

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

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Автоматизація потокової лінії виробництва твердопаливних пелет»

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

шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності

Клєстов О.Д.
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф. Шефер О.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М.
(прізвище та ініціали)

Полтава – 2022 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
 електроніки та телекомунікацій

_____ О.В. Шефер
 “ ___ ” _____ 2022 р.

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Клєстову Олександрю Денисовичу

1. Тема проекту (роботи) «Автоматизація потокової лінії виробництва
 твердопаливних пелет»

керівник проекту (роботи) Шефер О. В., д.т.н., професор,

затверджена наказом вищого навчального закладу від “12” 08. 2022 року № 544фа

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 07.12.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) споживана потужність привода – не більше 0,5 кВт;
 зольність кінцевого продукту не більше 5 %; температуру плавлення твердопаливних
 пелет до 1300 °С; продуктивність дозаторів – від 0,2 до 0,7 т·год⁻¹; частота обертання
 електродвигунів – від 30 до 157 рад·с⁻¹.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз засобів виробництва твердопаливних пелет. Енергоефективність виробництва пелет. Аналіз процесу дозування сировини у поточкових лініях безперервної дії. Дослідження процесу утворення твердопаливних пелет. Розробка моделі для дослідження режимів роботи регульованого ЕП потокової лінії. Корекція динамічних та енергетичних характеристик ЕП дозаторів компонентів твердопаливних пелет. Моделювання інтелектуальної системи управління потоковою лінією. Удосконалення технології приготування твердопаливних пелет. Проектування інтелектуальної системи керування потоковою лінією. Рекомендації по налаштуванню нейроконтролера технологічного процесу дозування компонентів твердопаливних пелет.

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

Загальна характеристика твердопаливних пелет. Кінематична схема дозатора сипких матеріалів. Функціональна схема частотно-регульованого НП. Механічні характеристики приводного двигуні при зміні навантаження. Характеристики енерговитрат ЕП. Структурна схема потокової лінії виробництва пелет. Імітаційні моделі установки. Графіки результатів моделювання та досліджень. Структурна схема системи з фаззі-

логією. Принципова електрична схема мікропроцесорного керування технологічним процесом.

6. Дата видачі завдання ____ . ____ . 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Аналіз предметної області. Визначення технологічних вимог до систем керування поточковими лініями пресування твердопаливних пелет.	13.09.22		15%	Пл. 1
2	Способи і технічні засоби забезпечення регульованих характеристик дозаторів безперервної дії. Обґрунтування наряду та мети дослідження	27.09.22	I	30%	Пл. 2,3
3	Дослідження параметрів поточної лінії виробництва твердопаливних пелет. Енергоефективність виробництва пелет.	10.10.22		40%	Пл. 4
4	Аналіз процесу дозування сировини у поточкових лініях безперервної дії. Дослідження процесу утворення твердопаливних пелет	17.10.22		50 %	Пл. 5,6
5	Обґрунтування та розробка алгоритмів і технічних засобів системи зв'язного дозування компонентів. Моделювання інтелектуальної системи управління поточною лінією	24.10.22	II	70%	Пл. 7,8
6	Створення системи керування швидкісними режимами електропривода поточної лінії виробництва твердопаливних пелет. Удосконалення технології приготування твердопаливних пелет	08.11.22		80%	Пл. 9,10
7	Проектування інтелектуальної системи керування поточною лінією. Рекомендації по налаштуванню нейроконтролера технологічного процесу зв'язного дозування компонентів твердопаливних пелет. Висновки. Оформлення чистового варіанта магістерської роботи	07.12.22	III	100%	Пл. 11,12

Магістрант _____ Клєстов О. Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Шефер О. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ	Стор.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	8
1.1 Аналіз сучасних технічних засобів виробництва твердопаливних пелет.....	8
1.2 Технологічні вимоги до систем керування потоковими лініями пресування твердопаливних пелет.....	15
1.3 Електрообладнання поточкових ліній приготування сумішей.....	20
1.4 Способи і технічні засоби забезпечення регульованих характеристик дозаторів безперервної дії.....	24
1.5 Обґрунтування наряду та мети дослідження.....	29
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ	32
2.1 Вихідні положення.....	32
2.2 Енергоефективність виробництва твердопаливних пелет.....	33
2.3 Статистичний аналіз процесу дозування сировини у поточкових лініях безперервної дії.....	37
2.4 Дослідження процесу утворення твердопаливних пелет.....	47
РОЗДІЛ 3. ОБґРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗНОГО ДОЗУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ	53
3.1 Розробка моделі для дослідження режимів роботи регульованого електропривода поточкової лінії.....	53
3.2 Корекція динамічних та енергетичних характеристик електропривода дозаторів компонентів твердопаливних пелет.....	63
3.3 Моделювання інтелектуальної системи управління поточковою лінією.....	78
РОЗДІЛ 4. СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ	87

	5
4.1 Постановка задач досліджень.....	87
4.2 Розробка способу та пристрою контролю продуктивності дозаторів безперервної дії.....	92
4.3 Удосконалення технології приготування твердопаливних пелет...	95
4.4 Проектування інтелектуальної системи керування потоковою лінією.....	103
ВИСНОВКИ.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	112
ДОДАТКИ.....	113

ВСТУП

Актуальність теми. Збільшення власних енергетичних ресурсів є важливою національною проблемою України, де їх річне споживання досягло 210–230 млн т умовного палива. Розв'язати цю проблему можна, залучаючи наявні у нашій державі ресурси біомаси, спираючись на власний і міжнародний науково-виробничий потенціал. Потенційно технічно досяжний надлишок біосировини в Україні становить 27 млн т/рік, що дає підстави з великим оптимізмом розглядати цей вид палива як перспективний, про що свідчать останні урядові нормативні документи.

Серед наявних на сьогодні гідравлічних, екструдерних та ударних пресів найперспективнішими, зважаючи на техніко-економічні характеристики, є останні, насамперед тоді, коли йдеться про брикетування соломи. Проте детальний аналіз свідчить про високу енергоємність процесу виробництва твердого біопалива і низьку якість кінцевого продукту, які зумовлені великими нерівномірностями дозування та значними коливаннями вологості сировини.

В агропромисловому комплексі України застосовується понад 4 млн асинхронних короткозамкнених електродвигунів змінного струму, які є основними споживачами електричної енергії в галузі. Витрати електроенергії можна значно зменшити завдяки впровадженню у виробництво регульованого електропривода. У передових країнах світу понад 50% електроприводів є регульованими, що дало змогу зменшити витрати електроенергії на 20–30 %. В Україні процес впровадження регульованих електроприводів у виробничі процеси АПК тільки розпочинається.

Це дає підстави стверджувати, що дослідження задач підвищення енергетичної ефективності виробництва твердого біопалива можуть бути значно розширені завдяки опрацюванню науково-технічних передумов використання частотно-регульованого електропривода для керування швидкісними режимами технологічних процесів.

Наведене вище твердження обумовлює необхідність розв'язання наукового завдання, яке полягає в обґрунтуванні методів і засобів забезпечення раціонального керування швидкісними режимами електропривода потокової лінії виробництва твердого біопалива для зменшення витрат електроенергії та підвищення якості продукції.

Мета і задачі дослідження – зменшення витрат енергії і підвищення якості продукції завдяки раціональному керуванню швидкісними режимами електропривода потокової лінії виробництва твердопаливних пелет.

Досягнення поставленої мети ґрунтується на розв'язанні таких задач:

1. Проаналізувати процес виробництва твердого біопалива та обґрунтувати вимоги до його характеристик.
2. Встановити закономірності формування пропорцій твердопаливних пелет для організації зв'язного дозування сировини.
3. Розробити математичні моделі режимів роботи регульованого електропривода, синтезувати структурну схему системи керування потоковою лінією.

4. На основі методів математичної статистики визначити основні вимоги до процесу вимірювання продуктивності дозаторів безперервної дії.

5. Оцінити способи корекції жорсткості механічних характеристик зв'язних електродвигунів, виходячи з критерію максимуму енергетичних характеристик електродвигунів дозаторів.

6. Розробити алгоритм функціонування та структурну схему інтелектуальної системи керування швидкісними режимами потокової лінії виробництва твердопаливних пелет.

7. Провести експериментальні дослідження і аналіз техніко-економічних показників розробки.

Об'єкт досліджень. Процес перетворення енергії в електроприводі робочих машин потокової лінії виробництва твердопаливних пелет.

Предмет досліджень. Закономірності впливу раціонального керування швидкісними режимами електропривода потокової лінії виробництва твердопаливних пелет на витрати і втрати енергії, якісні характеристики продукції.

Методи дослідження – теоретична складова досліджень здійснювалась із застосуванням елементів математичної статистики, імітаційного моделювання, яке базується на законах електромеханіки, електричних кіл, теорії електропривода. Експериментальні дослідження проводились у виробничих умовах та на спеціально розроблених стендах.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз сучасних технічних засобів виробництва твердопаливних пелет

Виявлення можливостей України по використанню біомаси для виробництва енергетичних ресурсів, проведення дослідження щодо оцінки цих ресурсів, визначення територій, перспективних для організації виробництва енергії з використанням його різних видів. Біомаса це побічна продукція та відходи біологічного походження, що можуть використовуватись як паливо для виробництва енергії, зокрема: стебла сільськогосподарських культур і скошена трава, солома, відходи деревини, тверді побутові відходи.

Твердопаливні пелети відрізняється від традиційного палива тим, що вони за своєю сутністю практично є нейтральним щодо зростання парникового ефекту, оскільки рослини, які вирощують для його виробництва, забирають вуглекислий газ з атмосфери і виділяють кисень. Отже, споживаючи твердопаливні пелети, можна призупинити глобальні зміни клімату Планети. Таким чином, з енергетичної, економічної й екологічної точок зору виробництво енергії з біомаси є актуальним напрямом.

Біомаса – 4-е за значенням паливо у світі, дає близько 2 млрд. т умовного палива на рік, що становить близько 15 % загального споживання первинних енергоносіїв у світі. При цьому, понад 70 % відновлюваних джерел енергії походить з неї. Відбувається швидкий перехід до раціонального використання твердопаливних пелет. На сьогодні, до 30 % твердих біоматеріалів можна використати на енергетичні потреби без будь-яких істотних наслідків для родючості ґрунтів.

Лідерами використання твердих біоматеріалів для енергетичних потреб, серед країн ЄС є Данія і Швеція. Активного розвитку цей напрям набуває у більшості країн Центральної Європи та Північної Америки. Як енергоресурси, біомасу широко використовують й наші сусіди – Польща, Угорщина, Словаччина,

Чехія та країни Прибалтики. Щорічно в цих країнах утилізують до 25 % твердих біоматеріалів. Цей ресурс твердопаливних пелет може істотно поліпшити регіональні енергетичні потреби і в Україні. З кожного енергетичного гектара можна використати близько 2–3 тонни соломи, що є еквівалентом 1 тонни кам'яного вугілля. Навіть у процесі використання 10 % посівних площ для вирощування необхідної сировини, можна одержати щорічно 6–9 млн. тонн соломи для локального енергетичного використання.

Твердопаливні пелети, як енергоресурс, відіграють суттєву роль в енергозабезпеченні промислово розвинених країн: якщо у США їх частка становить близько 1/20 загального обсягу, то у Австрії та Швеції цей показник зростає до 1/5, тобто у 4 рази (Рисунок 1.1) [2].

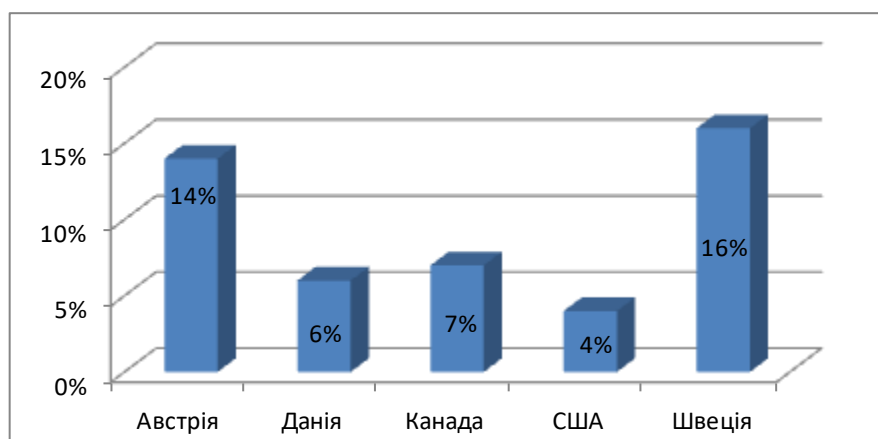


Рисунок 1.1. Частка використання твердопаливних пелет у промислово розвинених країнах

За матеріалами Програми ООН, частка відновлюваних джерел енергії в загальносвітовому паливно-енергетичному балансі у 2050 р. може досягти 50%, а відповідно до прогнозу Світової енергетичної Ради, на кінець поточного століття вона сягне 80–90%. Отже, твердопаливні пелети за значенням у прогнозах посідають 4-те місце серед палив і забезпечують близько 15% загального споживання первинних енергоносіїв у світі (у країнах, що розвиваються – понад 30 %, іноді до 50-80 % [3].

Динаміка розвитку світової електроенергетики засвідчує впевнене зростання частки біоресурсних джерел у загальному балансі генерованої енергії.

У секторі використання нетрадиційних джерел енергії ЄС розпочав роботи, спрямовані на використання біоенергетичних матеріалів тільки з річним циклом відновлення (солома, відходи насінневих та елеваторних виробництв).

В Україні економічно доцільний потенціал твердопаливних пелет оцінюється у 27 млн тонн в рік, де його основними складовими є сільськогосподарські відходи та енергетичні культури.

Основними технологіями переробки біомаси є: пряме спалювання, газифікація, анаеробна ферментація з утворенням біогазу, виробництво спиртів і масел для отримання моторного палива [4].

Детальний аналіз обсягу рослинних відходів українського господарства (табл. 1.1) дозволяє стверджувати, що кількість сировини для виробництва твердопаливних пелет за останні 5 років має стрімку тенденцію до зростання, що переконливо засвідчує актуальність розвитку галузі виробництва та використання твердих біоматеріалів в Україні.

Таблиця 1.1

Кількість основних рослинних відходів за 2017–2022 рр.

Вид сировини	Роки					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	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

Особливістю технології є недоцільність її транспортування на відстань понад 50 км. Тому переробку соломи зернових культур, стебел і качанів

кукурудзи, соняшнику, гілок плодкових дерев і лози винограду, відходів переробки очерету, слід вести на місці їх збору. Важливими елементами технічного забезпечення технологій переробки біомаси є:

- обладнання технологічне для спалювання біомаси;
- машини для збирання біомаси;
- сховища та обладнання для зберігання сировини;
- системи керування технологічними процесами на всіх етапах

виробництва і застосування твердопаливних пелет.

Найбільш значущою характеристикою біомаси, що використовують як твердопаливні пелети, є її теплотворна здатність, яка залежить від багатьох чинників: генетичних особливостей енергетичних рослин, впливу навколишнього середовища, умов зберігання, вологості тощо. У таблиці 1.2 наведено середню теплотворну здатність для деяких видів сировини, при абсолютній її вологості на рівні 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

Важлива роль у процесі використання твердої біомаси, в якості палива, відіграє зольність (табл. 1.3), яка визначає вміст залишку у відсотках (на безводну масу), що утворюється з мінеральних домішок палива під час його повного згоряння.

Важливим чинником, що впливає на теплотворну здатність сировини, є вміст кисню. Значний його вміст у твердому біопаливі означає, що в процесі його горіння потреба в повітрі та кількість утвореного диму менші, ніж при спалюванні

різних видів вугілля (табл. 1.3). Вміст вологи в біопаливі несприятливий не лише з точки зору теплотворної здатності матеріалу. Зі збільшенням вологості зростає кількість водяної пари, а це, наслідок процесів її конденсації, створює проблеми відведення 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

До основних видів біомаси, що використовуються як твердопаливні пелети для безпосереднього спалювання, відносять деревину та сировину з енергетичних рослин, а також соломі і відходи чистки з різних насаджень (вздовж доріг, чистка фруктових садів і т.п.). Спалюванню деревини та соломи в печах передують збирання, висушування та зберігання сировини. Однією з визначальних характеристик різного типу біомаси є її щільність. Зазвичай сухі біологічні матеріали мають щільність у 3–4 рази нижчу, ніж вугілля, тому важливим чинником якості твердопаливних пелет є технологія приготування біомаси до спалювання. Вона обумовлює конструктивно-технологічне виконання теплотехнічного обладнання, істотно впливає на економічні показники його роботи. Наведені в таблиці 1.4 енергетичні характеристики твердопаливних пелет в залежності від технологій приготування до спалювання дозволяють проаналізувати енергоємність певного типу сировини. Отже, питома енергоємність твердопаливних пелет у 10 разів більша, ніж у звичайної соломи, а питома об'єм – у 10–15 разів менший.

Способами утилізації решток сільськогосподарських рослин для подальшого використання в якості твердопаливних пелет є його тюкування, пелетування, гранулювання.

**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 способу пресування частинок, пресовані твердопаливні пелети поділяють на два види: гранули і пелети. Гранулювання та пелетування – це процеси, під час яких подрібнені відходи, у вигляді тирси, пресуються при нагріванні під високим тиском. Температура матеріалу підвищується, відбувається пластифікація лігніну, тому здійснюється склеювання частинок матеріалу з таким формуванням паливних пелет або гранул в яких за мінімального об'єму концентрується максимальна кількість деревної речовини.

Гранула (Рисунок 1.2) – це циліндр із розмеленої пресованої деревини. Вона має від 10 до 30 мм у довжину і від 6–10 мм діаметр. Залежно від якості розрізняють гранули першого класу і промислові гранули. Гранули першого класу – найвищої якості. Для виробництва не допускають застосування кори, оскільки вона має високу зольність. Промислові гранули можуть містити певну кількість кори (до 10 %) (табл. 1.5).



Рисунок 1.2. Гранули

Широке розповсюдження паливні гранули отримали насамперед завдяки особливостям процесу їхнього згорання. Адже згораючи, паливні гранули виділяють відповідну кількість тепла, при цьому їх теплотворність паливних гранул прирівнюють до традиційних видів палива, тоді як кількість шкідливих речовин, що виділяється, – незначна. Технологія виробництва гранул із деревини залежить від вихідної сировини та включає такі операції: підготовку сировини → сушіння → подрібнення → гранулювання → охолодження і пакування.

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

Підготовка сировини полягає в процесі подрібнення відходів у технологічну тріску і виготовлення з неї стружки. Стружка має високу вологість – у межах 80–90 %. Оптимальна вологість після сушіння повинна становити не більше 12 %. Особливістю технології виготовлення гранул – високі вимоги до розмірів

деревинних частинок. Перш ніж подати подрібнену деревину на гранулювання, її подрібнюють на молоткових дробарках. Чим менший діаметр гранул, тим дрібніша повинна бути сировина. Важливим показником якості гранул є їх щільність, яка залежить від вологості підготовленої подрібненої деревини. Максимального значення щільності можна досягти при вологості сировини до 20%. Тому перед гранулюванням зволожують сировину водою або парою на 2–3%. Ця поверхнева волога сприяє кращому зближенню й ущільненню дрібних частинок деревини. Під дією пресування зростають пластичні деформації частинок, а поверхнева волога, крім того, виконує роль змазки та охолоджує матрицю гранулятора.

Тривалість зволоження сировини не повинна перевищувати 10–15 с, щоб волога не встигла проникнути в стінки судин, оскільки частинки гранул стануть пружними [6].

1.2 Технологічні вимоги до систем керування потоковими лініями пресування твердопаливних пелет

Виробництва паливних гранул здійснюють із використанням пресів, які бувають з кільцевою і плоскою матрицями. В кільцевих пресах сировина продавлюється барабанами через матрицю і назовні обрізується. Енерговитрати на пресування в обох випадках однакові. Потім гранули охолоджують і упаковують [8].

Паливні пелети пресують у гідравлічних (Рисунок 1.3), ударно-механічних (Рисунок 1.4) і шнекових (Рисунок 1.5) пресах різноманітних конструкцій. Від застосованого пресового обладнання залежать форма і розміри пелет [8].

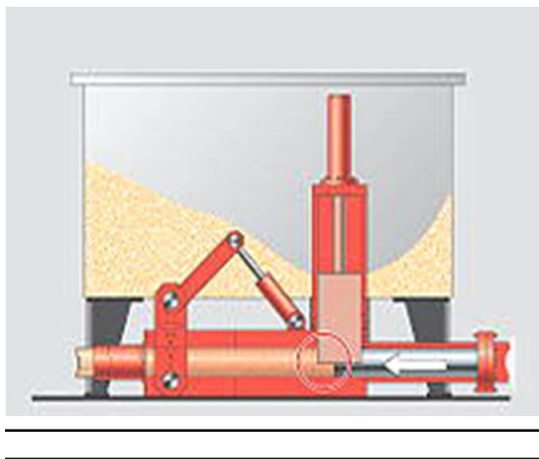


Рисунок 1.3. Гідравлічний прес

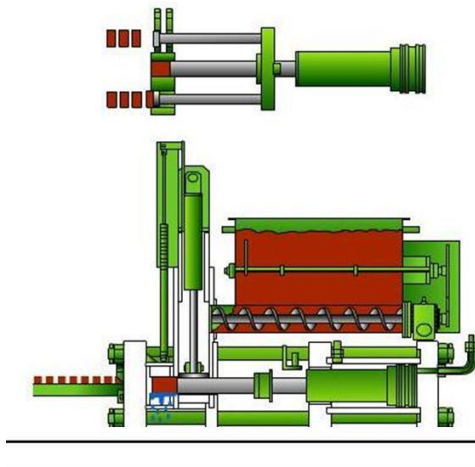


Рисунок 1.4. Ударно-механічний прес

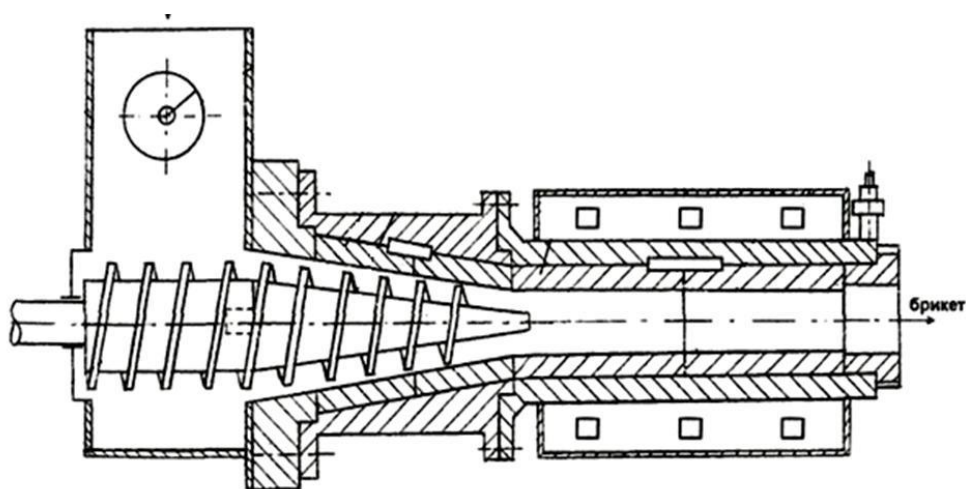


Рисунок 1.5. Шнековий прес

Пелети виготовлені на гідравлічних пресах (Рисунок 1.6), тобто за допомогою високого тиску і за формою нагадує невелику цеглу.



Рисунок 1.6. Пелети, виготовлені на гідравлічних пресах

Пелети виготовлені на ударно-механічних (кривошипно-шатунних) пресах (Рисунок 1.7) (під дією високого тиску) мають циліндричну форму. Перевагами такого типу пелет є незначні вимоги до кваліфікації персоналу і до організації виробництва, невисока собівартість продукції. До недоліків можна віднести те, що пелети не стійкі до вологи. Даний тип пелет широко застосовується на промислових електростанціях. Ринок споживання циліндричних пелет постійно зростає.



Рисунок 1.7. Пелети, виготовлені на ударно-механічних пресах

На шнекових пресах пелети виготовляються за допомогою поєднання високого тиску і випалювання. Таке паливо має форму багатогранника з отвором в середині (Рисунок 1.8). До переваг такого виду пелет відносять високу механічну стійкість до пошкоджень і високу вологостійкість. Недоліками такого виробництва є трудомісткість виробничого процесу, необхідність у висококваліфікованих фахівцях, значна енергоємність [4].



Рисунок 1.8. Пелети, виготовлені на шнекових пресах

В Україні та інших країнах виготовляється цілий ряд технологічних поточкових ліній для виробництва твердого твердопаливних пелет. Всіх їх об'єднує спільний недолік – низька якість кінцевого продукту, пов'язана з неможливістю механічними методами згладити базові недетерміновані характеристики біосировини [7].

Тому розробка системи керування поточковими лініями продукування твердопаливних пелет з повноцінними теплотворними і товарними характеристиками є актуальною задачею для агропромислової енергетики.

Найбільш доцільним, з точки зору економіки, є виробництво пелет на ударно-механічних пресах. Огляд існуючих ліній пелетування дозволив зробити висновок про перспективність вибору технології запропонованої фірмою Wektor (Рисунок 1.9), основною перевагою якої є можливість виготовлення двокомпонентного палива [4].

Конструкція преса забезпечує доступ до вузлів і агрегатів, що дозволяє проводити зручне обслуговування, ревізію, а також поточний ремонт, в безпечних умовах, за максимально короткий час.

У пресі зменшена кількість швидкозношуваних деталей і вузлів, їх конструкція доведена до такого вигляду, щоб була можливість виконати їх на металообробному обладнанні практично в будь-яких умовах за максимально короткий термін.



Рисунок 1.9. Лінія пелетування WT-60

Електрообладнання преса забезпечує керування в необхідних режимах, плавне регулювання та необхідний захист і сигналізацію. Устаткування після виходу на робочий режим працює в автоматичному режимі і не вимагає постійної уваги обслуговуючого персоналу.

Здійснений аналіз видів твердопаливних пелет за їх теплотворною здатністю, вартістю, екологічністю та доступністю засвідчує, що найбільш доцільною сировиною для виготовлення пелет, за допомогою даної технології, є використання соломи. Практично досяжний надлишок соломи в Україні складає 3–4 млн. тонн в рік, що дає підстави з великим оптимізмом розглядати цей вид твердопаливних пелет як перспективний, про що свідчать останні декларації та постанови українського уряду [8]. Однак існують і недоліки використання соломи як палива – це велика зольність. Тому пропонується використовувати двокомпонентне паливо, що складається з соломи і кукурудзи. Для створення такого двокомпонентного палива найкраще підходять преси ліній пелетування палива. Визначальними параметрами оцінки, в даному випадку, є характеристики пресів: вартість, продуктивність, надійність, енергоємність та якісні характеристики кінцевої продукції, що корелюють з фізико-механічними властивостями сировини. Серед існуючих на сьогоднішній день гідравлічних, екструдерних та ударних пресів найбільш перспективними, зважаючи на техніко-економічні характеристики, є останні, особливо для пелетування двокомпонентного твердопаливних пелет, в тих випадках коли мова іде про пелетування соломи, енергоємність процесу та продуктивність. На наш погляд, для виготовлення двокомпонентного палива на основі соломи і кукурудзи найкраще підходить лінія пелетування ВТ-60. За допомогою регульованої подачі компонентів палива можна контролювати їх відсотковий склад залежно від вологості. Такий склад палива підвищить енергоефективність його горіння, зменшить зольність і сприятиме продукуванню технологічного газу для отримання електроенергії за допомогою твердооксидної паливної комірки.

Водночас, згадані технології об'єднує спільний недолік – нерівномірність подачі сировини в прес, що складає за коефіцієнтом варіації 25–35 %, що суттєво

впливає на якість кінцевого продукту – щільність, зв'язність і як результат – його теплотворність [3].

Суттєвим недоліком використання соломи в якості базового компонента є те, що її вологість в несприятливий погодний період сягає 30...35 %. В таких випадках застосовують просушування сировини до 15...16 %, що призводить до значних перевитрат енергії та технологічних незручностей, які в більшості випадків є причиною зупинки виробництва.

Спроби ліквідувати вказаний недолік за допомогою пресових механізмів та просушування сировини не дає суттєвого ефекту і призводить до значних перевитрат електроенергії. Вирішити дану проблему можна завдяки регульованому зв'язному дозуванню сировини. Реалізувати такий підхід можна шляхом всебічного вивчення та аналізу факторів, що впливають на утворення флуктуацій, які виникають під час роботи шнекових живильників сировини.

В Україні та країнах ЄС створено цілий ряд обладнання для рівномірної безперервної подачі сировини у змішувачі, сушильні камери, гранулятори, преси тощо. Практично у всіх дозаторах домінує регульовальний асинхронний електропривод, що є позитивною передумовою автоматизації процесу дозування.

Усе це пов'язано з недетермінованістю потокового процесу дозування сировини і відсутністю чітких методик для повноцінного математичного аналізу флуктуаційних явищ, характерних для вказаних технологій [7].

Однак, зазначені процеси є стохастичними і характеризуються високим ступенем невизначеності, тому для розробки автоматизованої системи керування доцільно використовувати інтелектуальні технології, зокрема нейроконтролери та Fuzzy-логіку. Це дозволить оптимізувати технологію виготовлення двокомпонентного твердопаливних пелет згідно критеріїв енергоощадності та вартості, а також підвищити якість пелетів та їх питому енергоємність.

1.3 Електрообладнання потокових ліній приготування сумішей

Дозування складових є основною операцією в технологіях приготування сумішей. Якість кінцевого продукту при цьому залежить, в основному, від

дотримання заданого за рецептом співвідношення між вхідними компонентами, тобто від якості роботи дозаторів. Тому, незалежно від типу і принципу дії дозуючих пристроїв тут переслідується основна технічна задача – підвищення їх точності в робочому діапазоні.

На сьогоднішній день розробкою обладнання для безперервного дозування зайнято більше 50 фірм, в тому числі «Siptron» (США), «Lewa» (Німеччина), «Dozargo» (Франція). Їх зусилля, в основному, направлені на виробництво дозаторів за вагою матеріалу [11].

Для приготування суміші, інтенсивність потоків встановлюють попередньо для того, щоб співвідношення їх складових відповідало потрібній рецептурі. В тому випадку використовують «зв'язні системи», коли апаратура керування всіх дозаторів зв'язана між собою, а один із компонентів виступає в ролі «ведучого», інші – «веденими». Таке дозування називають пропорційним, що забезпечує 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

$$I_1 = k_i [Q_0(t) - Q_{0зад.}] + Q_i(t), \quad (1.3)$$

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

k_i – коефіцієнт пропорційності.

