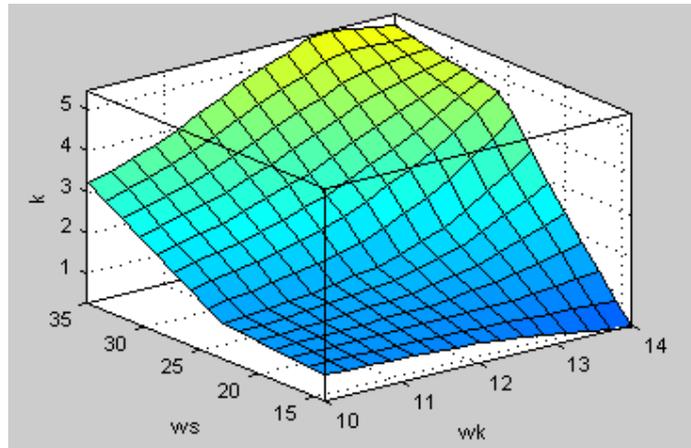


Рисунок 3.11. Поверхня, що відтворюється навченою гібридною мережею

На основі поданих вище результатів досліджень у середовищі MATLAB розроблено імітаційну модель системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет з використанням нейроконтролера для здійснення керування технологічним процесом (рис 3.12). Структуру нечіткої системи в середовищі Simulink наведено у додатку Б3.

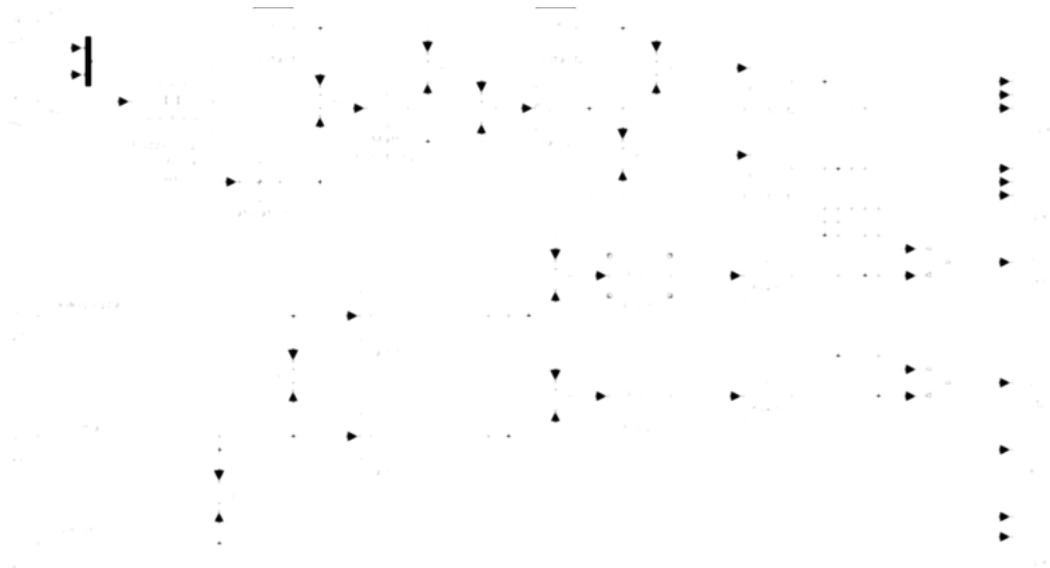


Рисунок 3.12. Імітаційна модель системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет

На рисунку 3.13 наведено результати моделювання, що демонструють варіацію продуктивності дозаторів при зміні швидкості їхніх робочих вузлів у межах заданого параметра k та вологості суміші w . При цьому вологість подрібнених кукурудзяних качанів зберігається на рівні $w_1=12\%$, а вологість соломи w_2 змінюється від 14% до 35% . Розглянуто два варіанти: без регулювання швидкості дозаторів та з її корекцією на основі фактичних значень продуктивності Q_1, Q_2, Q_3 .

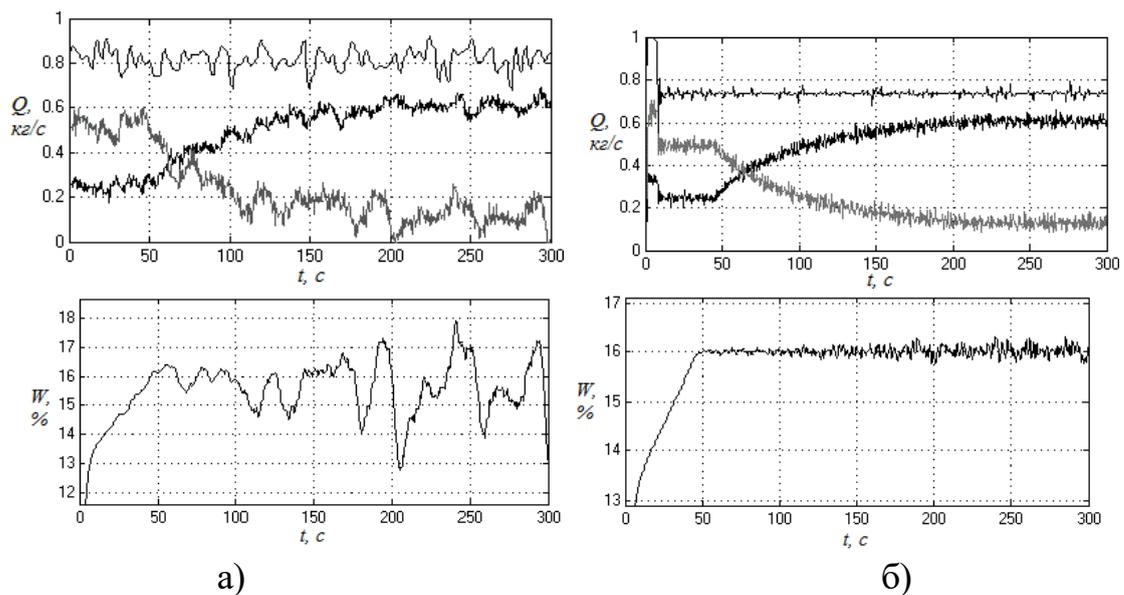


Рисунок 3.13. Дисперсії продуктивності дозаторів Q_1, Q_2, Q_3 і вологості суміші w : а) без корекції, б) з корекцією швидкостей робочих органів дозаторів

Розроблено інтелектуальні алгоритми управління лінією гранулювання твердого палива, у яких продуктивність гвинтового дозатора Q_3 визначає загальну продуктивність дозаторів Q_1 та Q_2 . Для обчислення коефіцієнта масового співвідношення компонентів суміші k створено нечіткий контролер типу Сугено, що використовує як вхідні дані поточні показники вологості складових w_1, w_2 та верхню допустиму вологість суміші w^* . Середньоквадратичне відхилення навченої системи не перевищує $0,2\%$.