При більш жорстких вимогах до величини $\sum_1^n Q_i(t)$ слід використовувати багатозв'язні системи з автоматичним регулюванням продуктивності всіх

потоків [2]. Але збільшення кількості компонентів призводить до ускладнення системи, підвищення її вартості та зниження надійності обладнання.

Наведені системи мають недоліки, які закладені в методології їх побудови на базі масовимірювальних транспортерів. Динамічний характер процесу зважування породжує нелінійність характеристик вихідного сигналу у всіх ланках структурної схеми – вагоприймальна стрічка транспортера – первинний перетворювач – підсилювач – інтегратор. Недоліком масовимірювальних систем є той факт, що при зважуванні легких компонентів (стружка, вата, солома тощо) на малих продуктивностях в потоці первинні перетворювачі важко реалізувати в технологічний процес вимірювання без надмірних похибок.

За принципом регулювання дозатори безперервної дії можна поділити на дві групи: дозатори з регулюванням навантаження матеріалу на стрічці транспортера і дозатори з регулюванням швидкості подачі матеріалу [8]. Дозатори з регулюванням кількості матеріалу на стрічці транспортера працюють при постійній швидкості її руху і регулюють її тільки при переналаштуванні на іншу продуктивність. Використання регульованої засувки для зміни перерізу випускного отвору не забезпечує необхідної точності дозування, особливо складносипких матеріалів до яких відноситься біомаса [2]. У дозаторах з швидкісним регулюванням стрічки при збільшенні маси матеріалу на транспортері її швидкість відповідно зменшується і навпаки.

Зазначені типи дозаторів мають цілий ряд суттєвих недоліків, у обох випадках транспортер є завантажувальною і масовимірювальною ланкою дозатора. В дозаторах матеріал зважується і видається неодноразово, що призводить до віялоподібних змін продуктивності [8].

Ці недоліки практично відсутні в дозаторах, в яких живильний і зважувальні механізми розділені на самостійні ланки (фірма «Schenk», Німеччина). Ці дозатори забезпечують більш рівномірну видачу матеріалу, так як практично відсутній проміжок часу між моментом зважування матеріалу і його видачі у змішувач (Рисунок 1.10). Під час зміни маси матеріалу на стрічці, яка рухається з постійною швидкістю, зважувальний транспортер діє на вимірювальний елемент, від якого імпульси надходять на регулятор. Але ця система керування дозаторами

має ряд недоліків [11]:

- велику інерційність видачі інформації масовимірювальним пристроєм;
- вплив вібрації, пов'язаної з падінням матеріалу з шнека на стрічку (при підвищеній чутливості первинного перетворювача що дуже суттєво);
- вплив на роботу електропривода.

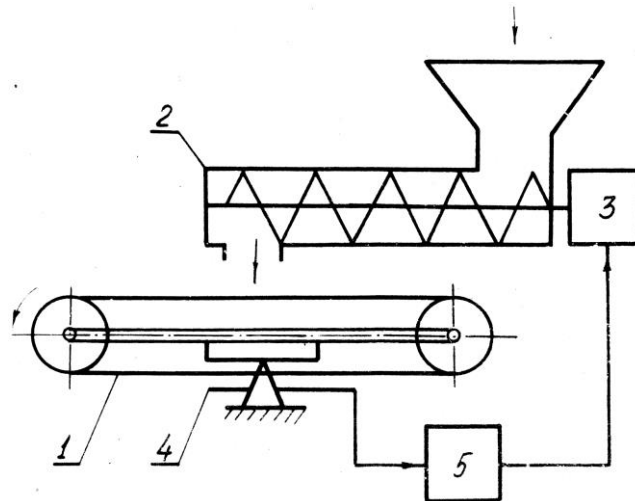


Рисунок 1.10. Дозатор сипучих матеріалів фірми «Schenk» : 1 – масовимірювальний транспортер; 2 – шнековий бункер – живильник; 3 – регульований електропривод; 4 – масовимірювальний пристрій; 5 – блок керування

Безперервне дозування в цілому ряді випадків доцільно проводити за щільністю потоку матеріалу (стружки, тирси). В цьому випадку щільність характеризує кількість сухої речовини, що контролюється в потоці матеріалу, що суттєво в таких галузях як деревообробка та технології виробництва твердого твердопаливних пелет.

Зазначену мету можна досягти використовуючи властивість ультразвуку втрачати свою інтенсивність при проходженні через матеріал [4, 5]. Інтенсивність акустичних коливань, що пройшли через потік матеріалу при вільному падінні з вивантажувального отвору дозатора зменшується за залежністю:

$$I_k = I_0 \exp(-ax),$$

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.

Вказана вище схема дозування вигідно відрізняється від інших тим, що дозування матеріалу проводиться за кількістю сухої речовини в потоці, яка є визначальним критерієм визначення продуктивності дозаторів. Крім цього, регулювання продуктивності дозатора за швидкістю з використанням безінерційного витратоміра дозволяє значно покращити технологічні характеристики дозаторів [6].

1.4 Способи і технічні засоби забезпечення регульованих характеристик дозаторів безперервної дії

Транспортери, дозатори, змішувачі різних типів відносяться до найпоширеніших технологічних машин (механізмів), для яких переважно використовується нерегульований асинхронний електропривод. Цей спосіб реалізації виправданий у технологіях, в яких, згідно вимог, необхідно забезпечувати сталу продуктивність.

Проте, у деяких випадках виникає необхідність регулювання швидкісних режимів, зокрема у лініях зв'язного дозування компонентів суміші під час пелетування твердопаливних пелет.

Використання для вказаних технологій систем частотно-регульованого електропривода дозволить не тільки значно знизити втрати електроенергії [8], але й підвищити якісні показники кінцевого продукту.

Можна розглядати наступні шляхи реалізації енергоощадних режимів роботи регульованого електропривода технологічних машин (шнекових та секторних дозаторів, шнекових транспортерів, пресів тощо):

- забезпечення раціональних енергетичних режимів роботи асинхронного електропривода, що дають змогу мінімізувати втрати енергії у процесі його функціонування;

- здійснення регулювання частоти обертання їх робочих органів, що забезпечує суттєве зниження енергоспоживання (особливо для шнеків-екструдерів, пресів);

– адаптація механічних характеристик електродвигуна до вимог технологічного процесу шляхом регулювання швидкісних режимів електропривода.

Розглянемо існуючі алгоритми керування асинхронним електроприводом виконавчих механізмів технологічних ліній виробництва твердопаливних пелет на базі їх вхідних і вихідних параметрів [8,7]. Для приводного асинхронного електродвигуна робочого механізму необхідно визначити характер зміни його статичного моменту від частоти обертання $M_c = f(\omega)$. Для більшості механізмів, залежність моменту статичного навантаження від кутової швидкості, в зоні її регулювання, може бути представлена у вигляді степеневої функції:

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

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

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

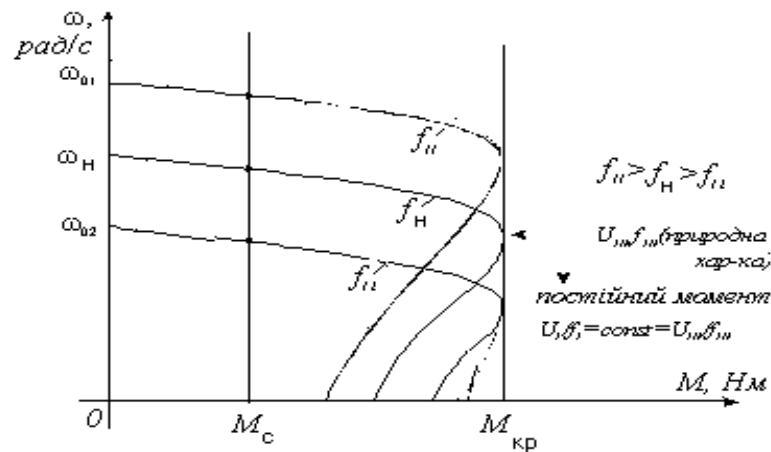


Рисунок 1.11. Сумісні механічні характеристики електродвигуна та робочого механізму при $M_c = const$

Зростаюче механічне навантаження (Рисунок 1.12) мають шнекові преси, екструдери, а також деякі типи змішувачів тощо, оскільки у них обертовий момент залежить від частоти обертання.

Частота обертання робочих органів вказаних машин невисока, тому зведений момент інерції системи до валу електродвигуна визначається в основному моментом інерції його ротора.

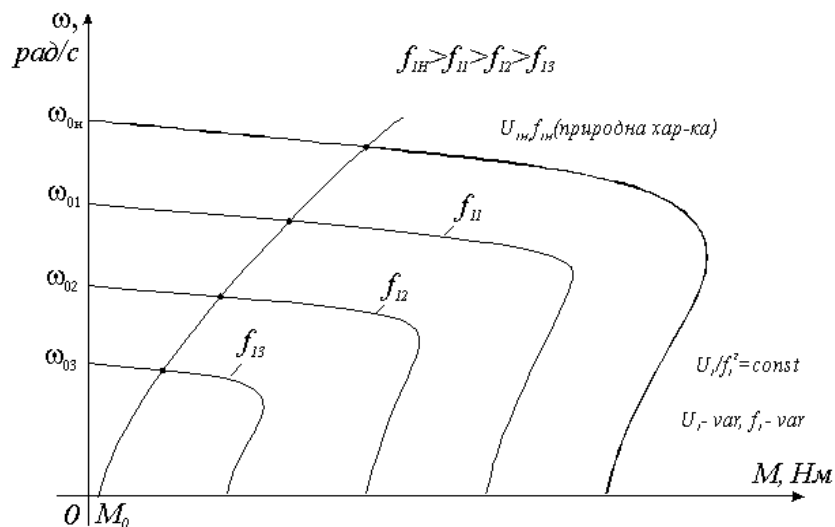


Рисунок 1.12. Сумісні механічні характеристики електродвигуна при зростаючому навантаженні на валу

Цим можна пояснити те, що час запуску електродвигуна триває кілька секунд, а нагрівання під час пуску незначне. Оскільки двигуни привода пресів мають велику потужність, то для обмеження пускових струмів їх часто запускають з перемиканням обмоток із «зірки» на «трикутник».

Режим роботи електродвигунів тривалий, із змінним навантаженням. Зусилля, які виникають у пресувальних органах, зумовлюються багатьма факторами, що можуть змінювати свій вплив протягом роботи машини (кількість і склад вихідного матеріалу, його вологість, температуру матриці тощо). Тому навантаження на валу двигуна коливається в значних межах, включаючи і 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 $M_{c*} = f^2_{1*}$ або ж у розгорнутому вигляді: $M_c = M_n \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$.

Аналіз механічних характеристик робочих органів технологічних машин, та отримані експериментальні залежності статичного моменту від частоти обертання електродвигуна, дають змогу реалізувати раціональне керування асинхронним двигуном за адаптивним алгоритмом формування вольт-частотних характеристик для кожного із розглянутих варіантів.

Для реалізації таких способів керування доцільно використовувати системи регульованого електропривода на базі перетворювачів частоти (ПЧ), що дозволяють незалежно від режиму роботи автоматизованого електропривода забезпечувати високий коефіцієнт потужності силового кола і водночас хороші статичні та динамічні показники системи регулювання. Функціональна схема частотно-регульованого автоматизованого електропривода показана на рисунку 1.13.

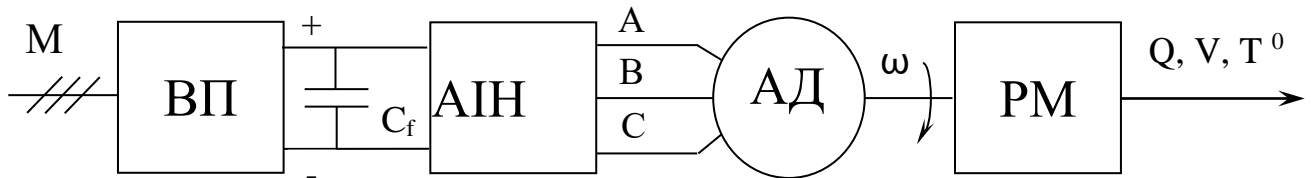


Рисунок 1.13. Функціональна схема частотно-регульованого автоматизованого електропривода : М – мережа, ВП – випрямляч, C_f – ємнісний фільтр, АІН – автономний інвертор напруги, АД – асинхронний двигун, РМ – робоча машина

Проведені порівняння переконливо свідчать про значні переваги систем регульованого електропривода на базі ПЧ у випадках широкого діапазону регулювання швидкісних режимів технологій виробництва твердопаливних пелет.

Оптимізація швидкісних характеристик транспортерів, дозаторів та їх взаємодія із змішувачами безперервної дії є вельми перспективним напрямом економії електроенергії. Заощадження потужності (споживаної енергії) ΔP_e під час роботи транспортера при сталому моменті навантаження та змінній продуктивності транспортування визначається (у відносних одиницях) за співвідношенням:

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

де M^* – відносний момент неробочого ходу транспортера;

Q^* – відносна продуктивність транспортера.

При зниженні продуктивності транспортера, наприклад на 30–50 % і при навантаженні холостого ходу ($M^* = 0,4$), економія потужності складає 12–20 %.

При зв'язному регулюванні подачі компонентів твердого твердопаливних пелет можна успішно перерозподіляти спектральні густини їх потоків та ефективно використовувати згладжуючу здатність дозатора. Проведені дослідження дозаторів [4, 5] показали, що крім технологічного ефекту можна зменшувати в 2–2,5 рази витрати електроенергії в динаміці.

Зазначені факти дають підставу припускати, що існують усі передумови для раціонального використання ресурсів частотно-регульованого автоматизованого електропривода в технологіях виробництва твердопаливних пелет, які можуть бути реалізовані шляхом розробки і впровадження адаптивних алгоритмів та

інтелектуальних систем керування. Заощадження електроенергії в електроприводі, доповнене якісними технологічними показниками, може в окремих випадках сягати 50 %.

1.5 Обґрунтування напряму та мети дослідження

Основним типом масового електропривода є нерегульований привід на базі асинхронних електродвигунів з короткозамкненим електродвигуном потужністю до 20 кВт, що складає більше 90 % від загального його парку і 75 % спожитої асинхронними двигунами електроенергії [4].

Особливість сучасного етапу його розвитку полягає в переході до регульованого електроприводу (автоматизованого електропривода) в технологічних установках, у яких до сьогодні домінував простий нерегульований електропривод. Економія при цьому сягає до 50 % електроенергії, води – 25 %, кормів – 30 %, та енергії не менше 10 % [7].

Спроби вирішити технологічні задачі на установках дозування кормів за допомогою муфт ковзання типу ПСМС та приводу постійного струму ЭТ1Е2 почались відразу після впровадження вказаних пристроїв у серійному виробництві [7, 9]. Економія енергії не була тоді основною задачею. Домінантою виступала сама можливість змінювати продуктивність робочих машин при застосуванні автоматизованого електропривода на виробництві.

Розробки велися шляхом використання асинхронних двигунів з підвищеним ковзанням. Регульований електропривод пристрою дозування хімреагентів при обробці стеблових кормів в потоці [4] вирішував практично чисто технологічні питання підвищення якості кінцевого продукту.

З появою на ринку частотно-регульованого асинхронного електропривода останнього покоління відкрились нові можливості для створення енергоощадних систем регулювання швидкісними режимами.

Вказані характеристики регульованого асинхронного електропривода дозволили будувати на їх базі системи дозування різних матеріалів. Термін окупності системи, запропонованої на Харківській ТЕЦ-5 складає 357 днів.

Покращенню динамічних властивостей безперервно-поточного дозування компонентів за допомогою частотно-регульованого автоматизованого електропривода [6]. Його застосування дозволило при використанні вагового коректора ВК-1 досягти точності дозування до 0,1 %.

Проблема використання регульованого електропривода з його інтеграцією в структури цілісного технологічного комплексу висвітлена в роботі [8]. Використання частотного перетворювача на робочих машинах поточкових ліній із виробництва полімерних плівок різних типів дозволила на 20 % зменшити енергоємність технології, значно зменшити об'єм бракованих виробів. При цьому використовуються перетворювачі фірми SIEMENS, HITACHI і MITSUBISHI.

Практично всі автоматизовані електроприводи є складовою частиною систем, котрі працюють зі змінними технологіями, що в свою чергу змінює їх швидкісні режими технологічних машин та має детермінований характер. У відомих роботах практично відсутні дослідження енергетики технологічних процесів, способів організації роботи найбільш енергоємної ланки автоматизованого електропривода – технологічної машини.

Орієнтація методів забезпечення оптимізації алгоритмів у різних галузях не зовсім відповідає задачам, властивим керуванню об'єктами в яких присутні параметри зоологічного та біологічного походження.

У [7, 9] показано, що ігнорування факторів, які формуються технологічними процесами (параметри мікроклімату, фізико-механічні властивості матеріалу, наявність продукції націленої на реалізацію живим організмам) може значною мірою вплинути на сам принцип підходу до побудови систем на базі автоматизованого електропривода .

У той же час, відсутність надійної інформації про режими та якісні характеристики виробничого процесу є стримуючим фактором при розробці систем регулювання швидкісних режимів вказаних технологій. І якщо в загальнопромисловому секторі виробництва наукові новації знаходять себе

завдяки детерміновості технологічних параметрів [8]. Але, як було задекларовано раніше, резерви в цьому напрямку наукових зусиль зовсім не поступаються іншим галузям народного господарства. Це засвідчує актуальність розглянутого питання і особливо для технологій створення мікроклімату, теплозабезпечення, виробництва твердопаливних пелет, приготування кормових сумішей тощо.

Найбільш доцільним для забезпечення енергоощадних режимів роботи асинхронного частотно-регульованого електроприводу є використання системного підходу, спрямованого на забезпечення мінімальних витрат електроенергії в електроприводі.

Враховуючи наведену вище фактологію можна вважати, що умовно організацію раціональних швидкісних режимів електропривода потокової лінії виробництва двокомпонентного твердопаливних пелет слід вважати вирішенням наступних наукових і прикладних задач:

- встановити закономірності формування пропорцій двокомпонентного твердопаливних пелет для організації зв'язного дозування сировини;
- провести аналіз процесу виробництва твердопаливних пелет та обґрунтувати вимоги до його характеристик;
- розробити математичні моделі режимів роботи регульованого електропривода, синтезувати структурну схему системи керування потоковою лінією;
- на основі методів математичної статистики визначити основні вимоги до процесу вимірювання продуктивності дозаторів безперервної дії;
- оцінити способи корекції жорсткості механічних характеристик зв'язних електродвигунів, виходячи з критерію максимуму енергетичних характеристик електродвигунів дозаторів;
- розробити алгоритм функціонування та структурну схему інтелектуальної системи керування швидкісними режимами потокової лінії виробництва твердопаливних пелет;
- провести експериментальні дослідження розробки.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ

2.1 Вихідні положення

Альтернативними способами утилізації біомаси є їх тюкування, пелетування, гранулювання та подальше використання в якості твердих біопалив. Ці альтернативи стали економічно доцільними у зв'язку з постійним зростанням вартості енергетичних ресурсів.

Твердопаливні пелети від традиційного палива відрізняються тим, що вони за своєю сутністю практично нейтральні щодо впливу на зростання парникового ефекту, оскільки рослини, які використовуються для його виробництва, забирають вуглець з атмосфери і виділяють кисень. Тобто, споживаючи твердопаливні пелети, можна призупинити глобальні зміни клімату.

Відомо, що 3 т. соломи за теплотворною здатністю еквівалентні 1000 м³ природного газу. Пелети з соломи при насипній щільності 400–500 кг/м³ мають теплоту згорання 16,5–17,5 МДж/кг.

Відомі лінії з виробництва твердопаливних пелет (Україна, Польща) у зв'язку з випадковою продуктивністю робочих машин і відсутністю зв'язного регулювання мають високу енергоємність і не забезпечують необхідну якість продукції. Зазначені недоліки обумовили необхідність створення енергозберігаючої інтелектуальної системи керування потоковою лінією виробництва твердопаливних пелет. Для реалізації вказаної задачі необхідно дослідити режими роботи поточкових ліній, розробити математичні моделі технологічного процесу, оцінити енергоощадні швидкісні режими робочих машин, розробити і реалізувати систему регульованого електропривода зв'язного дозування компонентів твердопаливних пелет з використанням нейроконтролера на основі fuzzy-технологій.

2.2 Енергоефективність виробництва твердопаливних пелет

Ефективність поточного виробництва багатокomпонентного твердопаливних пелет, з точки зору раціонального використання енергії, характеризується як показниками готової продукції, так і питомими витратами електроенергії. Від додержання складу суміші залежать теплотехнічні і товарні характеристики готової продукції [2].

Ступінь завантаження електродвигунів змішувача, дозаторів і пресу безперервної дії значною мірою визначає питому енергоемність процесу пелетування біомаси, яка згідно [8] визначається за формулою:

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

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

де i – номер компонента; n – кількість компонентів;

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

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

$E_{зм}$ – енергоемність процесу змішування, кВт.год.т⁻¹;

W_i , $W_{зм}$ і $W_{пр}$ – витрати електроенергії під час дозування i -го компонента, змішування і пресування суміші відповідно, кВт·год.

Витрати електроенергії пропорційні потужності, що споживається електроприводами з мережі, залежать від продуктивності робочих машин або режимів навантаження електродвигунів, що характеризуються значними нерівномірностями. Враховуючи випадковий характер навантаження АД, споживану ним електроенергію можна визначити за виразом:

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

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.

З метою оптимізації W_{xx} необхідно правильно вибрати потужності електродвигунів для приводу робочих машин, що працюють в режимі випадкових навантажень. Для цього знімаються графіки струму в часі і розраховуються спектральні щільності випадкових процесів навантаження. Далі за методом, запропонованим у [8], визначають еквівалентний струм і необхідну потужність.

Мінімізація другої складової рівняння (2.3) здійснюється за рахунок підвищення точності та рівномірності дозування компонентів у потоці. Вказану задачу успішно вирішують системи зв'язного регулювання продуктивності дозаторів компонентів твердопаливних пелет [5].

Витрати електроенергії пропорційні потужності, що споживається електроприводами з мережі, залежать від продуктивності робочих машин. Режими навантаження електродвигунів у поточних лініях характеризуються значною нерівномірністю.

Аналіз діаграм навантаження електроприводів дозаторів показав, що у всіх них $M_c = const$, тому в значній мірі визначаються перехідними процесами при дозуванні компонентів. Враховуючи, що $M_c = const$, запишемо рівняння сумарних втрат для приводного двигуна дозатора

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + I^2 R, \quad (2.4)$$

де $\Delta P_{ст}$ – втрати у сталі;

$\Delta P_{мех}$ – 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.

Таким чином з аналізу (6) видно, що втрати енергії в електродвигунах шнекових дозаторів компонентів твердопаливних пелет визначаються величиною

інерції механізму шнека, а також заданою швидкістю його обертання. Вплив на втрати здійснює дисперсія швидкості σ_{ω}^2 , збільшення якої призводить до зростання витрат електроенергії в електроприводі.

У ході досліджень процесу дозування компонентів твердопаливних пелет нами доказано, що під час зростання σ_{ω}^2 практично зростає σ_Q^2 , зменшення якої призводить до економії енергії, а також покращує збалансованість суміші твердопаливних пелет. Тому керування повинно включати в себе первинні перетворювачі продуктивності дозаторів компонентів, регульований електропривод дозаторів безперервної дії та нейрорегулятор на базі мікропроцесорного контролера, який переналаштовується в залежності від складу і характеристик технологічного обладнання та рецептури твердопаливних пелет. Проведений аналіз показав, що застосування системи дозволяє знизити енергоємність процесу виробництва твердопаливних пелет на 15–20 %.

Як було задекларовано нами вище (розділ 1) визначальний вплив на енергоємність процесу пелетування має величина вологості базового компонента, яка в більшості випадків перевищує 20...30 %. Подрібнена пшенична «сіра» солома з такою вологістю не піддається пелетуванню і виробникам на практиці приходиться іти на порушення технологічного процесу, пропускаючи біосировину через дозатор, екструдер і прес, зменшуючи таким чином вологість на 3–4 %. Пропустивши 2–3 рази біосировину, добиваються зменшення вологості соломи на 7–9 %, витративши при цьому в 1,5...2 рази більше електроенергії ніж при штатній ситуації, коли вологість на вході дозатора не перевищує 15–16 %.

При вологостях більше 25 % застосовують підсушування сировини в циклонних сушарках, що призводить до значних перевитрат теплової та електричної енергії.

Проведені нами дослідження показали, що при вологості понад 25 % і продуктивності у верхній шкалі дозатора на виробництво 1 т. пелетів витрачається в 2...3 рази більше енергії, а це робить експлуатацію потокової лінії нерентабельною (Рисунок 2.1).

Отже, розширення вологісного діапазону базової сировини можливе тільки у випадку добавляння другого компоненту в твердопаливних пелет з низькою

базовою вологістю, наприклад, подрібнених качанів кукурудзи після насінневих заводів, або відходів елеваторної промисловості, вологість яких не перевищує 15%.

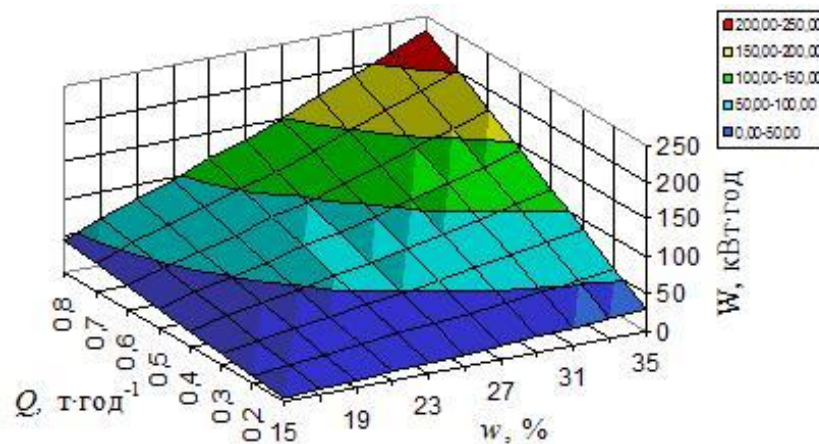


Рисунок 2.1. Залежність енерговитрат на виробництво пелетів від вологості базової біосировини і продуктивності потокової лінії

2.3 Статистичний аналіз процесу дозування сировини у потокових лініях безперервної дії

На сьогодні створено цілий ряд машин та обладнання для рівномірної безперервної подачі сировини у змішувачі, сушильні камери, гранулятори, преси тощо. Практично у всіх дозаторах домінує регульовальний асинхронний електропривод, що є позитивною передумовою автоматизації процесу дозування.

Спільним недоліком вказаного обладнання є суттєва нерівномірність об'ємного дозування подрібненої стебельної сировини (до 35 % за коефіцієнтом варіації), що призводить до зниження якості кінцевого продукту, а також до збільшення енерговитрат на технологічний процес [3]. Це пов'язано з недетермінованістю потокового процесу дозування сировини і відсутністю чітких методик для повноцінного математичного аналізу флуктуаційних явищ, характерних для вказаних технологій [7]. Отже, пошук раціональних математичних інструментаріїв, що якісно описують процеси безперервного

дозування матеріалу з властивостями випадкових функцій дозволять розробити повноцінні передумови для створення систем керування технологіями виробництва твердопаливних пелет.

Основною характеристикою дозатора безперервної дії є його продуктивність, що визначається як інтеграл від поточного значення витрат за одиницю часу. Тому аналіз і пошук критеріїв оцінювання 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 \bar{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

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

де N – кількість зафіксованих точок;

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

Знайдені за формулами (2.17) коефіцієнти визначають тригонометричний поліном

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

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

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

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 (частота Найквіста) визначається згідно теореми Котельнікова

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

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 $m=0, \sigma \approx 1$.

Перевірку стаціонарності процесу краще всього проводити за зміною кореляційної функції протягом визначеного часу. Якщо на протязі визначеного часового інтервалу $R(\tau) \rightarrow 0$, то цього достатньо щоб вважати процес стаціонарним [2].

Після апробації процесу безперервного дозування сировини твердопаливних пелет на стаціонарність обчислюємо статистичні оцінки функції $Q(t)$ – математичне сподівання, $-m_x$; дисперсію D_x функції $x(t)$; середнє квадратичне відхилення σ , коефіцієнт варіації c , спектральну густину $S(\omega)$; кореляційну функцію $R(\tau)$; третій центральний момент (асиметрію), M_3 ; четвертий центральний момент, M_4 .

Визначені вище оцінки дають змогу найбільш повно характеризувати безперервно-поточне дозування і дають чіткий математичний опис процесу дозування, який буде справедливий для всіх режимів роботи і дозволить чітко обґрунтувати вимоги до обладнання та накреслити шляхи досягнення практичної мети. Крім того, використовуючи теорію випадкових функцій і отримані експериментальні дані випробувань технологічного обладнання [4] можна на попередньому етапі прогнозувати вимоги до електрообладнання лінії продукування твердопаливних пелет.

Основною характеристикою дозатора безперервної дії є рівномірність видачі заданої кількості матеріалу з необхідною точністю, тобто в забезпеченні виразів

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

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

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

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

Оскільки в нашому випадку швидкість подачі шнекового транспортера ($V = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) є визначальною по частоті, згідно [2] вибираємо $\Delta t = 5 \text{ с}$, що прийнятий для аналізу аналогічних дозуючих пристроїв.

Проведені нами дослідження за методикою висвітленою в [4] підтвердили позитивні регулювальні характеристики шнекового дозатора. Шкала продуктивності обладнання на двох компонентах сировини (подрібнена пшенична солома, подрібнені качани кукурудзи) носить лінійний характер (рис. 2.2).

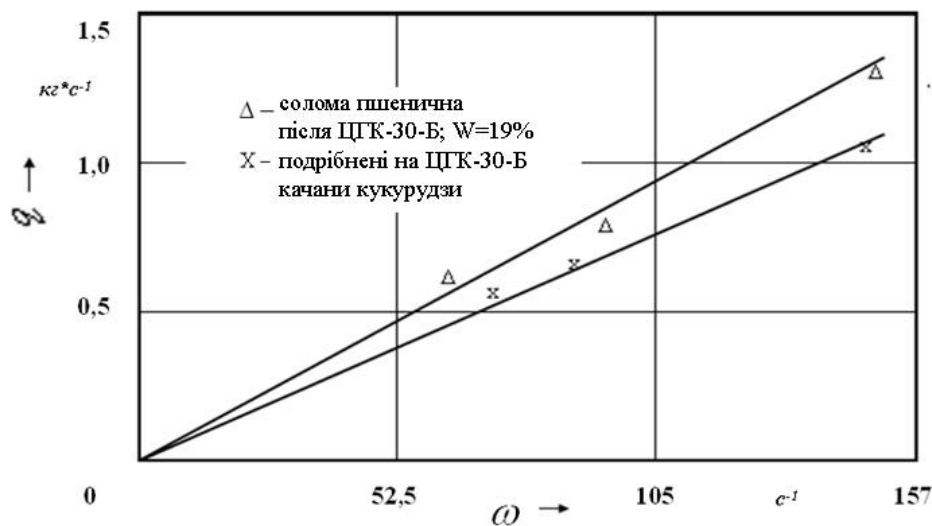


Рисунок 2.2. Шкала продуктивності шнекового дозатора

Побудовані за експериментальними даними кореляційні функції потоків матеріалу для трьох швидкостей шнека дозатора $\omega_1 = 52,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 105 \text{ с}^{-1}$, $\omega_3 = 157 \text{ с}^{-1}$ 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.

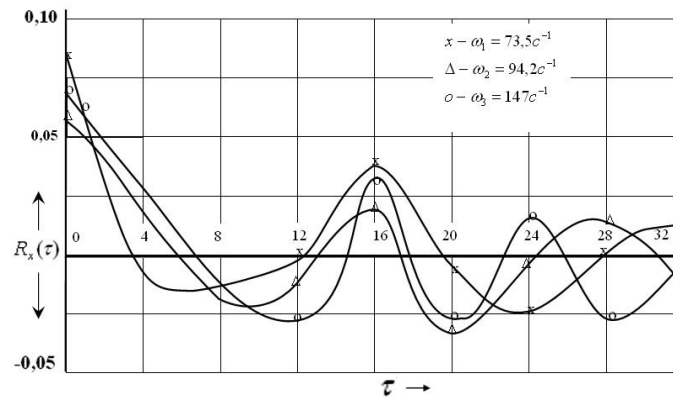


Рисунок 2.3. Кореляційні функції потоків сировини при різних швидкостях шнекового дозатора

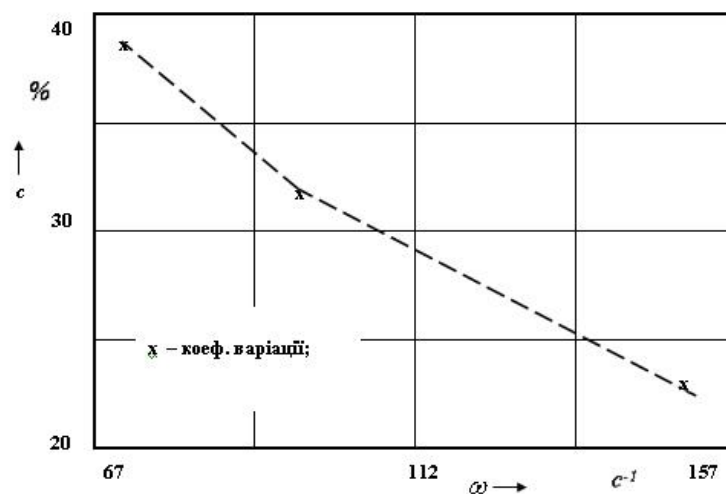


Рисунок 2.4. Залежність коефіцієнта варіації від швидкості шнекового дозатора

Проведені дослідження процесу дозування подрібненої соломи дозатором безперервної дії показали, що основним джерелом дисперсії є шнековий механізм, а отримана спектральна щільність розподілу $S(\omega)$ (Рисунок 2.5) апроксимується експоненціально - косинусними функціями виду:

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

де Dx – дисперсія, кг^2 ;

α_1, β_1 – параметри автокореляційної функції (АКФ);

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

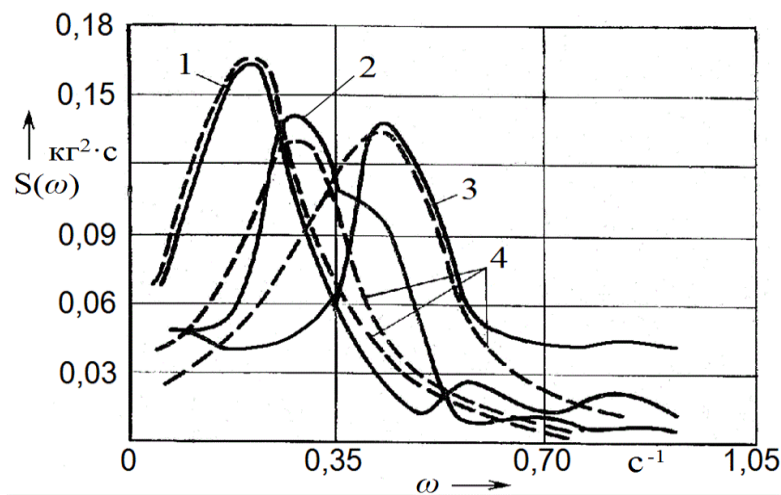


Рисунок 2.5. Спектральні щільності потоків подрібненої соломи сформованих шнековим дозатором для частот обертання двигуна: 1 – $\omega_1 = 75 \text{ с}^{-1}$, 2 – $\omega_2 = 95 \text{ с}^{-1}$, 3 – $\omega_3 = 147 \text{ с}^{-1}$, 4 – апроксимовані

Аналізуючи спектри дисперсії потоків матеріалу (рис. 2.5) можна зауважити, що з їх ростом $S(\omega)$ зменшується і при $\omega \geq 0,95 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ практично наближається до нуля, оскільки їх характеристики в межах наведених частот $0,05\text{--}0,95 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ охоплюють 85–95 % загальної дисперсії Dx . При цьому, максимальна частота елементарних гармонік потоку дозованого матеріалу практично не перевищує $0,95 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ і відповідно період коливань дисперсії можна візуалізувати, так як його величина складає $T_{\text{макс.}} = 2\pi / 0,95 = 6,6 \text{ с}$. За наведений період може постати необхідність в зміні продуктивності дозатора і відповідно потреба в регулюванні процесом безперервного дозування сировини в пресуючий механізм. Дозування біомаси з даним розподілом по частотах і апроксимованою залежністю (2.19) потребує застосування спеціальних регуляторів, частотні характеристики яких мають вигляд вибіркового полосового фільтра [50]. Спектри 1, 2, 3 (Рисунок. 2.5) апроксимуються виразом (2.19) з похибкою по дисперсії до

5 %. Значення параметрів АКФ відповідно по спектрах дорівнюють:

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

Оскільки величина параметра коливальності β змінюється в незначному діапазоні і знаходиться в межах $0,21 - 0,41 \text{ с}^{-1}$, то вирішальне значення у формуванні збурюючого впливу на пристрій керування (регулятор) буде мати параметр затухання α . При збільшенні α спектральна щільність потоку біомаси наближається до вигляду $S(\omega) = \text{const}$, а коливання продуктивності матеріалу корелює зі спектром «білого шуму». При зменшенні α спектральна щільність зменшується швидше і в коливаннях продуктивності дозатора домінують інфранизькі частоти $0,05-0,95 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$, які доступні в керуванні промисловими пропорційно-інтегральними (ПІ) регуляторами.

Для регулювання процесу дозування стеблевої біомаси необхідно в потоці вимірювати продуктивність живильного пристрою. Для цього використано акустичний витратомір, дослідження якого показали, що похибка вимірювань не перевищує 5 % на подрібненій соломі злакових та бобових культур.

Аналіз якості процесу дозування проводився методом пошуку мінімуму рівняння

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

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) проводилась 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 $D_{\Delta G_A}(\Delta t) = D_{\Delta G_i} f(\alpha_i, \beta_i, \Delta t)$, 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 .

Величина $D_{\Delta G_A}(\Delta t)$ буде визначатися в основному параметрами передаточної функції самого шнекового дозатора, яка має вид:

$$W(p) = \bar{K}, \quad (2.27)$$

де $\bar{K} = \pi d^2 s_2 / 4$ (d, s_2 – діаметр і крок шнека відповідно).

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) $\omega_i = 1,53 \text{ рад. } c^{-1}$, а для витратоміра $\omega_i = 5 \text{ рад. } c^{-1}$, отримаємо вихідні дані для визначення граничних частот регулятора.

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

Це свідчить про те, що по своїх динамічних властивостях акустичний витратомір і шнековий дозатор задовольняють вимоги, що ставляться до замкнутих 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 $D_{\Delta G_A}(\Delta t)$ 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 двокомпонентного твердопаливних пелет

Одним із пріоритетних напрямів зменшення обсягів використання традиційних енергоресурсів є використання твердопаливних пелет на користь якого свідчать економічні, технічні та екологічні чинники.

Впровадження теплотехнічного обладнання, що працює на даному виді палива, характеризується малим терміном окупності, відсутністю викидів в атмосферу сполук сірки, хлору та інших шкідливих елементів, річним циклом відновлення потенціалу сировини [8].

Відповідно до останніх досліджень, перспективною сировиною для виготовлення твердопаливних пелет є солома зернових культур, відходи елеваторної промисловості та кукурудзяні качани. За своїми енергетичними характеристиками вони майже адекватні. Як відомо [4], за своєю теплотворною здатністю 2,7–2,9 тонни вказаної біомаси еквівалентні 1000 м³ природного газу. На сьогодні солома, качани кукурудзи та відходи не є товарним продуктом, що має свою конкретну ціну. В кожному конкретному випадку ціна залежить від регіону України і корелює в межах 150 ... 300 грн. за тонну. Це на порядок нижча ціна від природного газу, мазуту, пічного палива – традиційних для АПК джерел енергії.

Отже, пошук раціональних способів продукування твердопаливних пелет з характеристиками, що задовольняють теплогенеруючі установки, є надзвичайно актуальною задачею для енергетики.

Теплоенергетики досліджують дві основні характеристики твердопаливних пелет із соломи і відходів: вологість, що не повинна перевищувати 15 % і вміст лужних металів, які зменшують температуру розщеплення і плавлення палива, що призводить до появи значних шлакоутворень на внутрішній поверхні камери згоряння. Оплата в процесі дотримання згаданих вище вимог здійснюється в

залежності від теплоти згоряння твердопаливних пелет, яка коливається в межах 14–16 МДж/кг.

Одним із перспективних шляхів покращення теплоенергетичних властивостей твердопаливних пелет є його багатокomпонентність, яка дозволяє:

- а) зменшити кількість золи;
- б) підвищити температуру розщеплення і плавлення біомаси;
- в) знизити вологість твердопаливних пелет.

Проведені дослідження засвідчили, що на даному етапі розвитку продукування твердопаливних пелет найперспективнішою технологією є потокова лінія виробництва пелетів серії Wektor (Польща) на базі пресів ударного типу. На користь вказаної технології говорить багато факторів: ціна обладнання, якість продукції, продуктивність, енергоємність, металоємність, розповсюдженість (сервісні можливості). Вона сертифікована в Євросоюзі і є найбільш розповсюдженою в Польщі, Чехії, Румунії, Україні [7]. Загальні витрати на виробництво 1 т. пелетів за допомогою лінії Wektor коливаються в межах до 500 грн. за тонну, в залежності від ціни сировини, при цьому енерговитрати на тонну не перевищують 150 грн (Додаток А1).

Наші зусилля були направлені на пошук оптимального, з точки зору застосування, в теплогенераторах двокомпонентного твердопаливних пелет.

Об'єктом дослідження були процеси виготовлення багатокomпонентного твердопаливних пелет з метою визначення його оптимального складу і формулювання вимог до існуючого технологічного обладнання.

Нами проведені випробування діючого обладнання заводу з виготовлення твердого твердопаливних пелет в м. Полтава.

В якості компонентів використовувались подрібнені качани кукурудзи з різним модулем помолу та подрібнена солома пшенична «сіра». Отримані твердопаливні пелети виготовлялось в різних варіантах. На рисунках (2.6–2.9) показано пелети як однокомпонентні – рисунок 2.6 – подрібнені кукурудзяні качани, рисунок 2.7 – подрібнена пшенична «сіра» солома (K_2/C_2), так і в двокомпонентному варіанті – рисунок 2.8 (в пропорції $K_2/C_2 = 3/1$), рисунок 2.9 (в пропорції – $K_3/C_3 = 4/1$).



Рисунок 2.6. Пелети з подрібнених кукурудзяних качанів



Рисунок 2.7. Пелети з подрібненої пшеничної соломи "сірої"



Рисунок 2.8. Двокомпонентні пелети в пропорції K_2/C_2



Рисунок 2.9. Двокомпонентні пелети в пропорції K_3/C_3

Досліди показали, що пелети, виготовлені з подрібнених качанів кукурудзи при позитивних теплоенергетичних характеристиках не відповідають вимогам транспортування і зберігання готової продукції з причини відсутності у пелеті лігніну, що є природним скріплювачем продукції. Міститься він у достатній кількості в соломі і за його відсутності пелети повністю втрачають товарні характеристики.

Пелети з соломи (Рисунок 2.7), при позитивних товарних характеристиках, мають підвищений вміст золи (до 4,5 %) та низьку температуру деформації і розщеплення біомаси (близько 1000 °C), що значно погіршує їх теплотехнічні властивості.

Двокомпонентне паливо, завдяки наявності взаємодоповнюючих

характеристик, має кращі товарні та теплотехнічні показники. Причому наявність другого компонента (подрібнених качанів кукурудзи) призводить до зменшення зольності палива до (2,3 %) та підвищення температури плавлення біомаси до 1300 °С, що позитивно впливає на експлуатацію теплогенераторів (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 – качани кукурудзи з модулем помолу 5,0 мм;

C₁ – солома пшенична «сіра» з модулем помолу 30...50 мм;

C₂, C₃ – солома пшенична «сіра» з модулем помолу 30...50 мм і масою 1 кг;

K₂ – качани кукурудзи з модулем помолу 1,5 мм і масою 3 кг;

K₃ – качани кукурудзи з модулем помолу 5,0 мм і масою 4 кг.

Задекларована нами технологія приготування двокомпонентного твердопаливних пелет [3] передбачає безперервне дозування сировини в прес з подальшим продукуванням пелетів. Структурна схема технологічної лінії показана на рисунку 2.10.

Використання потокових ліній продукування двокомпонентного твердопаливних пелет прискорює технологічний процес та зменшує експлуатаційні витрати не менше ніж на 30–40 % порівняно з обладнанням порційної дії еквівалентної продуктивності [8].

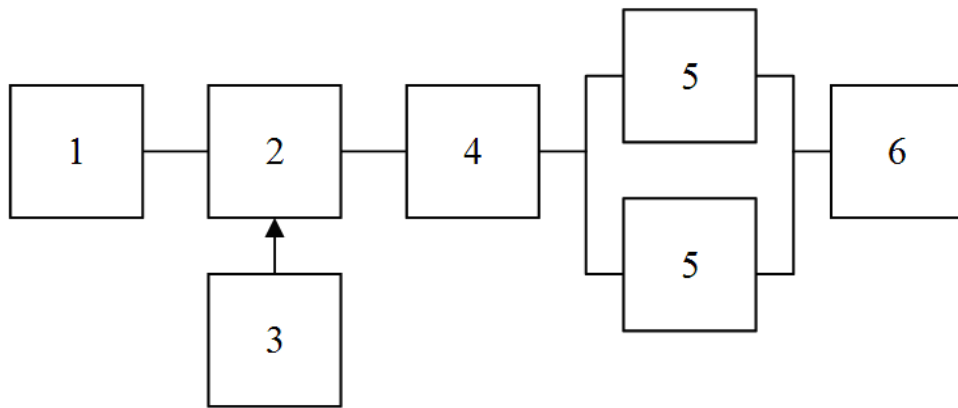


Рисунок 2.10. Структурна схема потокової лінії приготування двокомпонентного твердопаливних пелет: 1 – подрібнювач соломи; 2 – дробарка; 3 – дозатор 2-го компоненту; 4 – силос-дозатор твердопаливних пелет; 5 – преси; 6 – накопичувач готової продукції

Задача безперервного дозування компонентів твердопаливних пелет зводиться до послідовного формування доз заданої величини за проміжок часу, величина якого визначається робочим об'ємом змішувача. Оскільки потоки компонентів є випадковими функціями, то для компенсації похибки дозування з метою визначення оптимальної рецептури технологічних ліній підбирають необхідні значення дозаторів і змішувача.

Аналіз процесів у технологічних лініях з наперед заданою структурою та вибраним складом обладнання проводиться на основі досліджень характеристик потоків компонентів, що формуються дозаторами і побудові автокореляційних функцій. Їх вигляд дозволяє визначити стаціонарність та ергодичність процесів, а параметри – придатність вибраного дозатора до потокової лінії з конкретним змішувачем.

Спектральні щільності потоків біомаси визначаються безпосередньо за вихідними реалізаціями за допомогою розробленої нами методики [2] і подаються як графічні залежності дисперсій від частоти коливань окремих компонентів. Запропонований аналіз спектрів полягає у визначенні діапазонів змін частот коливань потоків біомаси сумарної дисперсії (або середньоквадратичного відхилення) потоку кожного компонента. Першою умовою відповідності є відсутність у спектрі дисперсії потоку з частотою меншою від критичної частоти

$\omega_{кр}$, 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 застосування потокової технології приготування двокомпонентного твердопаливних пелет необхідне покращення системи керування технологічним процесом. Відомі проекти спрямовані на удосконалення окремих елементів системи автоматичного керування (САК) для підвищення точності дозування і рівномірності подачі біомаси. Для цього використовуються регульовані електроприводи, первинні перетворювачі витрат компонентів твердопаливних пелет і регулятори. Впровадження САК дозволяє підвищити якість сумішей і знизити витрати праці й електроенергії порівняно з системами дистанційного керування.

Мінімізувати витрати електроенергії на виробництво твердого твердопаливних пелет та покращити його теплотехнічні і товарні характеристики можливо за рахунок підвищення точності дозування компонентів в потоці, шляхом зв'язного регулювання продуктивності дозаторів. Статистичний аналіз процесу безперервного дозування сировини дає можливість визначити основні характеристики процесу $m_x, c, R_x(t), S(\omega)$, дозволяє сформулювати ключові вимоги до діапазонів роботи робочих машин, які повинні знаходитися в межах – по ідентифікації витрат – від 0,2 до 0,7 т·год⁻¹, по частоті обертання електродвигуна шнека – від 30 до 157 с⁻¹.

Дослідження двокомпонентних твердопаливних пелет, в якому використані природні властивості компонентів (солома – наявність лігніну, подрібнені качани кукурудзи – менша зольність і вища температура горіння) дозволили зробити висновок, що найкращі теплотехнічні характеристики мають пелети з пропорцією 1/2,5. Причому пропорція 1/5 є критичною з точки зору отримання товарного продукту. При зменшенні вмісту соломи (лігніну) в пелеті вони втрачають свої товарні характеристики і є непридатними до транспортування та використання.

РОЗДІЛ 3

ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗНОГО ДОЗУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ

3.1 Розробка моделі для дослідження режимів роботи регульованого електропривода потокової лінії

Сучасне виробництво напівпровідникової техніки та мікроелектроніки дозволяє створити електропривод, який відповідає будь-яким вимогам технологічного процесу. Застосування керованих перетворювачів частоти, наприклад, SIEMENS, дозволяє створити установки з інтенсивними динамічними властивостями і мінімальними додатковими втратами. Висока швидкодія контролерів управління, які використовуються в системах керування перетворювачами, дає можливість отримати характеристики електропривода, що відповідають характеристикам виробничих механізмів. У кожному конкретному випадку необхідно забезпечити оптимальний діапазон і точність регулювання координат. Для цих цілей у розділі аналізуються й оптимізуються структури регульованого електропривода, які забезпечують вимоги технологічних процесів і за діапазоном і за точністю регулювання.

Серед використаних електроприводів, більшість складає група регульованих за швидкістю систем, що працюють в статичних режимах з постійним або зі змінним моментом навантаження. Для таких електроприводів оптимізуються усталені режими роботи за енергетичними критеріями: мінімум витрат енергії в системі «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун». Розглядається проблема енергетичної оптимізації, заснована на принципах векторного управління асинхронним електродвигуном та ідеї підпорядкованого управління магнітним потоком, впроваджених у виробках фірми Rockwell Automation.

Оптимізація енергетичних і динамічних характеристик електропривода ставить на часі застосування інтелектуальних технологій в управлінні режимами

його роботи. Суттєва нелінійність, параметрична нестационарність асинхронного електродвигуна як об'єкта керування, необхідність співставлення аналітичних та експериментальних результатів досліджень зумовили потребу в розробці фізичних моделей (спеціалізованого стенду) і методики оцінювання впливу різних чинників на ефективність роботи автоматизованого електропривода.

Створення регульованих електроприводів нерозривно пов'язане з необхідністю удосконалення математичного апарату дослідження асинхронного електродвигуна, як елемента складних замкнених систем, в процесі аналізу та синтезу яких математична модель машини безпосередньо використовується в якості інструменту під час пошуку алгоритмів керування, що оптимізуються за різними критеріями.

Із розвитком обчислювальної техніки з'явилися нові можливості моделювання комплексних систем електропривода, у тому числі, і систем з безпосередніми перетворювачами частоти. Зростання обчислювальної здатності ЕОМ дозволило розрахувати складні аналітичні вирази, що описують моделюючу систему. Використання прикладного пакету MATLAB з комплектом імітаційного моделювання Simulink суттєво збільшує ефективність проведення комплексного моделювання складних електромеханічних систем.

У процесі експериментальних досліджень технології виробництва двокомпонентного твердопаливних пелет встановлено, що загальна вологість w суміші сировини у бункері-змішувачі, яка надходить у прес, має становити 12–16 %, а співвідношення масових часток сухих компонентів (подрібнені солома та кукурудзяні качани) у ній – 1:1–1:5 відповідно [4].

Для забезпечення вказаних вище умов виникає необхідність керування продуктивністю дозаторів у процесі дозування кожного із компонентів твердопаливних пелет у заданому співвідношенні, яке доцільно здійснювати засобами частотно-регульованого асинхронного електропривода.

З цією метою нами розроблено структурну схему автоматизованої потокової технологічної лінії виробництва двокомпонентних твердопаливних пелет (рисунок 3.1). Вона складається з двох завантажувальних дозаторів: секторного 1

для подрібненої соломи та шнекового 2 для подрібнених качанів кукурудзи з регульованими асинхронними двигунами (АД) 3, 4, бункера-змішувача 12, підпресовувального шнека-екструдера з регульованою продуктивністю 14 та преса 15. Процес керування швидкісними режимами регульованих технологічних машин здійснюється нейроконтролером 11 та відповідними перетворювачами частоти 7–10 з АД.

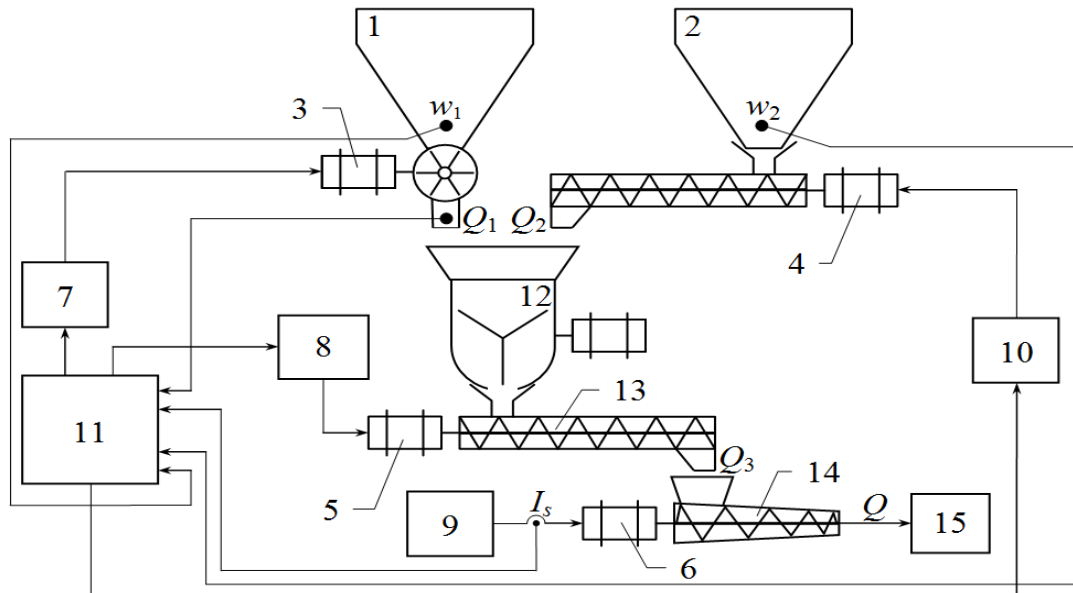


Рисунок 3.1. Структура автоматизованої потокової технологічної лінії виробництва двоконпонентних твердопаливних пелет: 1 – бункер-дозатор секторний; 2 бункер-дозатор шнековий; 3, 4, 5, 6 – регульовані асинхронні двигуни; 7, 8, 9, 10 – перетворювачі частоти; 11 – нейроконтролер; 12 – бункер-змішувач; 13 – шнек-дозатор; 14 – підпресовувальний шнек; 15 – прес; w_1 , w_2 – датчики вологості; Q_1 – датчик продуктивності, I_s – датчик струму статора АД

Для забезпечення сталого об'єму заповнення бункера-змішувача та постійної щільності пелетів згідно вимог, сумарна масова продуктивність двох завантажувальних бункерів-дозаторів Q_1 , Q_2 повинна дорівнювати продуктивності вивантажувального шнека-дозатора Q_3 і, в свою чергу, має визначатися продуктивністю технологічної лінії, тобто залежати від продуктивностей підпресовувального шнека-екструдера та преса 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:

$$\sum_{i=1}^n S_1 v \rho_{1i} \Delta t_i + \sum_{i=1}^n S_2 k_i v \rho_2 \Delta t_i = \sum_{i=1}^n S_3 \alpha (v + k_i v) \rho_3 \Delta t_i = S_4 \beta (v + k_i v) \rho_4 T, \quad (3.3)$$

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.

Продуктивності шнекових дозаторів при сталій швидкості обертання робочих органів мають характер випадкових функцій з нормальним законом розподілу величин. Для згладжування дисперсії їх продуктивностей в існуючих технологіях застосовують бункери-змішувачі великого об'єму (2 м^3), які виконують роль інтеграторів. Процес змішування у них забезпечується АД потужністю 3 кВт. Величина об'єму бункера-змішувача та відповідно потужність АД вибрані із розрахунку забезпечення необхідних якісних показників сировини (згідно вимог), що надходить у прес, з урахуванням невідповідності швидкісних режимів вхідних і вихідних дозаторів та дисперсію їх продуктивностей.

Застосування інтелектуальної системи керування процесом виробництва двокомпонентних твердопаливних пелет на базі нейротехнологій дає змогу

забезпечити синхронну роботу всіх машин (дозаторів компонентів, вивантажувального шнека і преса екструдера) шляхом корекції їх швидкісних режимів з урахуванням дисперсій продуктивностей і скоротити час інтегрування у бункері-змішувачі до мінімально необхідного (20 с), виходячи із заданої величини нерівномірності змішування компонентів сировини. Це дає змогу суттєво зменшити його об'єм (до $0,05 \text{ м}^3$) та потужність привідного АД до 0,25 кВт.

Вказаний час інтегрування вибрано, виходячи з умови фільтрування високочастотних складових дисперсії продуктивностей дозаторів, і з урахуванням часу змішування. Коефіцієнти варіацій продуктивностей дозаторів у випадку використання подрібнених качанів кукурудзи і соломи становлять 5 % та 15 % відповідно [10]. Виходячи з цього, необхідно контролювати тільки низькочастотні складові дисперсії поточної продуктивності дозатора одного із компонентів суміші з більшою варіацією (Q_1) та підтримувати необхідну величину продуктивності з метою отримання заданої величини вологості суміші, що подається у прес, яка не повинна перевищувати 16 %.

Зараз у технологічному процесі виробництва твердопаливних пелет отримують методом шнекового або шнеково-ударного пресування (екструзії), у процесі якого відбувається формування виробів необмеженої довжини продавлюванням аморфного матеріалу через форму-головку (філь'єру) з каналом необхідного профілю.

Аморфність подрібненого матеріалу досягається підвищенням температури пресування до 250–300 °С за рахунок внутрішнього та зовнішнього або тільки внутрішнього (у технології із використанням додаткового преса ударного типу) нагрівання. Внутрішнє нагрівання відбувається у результаті виникнення сил тертя між шнеком і матеріалом при високому робочому тиску.

Таке технологічне обладнання затрачає значну кількість електроенергії, раціональність використання якої суттєво залежить від режимів його роботи, зокрема частоти обертання шнека, продуктивності завантажувального транспортера, щільності пресування, виду сировини та її вологості.

Величина питомих витрат електроенергії під час виробництва твердого твердопаливних пелет суттєво залежить від перерахованих вище чинників.

З метою аналізу енергоспоживання у галузі виробництва твердопаливних пелет нами проведено дослідження технологічної лінії пелетування соломи «сірої» на одному із підприємств м. Полтави.

У процесі досліджень з'ясувались електромеханічні характеристики асинхронного електропривода технологічного обладнання, зокрема шнекових дозаторів, змішувача та пресувальних машин (підпресувального шнека-екструдера, преса ударного типу), а також швидкісні режими його роботи.

На підставі результатів проведених експериментальних досліджень енергетики процесу виробництва твердопаливних пелет, що включає етапи дозування та змішування компонентів сировини, а також їх кінцеве пресування, отримано залежність питомого енергоспоживання технології від продуктивності технологічної лінії та вологості сировини, яка представлена графічно у вигляді поверхні (Рисунок 3.2).