Математичне моделювання підтвердило ефективність нечіткого регулювання: система забезпечує швидкий вихід на стабільний рівень заданої вологості на випуску змішувача (час становить 10 секунд), а перевищення встановленого значення не перевищує $2,5\%$. Таким чином, застосування нечітких регуляторів є доцільним та перспективним.

Інтелектуальна система синхронного дозування дозволяє ефективно регулювати рецептуру суміші, вирішуючи проблеми надмірної вологості соломи та зниження зольності кінцевого продукту. Моделювання технологічного процесу лінії гранулювання дозволило проаналізувати швидкісні режими роботи електроприводів дозаторів та екструдера, а також розробити алгоритми керування, які базуються на інтелектуальних методах для синхронного дозування компонентів суміші.

За результатами досліджень визначено залежності моменту асинхронного двигуна екструдера від пропускної здатності гвинтового дозатора та струму статора в умовах ручного та автоматичного управління. Це дало змогу оптимізувати об'єм бункера змішувача і значно знизити потужність приводного електродвигуна з 3 кВт до 0,25 кВт. Запропоновано регулювати продуктивність гвинтового дозатора на основі струму статора екструдера, що дозволило скоротити енергоспоживання на 20 %.

Досліджено, що корекція механічних характеристик синхронних електроприводів по напрузі, виходячи з умов максимальних енергетичних показників, дозволяє підвищити ККД на 3,4 % та коефіцієнт потужності на 6,4 %. Розроблено модель нечіткого контролера для інтелектуальної системи синхронного дозування компонентів твердопаливних гранул: середньоквадратична похибка контролера не перевищує 0,2 %, час виходу на стабільну вологість становить до 10 секунд, а перерегулювання — не більше 2,5 %.

Висновки до розділу 3

Запропонована інтелектуальна система керування процесом виробництва паливних пелет дозволяє ефективно коригувати склад суміші у широкому діапазоні, що дає змогу вирішувати проблеми підвищеної вологості соломи та зниженої шлаковості кінцевого продукту.

Використання бункера-змішувача з мінімально необхідним об'ємом, що забезпечило десятикратне зменшення потужності електродвигуна, у поєднанні з регулюванням пропускної здатності шнека-дозатора на основі номінального струму статора асинхронного двигуна шнека-екструдера під високим тиском дозволило знизити загальні енерговитрати технології в середньому на 20 %

Було обґрунтовано метод корекції жорсткості механічних характеристик для зчеплених електроприводів. Встановлено, що виходячи з критерію максимізації енергетичних показників (ККД та коефіцієнта потужності), регулювання напругою є більш ефективним при підвищеному навантаженні, тоді як при зниженому навантаженні доцільніше застосовувати частотну корекцію. Так, підвищення навантаження з використанням корекції напругою дозволяє збільшити ККД на 3,4 % та коефіцієнт потужності на 6,4 %, тоді як частотна корекція в цих умовах призводить до зниження зазначених показників

Досліджено, що корекція механічних характеристик синхронних електроприводів по напрузі, виходячи з умов максимальних енергетичних показників, дозволяє підвищити ККД на 3,4 % та коефіцієнт потужності на 6,4 %. Розроблено модель нечіткого контролера для інтелектуальної системи синхронного дозування компонентів твердопаливних гранул: середньоквадратична похибка контролера не перевищує 0,2 %, час виходу на стабільну вологість становить до 10 секунд, а перерегулювання — не більше 2,5 %.

РОЗДІЛ 4

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Розробка способу та пристрою контролю продуктивності дозаторів

Огляд наявної науково-технічної літератури показує, що наразі не існує єдиної універсальної методики для створення інтелектуальних систем керування. Такі системи мали б забезпечувати як моделювання, так і аналіз різнорідних типів даних — кількісних, нечітких, неповних чи неоднозначних. Крім того, їм бракує властивостей самонавчання на основі накопиченого досвіду та здатності адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі чи умовах роботи об'єкта керування. Найбільш перспективним напрямом у розробці інтелектуальних систем управління є інтеграція методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, нечіткої логіки та генетичних алгоритмів.

Враховуючи зазначене, комплекс заходів, що включає дослідження та класифікацію швидкісних режимів енергоємних технологій, розробку адекватних моделей, вдосконалення теоретичних основ управління, надання системам інтелектуальних властивостей та оцінку ефективності їх впровадження, дозволяє чітко визначити необхідні діапазони регулювання та параметри керуючих систем на основі регульованих електроприводів. Впровадження таких систем сприяє зниженню питомих енерговитрат у процесі виробництва та переробки сільськогосподарської продукції.

За результатами експлуатаційних випробувань та серії експериментів було встановлено, що точність дозування та кінцева якість продукту значною мірою залежать від фізико-механічних властивостей матеріалів і їх вологості. Під час завантаження можуть виникати непередбачувані збурення, спричинені, наприклад, прилипанням або неоднорідністю матеріалу, що веде до передозування або перерегулювання залежно від заданих критеріїв. Значні похибки дозування погіршують якість продукту та підвищують витрати сировини, тоді як надмірно жорсткі вимоги до точності можуть спричинити нестабільність

регулювання та часті переключення потужних електродвигунів, що призводить до додаткового енергоспоживання та швидшого зношування обладнання.

Для визначення фактичної пропускної здатності проточних дозаторів біомаси нами розроблено апаратну реалізацію та методику вимірювання на основі ультразвукового бар'єру (рис. 4.1). Контрольований потік матеріалу піддається ультразвуковому опроміненню під час вільного падіння з живильника, формуючи ефективний ультразвуковий коридор між випромінювачем та приймачем (рис. 4.2).