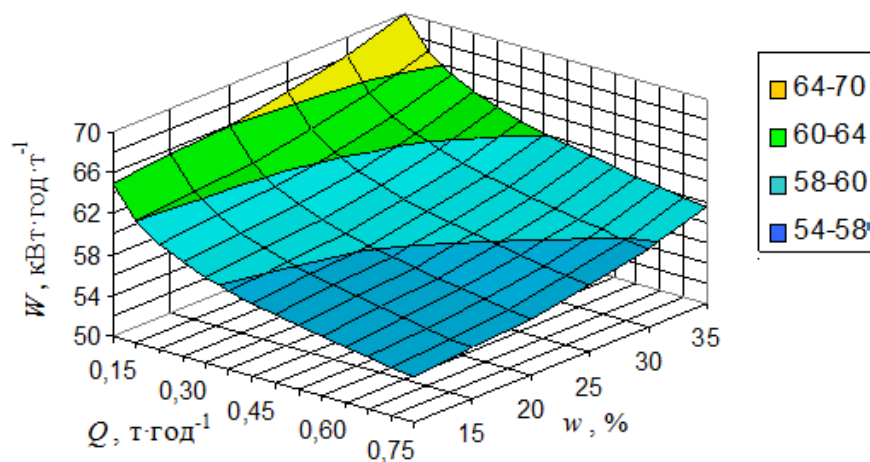


Рисунок 3.2. Залежність питомих витрат електроенергії W від Q та w сировини

Тенденція до зростання питомих витрат електроенергії W при зниженні продуктивності технологічної лінії Q пояснюється особливостями механічних характеристик робочих органів шнекових машин, а також збільшенням втрат у регульованому електроприводі на низьких частотах обертання АД. Підвищена вологість сировини спричиняє збільшення опору в'язкого тертя, що виникає під час її переміщення у процесі дозування компонентів твердого твердопаливних

пелет, а також змішування і, особливо, під час пресування.

Величина струму I_s АД підпресовувального шнека найбільш суттєво залежить від щільності пресування твердопаливних пелет, що визначається його власною продуктивністю Q , а також продуктивностями преса та шнека-дозатора Q_3 (див. рисунок 3.1), тому необхідно забезпечити синхронну роботу вхідних і вихідних дозуючих пристроїв з урахуванням нерівномірності їх продуктивності.

За даними експериментальних досліджень встановлено, що потужність, яка споживається електроприводом підпресовувального шнека, становить близько 40 % від загальної потужності вказаної технології. Вона затрачається на подолання сил тертя під час руху матеріалу в зоні завантаження, створення циркуляційного потоку між витками та ущільнення сировини до необхідної для подальшого пресування величини. Для шнека зі змінною глибиною гвинтової канавки споживання потужність визначається [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.

Оскільки для визначеного типу шнека змінні J , t , e , l_0 є константами,

механічна потужність, що затрачається, залежить від коефіцієнта в'язкого тертя μ , частоти обертання n у другій степені та щільності пресування, вираженого через перепад тиску ΔP .

Щільність пресування у вказаній технології становить близько 1:10 і задається співвідношенням об'ємних продуктивностей підпресовувального шнека та ударного преса, а також регулюванням величини зусилля на виході технологічного отвору під час проходження твердопаливних пелет.

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 ($k = 1,5 \dots 3$).

Регулювання продуктивностей технологічних машин в даний час здійснюють у ручному режимі засобами частотно-регульованого електропривода, що не забезпечує їх синхронної роботи і призводить до невиконання умови, згідно з рівнянням (3.1). Виникають перевитрати електроенергії АД підпресовувального шнека внаслідок значного зростання його механічного навантаження та до зниження якісних показників продукції. Це підтверджується експериментальними дослідженнями, проведеними у виробничих умовах, під час яких виявлено значне перевищення струму статора АД підпресовувального шнека (до 15 А, при номінальному для даного АД – 11 А), а в деяких випадках пікове навантаження спричиняло зупинку АД із-за невідповідності його швидкісного режиму та режиму роботи завантажувального шнека за підвищеної вологості сировини.

З точки зору забезпечення енергоефективності технологічного процесу доцільно підтримувати продуктивності вказаних машин у визначених швидкісних режимах, що забезпечують номінальну, для встановленого двигуна, величину струму статора.

Ця задача вирішувалася шляхом регулювання продуктивності дозатора Q_3 за допомогою частотно-регульованого асинхронного електропривода, виходячи із величини струму АД підпресовувального шнека.

З метою дослідження швидкісних режимів роботи та енергетики асинхронного електропривода вказаного вище технологічного обладнання в середовищі MATLAB [8] розроблено імітаційну модель технологічної установки (Рисунок 3.3), яка базується на створених математичних моделях шнекових дозаторів та підпресовувального шнека-екструдера (за рівняннями 3.2–3.6) (Рисунок 3.4) і відтворює процес функціонування вказаних технологічних машин у замкнутій системі автоматичного керування продуктивністю завантажувального шнека-дозатора Q_1 , що забезпечує задану номінальну величину струму статора АД вказаного обладнання.

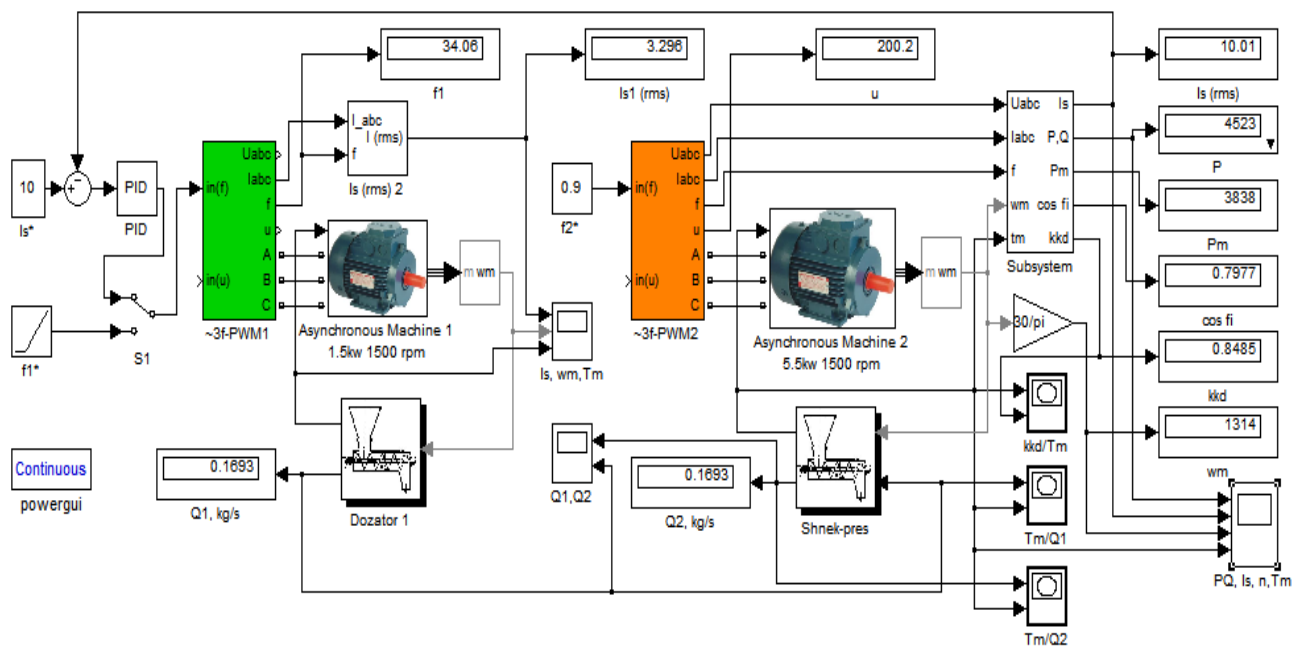


Рисунок 3.3. Імітаційна модель установки для дослідження режимів роботи та енергетики технологічного обладнання

За результатами моделювання отримано залежності величини механічного навантаження АД підпресовувального шнека M від продуктивності завантажувального шнека-дозатора Q_1 і струму статора цього двигуна у режимах ручного та автоматичного (за номінальним струмом АД) керування (Рисунок 3.5).

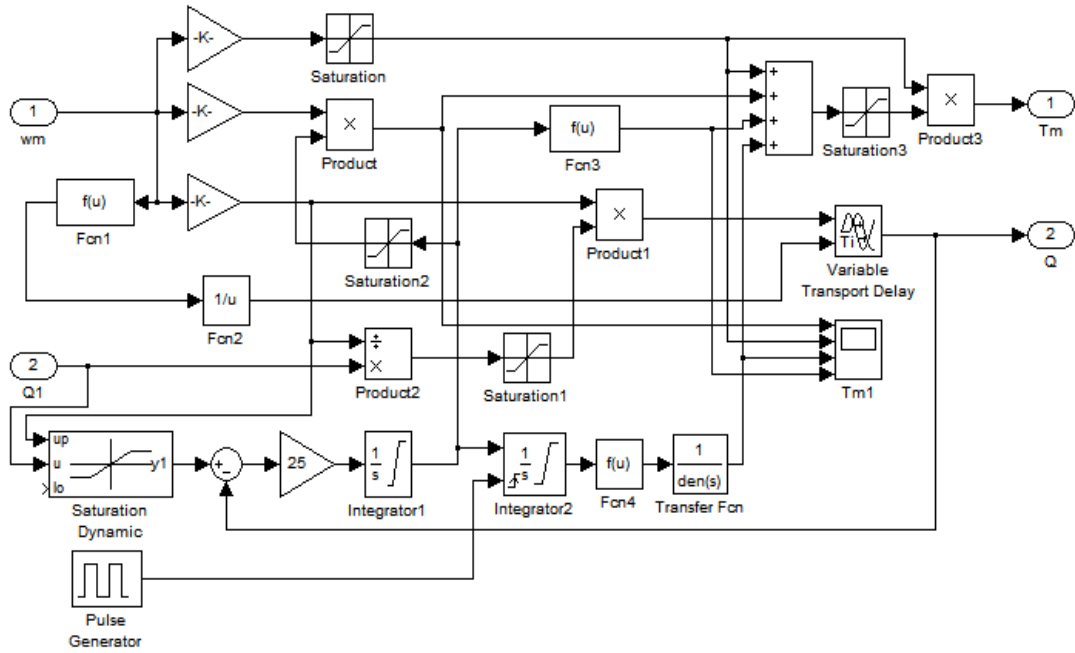


Рисунок 3.4. Структура імітаційної математичної моделі підпресувального шнека-екструдера

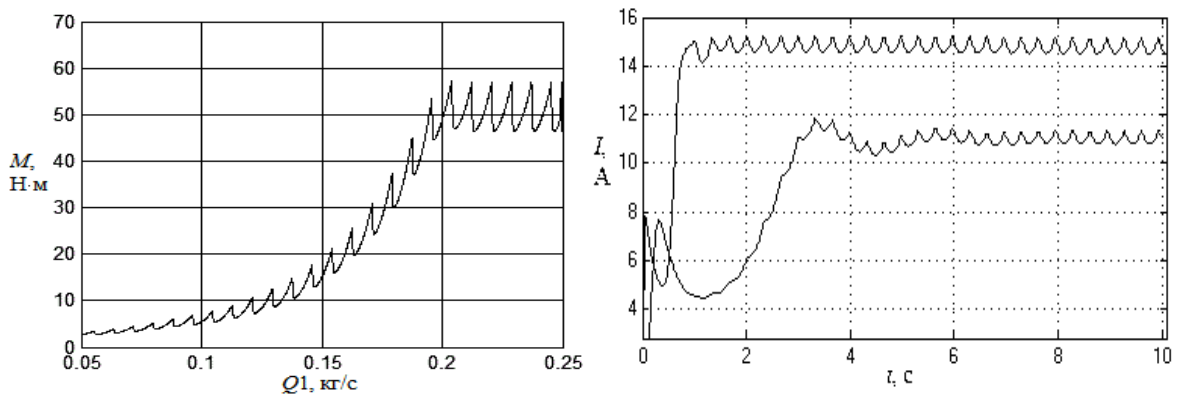


Рисунок 3.5. Результати моделювання режимів роботи шнека-екструдера

На основі поданих вище результатів досліджень розроблено імітаційну модель установки для виробництва двокомпонентних твердопаливних пелет з використанням нейроконтролера для здійснення керування технологічним процесом (Рисунок 3.6).

У запропонованій структурі імітаційної моделі інтелектуальної системи керування (Рисунок 3.6) продуктивність шнека-дозатора Q_3 задається, виходячи із величини струму статора АД підпресувального шнека i , в свою чергу, визначає сумарну продуктивність дозаторів Q_1 , Q_2 , яка встановлюється рівною продуктивності Q_3 .

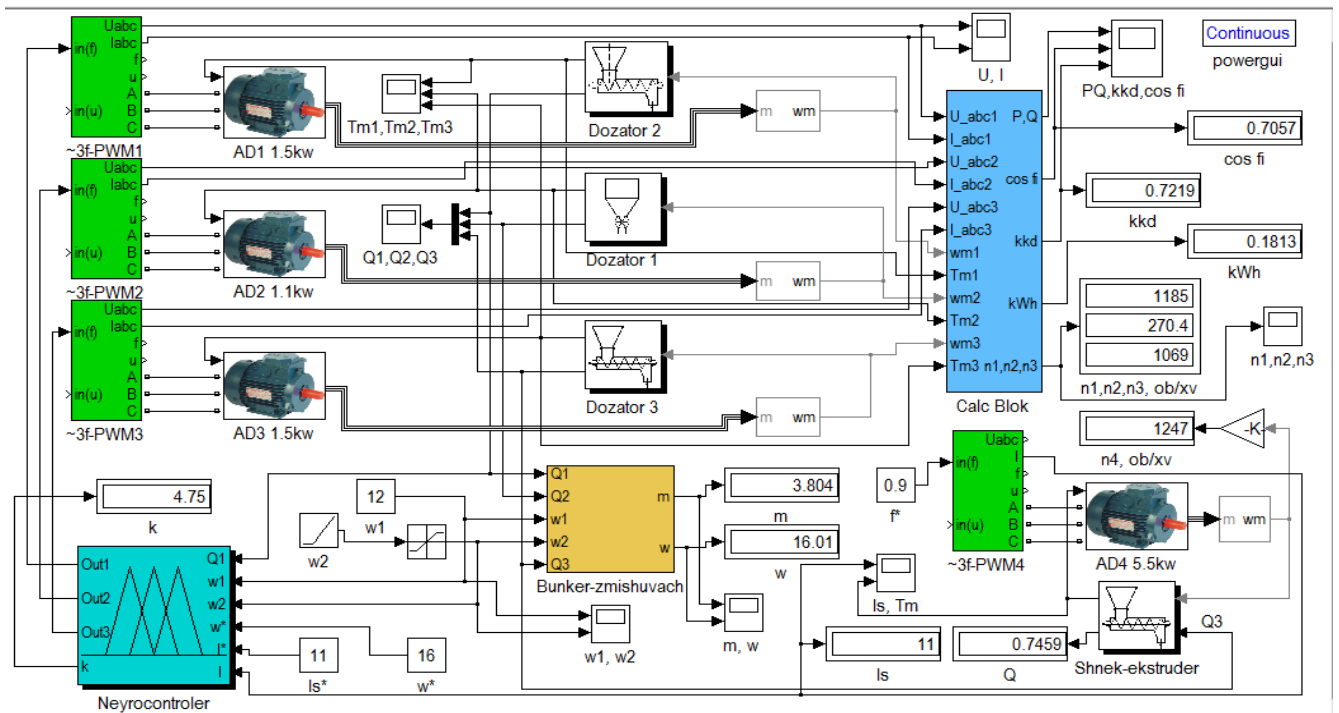


Рисунок 3.6. Імітаційна модель системи керування потоковою лінією

Отже, розроблена інтелектуальна система керування технологією виготовлення твердопаливних пелет дозволяє у широкому діапазоні регулювати склад суміші і тим самим вирішувати питання надлишкової вологості соломи та зменшення зольності кінцевого продукту.

Застосування бункера-змішувача мінімально необхідного об'єму з десятикратним зниженням потужності приводного двигуна, а також здійснення регулювання продуктивності завантажувального шнека-дозатора за величиною номінального струму статора АД підпресовувального шнека-екструдера дало змогу зменшити загальне енергоспоживання технологією в середньому на 20 %.

3.2 Корекція динамічних та енергетичних характеристик

Корекцію характеристик зв'язних електроприводів можна дослідити на прикладі роботи потокової лінії виробництва твердопаливних пелет, а алгоритм керування такими лініями реалізувати за декількома варіантами.

Перший – потокова лінія нерегульована. Подача компонентів у змішувач

або безпосередньо в прес здійснюється окремими дозаторами, підібраними таким чином, щоб їх продуктивність відповідала рецептурному співвідношенню компонентів у суміші. Дослідження показують, що у зв'язку з високим коефіцієнтом варіації дозаторів (до 35 %) суміш не відповідає товарним і теплотехнічним вимогам [4].

Другий – на кожний дозатор встановлюється регульований електропривод. За таких умов суміш можна реалізувати за будь-яким рецептом, що буде відповідати теплотехнічним вимогам. Однак установка частотно-регульованих електроприводів на всі дозатори лінії виробництва твердопаливних пелет значно підвищує вартість системи керування.

Третій варіант – встановлення одного частотно-регульованого електропривода, що живить усі дозатори. При цьому, контролюють продуктивність ведучого дозатора, змінюють частоту живлення електроприводів усіх дозаторів, і вони пропорційно зменшують (збільшують) подачу компонентів. Під час зміни продуктивності лінії за даним рецептом у суміші витримуються рецептурні співвідношення за компонентами. Зміна рецепту суміші призводить до переналаштування механічної частини електроприводів дозаторів. Система реалізації такого алгоритму значно дешевша від другого варіанту.

Четвертий варіант, найбільш ефективний стосовно якості приготування суміші. На всі дозатори встановлено частотні перетворювачі, а система живлення її централізована. Такий варіант дешевший від другого, має центральний процесор, що задає, згідно з рецептом, частку компоненту палива в суміші шляхом регулювання частоти обертання робочих органів дозаторів.

Однак усім цим варіантам властиві недоліки за якістю багатоконпонентних твердопаливних пелет, пов'язані з різною жорсткістю механічних характеристик приводних електродвигунів. При високих коефіцієнтах варіації дозування компонентів цей недолік призводить до значних похибок. Жорсткість механічних характеристик електродвигунів різної потужності у рамках однієї і тієї ж синхронної частоти обертання різна, що призводить до зміни співвідношень швидкостей обертання електродвигунів, які працюють на потокову лінію, а значить і продуктивності дозаторів, при зміні вихідної частоти живлення

перетворювача частоти. Застосування одного перетворювача живлення електроприводів потокової лінії на практиці інколи зумовлює необхідність в ході реалізації рецепту коректувати швидкість одного з дозаторів. Під час реалізації алгоритму керування, який передбачає використання частотних перетворювачів у кожному електроприводі, ці недоліки відсутні.

Під час застосування регуляторів частоти на всіх дозаторах з центральним блоком живлення і центральним процесором є можливість коректувати жорсткість механічної характеристики як за напругою, так і за частотою.

Різниця в частоті обертання валів, найбільш поширених електродвигунів, встановлених на дозаторах компонентів твердопаливних пелет (АИР80В4У3, 2АИ80В6ПА), у номінальних режимах навантаження сягає 1–1,5%. Ця похибка суттєва в рецептах, коли протягом секунди потрібно «відпрацювати» необхідну дозу компонента.

Математичний опис динамічних та енергетичних процесів в електроприводі без електромагнітних процесів в електродвигуні здійснюється за допомогою Т- і Г- подібних схем заміщення та енергетичної діаграми асинхронного електродвигуна [4, 8], на основі яких рівняння для визначення моменту електродвигуна має вигляд:

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

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

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.

Активні та індуктивні опори приймаються за довідниковими даними або за результатами досліджень і розрахунків режимів холостого ходу і короткого замикання. Активний опір кола намагнічування електродвигуна визначається приблизно, вважаючи, що втрати в сталі змінюються пропорційно добутку квадрата магнітного потоку в повітряному зазорі та частоти струму в першому ступені [8]:

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

Визначивши із досліду холостого ходу номінальні втрати в сталі і струм холостого ходу двигуна, із (3.8) визначаємо значення $R_{\mu n}$. Цю ж величину можна отримати якщо відомі втрати в сталі електродвигуна при номінальному режимові, шляхом рішення рівняння (3.8) і виразу для струму холостого ходу електродвигуна із системи рівнянь (3.7). Як видно з (3.8), активний опір намагнічування електродвигуна змінюється пропорційно частоті напруги живлення. Тому в систему рівнянь (3.7) при зміні частоти живлення значення активного опору намагнічування задається як $R_{\mu n} \frac{f_1}{f_{1n}} = R_{\mu n} f^*$.

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.

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

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

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

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:

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

Способи корекції зв'язних систем регулювання електроприводом розглянуті в [8, 9]. Спосіб, запропонований у [8], вимагає датчиків швидкості електродвигунів, після порівняння яких подаються сигнали для корекції швидкості. В [9] розглянуті системи, які мають однакове навантаження. У згаданих роботах не проводиться оцінка енергетики під час реалізації способів корекції швидкості.

Розглянемо можливості названих корекцій 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 (3.10) видно, що обертовий момент асинхронного електродвигуна можна

змінювати шляхом регулювання напруги живлення u та її частоти f^* , а також змінною відносного або абсолютного ковзань частоти обертання ротора. У загальному вираз обертового моменту електродвигуна в диференційній формі можна представити рівнянням:

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

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 $v_1 = v + \Delta v$, то

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

Знайдемо частинні похідні цього виразу з (3.10), попередньо продиференціювавши його за змінними f^* , u і v :

$$\begin{aligned} \frac{\partial\mu}{\partial f^*} = & \frac{-3u_1^2 r_2'^2 \left\{ \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)]^2 \right\} -}{(f^* - v)^2 \left\{ \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)]^2 \right\}^2} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{-(f-v) \left\{ 2 \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \frac{(1+l_1)r_2'(-v)}{(f-v)^2} + \right\}}{\rightarrow} \end{aligned}$$

$$\rightarrow \frac{+ 2 \left[f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right] \left[(l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]}{.} \quad (3.15)$$

Якщо прийняти, що момент

$$\mu = \frac{3u_1^2 r_2}{(f - \nu) \left\{ \left[r_1 + (1 + l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \left[f^* (l_1 + l_1 l_2 + l_2) \right]^2 \right\}}, \quad (3.16)$$

тоді загальний опір електродвигуна

$$z = \sqrt{\left[r_1 + (1 + l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + f^2 (l_1 + l_1 l_2 + l_2)^2},$$

коефіцієнти потужності

$$\cos \varphi = \frac{r_1 + (1 + l_1) \frac{r_2'}{s}}{\sqrt{\left[r_1 + (1 + l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \left[f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]^2}}, \quad (3.17)$$

$$\sin \varphi = \frac{f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)}{\sqrt{\left[r_1 + (1 + l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \left[f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]^2}}, \quad (3.18)$$

коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{r_2' (1 - s)}{s \left[r_1 + (1 + l_1) \frac{r_2'}{s} \right]}, \quad (3.19)$$

то вираз (3.15) можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial \mu}{\partial f^*} = \frac{\mu}{(f^* - \nu)} \left[2\eta (1 + l_1) \cos^2 \varphi - 2s \sin^2 \varphi - 1 \right]. \quad (3.20)$$

Прийнявши

$$(2\eta \cos^2 \varphi - 2s \sin^2 \varphi - 1) = A,$$

тоді

$$\frac{\partial \mu}{\partial f^*} = \frac{\mu}{(f^* - \nu)} \cdot A. \quad (3.21)$$

Частинна похідна моменту за напругою дорівнюватиме

$$\frac{\partial \mu}{\partial u} = \frac{2 \cdot 3 r_2 u_1}{(f^* - \nu) [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 + f^{*2} \left[r_1 + (l_1 + 1) \frac{r_2}{s} \right]^2} = \frac{2\mu}{u_1}. \quad (3.22)$$

Частинна похідна моменту за частотою обертання ротора

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu}{\partial \nu} &= \frac{\partial}{\partial \nu} \frac{3 u_1^2 r_2'}{(f^* - \nu) \left\{ [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 + \left[(l_1 + 1) \frac{r_2' f^*}{f^* - \nu} + r_1 \right]^2 \right\}} = \\ &= 3 u_1^2 r_2' \frac{- \left\{ [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 + \left[(1 + l_1) \frac{r_2' f^*}{f^* - \nu} + r_1 \right]^2 \right\} -}{(f^* - \nu)^2 \left\{ [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 + \left[(l_1 + 1) \frac{r_2' f^*}{f^* - \nu} + r_1 \right]^2 \right\}^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{-(f^* - \nu) \left\{ 2 \left[(1 + l_1) \frac{r_2' f^*}{f^* - \nu} + r_1 \right] (1 + l_1) \frac{r_2' f}{(f - \nu)^2} \right\}}{(f^* - \nu)^2 \left\{ [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 + \left[(l_1 + 1) \frac{r_2' f^*}{f^* - \nu} + r_1 \right]^2 \right\}^2}. \end{aligned}$$

Перетворивши вираз $\frac{\partial \mu}{\partial \nu}$ і записавши окремі множники і доданки за (3.16),

(3.17), (3.18) і з урахуванням відносного моменту $\mu = \frac{1}{(1 + l_2)} (i_{1b} \psi_{2a} - i_{1a} \psi_{2b})$,

отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu}{\partial \nu} &= -\frac{\mu}{(f^* - \nu)} - 2 \frac{\mu \cos^2 \varphi \cdot (1 + l_1) \cdot \eta \cdot f^*}{(f^* - \nu) \nu}, \\ \frac{\partial \mu}{\partial \nu} &= -\frac{\mu f^*}{(f^* - \nu) \nu} (2 \cdot (1 + l_1) \cdot \eta \cos^2 \varphi - 1 + s). \end{aligned}$$

Позначимо $B = 2(1 + l_1) \cdot \eta \cos^2 \varphi - 1 + s$, тоді

$$\frac{\partial \mu}{\partial \nu} = -\frac{\mu f^*}{(f^* - \nu) \nu} \cdot B. \quad (3.23)$$

З урахуванням (3.21) і (3.22) умова рівності вихідних механічних параметрів двигуна (3.23) при частотній корекції і корекції за напругою запишеться так:

$$\Delta f^* = \frac{2(f^* - \nu)}{A \cdot u} \Delta u = \frac{2f_2^*}{A \cdot u} \Delta u \quad \text{або} \quad \Delta u = \frac{A \cdot u}{2f_2^*} \Delta f^*, \quad (3.24)$$

де $f_2^* = f^* - \nu$.

Величина корекції за напругою визначається з виразу (3.13) після підстановки значень частинних похідних моменту за напругою і частотою обертання ротора, визначених виразами (3.22) і (3.23) 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

$$\Delta P_2^* = \mu_1 \nu_1 - \mu \nu = (\mu + \Delta \mu)(\nu + \Delta \nu) - \mu \nu = \Delta \mu \nu + \mu \Delta \nu$$

від попереднього значення $P_2^* = \mu \nu$. З урахуванням викладеного вище вираз (3.26) запишемо у вигляді

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

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

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 за (3.21) і (3.23).

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

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

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

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.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f^*} &= \frac{(1+l_1) r_2' \frac{-\nu}{(f^* - \nu)^2} \times}{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\times \sqrt{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2} - \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \times}{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2} \rightarrow \\ &= \frac{\frac{1}{2} \left[2 \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \frac{-(1+l_1) r_2' \nu}{(f^* - \nu)^2} + 2 [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)] (l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]}{\sqrt{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2}} = \\ &= \frac{(1+l_1) r_2 \frac{-\nu}{(f^* - \nu)^2} \left\{ \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \right.}{\left. \left\{ \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \right.} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 \left. \right\} + \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 \frac{(1+l_1) r_2' \nu}{(f^* - \nu)^2} -}{\rightarrow} \\ &\rightarrow \frac{-\frac{1}{f^*} \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2}{\rightarrow}. \end{aligned}$$

Спростивши цей вираз, отримаємо:

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

Частинна похідна за абсолютною частотою ковзання

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos \varphi}{\partial (f^* - \nu)} &= \frac{\frac{-r_2' f^* (1+l_1)}{(f^* - \nu)^2} \times}{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\sqrt{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2} - \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \times}{\frac{1}{2} \frac{2 \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \left(-\frac{r_2 f^* (1+l_1)}{(f^* - \nu)^2} \right)}{\sqrt{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2}}} \rightarrow \end{aligned}$$

Спростивши вираз, отримаємо

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

Частинна похідна коефіцієнта корисної дії за частотою живлення

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial f^*} &= \frac{r_2' \frac{-\nu}{(f^* - \nu)^2} \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] - r_2' \frac{\nu}{f^* - \nu} (1+l_1) r_2' \frac{-\nu}{(f^* - \nu)^2}}{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2} = \\ &= \frac{r_2' \frac{-\nu}{(f^* - \nu)^2}}{r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s}} + \frac{r_2'^2 (1+l_1) \frac{\nu^2}{(f^* - \nu)^3}}{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2}. \end{aligned}$$

Після спрощення отримаємо:

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

Похідна ККД за абсолютною частотою ковзання

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial (f^* - \nu)} &= \frac{\partial}{\partial (f^* - \nu)} \left(\frac{r_2 \frac{\nu}{(f^* - \nu)}}{r_1 + (1+l_1)r_2 \frac{f^*}{f^* - \nu}} \right) = \\ &= \frac{r_2' \frac{-\nu}{(f^* - \nu)^2} \left[r_1 + (1+l_1)r_2 \frac{f^*}{f^* - \nu} \right] - r_2' \frac{\nu}{f^* - \nu} r_2 (1+l_1) \frac{-f^*}{(f^* - \nu)^2}}{\left[r_1 + (1+l_1)r_2 \frac{f^*}{f^* - \nu} \right]^2}. \end{aligned}$$

Спростивши вираз, отримаємо:

$$\frac{\partial \eta}{\partial (f^* - \nu)} = -\frac{\eta}{f^* - \nu} + \frac{\eta^2 f^* (1+l_1)}{\nu (f^* - \nu)} = -\frac{\eta}{f^* - \nu} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{\nu s}. \quad (3.32)$$

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

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

При зміні напруги нова абсолютна частота ковзання буде рівною

$$f_{2_u}^* = f^* - \nu_1, \text{ а її зміна } \Delta f_{2_u}^* = f_{2_u}^* - f_2^* = f^* - \nu_1 - f^* + \nu = -\Delta \nu,$$

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

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

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

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

$$\Delta \cos \varphi_f = \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f_2^*} \Delta f_{2_f}^*. \quad (3.35)$$

При корекції за частотою абсолютна частота ковзання

$$f_{2_f}^* = f_1^* - \nu_1 = f^* - \nu_1 + \Delta f^*,$$

а її зміна

$$\Delta f_{2_f}^* = f_{2_f}^* - f_2^* = f^* - \nu_1 + \Delta f^* - f^* + \nu = \Delta f^* - \Delta \nu. \quad (3.36)$$

Різниця між частотами абсолютного ковзання при корекції за частотою і

напрugoю дорівнює

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

Підставляючи у (3.33) значення частинних похідних за виразами (3.29) і (3.30), а значення зміни абсолютної частоти ковзання за (3.36), отримаємо:

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

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:

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

Порівнявши вирази для $\cos \varphi$ і η при корекції за напрugoю, 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 напрugoю 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^*

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

Оскільки

$$i = \frac{u}{z}, \text{ то } \frac{\partial i}{\partial u} = \frac{1}{z}, \frac{\partial i}{\partial z} = -\frac{u}{z^2} \text{ і } \Delta i_u = i \left(\frac{\Delta u}{u} - \frac{\Delta z_u}{z} \right). \quad (3.40)$$

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

З виразу (3.7) повний опір у відносних одиницях

$$z = \sqrt{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \left[f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]^2}, \text{ а}$$

$$\frac{\partial z}{\partial \omega_1} = \frac{1}{2} \frac{2 \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \frac{-(1+l_1) r_2' v}{(f^* - v)^2} + 2 f^* \left[(l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]^2}{\sqrt{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \left[f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]^2}}.$$

Спростивши цей вираз, отримаємо:

$$\frac{\partial z}{\partial f^*} = z \left(-\frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{f^* - v} + \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \right), \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial z}{\partial f_2^*} = \frac{1}{2} \frac{2 \left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \frac{-f^* (1+l_1) r_2'}{(f^* - v)^2}}{\sqrt{\left[r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \left[f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2) \right]^2}} = -z \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{v s}. \quad (3.42)$$

Оскільки при корекції за напругою $\omega_1 = \text{const}$, то

$$\Delta z_u = \frac{\partial z}{\partial f_2^*} \Delta f_{2u}^* = z \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{v s} \Delta v. \quad (3.43)$$

Оскільки $\Delta z_f = \frac{\partial z}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial z}{\partial f_2^*} \Delta f_{2f}^*$, то підставивши у цей вираз значення

частинних похідних за (3.41) і (3.42), а значення зміни абсолютної частоти

ковзання за (3.36), отримаємо:

$$\begin{aligned}\Delta z_f &= z \left(\frac{(1+l_1)\eta \cos^2 \varphi}{f_2^*} + \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \right) \Delta f^* - z \frac{(1+l_1)\eta \cos^2 \varphi}{\nu s} (\Delta f^* - \Delta \nu) = \\ &= z \frac{(1+l_1)\eta \cos^2 \varphi}{\nu s} \Delta \nu + z \left[(1+l_1)\eta \cos^2 \varphi \left(\frac{1}{f^* - \nu} - \frac{1}{\nu s} \right) \Delta f^* + \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \Delta f^* \right] = \\ &= \Delta z_u - z \left[\frac{(1+l_1)\eta \cos^2 \varphi}{(f^* - \nu)} - \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \right] \Delta f^*.\end{aligned}\quad (3.44)$$

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

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

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

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

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

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

Із (3.39) видно, що при $\Delta P_2^* > 0$ корекція за напругою призводить до меншої зміни струму електродвигуна.

За наведеними вище залежностями для оцінки енергетичних характеристик електродвигунів під час корекції механічних характеристик за зміною частоти і напруги проведені розрахунки для приводних електродвигунів дозаторів АИР80В4У3 (1413 об/хв) і 2АИ80В6ПА (1387 об/хв) на прикладі більш жорсткої

характеристики (додаток Б1). Дослідження показали, що корекція за напругою характеристики електродвигуна АИР80В4У3 збільшує ККД на 3,4 %, а коефіцієнт потужності – на 6,4 %.

Таким чином, корекція за напругою у випадку $\Delta P_2 > 0$ дозволяє отримати вищі коефіцієнти потужності і корисної дії електродвигуна і не призводить до збільшення струму вище номінального.

Із навантаженням електропривода та підтриманням потокозчеплення ротора постійним, діапазон регулювання швидкості обмежується номінальною величиною ковзання. Оскільки жорсткість механічної характеристики електропривода пропорційна величині активного опору ротора і зворотно пропорційна квадрату його потокозчеплення, то введення позитивного зворотного зв'язку такої величини за моментом, дозволяє суттєво збільшити жорсткість механічної характеристики і тим самим діапазон регулювання швидкості.

Обґрунтовано спосіб корекції жорсткості механічних характеристик зв'язних електроприводів. Показано, виходячи з критерію максимуму енергетичних характеристик електродвигунів (коефіцієнта потужності і ККД), що корекція за напругою більш ефективна під час збільшення навантаження, а в процесі його зменшення необхідно застосовувати корекцію за частотою. За умови збільшення навантаження корекція за напругою дозволяє збільшити ККД на 3,4 %, а коефіцієнт потужності на 6,4 %. Під час застосування корекції за частотою згадані показники зменшуються.

3.3 Моделювання інтелектуальної системи управління потоковою лінією

Система керування технологією виготовлення двокомпонентних твердопаливних пелет повинна забезпечити регулювання складу суміші з метою уникнення надлишкової вологості компонентів і зменшення зольності кінцевого продукту.

Основними вимогами, що пред'являються до системи зв'язного дозування компонентів твердопаливних пелет є:

- час регулювання не більше 7 с;

- відхилення регульованої вологості суміші від заданого значення в сталому режимі має бути не більше 5 %;
- перерегулювання не більше 3 %.

Основними завданнями системи керування є забезпечення необхідної вологості суміші на виході змішувача при змінах вологості і продуктивності вхідних компонентів суміші.

Задана вологість суміші підтримується за рахунок змішування двох вхідних компонентів – соломи та кукурудзи. У процесі функціонування змішувача регулюються об'ємні витрати подрібнених качанів кукурудзи та соломи за рахунок зміни продуктивності дозаторів, відповідно Q_1 , Q_2 при підтримці сталої продуктивності Q_3 на виході змішувача:

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

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:

$$Q_1 = \frac{Q_3(w_3 - w_2)}{w_1 - w_2}; \quad Q_2 = \frac{Q_3(w_1 - w_3)}{w_1 - w_2} \quad (3.51)$$

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_{1e} та w_{2e} , а виміряні – w_1 та w_2 .

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

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

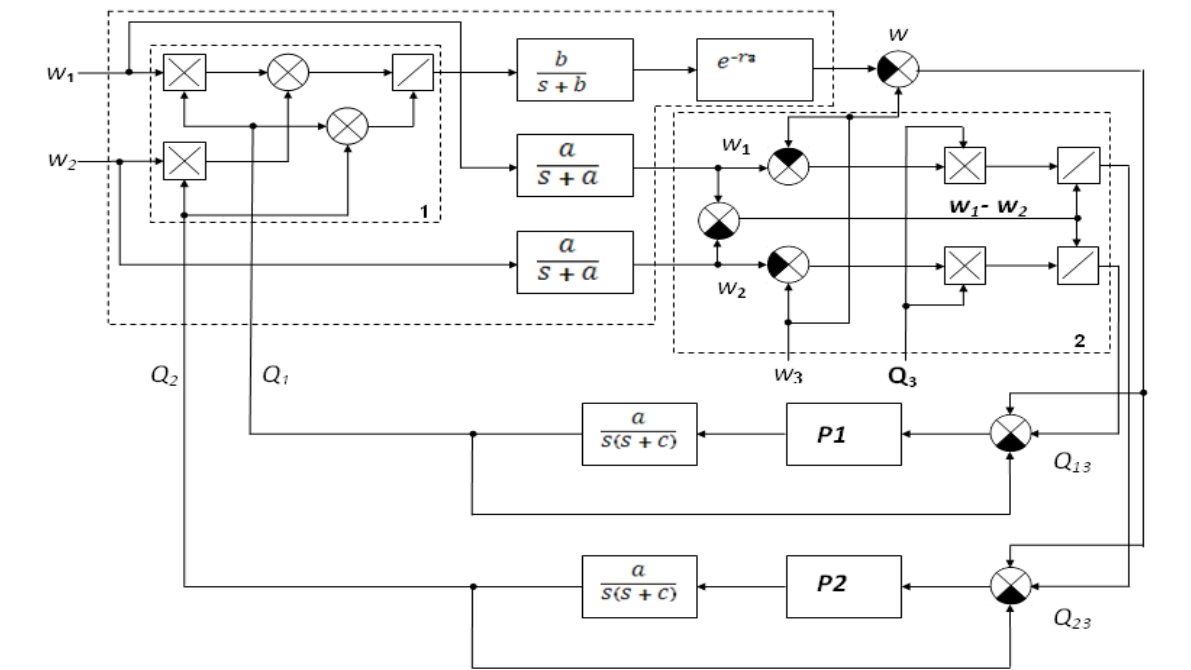


Рисунок 3.7. Структурна схема системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет

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

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

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

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) для підтримання необхідної продуктивності на виході змішувача при заданих значеннях вологості w_1 та w_2 дозволяють визначити коефіцієнт пропорційності k , оптимальне значення якого лежить в діапазоні від 1 до 5 (Рисунок 3.8).

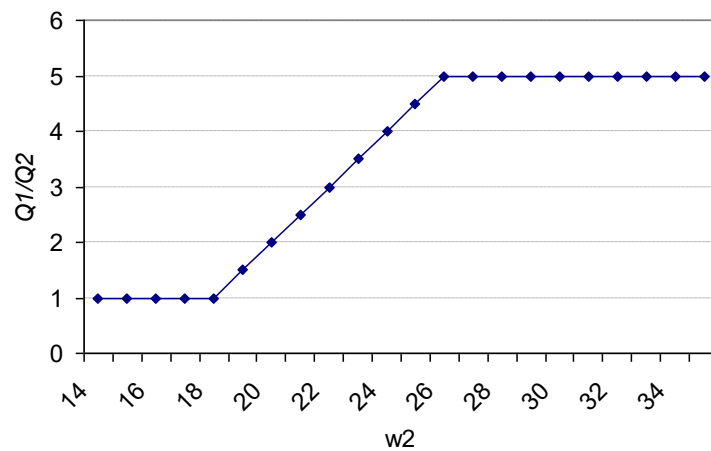


Рисунок 3.8. Співвідношення продуктивності для значень вологості $w_1 = 14\%$; $w_2 = 14\text{...}35\%$

Дослідження процесу виготовлення твердопаливних пелет показали, що його основні вхідні параметри, такі як вологість компонентів (подрібнених кукурудзяних качанів і соломи) і відповідна продуктивність дозаторів є нелінійні та нестационарні величини, взаємозв'язки між якими встановити традиційними аналітичними методами неможливо. У такому випадку оптимальним способом підвищення якості керування автоматизованими електромеханічними системами є використання інтелектуальних технологій. Найбільшого поширення для формування адаптивних алгоритмів регулювання набула технологія нечіткого керування (Fuzzy-control) [6].

Застосування нечітких систем дає змогу спростити процес розрахунку згаданої вище залежності, відкинувши необхідність проведення складних

математичних обчислень. Нейронечіткі (гібридні) мережі успішно реалізують досвід і знання експертів, а також мають здатність до самонавчання. Використання інтелектуальних компонентів на базі нечіткої логіки значно розширює можливості проектування і керування нелінійними динамічними системами. Крім того, вони дозволяють скоротити час розробки моделі для відтворення складних залежностей, забезпечуючи високу точність [9].

Алгоритм роботи нечіткого регулятора формується за допомогою простих і зрозумілих лінгвістичних правил, а не у вигляді математичних виразів загальноприйнятого виду. Для моделювання регулятора використано апарат гібридних мереж, який в середовищі MATLAB реалізовується редактором Anfis, (фрагмент лістингу програми створення і навчання fuzzy-контролера наведено у додатку Б2).

Враховуючи особливості взаємозв'язку залежностей, для зменшення величини похибки, доцільно розроблену нами систему керування дозуванням розбити на три частини, що керуються роботою окремих регуляторів:

- перша – на основі фаззі-регулятора (НР), що відтворюватиме залежність, яка визначає коефіцієнт масового співвідношення компонентів суміші k за величинами вологості w_1, w_2 ;

- друга і третя – на основі PID-регуляторів (відповідно P1 та P2), які зменшують дисперсію продуктивності дозаторів Q_1 та Q_2 із врахуванням визначеного коефіцієнту k і поточних значень продуктивності.

Для створення fuzzy-регулятора НР використано дві вхідні лінгвістичні змінні:

- вологість кукурудзи, w_k – містить 5 термів, межі визначення змінних – від 10 до 14;

- вологість соломи, w_s – містить 3 терми, межі визначення змінних – від 14 до 35;

Вихідним термом є коефіцієнт пропорційності k , що задається діапазоном значень $[0,5 \ 5]$ і визначає масове співвідношення компонентів суміші. В даному випадку доцільнішим є використання гібридної мережі, яка розробляється згідно алгоритму Sugeno (Рисунок 3.9).

Моделювання здійснено на основі скомплектованих трьох блоків даних: для навчання (Training data – wk_ws_k_d.dat), контрольний (Testing data – test_k.dat) і перевіряльний (Checking data – check_k_d.dat) (Рисунок 3.10).

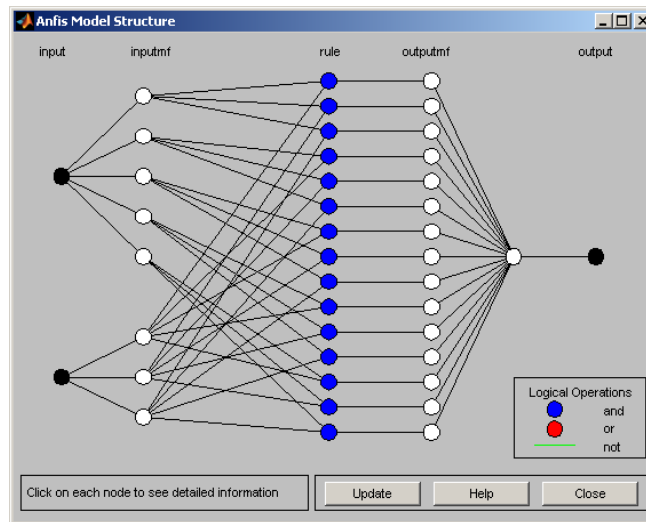


Рисунок 3.9. Структура Anfis-моделі типу Sugeno для знаходження коефіцієнта масового співвідношення компонентів суміші k

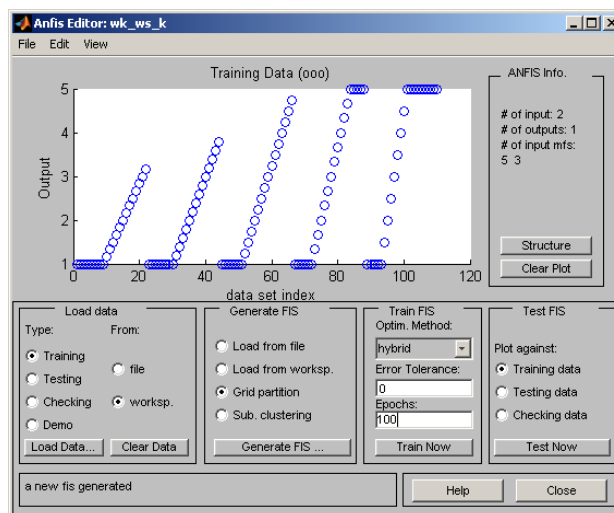


Рисунок 3.10. Розподіл даних для навчання нечіткої системи НР

Для навчання експертної системи встановлено 100 автоматизованого електропривода ox і отримано середньоквадратичну похибку 0,2248. Після перевірки системи контрольною вибіркою, проведено оптимізацію структури мережі шляхом підбору оптимальної кількості нейронів. На цьому кроці середньоквадратична похибка становила 0.19978.

Отримані залежності є нелінійними (Рисунок 3.11). Порівняння результатів моделювання з використанням класичних імітаційних схем та зі створеною гібридною мережею довели адекватність отриманих результатів.

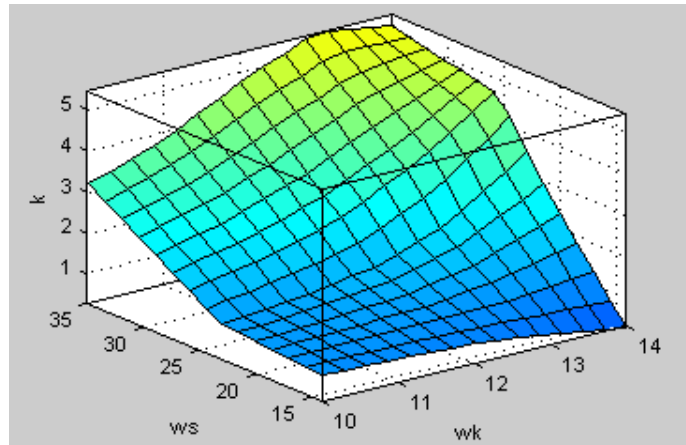


Рисунок 3.11. Поверхня, що відтворюється навченою гібридною мережею

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 (Рисунок 3.12). Структуру нечіткої системи в середовищі Simulink наведено у додатку Б3.

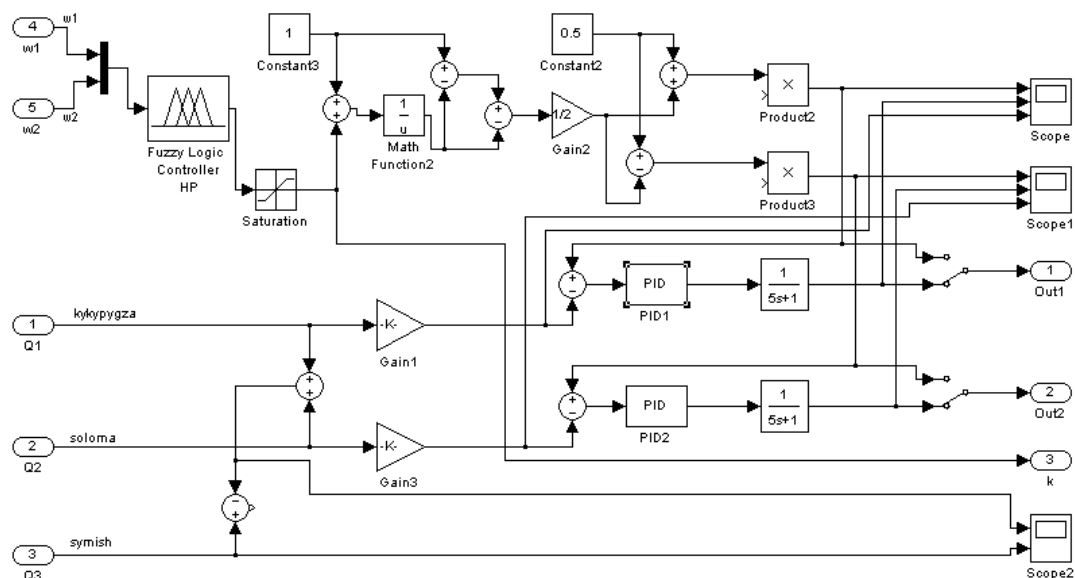


Рисунок 3.12. Імітаційна модель системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет

На рисунку 3.13 представлено результати моделювання, які відображають дисперсії продуктивності дозаторів в процесі регулювання швидкості робочих органів у встановленому діапазоні зміни k та вологості суміші w при фіксованій вологості подрібнених качанів кукурудзи $w_1 = 12\%$ та зміні вологості подрібненої соломи w_2 в межах 14–35% без корекції та з корекцією швидкості робочих органів дозаторів за поточними продуктивностями Q_1, Q_2, Q_3 .

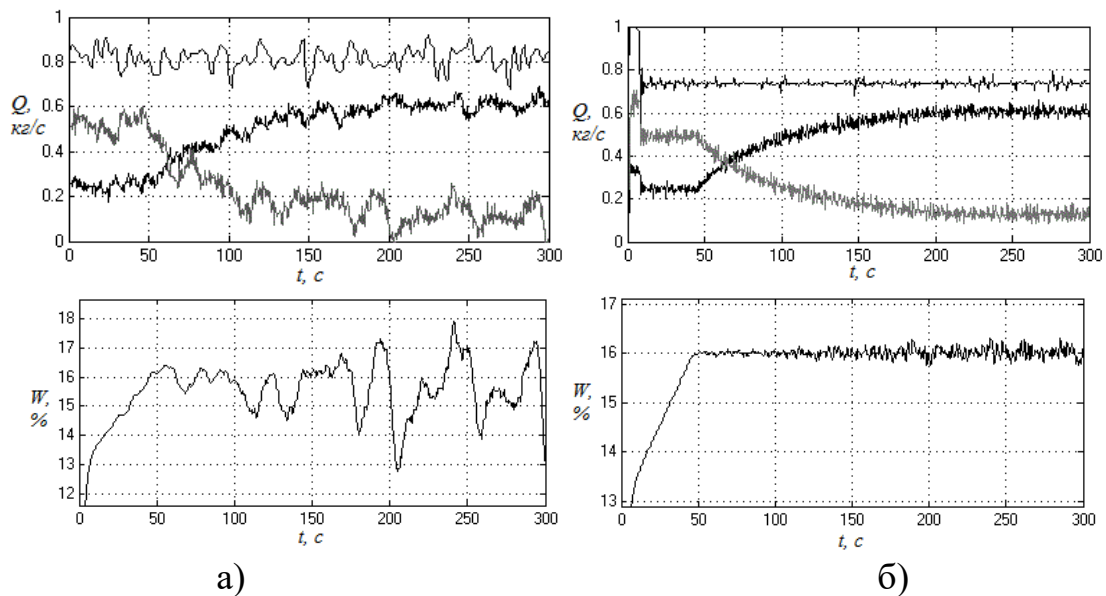


Рисунок 3.13. Дисперсії продуктивності дозаторів Q_1, Q_2, Q_3 і вологості суміші w : а) без корекції, б) з корекцією швидкостей робочих органів дозаторів

Таким чином, розроблено інтелектуальні алгоритми керування потоковою лінією виробництва твердопаливних пелет, згідно яких продуктивність шнека-дозатора Q_3 визначає сумарну продуктивність дозаторів Q_1, Q_2 . Для визначення коефіцієнту масового співвідношення компонентів суміші k розроблено fuzzy-контролер типу Sugeno, входними параметрами якого є поточні величини вологості компонентів w_1, w_2 та верхня межа допустимої вологості суміші w^* . Середньоквадратична похибка тестованого навченого контролера не перевищує 0.2%.

Дослідження розробленої системи керування методом математичного моделювання показує, що застосування нечітких регуляторів дозволяє спроектувати систему регулювання високої якості: система володіє достатньою швидкодією (час встановлення заданої вологості на виході змішувача з

урахуванням чистого запізнювання становить 10 с, перерегулювання не перевищує 2,5 %). Тому застосування нечітких регуляторів доцільно і перспективно.

Розроблена інтелектуальна система керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет дозволяє в широкому діапазоні регулювати склад суміші і, тим самим, вирішувати питання надлишкової вологості соломи та зменшення зольності кінцевого продукту.

Моделювання технологічного процесу потокової лінії виробництва твердопаливних пелет дозволило дослідити швидкісні режими роботи електроприводів дозаторів і екструдера преса та розробити алгоритми регулювання, що базуються на використанні інтелектуальних засобів для проектування системи керування зв'язним дозуванням компонентів суміші.

Виконані в розділі дослідження дали змогу зробити наступні висновки:

За результатами математичного моделювання отримано залежності величини моменту АД підпресовувального екструдера від продуктивності завантажувального шнека-дозатора і струму статора у режимах ручного та автоматичного керування, що дозволило визначити необхідний об'єм бункера змішувача із суттєвим зменшенням встановленої потужності приводного електродвигуна (з 3 кВт до 0,25 кВт). Запропоновано здійснювати регулювання продуктивності завантажувального шнека-дозатора за величиною струму статора АД підпресовувального екструдера, що дозволило зменшити затрати електроенергії на 20 %.

Встановлено, що корекція жорсткості механічних характеристик зв'язних електроприводів за напругою, виходячи з критерію максимуму енергетичних характеристик електродвигунів дозволяє збільшити ККД на 3,4 %, а коефіцієнт потужності – на 6,4 % .

Запропоновано модель fuzzy-контролера інтелектуальної системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет, середньоквадратична похибка функціонування якого не перевищує 0,2 %. Час встановлення заданої вологості на виході змішувача з урахуванням чистого запізнювання для розробленої системи не перевищує 10 с, а перерегулювання – 2,5 %.

РОЗДІЛ 4

СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ДВОКОМПОНЕНТНОГО ТВЕРДОГО ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ

4.1 Розробка способу та пристрою контролю продуктивності дозаторів безперервної дії

Аналіз літературних джерел показує відсутність єдиної методології розробки інтелектуальних систем управління, спроможних моделювати і аналізувати різні види знань (кількісні, нечіткі, неповні і неоднозначні) та здатних до навчання на основі накопиченого досвіду і адаптації до змін зовнішнього середовища та умов функціонування об'єкта керування. Перспективним напрямом у розробці інтелектуальних систем управління та прийняття рішень є інтеграція методів штучного інтелекту: нейронних мереж, нечітких множин і генетичних алгоритмів.

Тому дослідження та класифікація швидкісних режимів роботи цих енергоємних технологій, розробка моделей і розвиток теоретичних положень керування режимами роботи, інтелектуалізація систем керування, оцінка ефективності їх реалізації дозволяє сформулювати вимоги до діапазонів регулювання та параметрів систем керування на основі регульованого електропривода, впровадження яких вирішує проблему зменшення питомих витрат енергії на виробництво і переробку сільськогосподарської продукції.

У результаті експлуатації і експериментальних досліджень виробленої системи виявлено, що факторами, які впливають на точність дозування і якість продукції, є, перш за все, фізико-механічні властивості матеріалів і вологість. У процесі завантаження можливі випадкові збурення внаслідок залипань, неоднорідності матеріалів, тому в технологічному процесі стається передозування або перерегулювання залежно від заданих критеріїв. При великих похибках дозування знижується якість продукції і збільшуються витрати сировини, а при підвищених вимогах до точності виникає нестійкість регулювання, часті комутації потужних двигунів, що призводить до перевитрати енергії,

зношуваності вузлів.

Для вимірювання продуктивності дозаторів біомаси безперервної дії нами розроблено спосіб і пристрій на базі ультразвукового бар'єру (Рисунок 4.1). Потік контрольованого матеріалу прозвучується в місці вільного падіння (вивантаження з живильника). Ефективний ультразвуковий коридор, при цьому, утворюється між випромінювачем ультразвуку і приймачем (Рисунок 4.2).

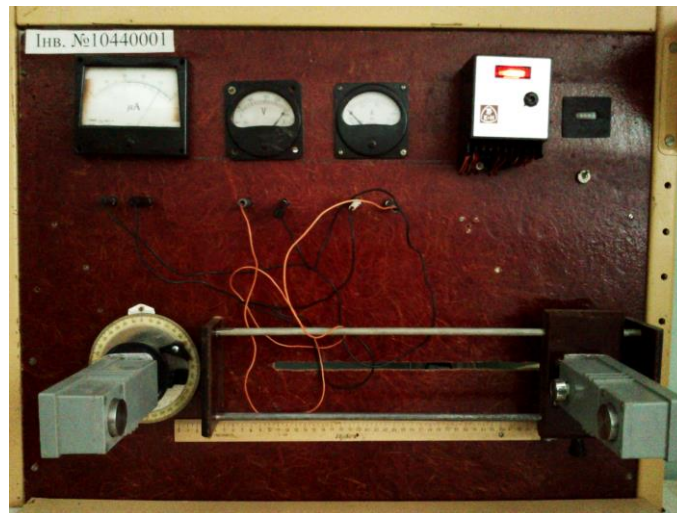


Рисунок 4.1. Стенд для дослідження ультразвукового витратоміра

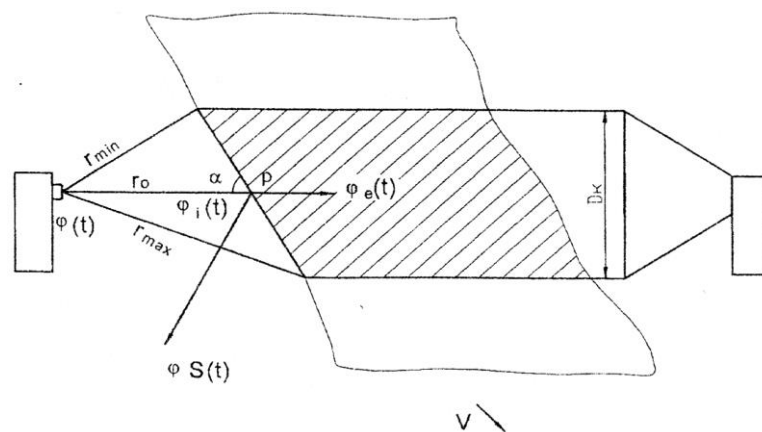


Рисунок 4.2. Схема вимірювання щільності сипкого матеріалу ультразвуком

Частота прозвучування потоку матеріалу вибрана 44 кГц, яка корелює з розмірами частинок подрібненої біомаси (1÷50 мм) та спричиняє повноцінне проходження акустичних хвиль через потік матеріалу і затухання пропорційне

його кількості [9].

Потік сипкої маси є стаціонарним випадковим процесом (п. 2.3), а це означає, що зміна потенціалу хвилі, що пройшов через потік, імовірнісні характеристики зміни якого нелогічні характеристикам потоку, також є стаціонарним випадковим процесом. Потік сипкої маси у зваженому стані можна подати як сукупність елементарних розсіювачів із щільністю ρ , що рухаються з швидкістю V в ультразвуковому коридорі з параметром D_k . При цьому, сипка маса рухається під кутом α до вектора поширення ультразвукових хвиль з параметрами в ультразвуковому коридорі 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 $V = const$ (у вільному падінні), розклавши функцію $r(t)$ за ступенями $t - \frac{r(t)}{c}$, 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

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

або

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

Оскільки $\varphi_i(t)$ – 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

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

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

де $*$ – комплексно спряжена величина.

Тоді автокореляційна функція виглядатиме так:

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

$$\begin{aligned} R_{ii} \left\{ \left[\tau - \frac{2}{c} (r - r_1) \right] \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right\} &= \left\{ \varphi \left[\left(t + \tau - \frac{2r}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right] \right\} \\ \text{де} & \\ &\times \varphi^* \left[\left(t - \frac{2r_1}{c} \right) \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

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)

$$Y = \left[\tau - \frac{2}{c} (r - r_1) \right] \left(1 - \frac{V}{c} \right), \quad \tau = \frac{Y}{1 - \frac{V}{c}} + \frac{2}{c} (r - r_1); \quad d\tau = \frac{dy}{1 - \frac{V}{c}},$$

одержимо

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

де

$$S_i \left(\frac{\omega}{1 - \frac{V}{c}} \right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ii}(Y) e^{-i \frac{\omega}{1 - \frac{V}{c}} Y} dY \quad (4.13)$$

спектральна щільність потужності спадної хвилі.