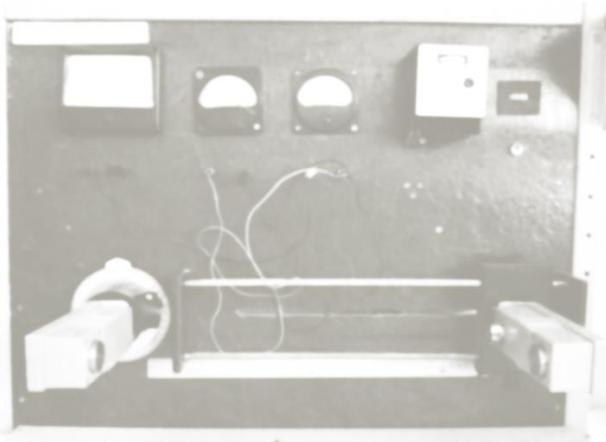


Рисунок 4.1. Стенд для дослідження ультразвукового витратоміра

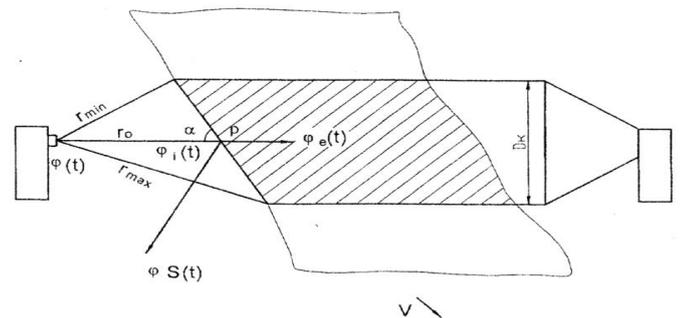


Рисунок 4.2. Схема вимірювання щільності сипкого матеріалу ультразвуком

Частота ультразвукового випромінювання для контролю потоку матеріалу була обрана рівною 44 кГц, що відповідає розмірам частинок подрібненої біомаси (1–50 мм) та забезпечує ефективне проходження акустичних хвиль через матеріал із затуханням, пропорційним його кількості [9].

Потік сипкої маси розглядається як стаціонарний випадковий процес (п. 2.3), тобто зміна потенціалу хвилі, що проходить крізь потік, є ймовірнісним процесом зі статистичними характеристиками, які відрізняються від характеристик самого потоку, але теж залишаються стаціонарними. У зваженому стані потік сипкої маси моделюється як сукупність елементарних частинок із щільністю ρ , що рухаються зі швидкістю V у ультразвуковому коридорі з параметром D_k . При цьому потік спрямований під кутом α до вектора поширення ультразвукових хвиль у межах коридору з мінімальним та максимальним

значенням r_{\min} і r_{\max} . Якщо визначити потенціал хвилі на

п'єзоелементі $\varphi(t)$, на границі розподілу повітря-матеріал $\varphi_i(t)$ на виході потоку $\varphi_e(t)$, а відбитий – $\varphi_s(t)$, то можна записати:

$$\varphi_e(t) = \varphi_i(t) - \varphi_s(t) \quad (4.1)$$

Із (4.1) видно, що чим менший потенціал відбитої хвилі $\varphi_s(t)$, тим вища ефективність проходження інформативного сигналу.

Потенціал хвилі на поверхні потоку сипкої маси згідно з [78] дорівнює:

$$\varphi_i(t) = \varphi \left[t - \frac{r(t)}{c} \right] \cdot \frac{A}{r_0} \quad (4.2)$$

де c – швидкість ультразвуку в середовищі;

t – час;

A – нормативний множник;

r_0 – відстань "випромінювач – матеріал", що контролюється за вектором поширення хвиль.

Під час рівномірного руху потоку маси $V = \text{const}$ (у вільному падінні), розклавши функцію одержимо

$$\frac{r(t)}{c} = \frac{r}{c} + \frac{V}{c} \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + \quad (4.3)$$

Підставивши вираз (4.3) у рівність (4.2), знайдемо

$$\varphi_i(t) = \varphi \left[t - \frac{r}{c} - \frac{V}{c} \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \frac{A}{r_0} \quad (4.4)$$

Потенціал відбитої хвилі згідно з запишемо у вигляді

$$\varphi_s(t) = \int_{r_{\min}}^{r_{\min} + D_k \operatorname{tg} \alpha} \varphi \left[\left(t - \frac{2r}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right] \cdot \rho \frac{1}{r_0 \operatorname{tg} \alpha} dr \quad (4.5)$$

$$\varphi_s(t) = \frac{\rho}{r_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \int_{r_{\min}}^{r_{\min} + D_k \operatorname{tg} \alpha} \varphi \left[\left(t - \frac{2r}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right] dr \quad (4.6)$$

Оскільки $\varphi(t)$ – випадковий стаціонарний процес, то для енергетичного опису процесу проходження сигналів у потоці сипкої маси знайдемо взаємозв'язок між енергетичними спектрами відбитої і спадної хвиль

Відповідно до (4.6) визначимо автокореляційну функцію і енергетичний спектр відбитої від потоку хвилі

$$\varphi_s(t+\tau) = \frac{1}{r_0 \operatorname{tg} \alpha} \int_{r_{\min}}^{r_{\min} + D_k \operatorname{tg} \alpha} \varphi \left[\left(t - \frac{2r}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right] \rho dr, \quad (4.7)$$

$$\varphi_s^*(t) = \frac{1}{r_0 \operatorname{tg} \alpha} \int_{r_{\min}}^{r_{\min} + D_k \operatorname{tg} \alpha} \varphi^* \left[\left(t - \frac{2r}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right] \rho^* dr, \quad (4.8)$$

Тоді автокореляційна функція виглядатиме так:

$$R_{ss}(\tau) = \frac{1}{r_0 \operatorname{tg} \alpha} \int_{r_{\min}}^{r_{\min} + D_k \operatorname{tg} \alpha} \int \rho \rho^* R_{ii} \left\{ \left[t - \frac{2r}{c} (r - r_1) \right] \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right\} d\rho dr_1, \quad (4.9)$$

де

$$R_{ji} \left\{ \left[\tau - \frac{2}{c} (r - r_1) \right] \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right\} = \left\{ \varphi \left[\left(t + \tau - \frac{2r}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right] \right\} \times \varphi^* \left[\left(t - \frac{2r_1}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right]. \quad (4.10)$$

Використовуючи теорему Вінера-Хінчина визначимо, що спектральна щільність потужності відбитого сигналу дорівнює

$$S_s(\omega) = \frac{\rho}{r_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ii} \left\{ \left[\tau - \frac{2}{c} (r - r_1) \right] \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right\} \cdot e^{i\omega\tau} d\tau \quad (4.11)$$