Підставивши в (4.11) результат (4.12), 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

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

Отже, залежність (4.15) підтверджує правильність вибору способу вимірювання витрат потоків компонентів твердопаливних пелет у місці їх висипання з дозаторів, коли щільність переходу "повітря – матеріал" мінімальна, а отже, і мінімальна енергія відбитого сигналу. Оскільки при хаотичному положенні частинок біомаси виконати вимогу $\alpha = 90^\circ$ на мінімізацію $S_s(\omega)$ дуже складно, то на практиці необхідно домагатися, щоб оптична вісь «випромінювач – передавач» була перпендикулярна потокові матеріалу.

Дослідження розробленого акустичного витратоміра проводилися на спеціально розробленому стенді (Рисунок 4.1) та безпосередньо на технологічному обладнанні, в місці вивантаження подрібненої соломи з дозатора безперервної дії. Були досліджені залежності вхідної напруги приймача акустичної пари від продуктивності дозатора $u_{II} = f(Q)$ при трьох величинах вологості стебельної маси – 10, 20, 35 % (Рисунок 4.3).

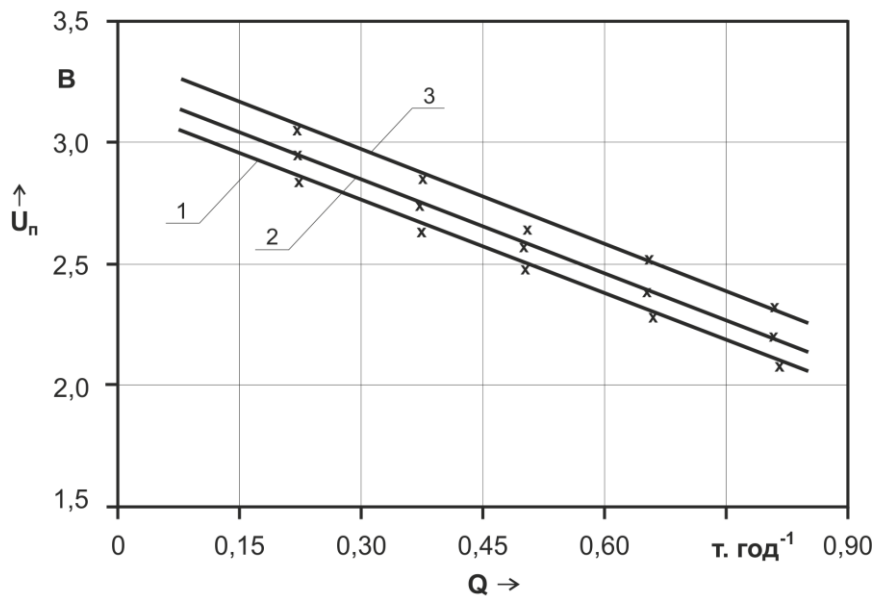


Рисунок 4.3. Залежність напруги приймача та продуктивності дозатора від вологості подрібненої соломи – 10, 20, 35 %

Результати випробувань показали, що розроблений витратомір ефективно працює в робочому діапазоні роботи дозатора. При цьому виконуються вимоги по мінімізації щільності переходу повітря – контрольований матеріал (4.15). Це дозволило збільшити коефіцієнт корисної дії прозвучування потоку біомаси, а також динамічні характеристики процесу вимірювання. Отримані залежності демонструють пропорційність величини вихідного сигналу витратоміра до продуктивності дозатора в його робочому діапазоні.

Вплив вологості подрібненої соломи в межах реальних величин (10 ... 35 %) носить лінійний характер, що дозволяє корегувати результати вимірювання витратоміра за допомогою використання акустичного вологоміра коректора (додаток Д1). Розрахунки показали, що похибка вимірювань продуктивності секторного та шнекового дозатора в робочому діапазоні їх роботи не перевищує 5 % при хорошій чутливості та безінерційності.

4.2 Створення технології приготування двокомпонентних твердопаливних пелет

Розробка нового способу роботи технологічної потокової лінії належить до

технології виробництва твердопаливних пелет з біологічної сировини однорічного циклу відновлення і може бути використана в галузі агропромислового та енергетичного машинобудування.

Відомий спосіб приготування твердопаливних пелет, який включає подачу рослинних відходів вологістю 4–12 % і фракційним складом 2–10 мм, їх пресування, наступне формування і ділення, при цьому пелети піддають додатковій термообробці, причому формування проводять безперервно і одночасно з термообробкою при температурі 150–250 °С в залежності від типу сировини. Недоліком вказаної технології є складність конструкції пристрою ворущіння і пресування рослинних відходів, а також значні енергозатрати, зумовлені необхідністю попереднього підсушування сировини до технологічно-прийнятної вологості.

Найближчим за технічною суттю є спосіб отримання пелетів із вуглецевмісних матеріалів, який включає підготовку сировини в дисковому екструдері при температурі 70–100 °С, завантаження в пелетуючий пристрій, пелетування і наступне сушіння протягом 3–5 діб в приміщенні при температурі 18–25 °С. Недоліком такого способу є необхідність контролю технологічної температури в залежності від типу сировини та вмісту смолистих і бітумних речовин, значний технологічний час виробництва та підвищена зольність пелетів.

В основу розробки поставлено задачу вдосконалення технології приготування твердопаливних пелет методом пелетування за рахунок зв'язного дозування двох компонентів, суміші соломи та подрібнених качанів кукурудзи, з метою забезпечення необхідних показників якості – щільності і зольності пелетів, а також вмісту в них лігніну.

Поставлена задача вирішується тим, що необхідна якість приготування пелетів в залежності від змінної поточної вологості соломи в межах 8–35 % і вологості качанів кукурудзи – 7–11 %, забезпечується точним дозуванням цих компонентів суміші в пропорції від 1/1 до 1/5, ефективним їх змішуванням і пресуванням технологічною лінією з регульованим електроприводом та системою його інтелектуального керування.

Схема запропонованого способу приготування пелетів зображена на

рисунку 4.4 і складається з дозаторів подрібненої соломи 1 та подрібнених качанів кукурудзи 2, інтегруючого накопичувача суміші циклонного типу 3, преса із бункером 4, регульованих електродвигунів: дозатора подрібненої соломи 8, дозатора качанів кукурудзи 9 та приводу технологічного преса 10; датчиків визначення масової витрати та вологості подрібненої соломи 5 та масової витрати подрібнених качанів кукурудзи 6, блока керування технологічним процесом 7.

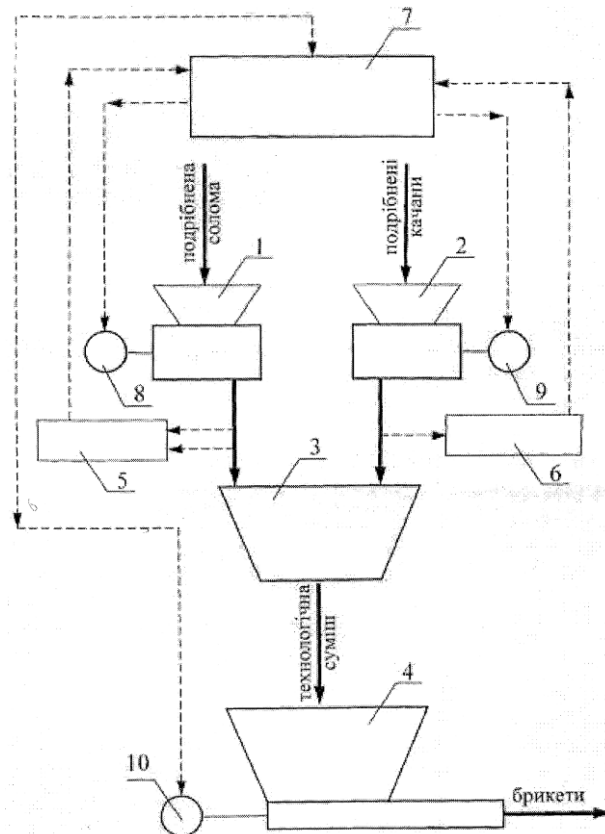


Рисунок 4.4. Структура автоматизованої технологічної лінії виробництва двокомпонентного твердого твердопаливних пелет

Спосіб приготування твердого твердопаливних пелет здійснюється наступним чином. Подрібнена солома завантажується в бункер дозатора 1, а подрібнені качани кукурудзи – в бункер дозатора 2. Дозатори 1 і 2 формують потоки компонентів суміші, з урахуванням їх властивостей, які контролюються датчиками вологості і масової витрати соломи 5 та подрібнених качанів 6, інформація з яких надсилається у блок керування 7. Блок керування 7, аналізуючи властивості окремих технологічних потоків подрібненої соломи і качанів кукурудзи, керує роботою асинхронних двигунів 8 і 9 дозаторів 1, 2, що

забезпечує необхідне дозування компонентів суміші у пропорціях від 1:1 до 1:5.

Сформовані у такий спосіб, окремі технологічні потоки направляються в бункер інтегруючого накопичувача суміші 3, де здійснюється накопичення і змішування компонентів з наступною подачею суміші в бункер преса 4, робота електродвигуна 10 якого, керуючись сигналом блоку 7, здійснює пресування суміші при температурі 150 °С з утворенням пелетів вологістю 14,5–15,5 %, теплотою згорання 4400–4500 ккал/кг і щільністю 1000–1100 кг/м³.

Запропонована технологія приготування твердопаливних пелет в порівнянні з існуючими забезпечує зменшення загальної енергоємності процесу за рахунок виключення технологічної операції сушіння, використання системи зв'язного дозування на основі регульованого електропривода та покращення його якісних характеристик: збільшення щільності, зменшення зольності та вмісту лігніну у пелетах.

4.3 Проектування інтелектуальної системи керування потоковою лінією

Одним із напрямів модернізації виробництва твердопаливних пелет і покращення його енергетичних та якісних показників є створення інтелектуальних систем керування технологічними процесами на базі ефективних первинних перетворювачів та мікропроцесорних систем обробки інформації, що формують керуючі дії за відповідними, найбільш адаптованими до технологічних вимог, алгоритмами.

Основними функціями системи керування потоковою лінією виробництва твердопаливних пелет є забезпечення автоматичного регулювання продуктивності дозаторів залежно від вологості компонент. Крім того, системою здійснюється автоматичний поточний контроль за керованими параметрами і фіксування граничних відхилень контрольованих параметрів дозування від нормативно встановлених, а також відображення їх поточних значень у режимі реального часу. Важливою функцією системи є формування бази даних динаміки вхідних параметрів з довільно заданою дискретністю а також бази даних вихідних параметрів.

Режими роботи програмно-апаратного комплексу можна розділити на три етапи:

Основний етап:

1. Встановлення початкових значень регульованих параметрів із заданим інтервалом і порядком;
2. Отримання поточних значень контрольованих параметрів компонент сировини з датчиків;
3. Налаштування режимів роботи НР при відхиленні контрольованих параметрів від встановлених;
4. Формування вихідної бази даних параметрів динаміки процесу у вигляді текстового файлу на жорсткому диску комп'ютера;
5. Виведення поточних значень контрольованих параметрів на екран монітора.

Додатковий:

6. Налаштування параметрів і режимів роботи системи та введення необхідних даних;
7. Фільтрування та ігнорування випадкових значень регульованих величин;
8. Сигналізація при відхиленні параметрів від встановлених меж;
9. Налаштування інтерфейсу для різних режимів роботи;
10. Виведення на екран монітора чи принтер значень контрольованих параметрів.

Технічне обслуговування обладнання:

11. Тестування роботи всіх складових частин системи;
12. Програмне регулювання периферійних пристроїв контролера.

Згідно з поставленим завданням, автоматизована система керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет повинна аналізувати величини їх вологості, продуктивність дозаторів, струму АД шнека-екструдера та виробляти керуючі дії для підтримання вказаних параметрів на заданому в програмі рівні. Структурна схема імітаційної моделі контролера даної системи представлена на рисунку 4.5.

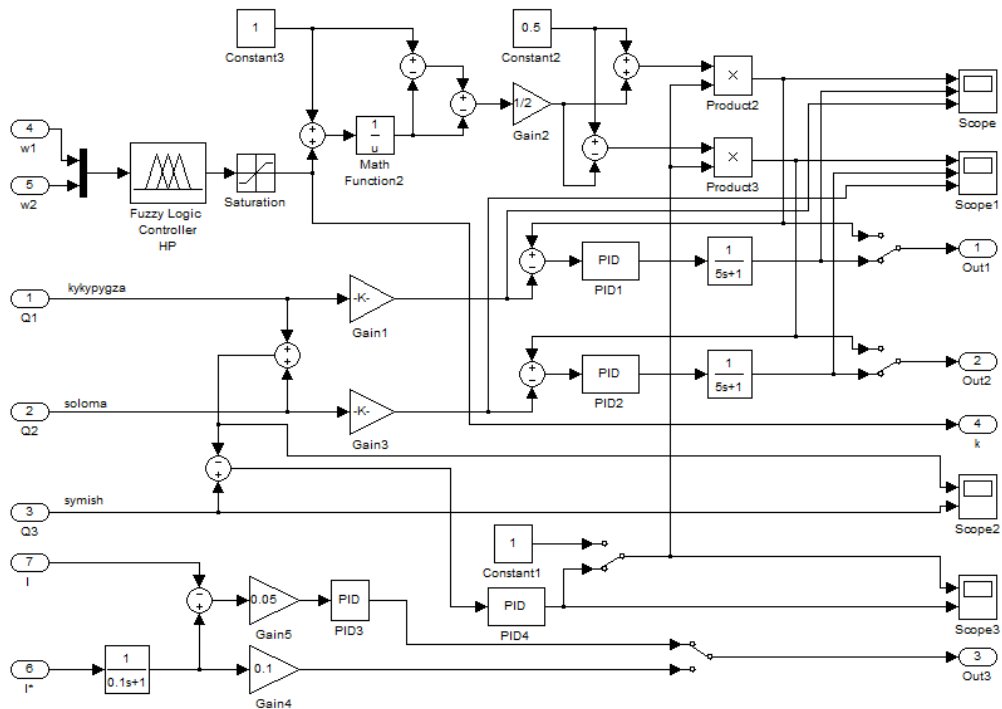


Рисунок 4.5. Імітаційна схема контролера інтелектуальної системи керування потоковою лінією виробництва твердопаливних пелет

Відповідно до тенденцій розподіленого керування таку систему доцільно розділити на два ієрархічні рівні:

– модуль зв'язку з об'єктом керування та попередньої обробки первинної інформації;

– ПК для аналізу, обробки і відображення інформації, а також накопичення інформації у базах даних.

Обмін інформацією між блоком контролера та ПК доцільно здійснювати через послідовні інтерфейси USB 2.0 або RS-232 із використанням апаратної гальванічної розв'язки модулів.

Загальна структура контролера повинна містити канали підсилення аналогових сигналів, комутатор каналів, АЦП, блок керування і попередньої обробки інформації, інтерфейсні модулі для зв'язку з ПЕОМ та обміну інформацією для обробки і візуалізації, а також допоміжні вузли: блок індикації та задання режимів, джерело живлення.

Такий модуль доцільно конструктивно виконати у вигляді окремого виносного модуля з невеликими габаритними розмірами (Рисунок 4.6.), що дає

зможу розташовувати його безпосередньо на контрольованому об'єкті і, таким чином, зменшити довжину ліній зв'язку від датчиків до базового приладу для зменшення впливу на них зовнішніх електромагнітних наводок.



Рисунок 4.6. Загальний вигляд мікропроцесорного модуля САК

Також до складу системи керування потоковою лінією виробництва твердого твёрдопаливних пелет повинні входити виконуючі механізми (частотно-регульовані електроприводи дозаторів) із можливістю плавного регулювання їх продуктивності (Рисунок 4.7).

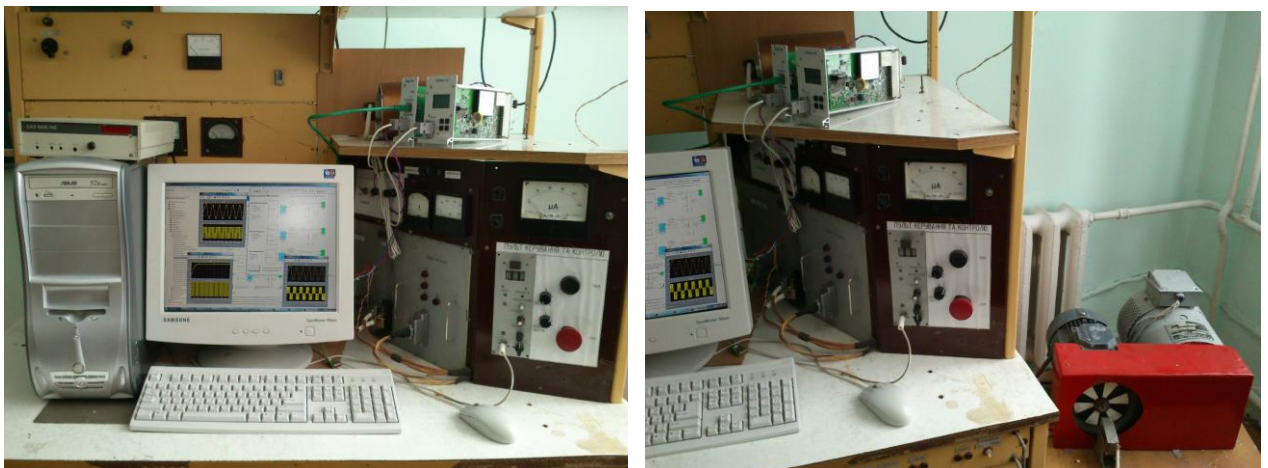


Рисунок 4.7. Стенд для моделювання і дослідження інтелектуальної системи керування

Виходячи із вказаних вище вимог, розроблено структурну схему інтелектуальної мікропроцесорної системи керування потоковою технологічною

лінією виробництва двокомпонентних твердопаливних пелет (Рисунок 4.8).

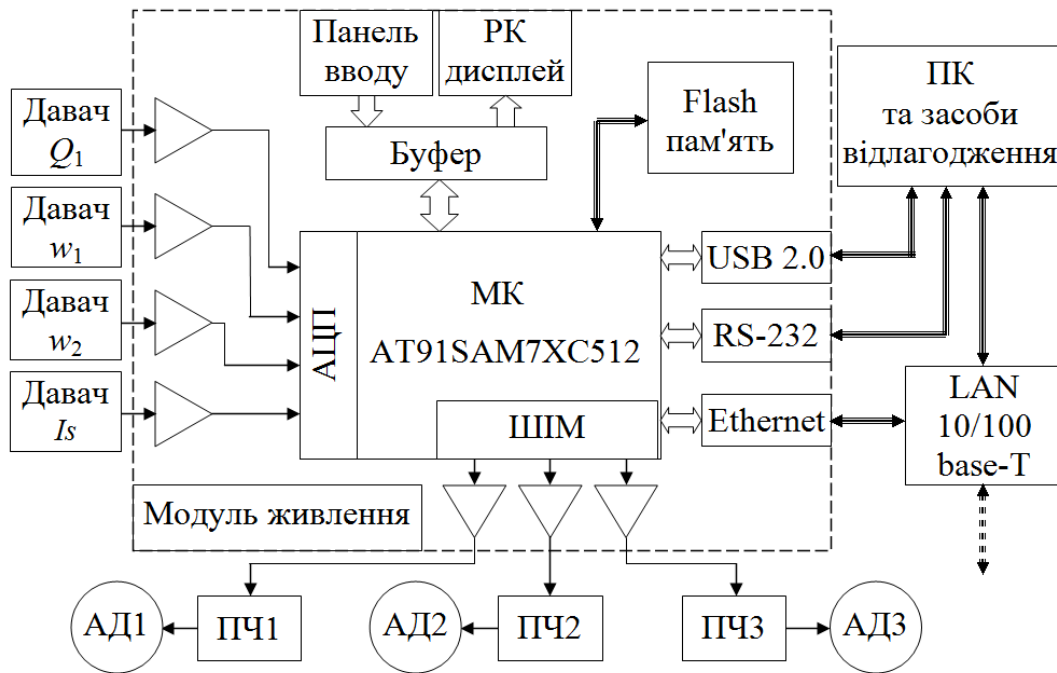


Рисунок 4.8. Структурна схема інтелектуальної системи

До її складу входять:

1. блоки частотного регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів дозаторів;
2. блок контролера, до складу якого входять такі основні вузли:
 - однокристальний мікроконтролер (МК) AT91SAM7XC512;
 - 8-ми каналний аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
 - інтерфейс зв'язку із датчиками;
 - масштабні підсилювачі аналогових сигналів з датчиків;
 - комутатор каналів;
 - інтерфейсний блок USB 2.0 для зв'язку з ПК;
 - блок індикації та задання режимів роботи;
 - блок живлення модуля.
3. Персональний комп'ютер;

Задачу, що вирішує мікроконтролер можна розбити на окремі модулі:

- перетворення вектора вхідних фізичних змінних у лінгвістичні змінні;
- прийняття рішення на підставі набору правил і видача вихідного впливу в термах фазі-логіки;

- приведення рішення до чіткості;
- видача керуючого впливу на силову схему.

Налаштування фаззи-контролера здійснено експериментальним поетапним тестуванням за допомогою середовища MATLAB. Основною проблемою програмної реалізації алгоритмів нечіткої логіки (Fuzzy-Software) є необхідність обробки великого обсягу інформації в реальному часі. Так, у випадку використання функцій належності, що запам'ятовуються за допомогою 64-х 4-бітових значень, обробка 49 правил з двома входами і однією вихідною величиною (функції належності якої задані у вигляді набору ізольованих значень – singletons) на 32-розрядній ЕОМ IBM-80386 – 20 МГц триває близько 170 мкс, що відповідає приблизно 300 000 правил/с.

Значне підвищення швидкодії нечітких регуляторів досягається шляхом апаратної реалізації їх алгоритмів. У таких випадках доцільним є використання мікроконтролерів, що поєднують аналоговий і цифровий принцип дії та програмовані користувачем, як чисті цифрові схеми з мажорунням. До таких схем належать інтегральні схеми OMRON FP-3000, TOGAI-Infra Logic F 110, які легко підключаються до датчиків і виконавчих механізмів. У той же час, вони є недостатньо гнучкими, оскільки мають або жорстко заданий характер зв'язків (OMRON), або малий набір стандартних команд (TOGAI).

Тому, для реалізації програмно-апаратного комплексу нами обрано однокристальний мікроконтролер AT91SAM7XC512 (структурна схема – Додаток В1).

Важливою особливістю даного МК є наявність ROM-пам'яті (ПЗП), в якій міститься програма-завантажувач, що дає змогу програмувати флеш-пам'ять, або завантажувати і запускати програму з оперативної пам'яті без застосування будь-яких апаратних засобів, окрім USB або RS-232 кабелю. Крім того, цей завантажувач дозволяє програмувати зовнішню флеш-пам'ять DataFlash серії AT45 корпорації Atmel, підключену до МК.

Доцільність використання мікросхем Atmel AT91SAM7X підтверджується ще й тим, що вони є найкращим рішенням для застосувань, які вимагають широкого набору периферії. Володіючи високопродуктивним 32/16-бітним ядром

ARM7TDMI, великим обсягом флеш та оперативної пам'яті на кристалі, набором широко застосовуваних інтерфейсів, дана серія може використовуватися розробниками для застосувань, пов'язаних зі збором даних і передачею їх по таких каналах, як Ethernet, CAN, SPI, SSC, UART тощо.

Основними технічними характеристиками AT91SAM7XC512 32/16-біт, принципова схема якої наведена у додатку В1, є:

- Вбудована високошвидкісна флеш-пам'ять:
 - доступ за 1 цикл при тактовій частоті до 30 МГц;
 - час запису сторінки 6 мс;
 - 10000 циклів запису;
 - можливість посекторного захисту.
- Вбудована SRAM пам'ять: доступ за 1 цикл при максимальній тактовій частоті
 - Тактовий генератор:
 - вбудований енергоощадний RC-генератор;
 - зовнішній кварцовий резонатор (3...20 МГц);
 - один PLL модуль.
 - Удосконалений контролер переривань:
 - індивідуально масковані переривання;
 - вісім рівнів пріоритету;
 - векторизовані джерела переривань;
 - два зовнішні входи переривань і один «швидкий» вхід.
 - Налагоджувальний порт: двопровідний UART з підтримкою каналу налагодження та спеціального переривання
 - Два паралельних контролера вводу-виводу:
 - 62 програмованих лінії введення-виведення, мультиплексованих з вбудованою периферією;
 - можливість генерації переривання згідно змін стану входів для кожної з ліній;
 - індивідуальне програмування для кожної лінії з відкритим стоком.
 - 13 контролерів прямого доступу до пам'яті.

- Порт USB Device:
 - Full Speed (12 Mbps);
 - 1352 байти вбудованої FIFO-пам'яті, що конфігурується.
- Ethernet MAC 10/100 base-T:
 - МП / RMP і інтерфейс;
 - вбудована FIFO-пам'ять;
 - виділені канали прямого доступу до пам'яті на прийом і передачу.
- Один Part 2.0A і Part 2.0B CAN-контролер:
 - вісім поштових скриньок, що повністю налаштовуються;
 - 16-розрядний лічильник часу.
- Синхронний послідовний контролер (SSC):
 - незалежні сигнали тактової частоти і фреймів для передавача і приймача;
 - високошвидкісний безперервний потік даних, з підтримкою 32-розрядних посилок.
- Два універсальних послідовних порти (USART):
 - підтримка інтерфейсів ISO7816, IrDA, RS485;
 - повна підтримка сигналів модему для USART1.
- Два master/slave SPI інтерфейсу:
 - 8/16 біт передача даних;
 - до 4 сигналів вибору кристалу;
 - один TWI інтерфейс;
 - восьмиканальний, 10-бітний АЦП;
 - IEEE ® 1149.1;
 - JTAG інтерфейс;
 - 5В сумісні входи/виходи;
 - вбудований стабілізатор живлення ядра 1,8 В;
 - частота роботи ядра 0 – 55 МГц;
 - корпус LQFP-100.

Компіляція, налагодження та програмування плати здійснюється програмним забезпеченням, що входить у стандартний комплект, який додається до мікросхем.

Програмні коди, які написані на мові C, забезпечують функціональність, що включає в себе підтримку всієї периферії, встановленої на платі та реалізовує розроблені нами алгоритми інтелектуальної системи керування потоковою лінією виробництва твердого твердопаливних пелет. Лістинг програмних модулів мікроконтролера AT91SAM7XC512 системи керування потоковою лінією виробництва твердопаливних пелет наведено у додатку В3.

Для реалізації протоколів взаємодії в мережі Ethernet використовується вільно розповсюджена операційна система реального часу FreeRTOS, що включає в себе стек протоколів TCP/IP, а також деякі спрощені мережеві сервіси, в тому числі HTTP. При виділенні статичної адреси для плати, є можливість переглянути поточну статистику її роботи (враховуючи запущені завдання чи статистику з'єднання), використовуючи локальну мережу або просто під'єднавши плату до комп'ютера за допомогою крос-кабеля.

Подальше тестування функціонування мікроконтролера AT91SAM7XC512 на основі розроблених нами алгоритмів та відповідного програмного забезпечення підтвердило доцільність та ефективність інтелектуальних систем керування поточними лініями виробництва твердого твердопаливних пелет.

4.4 Рекомендації по налаштуванню нейроконтролера технологічного процесу

Актуальною проблемою сучасних систем керування є підтримання працездатності при навантаженнях, що виходять за розрахункові межі. Алгоритми функціонування автоматизованих систем управління, які розроблені на стадії проектування, як правило, значною мірою відрізняються від оптимальних значень параметрів традиційних регуляторів. Ці труднощі пов'язані із впливом зовнішніх і параметричних збурень, частина з яких має нестационарний характер, і не підлягає контролю.

Розробку нейрорегулятора виконано на основі алгоритму Sugeno з використанням евристичних правил, що ґрунтувались на результатах чисельного і фізичного моделювання. Це дозволило розв'язати задачу синтезу керуючих впливів на основі застосування засобів нечіткої логіки та теорії нечітких множин,

у вигляді залежностей продуктивності дозаторів Q_1, Q_2 від вологості компонентів w_1, w_2 .

Подальше налаштування fuzzy-регулятора для системи керування технологічного процесу полягає у підборі виду та взаємного розміщення термів у діапазонах зміни вхідних і вихідних величин, а також у корекції необхідних правил, що зв'язують вхідні та вихідні параметри.

Оптимальне керування на основі нейрорегулятора забезпечує заданий режим роботи системи та реалізує відображення:

$$u^{(j)} = f(z^{(j)}) = f(z_1^{(j)}, z_2^{(j)}, \dots, z_n^{(j)}), \quad j = 1, \dots, J,$$

при наявності навчальної множини $\{(z^1, u^1), \dots, (z^J, u^J)\}$.

Критерій оптимальності у вигляді функції помилки для j -го розглянутого значення виду $E_j = 0,5 \|u - u^{(j)}\|^2$ дозволяє використовувати градієнтний метод оптимізації для підлаштування параметрів заданих предикатних правил.

Для аналізу функціонування технологічної лінії пелетування твердопаливних пелет у м. Полтава було оброблено архівні дані за період з червня по листопад 2022 р. Крім того, проведено набір еталонних ситуацій з відсіювання помилкових дій оператора та сформульовано критерій пошуку оптимальних форм функцій належності.

Тестування довело коректність роботи блока нечіткого регулятора в рамках даної моделі. Підтвердженням цього є аналіз перехідних процесів функціонування класичної системи зв'язного дозування та інтелектуальної системи на базі нейрорегулятора (Рисунок 4.9).

В процесі налаштування нейрорегулятора слід дотримуватись таких рекомендацій:

1. Кількість термів вхідних змінних можна змінювати з урахуванням особливостей об'єкту керування. В даному випадку на етапі досліджень нами обрано максимально допустимі відхилення параметрів: для одного з компонентів твердопаливних пелет – качанів кукурудзи було обрано 5 термів (Рисунок 4.10), оскільки допустимі значення вологості для нього 10, 11, 12, 13, 14. Для соломи весь її діапазон допустимих значень (14...34 %) розбито на 3 терми.

2. Процес налаштування слід проводити на основі використання тестової експериментальної вибірки даних із повного діапазону допустимих значень вологості компонентів, що не входять у навчальну вибірку.