Замінивши змінну інтегрування в (4.11) одержимо

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ii} \left\{ \left[\tau - \frac{2}{c} (r - r_1) \right] \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right\} \cdot e^{i\omega\tau} d\tau = \frac{e^{-i\omega \frac{2(r-r_1)}{c}}}{1 - \frac{V}{c}} S_i \left(\frac{\omega}{1 - \frac{V}{c}} \right), \quad (4.12)$$

Підставивши значення, запишемо

$$S_s(\omega) = \frac{\rho^2}{r_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \left(\frac{1}{1 - \frac{V}{c}} \right) S_i \left(\frac{\omega}{1 - \frac{V}{c}} \right). \quad (4.14)$$

Враховуючи, що у нашому випадку $c \gg V$, одержимо

$$S_s(\omega) = \frac{\rho^2 c \operatorname{tg}^2 \alpha}{r_0^2} \times S(\omega). \quad (4.15)$$

Таким чином, співвідношення (4.15) доводить слушність обраного методу фіксації обсягу проходження складових твердопаливних гранул у зоні їх вивантаження із механізмів дозування, коли густина інтерфейсу "повітряне середовище – речовина" є найменшою, а відтак, і потужність відбитого сигналу є найменшою. З огляду на те, що при непередбачуваній орієнтації елементів біомаси досягнення умови $\alpha = 90^\circ$ на мінімізацію $S(\omega)$ є надзвичайно непростим завданням, на рівні практичної реалізації необхідно прагнути, аби вісь спрямування "генератор – приймач" утворювала прямий кут із напрямком руху потоку матеріалу.

Випробування створеного акустичного лічильника об'єму здійснювалися як на спеціально сконструйованій установці (рис. 4.1), так і безпосередньо на производственому агрегаті, у точці виведення подрібненої соломи із безперервно працюючого дозатора. Було проаналізовано кореляцію між рівнем напруги на вході приймача акустичної пари та обсягами подачі дозатора $u_n = f(Q)$ при трьох величинах вологості стебельної маси – 10, 20, 35 % (рис. 4.3).

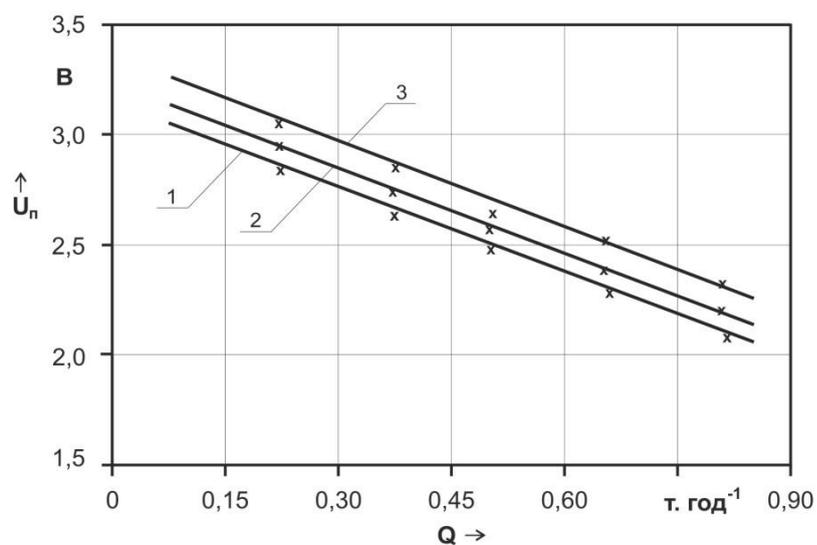


Рисунок 4.3. Залежність напруги приймача та продуктивності дозатора від вологості подрібненої соломи – 10, 20, 35 %

Випробування показали, що створений прилад для вимірювання витрати функціонує надійно протягом усього робочого діапазону дозувального механізму. Досягнуто зменшення щільності контакту між повітрям і сипким матеріалом, що підвищує ефективність акустичного контролю потоку біомаси та покращує динамічні характеристики вимірювань. Отримані результати демонструють чітку залежність рівня вихідного сигналу витратоміра від пропускної здатності дозатора в робочому режимі.

Коливання вологості подрібненої соломи в межах 10–35 % відбуваються передбачувано та лінійно, що дозволяє застосовувати акустичний прилад для корекції показників витратоміра з урахуванням вологості. Проведені розрахунки підтвердили, що похибка визначення продуктивності як секційних, так і шнекових дозаторів у робочій зоні не перевищує 5 %, при цьому чутливість пристрою та його оперативна реакція залишаються на високому рівні.

4.2 Розробка нового операційного методу виробництва твердопаливних пелет

Розробка нового операційного методу для технологічної лінії спрямована на виробництво твердопаливних пелет із щорічно відновлюваної біомаси та має практичне застосування у агропромисловому та енергетичному машинобудуванні.

Традиційний процес виробництва пелет передбачає подачу рослинних залишків з вологістю 4–12 % і розміром частинок 2–10 мм, їх стиснення, формування та різання, а також додаткову термічну обробку. Формування відбувається безперервно, одночасно із термообробкою при температурі 150–250 °С, що змінюється залежно від типу сировини. Основні недоліки цієї технології – складна конструкція змішувально-пресувального апарату та значні енерговитрати на попереднє сушіння сировини до промислово прийняттого рівня вологості.

Найближчим аналогом є метод виробництва пелет із вуглецевих матеріалів, який включає підготовку сировини в дисковому екструдері при 70–100 °С, гранулювання та подальше сушіння на повітрі протягом 3–5 днів при 18–25 °С.

Недоліками цього підходу є необхідність точного регулювання температури процесу залежно від типу сировини та вмісту смолистих компонентів, що подовжує виробничий цикл і збільшує вміст золи в пелетах.

Запропонований метод спрямований на вдосконалення технології виробництва гранул шляхом точного дозування двох компонентів – суміші соломи та подрібнених кукурудзяних качанів – для забезпечення стабільних показників якості: щільності гранул, вмісту золи та лігніну.

Контроль якості пелет забезпечується за рахунок точного дозування компонентів суміші у співвідношенні від 1/1 до 1/5, що враховує змінну вологість соломи (8–35 %) та кукурудзяних качанів. Після цього суміш ефективно переміщується і пресується на технологічній лінії з регульованим електроприводом та інтелектуальною системою управління.