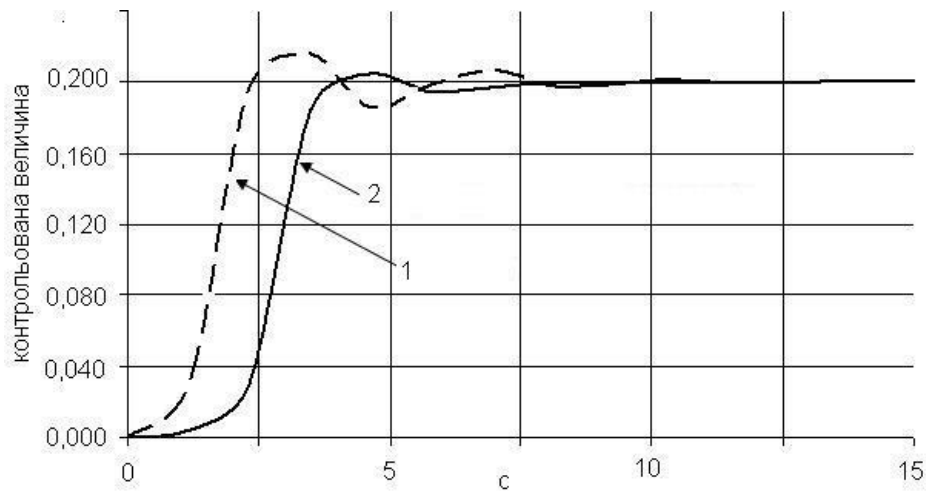


Рисунок 4.9. Перехідні процеси в системі зв'язного дозування: 1 – класичне регулювання; 2 – регулювання на базі нечіткої логіки

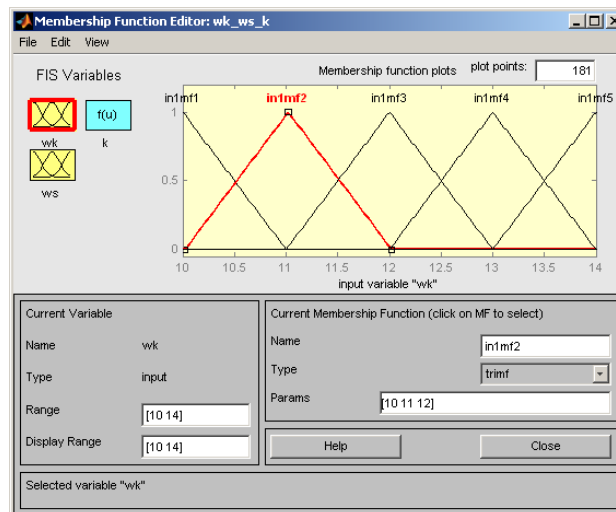


Рисунок 4.10. Вікно завдання параметрів функції належності для термів лінгвістичної вхідної змінної

3. Для всіх термів найдоцільнішим є вибір трикутної форми функції належності (trimf) (Рисунок 4.10), оскільки вона є найбільш ефективною при здійсненні апаратної реалізації нечіткого контролера:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

де $[a, c]$ – діапазон значень змінної;

b – найбільш можливе значення змінної.

4. Перевірку адекватності встановлених правил та функцій належності можна провести у вікні перегляду правил Rule Viewer редактора Anfis (Рисунок 4.11).

5. Подальше налаштування нечітких регуляторів в інтерактивній системі MATLAB слід здійснювати із використанням блоку NCD (Nonlinear Control Design), який реалізує метод динамічної оптимізації для проектування систем керування. Цей інструмент автоматично налаштовує системні параметри, ґрунтуючись на певних обмеженнях часових характеристик (наприклад, час регулювання та перерегулювання для реакції на поетапний вплив або межі для поточної помилки неузгодженості).

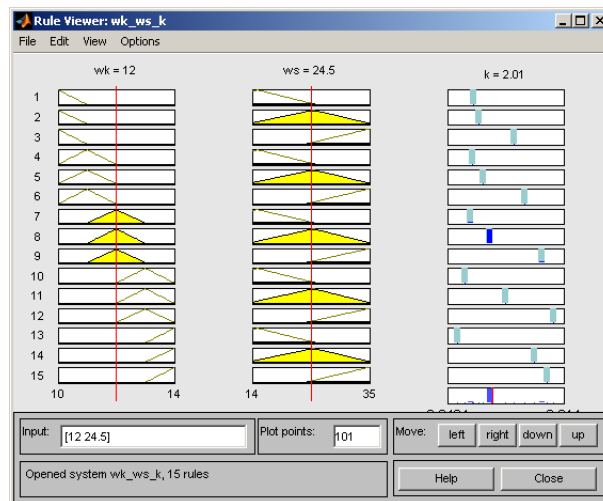


Рисунок 4.11. Результати налаштувань правил fuzzy-регулятора

У блоці NCD Output задається допустимий «коридор» для перехідної характеристики (Рисунок 3.12), в межах якого повинен знаходитись вихідний

сигнал досліджуваної системи, у відповідності до заданих величин перерегулювання і тривалості перехідного процесу.

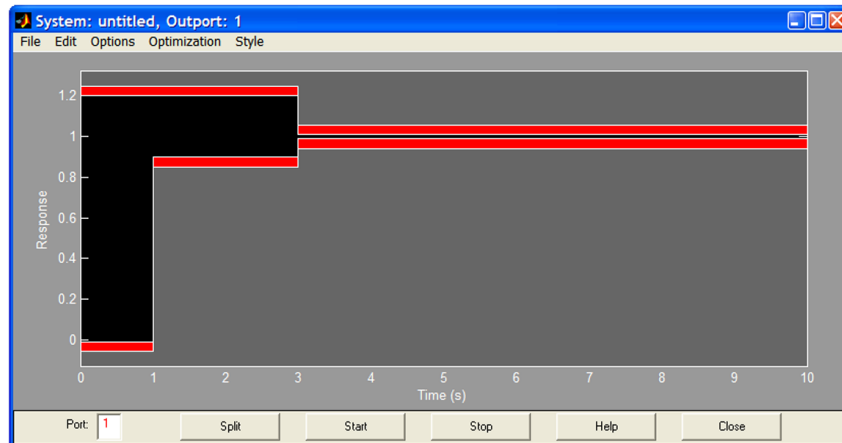


Рисунок 4.12. Графічне вікно блоку NCD Output

За допомогою меню блоку NCD Output задається інтервал дискретизації (один або два відсотки від тривалості процесу моделювання) і вказуються імена (ідентифікатори) параметрів системи, що підлягають оптимізації, а також вказуються невизначені параметри системи та їхні номінальні значення (Рисунок 4.13).

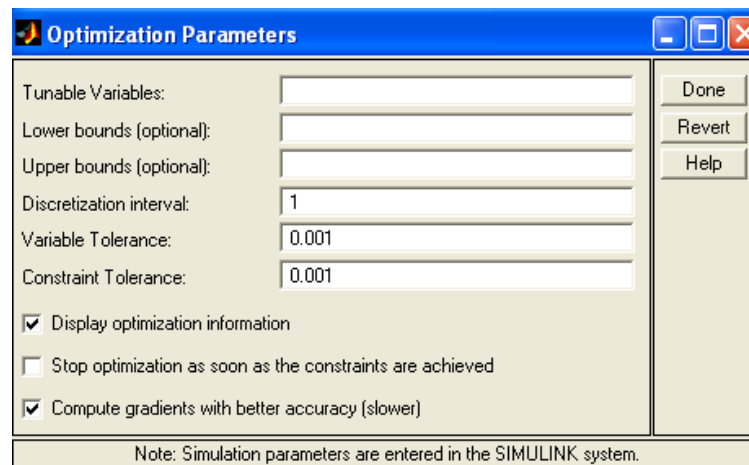


Рисунок 4.13. Вікно задання параметрів, що налаштовуються

Для кращої оптимізації системи керування процес налаштування параметрів регулятора слід здійснювати з додатковими обмеженнями.

В ході досліджень створювалися штатні ситуації та використовувалися методичні напрацювання, які характерні для аналогічних технологій. Виробничі дослідження системи проводились в жовтні 2022 року на виробничих

потужностях м. Полтава (додаток Д1). Технологічною базою була потокова лінія виробництва підприємства. Встановлена потужність лінії – 60 кВт, компонентами твердого твёрдопаливних пелет вибрані:

- солома пшенична «сіра», вологістю 27 %;
- качани кукурудзи, вологістю 11 %.



Рисунок 5.1. Потокова лінія виробництва двокомпонентного твердого твёрдопаливних пелет ВТ-60

Технологічний нейроконтролер, вмонтований безпосередньо в пульт керування (Рисунок 5.2). Економічний ефект від впровадження інтелектуальної системи керування склав 195 160 грн., а термін окупності 17 місяців. Енергоємність процесу під час використання системи зменшилася на 20 %.



Рисунок 5.2. Пульт керування лінією пелетування

Таким чином, здійснені нами дослідження доводять, що інтелектуальна система з нечітким регулятором є більш робастною, ніж класична, що підтверджує перевагу в даному випадку fuzzy-регулювання. Крім того, проведене тестування довело можливість використання для такого типу систем більш гнучких налаштувань, які дозволяють отримувати кращі результати.

Встановлені взаємозв'язки між електроакустичними параметрами прозвучування та фізико-механічними властивостями потоку біомаси, що дозволило вимірювати продуктивність дозаторів безперервної дії з похибкою до 5 % в робочому діапазоні $0,15 \dots 2,5 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

Виявлені закономірності формування співвідношень компонентів суміші (подрібнені солома і кукурудзяні качани), відповідно в межах 1:1 – 1:5, що дало можливість розширити вологісний діапазон соломи до 35 %, зменшити зольність твердопаливних пелет до 2,5 %, збільшити температуру плавлення пелетів до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Синтезовано за розробленою математичною моделлю алгоритм та структурну схему інтелектуальної системи керування раціональними швидкісними режимами електропривода у визначених діапазонах їх роботи (в межах $0,1 \dots 1,0 n_{\text{ном}}$).

Встановлено, що з метою налаштування програмних модулів інтелектуальної системи керування для здійснення апаратної реалізації нейроконтролера модуля зв'язного дозування синтез його параметрів (кількості термів, форм функції належності, правил) слід проводити на основі використання тестової експериментальної вибірки даних із повного діапазону допустимих значень вологостей компонентів, які не входять у навчальну вибірку. Крім того, використання NCD-блоку дозволяє автоматично налаштувати системні параметри, ґрунтуючись на певних обмеженнях часових характеристик (час регулювання та величина перерегулювання, або межі для поточної помилки неузгодженості).

Запропоновано програмно-апаратний комплекс на базі мікроконтролера AT91SAM7XC512, який дозволяє використовувати алгоритми керування, що базуються на нейронечітких технологіях. Застосування цього способу дає змогу підвищити надійність та швидкодію системи керування.

ВИСНОВКИ

На підставі узагальнених результатів досліджень потокової лінії виробництва твердопаливних пелет обґрунтовано методи, способи та технічні засоби реалізації раціональних швидкісних режимів електротехнологічного комплексу, що у сукупності забезпечують розв'язання прикладної задачі – підвищення енергетичної ефективності виробництва продукції.

1. Під час аналізу встановлено, що зменшення витрат електроенергії на виробництво твердопаливних пелет та поліпшення його енергетичних і якісних характеристик можливе завдяки підвищенню точності дозування компонентів у потоці, шляхом зв'язного регулювання продуктивності дозаторів. Статистичний аналіз процесу безперервного дозування сировини дає змогу визначити ключові вимоги до швидкісних діапазонів робочих машин, які мають перебувати в межах: за продуктивністю дозаторів – від 0,2 до 0,7 т·год⁻¹, за частотою обертання електродвигунів – від 30 до 157 рад·с⁻¹.

2. На основі математичного моделювання визначено мінімально необхідний об'єм бункера-змішувача із суттєвим зниженням потужності приводного двигуна (з 3 кВт до 0,25 кВт). Запропоновано здійснювати регулювання продуктивності завантажувального шнека-дозатора за величиною номінального струму статора АД підпресовувального шнека-екструдера, що дає змогу зменшити загальне енергоспоживання в середньому на 20 %.

3. Запропоновано новий спосіб приготування двокомпонентного твердого твердопаливних пелет, який вирізняється від існуючих тим, що дозування складових суміші здійснюється за допомогою регульованого електропривода у співвідношенні масових часток сухих компонентів суміші (подрібнені солома і кукурудзяні качани), відповідно, в межах 1:1–1:5. Це дає змогу використовувати солому з надлишковою вологістю до 35 %, зменшити зольність кінцевого продукту до 2,3 % збільшити температуру плавлення твердопаливних пелет до 1300 °С.

4. Доведено, що корекція напруги статора асинхронних двигунів при їх змінному навантаженні, виходячи з критерію максимуму енергетичних

характеристик електроприводів дозаторів, дає змогу збільшити їх коефіцієнт корисної дії на 3,4 %, а коефіцієнт потужності – на 6,4 % .

5. Спроековано модель fuzzy-контролера інтелектуальної системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет, середньоквадратична похибка функціонування якого не перевищує 0,2 %. Час встановлення заданої вологості на виході змішувача, враховуючи чисте запізнювання для розробленої системи, не перевищує 10 с, а перерегулювання 2,5 %.

6. Встановлено взаємозв'язки між електроакустичними параметрами прозвучування та фізико-механічними властивостями потоку біомаси, що дало змогу вимірювати продуктивність дозаторів безперервної дії з похибкою до 5 % у робочому діапазоні $0,15\text{--}2,5 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$.

7. Обґрунтовано параметри інтелектуальної системи керування продуктивностями дозаторів у визначених швидкісних діапазонах електропривода (у межах $0,1\text{--}1 n_{ном}$), залежно від величин вологості компонентів.

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.
4. *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>
5. 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. 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. О.В. Шефер, О.Д. Клєстов. *Моделювання інтелектуальної системи управління потоковою лінією виробництва твердопаливних пелет/ Шефер О.В., Клєстов О.Д. // Збірник наукових праць за матеріалами VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика».* (Полтава, 4 листопада 2022р.) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022, С.11-12.

ДОДАТКИ

Додаток А1

Лінія пелетування ВТ-60



Лінія призначена для подрібнення соломи зернових та олійних культур і соломи ріпаку, що поставляються у вигляді стислих блоків стандартних розмірів $0,7-1,2 \times 1, 2 \times 2, 4$ м або круглі тюки діаметром 1,5 м і висотою 1,5 м. Пропускна здатність до 2000 кг соломи ріпаку, вологість 15 %. Подача у подрібнювач здійснюється за допомогою сигналів від шафи управління [52; 57].

ВТ-60 використовується для виробництва пелетів, що мають діаметр 60 мм і довжину 25 - 200 мм.

Сировиною служить тирса, солома, ріпак.

Технічні характеристики:

продуктивності (тирса) 500 - 700 кг/год

продуктивність (для соломи) 300 - 500 кг/год

допустима вологість тирси 8 - 12%

допустима вологість соломи до 12%

ступінь ущільнення (обсяг тирси / гранулу) 8

Головний привід Потужність двигуна 18,5 кВт

шнекова потужність двигуна 5,5 кВт

загальна маса 2400 кг

Розміри (довжина, ширина, висота) [мм] $2800 \times 900 \times 1200$

Додаток А2

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

за матеріалами VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції

**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ: ТЕОРІЯ,
ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**

04 листопада 2022 року



Полтава 2022

УДК 004.89 + 681.51

Збірник наукових праць за матеріалами VIII Всеукраїнської науковопрактичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 4 листопада, 2022 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Редколегія: О.В. Шефер (головний редактор) та ін. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. – 96 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних електромеханічних систем та автоматизації, електричних машини і апаратів, моделювання та методів оптимізації, енергозбереження в електромеханічних системах, управління складними технічними системами, проблем аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах, інформаційно-комунікаційних технологіях та засобах управління. Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Відповідальний за випуск - д.т.н., професор О.В. Шефер.

Редакційна колегія:

О.В. Шефер – головний редактор, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Н.В. Єрмілова – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

С.Г. Кислиця – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Б.Р. Боряк – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ЗМІСТ

<i>О.І. Лактіонов, М.А. Мовін, В.С. Марченко</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	7
<i>О.Г. Дрючко, В.В. Соловійов, Н.В. Бунякіна, І.О. Іваницька, Є.О. Ошкодъоров</i> ФОРМУВАННЯ КАТАЛІТИЧНОАКТИВНИХ ШАРІВ АВТОМОБІЛЬНИХ СТРУКТУРОВАНИХ КОНВЕРТОРІВ НА ОСНОВІ ПЕРОВСКІТІВ ЛАНТАНОЇДІВ І ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	8
<i>О.В. Шефер, О.Д. Клєстов</i> МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОТОКОВОЮ ЛІНІЄЮ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ....	11
<i>Б.Р. Боряк, А.О. Косинков</i> МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ПРИМІЩЕННЯХ.....	13
<i>Н.В. Єрмілова, А.О. Чистота</i> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НАСОСНИХ УСТАНОВОК ВИПАРЮВАЧІВ СОКУ..	15
<i>О.І. Безверхий, Р.В. Карманов, В.В. Борецький</i> УДОСКОНАЛЕННЯ ДИЗАЙНУ САЙТІВ З ТОЧКИ ЗОРУ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОДАННЯ ІНФОРМАЦІЇ.....	17
<i>Г.В. Сокол, А.С. Міщенко</i> АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ПРАВОВИХ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ОСНОВ СИСТЕМ КІБЕРБЕЗПЕКИ КРАЇН ЄС.....	20
<i>Г.М. Кожушко, С.Г. Кислиця, В.С. Дорошенко</i> СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ВАГИ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІЙ СИСТЕМІ.....	21

УДК 621.34

О.В. Шефер, д.т.н., професор,

О.Д. Клестов, магістрант

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОТОКОВОЮ ЛІНІЄЮ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ

Дослідження процесу виготовлення твердопаливних пелет показали, що його основні входні параметри, такі як вологість компонентів і відповідна продуктивність дозаторів є нелінійні та нестационарні величини, взаємозв'язки між якими встановити традиційними аналітичними методами неможливо. Для формування адаптивних алгоритмів регулювання скористаємось технологією нечіткого керування [1].

Використання інтелектуальних компонентів на базі нечіткої логіки значно розширює можливості проектування і керування нелінійними динамічними системами. Це дозволяє скоротити час розробки моделі для відтворення складних залежностей, забезпечуючи високу точність.

Алгоритм роботи нечіткого регулятора формується за допомогою простих і зрозумілих лінгвістичних правил, а не у вигляді математичних виразів загальноприйнятого виду. Для моделювання регулятора використано апарат гібридних мереж в середовищі MATLAB, що реалізовано редактором Anfis.

У середовищі MATLAB [2-4] розроблено імітаційну модель системи керування зв'язним дозуванням компонентів твердопаливних пелет з використанням нейроконтролера для здійснення керування технологічним процесом (рис. 1).

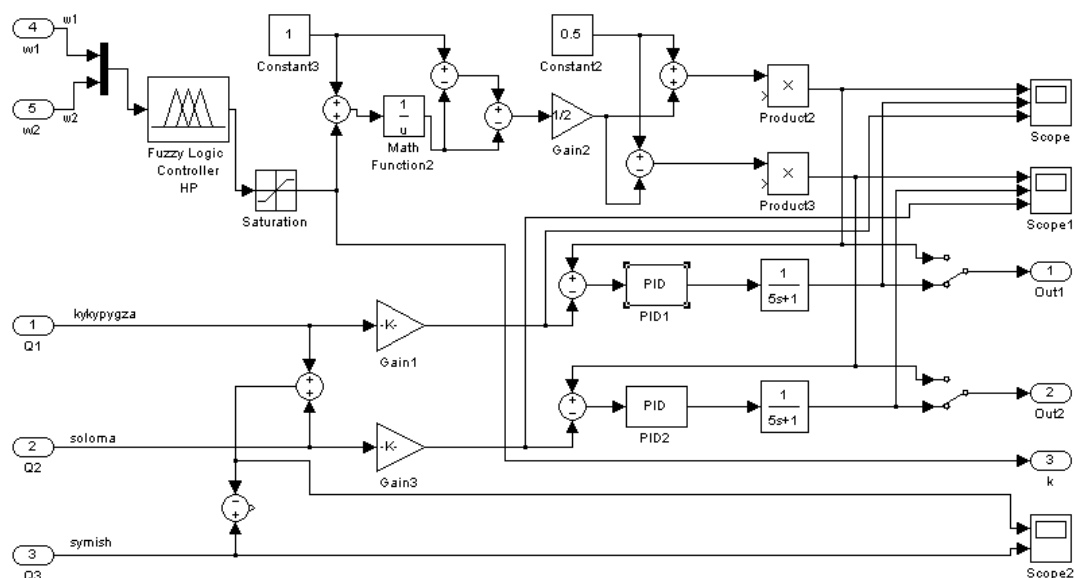


Рис. 1. Імітаційна модель системи керування дозуванням компонентів твердопаливних пелет

Дослідження розробленої системи керування методом математичного моделювання показало те, що застосування нечітких регуляторів дозволяє спроектувати систему регулювання високої якості: система має достатню швидкодію [5].

Розроблена інтелектуальна система керування дозуванням компонентів твердопаливних пелет дозволяє в широкому діапазоні регулювати вміст суміші й вирішувати питання надлишкової вологості компонентів та зменшення зольності твердопаливних пелет.

Моделювання технологічного процесу потокової лінії виробництва твердопаливних пелет дозволило дослідити швидкісні режими роботи електроприводів дозаторів і екструдера преса та розробити алгоритми регулювання, котрі ґрунтуються на використанні інтелектуальних засобів проектування системи керування дозуванням компонентів суміші.

Отже, за результатами математичного моделювання отримано залежності величини моменту асинхронного електроприводу від продуктивності завантажувального шнека-дозатора і струму статора у режимах ручного та автоматичного керування, що дозволило визначити необхідний об'єм бункера змішувача із суттєвим зменшенням встановленої потужності приводного електродвигуна з 6 кВт до 500 Вт.

Запропоновано модель fuzzy-контролера інтелектуальної системи керування дозуванням компонентів твердопаливних пелет, середньоквадратична похибка функціонування якого не перевищує 0,2 %.

ЛІТЕРАТУРА:

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. *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>*
4. *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>*
5. Y.Yen, R. Langari, *Fuzzy logic: Intelligence, Control and Information*, Printice-Yall, New Delhi, 2002.

SIMULATION OF THE INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF THE FLOW LINE OF THE PRODUCTION OF SOLID FUEL PELLETS

O. Shefer, Doctor of Science, professor,

O. Klietov, undergraduate

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

Додаток А3**CHAPTER 1****STATUS OF THE PROBLEM AND RESEARCH OBJECTIVES****1.1 Analysis of modern technical means of production of solid fuel pellets**

Identification of Ukraine's possibilities for the use of biomass for the production of energy resources, conducting research on the assessment of these resources, identification of promising territories for the organization of energy production using its various types. Biomass is by-products and waste of biological origin that can be used as fuel for energy production, in particular: stalks of agricultural crops and mowed grass, straw, wood waste, solid household waste.

Solid fuel pellets differ from traditional fuel in that they are essentially neutral to the growth of the greenhouse effect, since the plants grown for its production take carbon dioxide from the atmosphere and release oxygen. Therefore, by consuming solid fuel pellets, you can stop the global climate changes of the Planet. Thus, from the energy, economic and ecological points of view, the production of energy from biomass is a relevant direction.

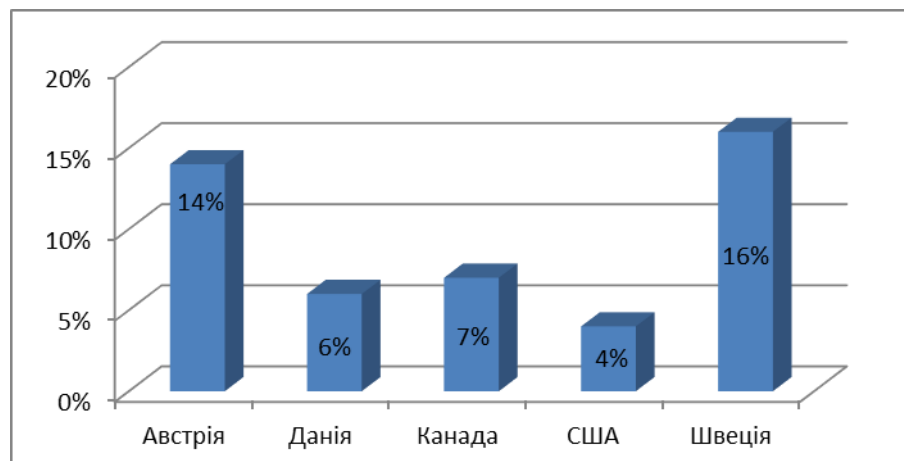
Biomass is the 4th most important fuel in the world, providing about 2 billion tons of conventional fuel per year, which is about 15% of the total consumption of primary energy carriers in the world. At the same time, more than 70% of renewable energy sources come from it. There is a rapid transition to the rational use of solid fuel pellets. Today, up to 30% of solid biomaterials can be used for energy needs without any significant consequences for soil fertility.

Among the EU countries, Denmark and Sweden are the leaders in the use of solid biomaterials for energy needs. This direction is actively developing in most countries of Central Europe and North America. As an energy resource, biomass is also widely used by our neighbors - Poland, Hungary, Slovakia, the Czech Republic and the Baltic states. Up to 25% of solid biomaterials are disposed of annually in these countries. This

resource of solid fuel pellets can significantly improve regional energy needs in Ukraine as well.

About 2-3 tons of straw can be used from each energy hectare, which is equivalent to 1 ton of hard coal. Even in the process of using 10% of the cultivated area for growing the necessary raw materials, it is possible to obtain 6–9 million tons of straw for local energy use annually.

Solid fuel pellets, as an energy resource, play a significant role in the energy supply of industrialized countries: if in the USA their share is about 1/20 of the total volume, then in Austria and Sweden this indicator increases to 1/5, i.e. 4 times (Picture 1.1) [2].



Picture 1.1. Share of use of solid fuel pellets in industrialized countries

According to the materials of the UN Program, the share of renewable energy sources in the global fuel and energy balance in 2050 may reach 50%, and according to the forecast of the World Energy Council, it will reach 80–90% by the end of the current century. Therefore, in terms of value, solid fuel pellets take the 4th place among fuels and provide about 15% of the total consumption of primary energy carriers in the world (in developing countries - more than 30%, sometimes up to 50-80% [3]). The dynamics of the development of the global electric power industry attests to a confident growth of the share of bioresource sources in the overall balance of generated energy. In the sector of the use of non-traditional energy sources, the EU has started work aimed at the use of bioenergy materials only with an annual recovery cycle (straw, waste from seed and elevator production).

In Ukraine, the economically feasible potential of solid fuel pellets is estimated at 27 million tons per year, where its main components are agricultural waste and energy crops.

The main technologies of biomass processing are: direct burning, gasification, anaerobic fermentation with the formation of biogas, production of alcohols and oils for obtaining motor fuel [4]. A detailed analysis of the volume of plant waste in the Ukrainian economy (Table 1.1) allows us to state that the amount of raw materials for the production of solid fuel pellets over the past 5 years has a rapid upward trend, which convincingly proves the relevance of the development of the industry of production and use of solid biomaterials in Ukraine.

Table 1.1

Amount of major plant waste for 2017–2022.

Type of raw material	Years					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	Amount of plant waste, thousand tons					
Cereal and leguminous straw (without corn)	19435,4	17534,6	13780,5	26361,3	22391	17210,3
Rapeseed straw	461,4	981,2	1696,8	4653,9	3034,7	2380,9
Soy straw	716,7	1040,8	845,4	951	1220,9	1965,8
Corn	6449,9	5783	6679	10302,1	9437,7	10757,7
Sunflower	12292,3	14306,9	10903,6	17046,4	16622,8	17687,2
In total	25637,2	39355,7	33905,3	59314,7	52707,1	50001,9

A feature of the technology is the impracticality of its transportation over a distance of more than 50 km. Therefore, the processing of straw of grain crops, stalks and cobs of corn, sunflower, branches of fruit trees and vines of grapes, and waste from reed processing should be carried out at the place of their collection. Important elements of technical support of biomass

processing technologies are:обладнання технологічне для спалювання біомаси;

- machines for harvesting biomass;
- warehouses and equipment for storing raw materials;
- technological process control systems at all stages of production and application of solid fuel pellets.

The most significant characteristic of biomass used as solid fuel pellets is its calorific value, which depends on many factors: genetic characteristics of energy plants, environmental influences, storage conditions, humidity, etc. Table 1.2 shows the average calorific value for some types of raw materials, with an absolute humidity of 20%.

Table 1.2

Average calorific value of energy raw materials

The name of the energy raw material	Calorific value, MJ/kg
Straw of grain crops	10,5
Corn stalks	12,5
Branches of fruit trees	10,5
Sunflower stalks	12,5
grape vine	14,2

An important role in the process of using solid biomass as a fuel is played by the ash content (Table 1.3), which determines the content of the residue in percent (per anhydrous mass), which is formed from mineral impurities of the fuel during its complete combustion. An important factor affecting the calorific value of raw materials is the oxygen content. Its significant content in solid biofuel means that in the process of its combustion, the need for air and the amount of smoke produced are smaller than when burning different types of coal (Table 1.3). The moisture content in biofuel is unfavorable not only from the point of view of the calorific value of the material. With increasing humidity, the amount of water vapor increases, and this, as a result of its condensation processes, creates problems with smoke removal.

Table 1.3

The need for solid fuel materials in the air

Fuel	Specific air demand during combustion, m ³ /kg	Ash content, %
Straw	5,65	4–10
Tree	7,63	1–2
Charcoal	10,52	0,8
Lignite	8,33	0,8
Coal	10,85	0,08

The main types of biomass used as solid fuel pellets for direct burning include wood and raw materials from energy plants, as well as straw and cleaning waste from various plantations (along roads, cleaning orchards, etc.). The burning of wood and straw in furnaces is preceded by the collection, drying and storage of raw materials. One of the defining characteristics of different types of biomass is its density. Usually, dry biological materials have a density 3–4 times lower than coal, so an important factor in the quality of solid fuel pellets is the technology of biomass preparation for burning. It determines the structural and technological implementation of heat engineering equipment, significantly affects the economic indicators of its operation. The energy characteristics of solid fuel pellets given in Table 1.4, depending on the technologies of preparation for burning, allow us to analyze the energy intensity of a certain type of raw material. Therefore, the specific energy capacity of solid fuel pellets is 10 times higher than that of ordinary straw, and the specific volume is 10-15 times smaller.

Ways of utilization of remains of agricultural plants for further use as solid fuel pellets are its baling, pelleting, granulation.