Схема запропонованого методу (рис. 4.4) включає: дозатор меленої соломи (1) та дозатор мелених кукурудзяних качанів (2); циклонний блок для накопичення суміші (3); прес із бункером (4); регульовані електродвигуни для дозатора меленої соломи (8), дозатора кукурудзяних качанів (9) та технологічного преса (10); датчики масової витрати та вологості меленої соломи (5) та масової витрати мелених кукурудзяних качанів (6); блок керування технологічним процесом (7).

Процес виробництва твердопаливних пелет здійснюється наступним чином. Подрібнена солома надходить у живильник-дозатор 1, а подрібнені кукурудзяні качани – у живильник-дозатор 2. Потоки обох компонентів контролюються датчиками вологості та масової витрати соломи (5) та мелених качанів (6), які передають інформацію до блоку керування (7). Блок аналізує характеристики потоків та регулює роботу асинхронних двигунів живильників (8 і 9), забезпечуючи точне порційне дозування компонентів у співвідношенні від 1:1 до 1:5.

Потоки суміші направляються у накопичувач (3) для інтеграції та гомогенізації, після чого маса надходить у завантажувальний бункер преса (4). Електродвигун преса (10), керований сигналом від блоку (7), здійснює компресію суміші при температурі 150 °С, що дозволяє отримати пелети з вологістю 14,5–

15,5 %, теплотворною здатністю 4400–4500 ккал/кг та об'ємною вагою 1000–1100 кг/м³.

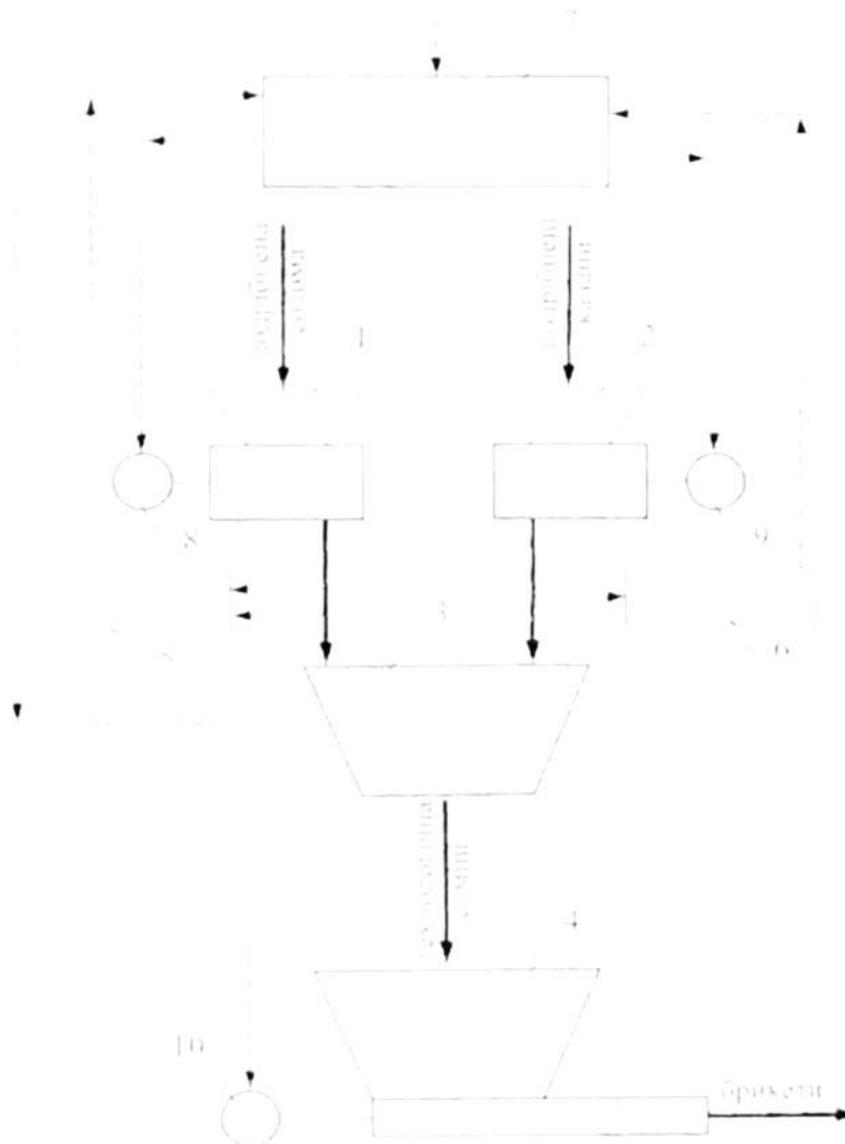


Рисунок 4.4. Структура автоматизованої технологічної лінії виробництва двокомпонентного твердого твердопаливних пелет

Запропонована технологія виробництва пелет забезпечує зниження енергоспоживання за рахунок виключення етапу сушіння, застосування узгодженої системи дозування на базі регульованих електроприводів, а також покращує якісні характеристики продукту: підвищує щільність, зменшує вміст золи та лігніну.

4.3 Розробка інтелектуальної системи для управління виробничим потоком

Один із перспективних напрямів модернізації виробництва паливних пелет та підвищення їхніх енергетичних і якісних характеристик полягає у впровадженні інтелектуальних систем управління технологічним процесом. Такі системи спираються на високоточні первинні датчики та мікропроцесорні модулі для обробки даних, які формують керуючі сигнали відповідно до алгоритмів, оптимально адаптованих під конкретні технологічні вимоги.

Основні функції системи контролю включають автоматичне регулювання швидкості подачі компонентів суміші залежно від їх вологості, безперервний моніторинг контрольованих змінних, фіксацію перевищень допустимих значень дозування та відображення актуальних показників у режимі реального часу. Крім того, система формує базу даних змін вхідних параметрів і результативних характеристик з довільно встановленою періодичністю.

Функціонування апаратно-програмного комплексу умовно поділяється на три етапи:

Основна фаза: встановлення початкових значень регульованих параметрів із визначеним кроком і послідовністю; отримання поточних значень контрольованих характеристик сировини за допомогою сенсорів; коригування параметрів регуляторів при відхиленні контрольованих величин від заданих уставок; збереження даних про динаміку технологічного процесу у вигляді текстового файлу на електронному носії; відображення актуальних значень контрольованих параметрів на моніторі.

Додаткова фаза: конфігурування робочих режимів системи та введення необхідної інформації; відслідковування аномальних або випадкових значень контрольованих параметрів; генерація сповіщень при виході параметрів за встановлені межі; налаштування візуального інтерфейсу для роботи в різних режимах; виведення контрольованих параметрів на монітор або принтер.

Технічне обслуговування апаратури: перевірка працездатності всіх компонентів системи; програмне керування периферійним обладнанням

контролера.

Відповідно до поставленого завдання, автоматизована система контролю узгодженого дозування компонентів для виробництва твердопаливних пелет здійснює аналіз вологості сировини, продуктивності дозаторів і струму електродвигуна шнекового екструдера. На основі цих даних система виконує керуючі дії для підтримки параметрів на рівні, встановленому у програмному забезпеченні. Структурна схема імітаційної моделі контролера для цієї системи наведена на рисунку 4.5

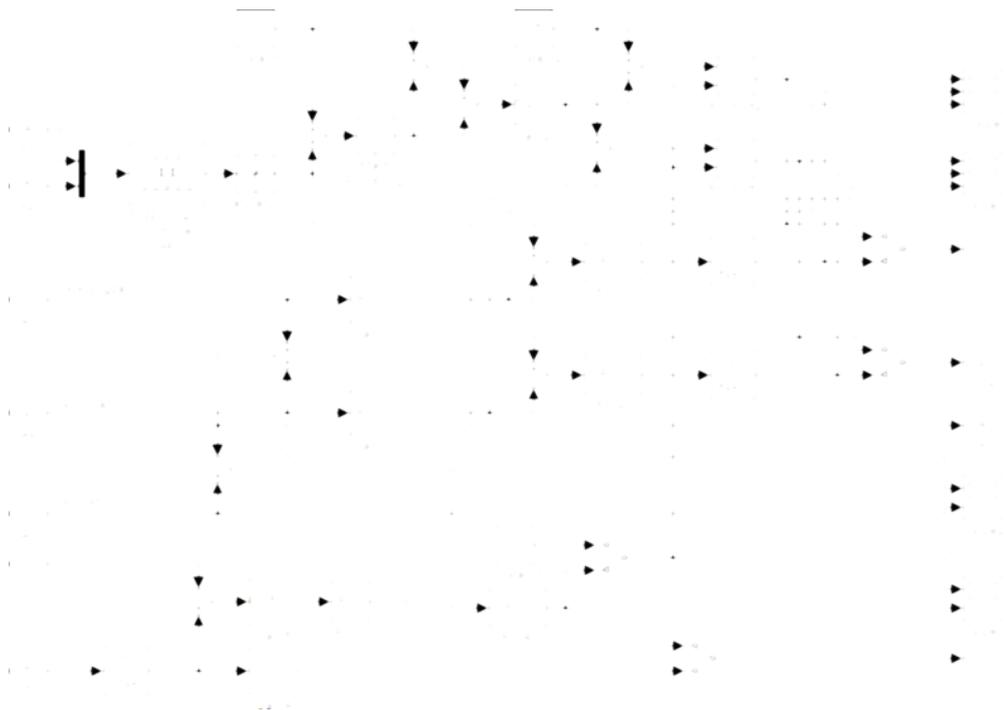


Рисунок 4.5. Імітаційна схема контролера інтелектуальної системи керування потоковою лінією виробництва твердопаливних пелет

В умовах сучасного розвитку децентралізованих систем управління доцільно структурувати таку систему у вигляді двох підпорядкованих рівнів:

Контролерний блок, який відповідає за зв'язок із керованими елементами та первинну обробку отриманих даних.

Персональний комп'ютер (ПК), призначений для детального аналізу, опрацювання, візуалізації даних та їхнього архівування у спеціалізованих базах.

Передача інформації між контролером та ПК рекомендується здійснювати через послідовні інтерфейси, такі як USB 2.0 або RS-232, із застосуванням апаратної гальванічної розв'язки для запобігання негативного впливу зовнішніх

перешкод.

Загальна архітектура контролера включає: схеми підсилення аналогових сигналів; маршрутизатор каналів; аналого-цифровий перетворювач (АЦП); вузол управління та попередньої обробки даних; спеціалізовані інтерфейсні плати для зв'язку з ПК та графічного відображення інформації; допоміжні елементи, зокрема панель індикації з можливістю встановлення робочих параметрів та блок живлення.

Оптимальним рішенням є виконання контролера як автономного, компактного виносного пристрою, що дозволяє розміщувати його безпосередньо біля об'єкта моніторингу. Це скорочує довжину трас підключення сенсорів і зменшує вплив електромагнітних перешкод.

До складу системи керування потоковою лінією виробництва двокомпонентних твердопаливних пелет входять також виконавчі механізми — частотно-регульовані електроприводи дозаторів, що забезпечують плавне регулювання продуктивності.

Враховуючи вказані вимоги, розроблено структурну схему інтелектуальної мікропроцесорної системи керування потоковою технологічною лінією виробництва двокомпонентних твердопаливних пелет (рис. 4.6).

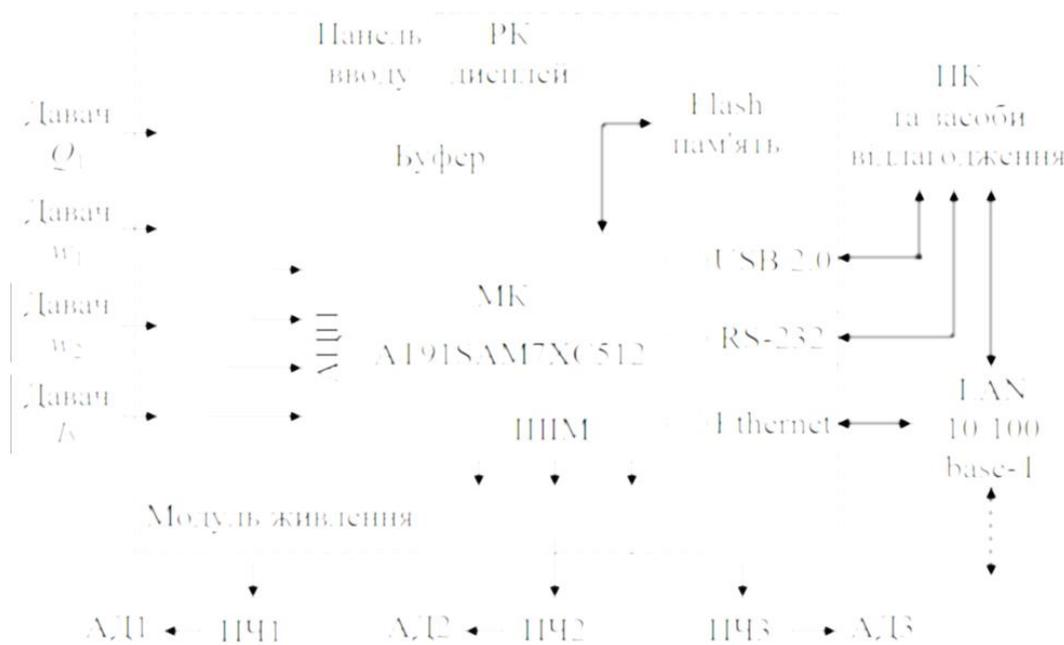


Рисунок 4.6. Структурна схема інтелектуальної системи

До складу розробленої системи входять наступні компоненти:

1. Блоки регулювання частоти обертання асинхронних двигунів дозаторів.
2. Блок контролера, який включає: однокристальний мікроконтролер (МК) AT91SAM7XC512; 8-канальний аналого-цифровий перетворювач (АЦП); інтерфейс для підключення датчиків; масштабувальні підсилювачі аналогових сигналів від датчиків; комутатор каналів; USB 2.0 інтерфейс для взаємодії з ПК; блок відображення інформації та встановлення робочих режимів; блок живлення модуля.
3. Персональний комп'ютер для аналізу та обробки даних.

Функції мікроконтролера можна розділити на окремі етапи: перетворення вхідних фізичних величин у лінгвістичні змінні; прийняття рішення на основі правил нечіткої логіки та формування вихідного сигналу; дефазифікація рішення; передача керуючого сигналу на силові елементи системи.

Налаштування фаззі-контролера проводилось експериментально з використанням середовища MATLAB. Основною складністю програмної реалізації алгоритмів нечіткої логіки (Fuzzy-Software) є обробка великих обсягів даних у реальному часі. Наприклад, при застосуванні функцій належності у вигляді 64 значень по 4 біти обробка 49 правил із двома входами та одним виходом на 32-розрядній ЕОМ IBM-80386 (20 МГц) займає близько 170 мкс, що еквівалентно приблизно 300 000 правил за секунду.

Прискорення роботи фаззі-регуляторів досягається за рахунок апаратної реалізації, зокрема шляхом використання програмованих мікроконтролерів із сумісною аналогово-цифровою архітектурою або чисто цифрових рішень з резервуванням. Приклади інтегрованих схем: OMRON FP-3000, TOGAI-Infra Logic F 110, які легко підключаються до датчиків і виконавчих механізмів. Недоліком цих рішень є обмежена гнучкість: жорсткі зв'язки (OMRON) або обмежений набір команд (TOGAI).

Для нашої системи обрано однокристальний мікроконтролер AT91SAM7XC512.

Синхронний послідовний контролер (SSC): автономні тактові сигнали та сигнали меж кадрів для передавача і приймача; високошвидкісна безперервна передача даних з підтримкою 32-розрядних зв'язків.

Два універсальні послідовні порти (USART): підтримка інтерфейсів ISO7816, IrDA, RS485; повна підтримка сигналів модему для USART1.

Два SPI-інтерфейси в режимі master/slave: передача даних 8/16 біт; до 4 сигналів вибору мікросхеми; один TWI інтерфейс; восьмиканальний 10-бітний АЦП; підтримка стандарту IEEE ® 1149.1 (JTAG); входи/виходи, сумісні з 5 В логікою; вбудований стабілізатор живлення ядра 1,8 В; робоча частота ядра 0–55 МГц; корпус LQFP-100.

Компіляція, налагодження та програмування плати здійснюється за допомогою стандартного програмного забезпечення, що постачається з мікросхемами. Розроблені програмні коди на мові С забезпечують повну роботу всіх периферійних пристроїв та реалізацію алгоритмів інтелектуальної системи керування потоковою лінією виробництва деревних пелет (перелік модулів – Додаток В3).

Для підтримки мережевих протоколів Ethernet використовується FreeRTOS, що включає стек TCP/IP та базові мережеві сервіси, зокрема HTTP. При статичному призначенні IP-адреси забезпечується можливість моніторингу робочої статистики через локальну мережу або пряме підключення до ПК.

Тестування функціональності мікроконтролера AT91SAM7XC512 із розробленими алгоритмами підтвердило ефективність інтелектуальних систем керування поточковими лініями виробництва пелет.

Результати досліджень показали:

інтелектуальна система з нечітким регулятором працює стійкіше порівняно з традиційними методами;

можливість застосування більш гнучких установок підвищує ефективність процесу;

кореляції між електроакустичними показниками та фізико-механічними властивостями біомаси дозволяють оцінювати пропускну здатність дозаторів із похибкою $\leq 5\%$ у робочому інтервалі $0,15\text{--}2,5\text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$;

оптимальні пропорції суміші (солома : кукурудзяні качани) від 1:1 до 1:5 дозволяють збільшити допустиму вологість соломи до 35 %, зменшити вміст золи в пелетах до 2,5 % і підвищити температуру плавлення до 1300 °С.

На основі математичної моделі синтезовано алгоритм та структурну схему інтелектуальної системи для регулювання швидкостей електроприводів у заданих робочих межах.

Калібрування програмних блоків системи для модуля узгодженого дозування проводиться на основі тестової вибірки даних, що охоплює повний діапазон вологості компонентів, не використаних у навчальній вибірці. Використання NCD-блоку дозволяє автоматично коригувати параметри системи з урахуванням часових обмежень (час стабілізації, перерегулювання або межі поточної помилки).

Сформовано програмно-апаратне рішення на базі AT91SAM7XC512, що реалізує нейронечіткі алгоритми керування, підвищуючи стійкість та швидкодію системи управління.

Висновки до розділу 4

Дослідження показали, що інтелектуальна система з нечітким регулятором є більш стійкою та ефективною порівняно з традиційними підходами, що підтверджує переваги застосування нечіткої логіки для керування потоковими технологічними лініями. Встановлено можливість використання більш гнучких установок, що забезпечує покращення результатів процесу.

Кореляції між електроакустичними показниками зондування та фізико-механічними властивостями біомаси дозволили оцінювати пропускну здатність дозаторів із точністю до 5 % у робочому діапазоні $0,15\text{--}2,5 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$. Оптимальні пропорції суміші соломи та кукурудзяних качанів у межах 1:1–1:5 дали змогу розширити допустимий діапазон вологості соломи до 35 %, знизити вміст золи у пелетах до 2,5 % та підвищити температуру їх плавлення до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Калібрування інтелектуальної системи на основі тестової експериментальної вибірки, що охоплює повний спектр вологості компонентів, дозволяє точно налаштовувати параметри нейроконтролера, а використання NCD-блоку забезпечує автоматичну адаптацію системи до заданих часових характеристик.

Розроблене програмно-апаратне рішення на базі мікроконтролера AT91SAM7XC512 забезпечує реалізацію нейронечітких алгоритмів керування, підвищуючи стійкість, точність і швидкодію системи управління.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі комплексного аналізу сучасної лінії виробництва паливних пелет обґрунтовано методи, підходи та технічні засоби для реалізації оптимальних швидкісних режимів електротехнологічного обладнання, що сприяють підвищенню енергетичної ефективності виробництва.

Дослідження показали, що зменшення енерговитрат і покращення енергетичних та якісних характеристик пелет можливе завдяки підвищенню точності дозування компонентів шляхом узгодженого регулювання продуктивності дозаторів. Статистична оцінка процесу безперервного введення сировини дозволила визначити ключові діапазони швидкостей робочих механізмів: продуктивність дозаторів – 0,2–0,7 т·год, частота обертання електродвигунів – 30–157 рад·с.

Математичне моделювання визначило мінімально необхідний об'єм бункера-змішувача та дозволило зменшити потужність привідного двигуна з 3 кВт до 0,25 кВт. Регулювання продуктивності живильного шнека-дозатора на основі струму статора асинхронного двигуна підпресівного шнека-екструдера забезпечує середнє зниження енергоспоживання на 20 %.

Запропоновано інноваційний метод приготування двоскладових пелет із введенням компонентів (солома та кукурудзяні качани) через регульований електропривід у масових співвідношеннях 1:1–1:5, що дозволяє використовувати соломі з вологістю до 35 %, зменшити зольність до 2,3 % та підвищити температуру плавлення пелет до 1300 °С.

Показано, що коригування напруги на статорі асинхронних двигунів при змінному навантаженні, з урахуванням критерію максимізації енергетичних показників електроприводів дозаторів, підвищує їх ККД на 3,4 % та коефіцієнт потужності – на 6,4 %.

Розроблено модель нечіткого контролера інтелектуальної системи керування узгодженим дозуванням, середньоквадратичне відхилення точності якого не перевищує 0,2 %. Час виходу на задану вологість у змішувачі становить не більше 10 с, а перерегулювання – 2,5 %.

Встановлено залежність між електроакустичними показниками зондування та фізико-механічними характеристиками потоку біомаси, що дозволяє оцінювати пропускну здатність дозаторів безперервної дії з похибкою до 5 % у діапазоні 0,15–2,5 кг·с.

Обґрунтовано параметри інтелектуальної системи регулювання продуктивності дозаторів у визначених діапазонах швидкостей електроприводу відповідно до встановлених рівнів вологості компонентів.

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач вищої освіти

Олександр ГОРОБЕЦЬ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lee C. C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller - part 1 (1990). IEEE trans. Syst., Man, Cybern, 20. 404 – 418.
2. Методика синтезу нечіткого регулятора в пакеті Matlab. Частина 1. Режим доступу – <https://www.mathworks.com/videos/getting-started-with-fuzzy-logic-toolbox-part-1-68764.html>
3. Шефер О.В. Методичні вказівки до курсового проектування з дисципліни „Електричні машини” для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2020. – 52 с.
1. Методика синтезу нечіткого регулятора в пакеті Matlab. Частина 2. Режим доступу - <https://www.mathworks.com/videos/getting-started-with-fuzzy-logic-toolbox-part-2-68765.html>
2. Галай В.М. Теорія цифрових систем автоматичного керування: навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. –131 с.
6. Методика синтезу нечіткого регулятора в пакеті Matlab. Частина 3. Режим доступу - <https://www.mathworks.com/videos/getting-started-with-fuzzy-logic-toolbox-part-3-68766.html>
7. Y.Yen, R. Langari, Fuzzy logic: Intelligence, Control and Information, Printice-Yall, New Delhi, 2002.
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.
9. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.
10. Галай М.В. Теорія автоматичного керування: неперервні та дискретні системи. Навч. пос-к. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – 454с.
11. Шефер О.В. Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 154 с.

12. Lee C. C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller - part 1 (1990). IEEE trans. Syst., Man, Cybern, 20. 404 – 418.
13. Методика синтезу нечіткого регулятора в пакеті Matlab. Частина 1. Режим доступу – <https://www.mathworks.com/videos/getting-started-with-fuzzy-logic-toolbox-part-1-68764.html>
14. Методика синтезу нечіткого регулятора в пакеті Matlab. Частина 2. Режим доступу - <https://www.mathworks.com/videos/getting-started-with-fuzzy-logic-toolbox-part-2-68765.html>
15. Методика синтезу нечіткого регулятора в пакеті Matlab. Частина 3. Режим доступу - <https://www.mathworks.com/videos/getting-started-with-fuzzy-logic-toolbox-part-3-68766.html>
16. Y.Yen, R. Langari, Fuzzy logic: Intelligence, Control and Information, Printice- Yall, New Delhi, 2002.
17. Гелету́ха Г. Г., Желе́зна Т. А. Біоенергетика в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку. – К. : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2018. – 60 с.
18. Клєстов О. Д. Автоматизація та енергоефективність ліній виробництва паливних пелет : дис. ... канд. техн. наук. – Полтава, 2022. – 180 с.
19. Пелетування біомаси : технології, обладнання, якість продукції / за ред. В. М. Ковальчука. – Львів : Львівська політехніка, 2019. – 212 с.
20. Бондар В. С., Шпак О. В. Електропривод і автоматизація технологічних процесів. – К. : Вища школа, 2016. – 320 с.
21. Жук О. Я., Мельник В. М. Енергоефективні режими роботи асинхронних електродвигунів у системах автоматизованого керування // Електромеханічні системи. – 2020. – № 3. – С. 45–52.
22. Стадник І. Я., Кравчук П. М. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. – Тернопіль : ТНТУ, 2017. – 260 с.