Characteristics of the energy intensity of solid biofuels depending on the technologies of their preparation for burning

Type of solid fuel pellets	Volumetric mass, kg/m ³	specific volume, m ³ /t	energy intensity, MW/m
Straw			
Ordinary	20–50	20–50	0,07–0,16
chopped	40–60	16–25	0,13–0,19
blocks	70–130	7,7–14	0,23–0,43
rolls	60–90	11–16	0,19–0,29
knitwear	50–110	9–20	0,16–0,36
pellets	300–450	2,2–3,3	0,99–1,48
Wood			
log	200–500	2,0–5,0	0,86–2,15
cod	200–300	3,3–5,0	0,86–1,29
sawdust	150–200	5,0–6,6	0,65–0,86
cuttings	250–400	2,0–3,0	0,70–0,90
pellets	600–800	1,3–1,6	2,58–3,44

Depending on the method of pressing the particles, pressed solid fuel pellets are divided into two types: granules and pellets. Granulation and pelletizing are processes in which shredded waste, in the form of sawdust, is compressed under high pressure heating. The temperature of the material rises, plasticization of lignin occurs, therefore material particles are glued together with the formation of fuel pellets or granules in which the maximum amount of wood matter is concentrated for a minimum volume. A pellet (Picture 1.2) is a cylinder of ground pressed wood. It is 10 to 30 mm long and 6–10 mm in diameter. Depending on the quality, first-class pellets and industrial pellets are distinguished. Pellets of the first class are of the highest quality. For production, the use of bark is not allowed, as it has a high ash content. Industrial pellets may contain a certain amount of bark (up to 10%) (Table 1.5).



Picture 1.2. Pellets

Fuel pellets became widespread primarily due to the peculiarities of their combustion process. After all, when burning, fuel pellets release the appropriate amount of heat, while their calorific value of fuel pellets is equated to traditional types of fuel, while the amount of harmful substances released is insignificant. The technology for the production of wood pellets depends on the raw material and includes the following operations: preparation of raw materials → drying → grinding → granulation → cooling and packaging.

Table 1.5

Properties of granules

No n/a	Properties of granules	Granules of the first class	Industrial pellets
1	Density, kg/m ³	1000–1200	1000–1200
2	Humidity, %	до 10	10–12
3	Dimensions, mm	d = 6; l = 10–30	d = 10; l = 10–30
4	Bark content, %	not allowed	until 10
5	Ash content, %	less than 0.7	more than 1.5
6	Calorific value, MJ/kg	16,9	15,1

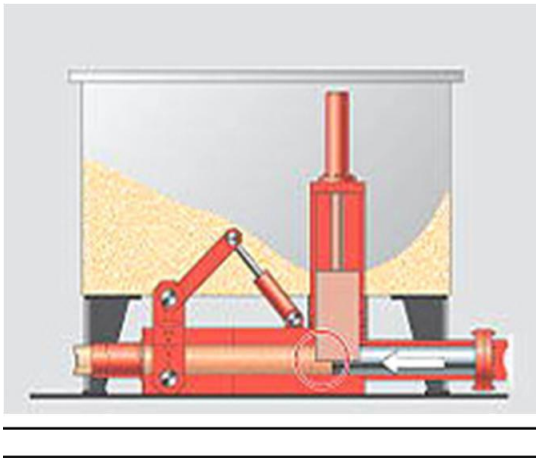
The preparation of raw materials consists in the process of grinding waste into technological chips and making shavings from it. Shavings have a high moisture content - in the range of 80-90%. The optimal humidity after drying should be no more than 12%. A feature of the pellet production technology is high requirements for the size of wood particles. Before submitting the chopped wood for granulation, it is crushed on hammer crushers. The smaller the diameter of the granules, the finer the raw material should be. An important indicator of the quality of pellets is their density, which depends on the moisture content of the prepared chopped wood. The maximum value of the density can be achieved at a raw material moisture content of up to 20%. Therefore, before granulation, the raw materials are moistened with water or steam by 2–3%. This surface moisture contributes to a better convergence and compaction of small wood particles. Under the action of pressing, the plastic deformations of the particles increase, and surface moisture, in addition, acts as a lubricant and cools the granulator matrix.

The duration of moistening of raw materials should not exceed 10–15 s, so that moisture does not have time to penetrate the walls of the vessels, since the particles of the granules will become elastic [6].

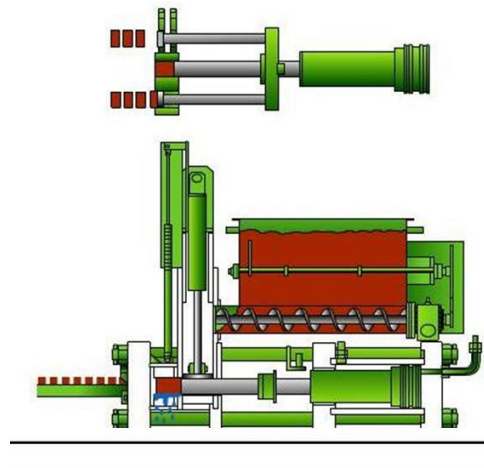
1.2 Technological requirements for control systems of solid fuel pellet pressing flow lines

Production of fuel pellets is carried out using presses with ring and flat dies. In ring presses, the raw material is pressed by drums through the matrix and cut to the outside. Energy consumption for pressing is the same in both cases. Then the granules are cooled and packed [8].

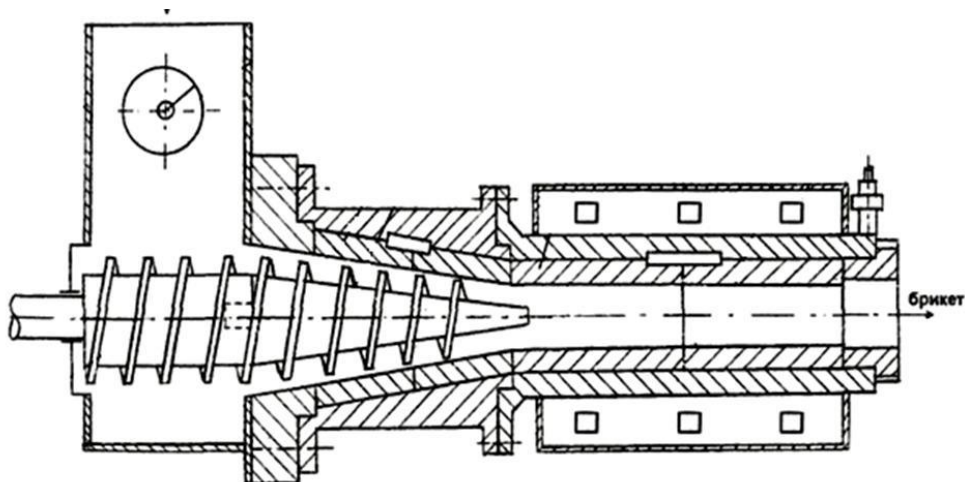
Fuel pellets are pressed in hydraulic (Picture 1.3), shock-mechanical (Picture 1.4) and screw (Picture 1.5) presses of various designs. The shape and size of the pellets depend on the used press equipment [8].



Picture 1.3. Hydraulic press



Picture 1.4. Impact mechanical press



Picture 1.5. Screw press

Pellets are made on hydraulic presses (Picture 1.6), that is, with the help of high pressure and in shape resembles a small brick.



Picture 1.6. Pellets made on hydraulic presses

Pellets made on shock-mechanical (crank-rod) presses (Picture 1.7) (under the influence of high pressure) have a cylindrical shape. The advantages of this type of pellets are minor requirements for personnel qualifications and production organization, low production cost. The disadvantages include the fact that the pellets are not resistant to moisture. This type of pellets is widely used in industrial power plants. The market for the consumption of cylindrical pellets is constantly growing



Picture 1.7. Pellets made on shock-mechanical presses

On screw presses, pellets are produced using a combination of high pressure and firing. Such fuel has the shape of a polyhedron with a hole in the middle (Picture 1.8). The advantages of this type of pellets include high mechanical resistance to damage and high moisture resistance. The disadvantages of such production are the labor-intensiveness of the production process, the need for highly qualified specialists, and significant energy consumption [4].



Picture 1.8. Pellets made on screw presses

A number of technological flow lines for the production of solid solid fuel pellets are manufactured in Ukraine and other countries. All of them have a common drawback - the low quality of the final product, which is associated with the impossibility of smoothing the basic non-deterministic characteristics of the bio-raw material by mechanical methods [7]. Therefore, the development of a control system for production flow lines of solid fuel pellets with full calorific and commercial characteristics is an urgent task for the agro-industrial energy industry.

The most expedient, from the point of view of economy, is the production of pellets on shock-mechanical presses. An overview of the existing pelletizing lines made it possible to draw a conclusion about the perspective of choosing the technology proposed by the company Vektor (Picture 1.9), the main advantage of which is the possibility of manufacturing two-component fuel [4]. The design of the press provides access to nodes and aggregates, which allows for convenient maintenance, revision, as well as current repairs, in safe conditions, in the shortest possible time.

In the press, the number of fast-wearing parts and assemblies has been reduced, their design has been brought to such an appearance that it would be possible to perform them on metalworking equipment in almost any conditions in the shortest possible time.



Picture 1.9. Pelletizing line BT-60

The electrical equipment of the press provides control in the necessary modes, smooth regulation and the necessary protection and signaling. After entering the working mode, the equipment works in automatic mode and does not require the constant attention of the service personnel. The analysis of the types of solid fuel pellets based on their calorific value, cost, environmental friendliness and availability confirms that the most appropriate raw material for the production of pellets using this technology is the use of straw. The practically achievable surplus of straw in Ukraine is 3–4 million tons per year, which gives reason to consider this type of solid fuel pellets as promising with great optimism, as evidenced by the latest declarations and resolutions of the Ukrainian government [8]. However, there are also disadvantages of using straw as fuel - it is high in ash. Therefore, it is suggested to use a two-component fuel consisting of straw and corn. Presses of fuel pelletizing lines are best suited for creating such a two-component fuel. The defining parameters of the evaluation, in this case, are the characteristics of the presses: cost, productivity, reliability, energy intensity and quality characteristics of the final products, which are correlated with the physical and mechanical properties of the raw materials. Among the existing hydraulic, extruder and impact presses, the most promising, considering the technical and economic characteristics, are the latter, especially for the pelletization of two-component solid fuel pellets, in those cases when it comes to pelletizing straw, energy intensity of the process and productivity. In our opinion, the VT-60 pelletizing line is best suited for the

production of two-component fuel based on straw and corn. With the help of adjustable supply of fuel components, it is possible to control their percentage composition depending on humidity. Such a fuel composition will increase the energy efficiency of its combustion, reduce ash content and contribute to the production of process gas for obtaining electricity using a solid oxide fuel cell.

At the same time, the mentioned technologies are united by a common drawback - the uneven supply of raw materials to the press, with a coefficient of variation of 25-35%, which significantly affects the quality of the final product - density, cohesion and, as a result, its calorific value [3]. A significant disadvantage of using straw as a basic component is that its humidity reaches 30...35% in unfavorable weather. In such cases, drying of raw materials up to 15...16% is used, which leads to significant overspending of energy and technological inconveniences, which in most cases are the reason for stopping production.

Attempts to eliminate this deficiency using press mechanisms and drying of raw materials do not have a significant effect and lead to significant overspending of electricity. This problem can be solved thanks to the adjustable, coherent dosing of raw materials. Such an approach can be implemented through a comprehensive study and analysis of factors affecting the formation of fluctuations that occur during the operation of screw feeders for raw materials. In Ukraine and EU countries, a range of equipment has been created for uniform and continuous supply of raw materials to mixers, drying chambers, granulators, presses, etc. Practically all dispensers are dominated by the regulating asynchronous electric drive, which is a positive prerequisite for the automation of the dosing process.

All this is related to the non-determinism of the flow process of dosing raw materials and the lack of clear methods for a full-fledged mathematical analysis of fluctuating phenomena characteristic of these technologies [7].

However, these processes are stochastic and characterized by a high degree of uncertainty, so it is advisable to use intelligent technologies, in particular, neurocontrollers and fuzzy logic, to develop an automated control system. This will make it possible to optimize the production technology of two-component solid fuel

pellets according to the criteria of energy saving and cost, as well as to improve the quality of pellets and their specific energy density.

1.3 Electrical equipment of flow lines for the preparation of mixtures

Dosing of components is the main operation in the technologies of preparation of mixtures. At the same time, the quality of the final product depends mainly on compliance with the ratio between the input components specified by the recipe, that is, on the quality of the dispensers. Therefore, regardless of the type and principle of operation of dosing devices, the main technical task is pursued here - increasing their accuracy in the working range.

To date, more than 50 companies are engaged in the development of equipment for continuous dosing, including "Siptron" (USA), "Lewa" (Germany), "Dozapro" (France). Their efforts are mainly directed to the production of dispensers by the weight of the material [11]. To prepare the mixture, the flow intensity is pre-set so that the ratio of their components corresponds to the required recipe. In that case, "connected systems" are used, when the control equipment of all dispensers is connected to each other, and one of the components acts as a "leader", others - as "slaves". Such dosing is called proportional, which ensures dependence:

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

Where Q_1 i Q_n - consumption of material of the first and nth kind;

k – proportionality factor.

In the presence of one "driven" component, such schemes are able to solve the tasks set before them [108]. Subject to availability oscillations [24]

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

In this case, it is preferable to use a multi-link control system with an unregulated main component dispenser. Then the signal affecting other dispensers will be proportional

$$I_1 = k_i [Q_0(t) - Q_{0_{зад.}}] + Q_i(t), \quad (1.3)$$

where $Q_{0_{зад.}}$ – the set value of the productivity of the main stream;

k_i – proportionality factor.

$\sum_1^n Q_i(t)$ With more stringent requirements for the size, multi-link systems with automatic performance adjustment of all should be used

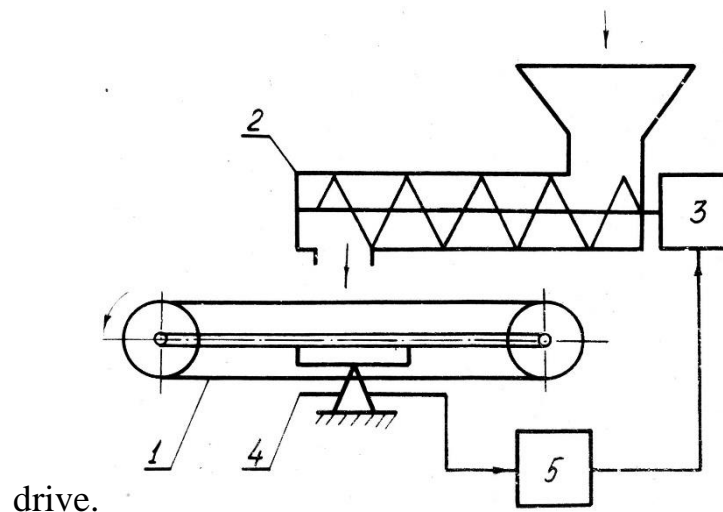
streams [21]. But an increase in the number of components leads to the complexity of the system, an increase in its cost and a decrease in the reliability of the equipment.

The above systems have shortcomings that are inherent in the methodology of their construction on the basis of mass measuring conveyors. The dynamic nature of the weighing process generates nonlinearity in the characteristics of the output signal in all links of the structural scheme - the weighing belt of the conveyor - the primary converter - the amplifier - the integrator. The disadvantage of mass measuring systems is the fact that when weighing light components (chips, cotton wool, straw, etc.) at low productivity in the flow, it is difficult to implement primary transducers in the technological process of measurement without excessive errors. According to the principle of regulation, continuously acting dispensers can be divided into two groups: dispensers with adjustment of the material load on the conveyor belt and dispensers with adjustment of the material feed rate [108]. Dosers with adjustment of the amount of material on the conveyor belt work at a constant speed of its movement and adjust it only when resetting to another performance. The use of an adjustable latch to change the cross-section of the outlet opening does not provide the necessary dosing accuracy, especially for complex materials, which include biomass [2]. In dispensers with belt speed adjustment, when the mass of the material on the conveyor increases, its speed decreases accordingly and vice versa. The specified types of dispensers have a number of significant disadvantages, in both cases the conveyor is the loading and mass-measuring link of the dispenser. In dispensers, the material is weighed and dispensed simultaneously, which leads to fan-like changes in productivity [8].

These disadvantages are practically absent in dispensers in which the feeding and weighing mechanisms are divided into independent links (Schenk, Germany). These

dispensers ensure a more uniform delivery of the material, as there is practically no time interval between the moment of weighing the material and its delivery to the mixer (Picture 1.10). During the change in the mass of the material on the belt, which moves at a constant speed, the weighing conveyor acts on the measuring element, from which pulses are sent to the regulator. But this dispenser management system has a number of disadvantages [11]:

- great inertia of information output by mass measuring device;
- the impact of vibration associated with the fall of material from the auger onto the belt (which is very significant with increased sensitivity of the primary transducer);
- influence on the operation of the electric



Picture 1.10. Dispenser of bulk materials of the "Schenk" company: 1 - mass measuring conveyor; 2 - screw hopper - feeder; 3 - adjustable electric drive; 4 - mass measuring device; 5 - control unit

In many cases, it is advisable to carry out continuous dosing according to the density of the material flow (chips, sawdust). In this case, the density characterizes the amount of dry matter that is controlled in the material flow, which is essential in such industries as woodworking and solid fuel pellet production technologies.

This goal can be achieved using the property of ultrasound to lose its intensity when passing through the material [4, 5]. The intensity of acoustic vibrations that passed through the flow of material during free fall from the discharge opening of the dispenser decreases depending on:

$$I_k = I_0 \exp(-ax),$$

where I_0 – initial power of acoustic vibrations, $W \cdot m^{-2}$;

I_k – final power on the flowmeter receiver, $W \cdot m^{-2}$;

a – coefficient of absorption of waves by the medium in the technological gap between the emitter and the receiver, m^{-1} ;

x – distance between the emitter and the receiver, m.

The above-mentioned dosing scheme differs favorably from others in that the dosing of the material is carried out according to the amount of dry matter in the flow, which is the determining criterion for determining the productivity of the dispensers. In addition, adjusting the performance of the dispenser by speed using an inertialess flowmeter allows to significantly improve the technological characteristics of the dispensers [6].

1.4 Methods and technical means of ensuring adjustable characteristics of continuous dispensers

Conveyors, dispensers, mixers of various types are among the most common technological machines (mechanisms), for which an unregulated asynchronous electric drive is mainly used. This method of implementation is justified in technologies in which, according to the requirements, it is necessary to ensure constant productivity.

However, in some cases, there is a need to adjust the speed regimes, in particular, in the lines of the connected dosing of the components of the mixture during the pelletizing of solid fuel pellets.

The use of frequency-regulated electric drive systems for these technologies will allow not only to significantly reduce electricity losses [8], but also to increase the quality of the final product. The following ways of implementing energy-saving modes of operation of the adjustable electric drive of technological machines (screw and sector dispensers, screw conveyors, presses, etc.) can be considered:

- provision of rational energy modes of operation of the asynchronous electric drive, which make it possible to minimize energy losses during its operation;

– implementation of regulation of the rotation frequency of their working bodies, which ensures a significant reduction in energy consumption (especially for screw extruders, presses);

– adaptation of the mechanical characteristics of the electric motor to the requirements of the technological process by adjusting the speed modes of the electric drive. Let's consider the existing algorithms for controlling the asynchronous electric drive of the executive mechanisms of the technological lines for the production of solid fuel pellets based on their input and output parameters [8,7]. For the drive asynchronous electric motor of the working mechanism, it is necessary to determine the nature of the change in its static moment from the rotation frequency $M_c = f(\omega)$. For most mechanisms, the dependence of the static load moment on the angular velocity, in the zone of its adjustment, can be represented in the form of a power function:

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

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

where M_0 – moment of static load, at $\omega = 0$. Given that $\omega \equiv f_1$, and $\omega_* = f_*$ the last expression can be written in the form:

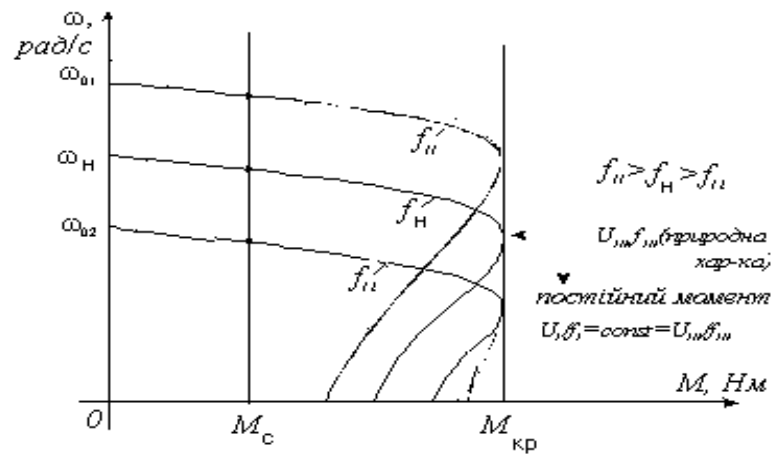
$$M_{c*} = M_{0*} + (1 - M_{0*}) f_*^q$$

In the researched technology, the types of static load subject to dependence are most common $M_c = f(\omega)$.

The static load moment does not depend on the speed (Figure 1.11). Conveyors with a constant mass of transported cargo, as well as mixers and crushers, have this characteristic.

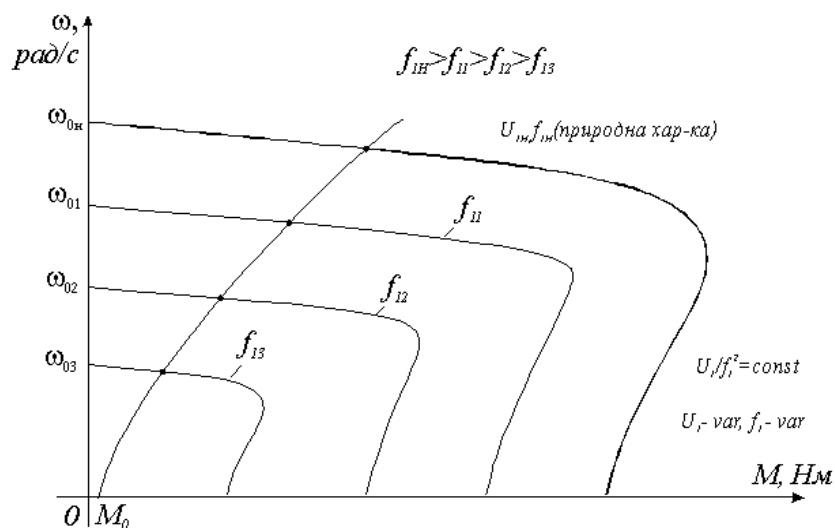
With some assumptions, all mechanisms in which the main load is the moment of frictional resistance can be included here, where $q=0$, $M_0 = M_c = \text{const}$, since the moment of friction almost does not change in the range of operating speeds. For this type of load, the static moment will be equal

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



Picture 1.11. Compatible mechanical characteristics of the electric motor and the working mechanism at $M_c = const$

The increasing mechanical load (Picture 1.12) has screw presses, extruders, as well as some types of mixers, etc., because their torque depends on the frequency of rotation. The frequency of rotation of the working bodies of the specified machines is not high, therefore the combined moment of inertia of the system to the shaft of the electric motor is mainly determined by the moment of inertia of its rotor.



Picture 1.12. Compatible mechanical characteristics of the electric motor with increasing load on the shaft

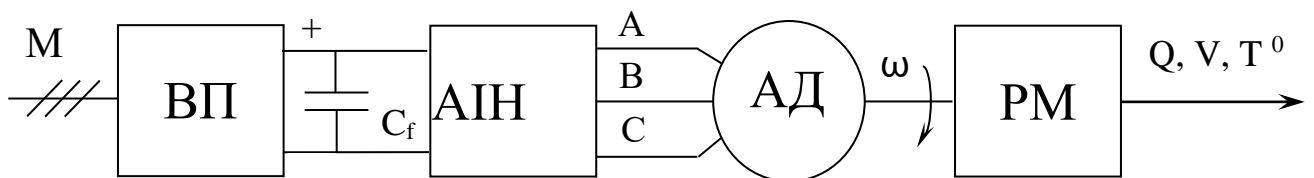
This can explain the fact that the start-up time of the electric motor lasts a few seconds, and the heating during the start-up is negligible. Since press drive motors have

a large power, in order to limit the starting currents, they are often started with the windings switched from "star" to "delta".

The mode of operation of electric motors is long, with a variable load. The forces that arise in the pressing bodies are determined by many factors that can change their influence during the operation of the machine (the amount and composition of the starting material, its humidity, the temperature of the matrix, etc.). Therefore, the load on the motor shaft fluctuates within significant limits, including overload.

The analysis of the mechanical characteristics of the working bodies of technological machines, and the obtained experimental dependences of the static moment on the frequency of rotation of the electric motor, make it possible to implement the rational control of the asynchronous motor according to the adaptive algorithm of the formation of voltage-frequency characteristics for each of the options considered.

To implement such control methods, it is advisable to use adjustable electric drive systems based on frequency converters (IFs), which allow, regardless of the operating mode of the automated electric drive, to provide a high power factor of the power circuit and at the same time good static and dynamic indicators of the control system. The functional diagram of the frequency-regulated automated electric drive is shown in Picture 1.13.



Picture 1.13. Functional diagram of a frequency-regulated automated electric drive: M - network, VP - rectifier, Cf - capacitive filter, АИИ - autonomous voltage inverter, АД - asynchronous motor, РМ - working machine

The conducted comparisons convincingly testify to the significant advantages of adjustable electric drive systems based on the IF in cases of a wide range of regulation of speed regimes of solid fuel pellet production technologies.

Optimizing the speed characteristics of conveyors, dispensers and their

interaction with continuous mixers is a very promising area of energy saving. Power savings (consumed energy) during conveyor operation at a constant load moment and variable transportation productivity is determined (in relative units)

$$\text{by the ratio: } \Delta P_e = M^* (1 - Q^*), \quad (1.7)$$

where M^* – the relative moment of non-working movement of the conveyor;
 Q^* – relative performance of the conveyor.

When the productivity of the conveyor is reduced, for example by 30–50% and when the load is idling ($M^* = 0.4$), power saving is 12–20% [5].

With coherent regulation of the supply of solid components of solid fuel pellets, it is possible to successfully redistribute the spectral densities of their streams and effectively use the smoothing capacity of the dispenser. Conducted studies of dispensers [4, 5] showed that, in addition to the technological effect, it is possible to reduce the consumption of electricity in dynamics by 2-2.5 times.

The mentioned facts give reason to assume that there are all prerequisites for the rational use of the resources of the frequency-regulated automated electric drive in the production technologies of solid fuel pellets, which can be implemented through the development and implementation of adaptive algorithms and intelligent control systems. Electricity savings in the electric drive, supplemented by high-quality technological indicators, can in some cases reach 50%.

1.5 Justification of the research direction and purpose

The main type of mass electric drive is an unregulated drive based on asynchronous electric motors with a short-circuited electric motor with a capacity of up to 20 kW, which accounts for more than 90% of its total fleet and 75% of the electricity consumed by asynchronous motors [4].

The peculiarity of the modern stage of its development is the transition to a regulated electric drive (automated electric drive) in technological installations, which until today were dominated by a simple unregulated electric drive. At the same time, savings reach up to 50% of electricity, water – 25%, feed – 30%, and energy at least 10% [7].

Attempts to solve technological problems at feed dosing units using sliding couplings of the PSMS type and direct current drive ET1E2 began immediately after the introduction of these devices into serial production [7, 9]. Saving energy was not the main task then. The very possibility of changing the performance of working machines when using an automated electric drive in production was dominant. Developments were carried out by using asynchronous motors with increased slip. The adjustable electric drive of the device for dosing chemical reagents during the processing of stem fodder in the flow [4] solved practically purely technological issues of improving the quality of the final product.

With the appearance on the market of a frequency-regulated asynchronous electric drive of the latest generation, new opportunities have opened up for the creation of energy-saving regulation systems with high-speed modes.

The specified characteristics of the adjustable asynchronous electric drive allowed to build dosing systems of various materials on their basis. The payback period of the system proposed at the Kharkiv CHP-5 is 357 days.

Improving the dynamic properties of continuous-flow dosing of components using a frequency-regulated automated electric drive [6]. Its use made it possible to achieve dosing accuracy of up to 0.1% when using the VK-1 weight corrector. The problem of using an adjustable electric drive with its integration into the structures of a complete technological complex is covered in [8]. The use of a frequency converter on the working machines of flow lines for the production of various types of polymer films made it possible to reduce the energy consumption of the technology by 20%, and significantly reduce the volume of defective products. At the same time, SIEMENS, HITACHI and MITSUBISHI converters are used.

Virtually all automated electric drives are a component of systems that work with variable technologies, which in turn changes their speed modes of technological machines and has a deterministic nature. In the known works, there are practically no studies of the energy of technological processes, methods of organizing the work of the most energy-intensive link of an automated electric drive - a technological machine.

The orientation of methods for ensuring the optimization of algorithms in various fields does not fully correspond to the tasks inherent in the management of objects in

which there are parameters of zoological and biological origin.

It is shown in [7, 9] that ignoring the factors that are formed by technological processes (microclimate parameters, physical and mechanical properties of the material, the presence of products aimed at the realization of living organisms) can significantly affect the very principle of the approach to the construction of systems based on an automated electric drive.

At the same time, the lack of reliable information about the modes and qualitative characteristics of the production process is a restraining factor in the development of systems for regulating the speed modes of the specified technologies. And if in

in the general industrial sector of production, scientific innovations find themselves due to the determinism of technological parameters [8]. But, as it was declared earlier, reserves in this direction of scientific efforts are not at all inferior to other branches of the national economy. This testifies to the relevance of the issue under consideration, especially for the technologies of microclimate creation, heat supply, production of solid fuel pellets, preparation of fodder mixtures, etc. The most expedient for ensuring energy-saving modes of operation of an asynchronous frequency-regulated electric drive is the use of a system approach aimed at ensuring minimum consumption of electricity in the electric drive.

Taking into account the above factology, it can be considered that the conventional organization of rational speed modes of the electric drive of the flow line for the production of two-component solid fuel pellets should be considered as a solution to the following scientific and applied problems:

- to establish regularities in the formation of proportions of two-component solid fuel pellets for the organization of coherent dosing of raw materials;
- analyze the solid fuel pellet production process and substantiate the requirements for its characteristics;
- to develop mathematical models of the operating modes of the adjustable electric drive, to synthesize the structural diagram of the flow line control system;
- based on the methods of mathematical statistics, determine the main requirements for the process of measuring the productivity of continuous dispensers;
- to evaluate the methods of correcting the rigidity of the mechanical

characteristics of the connected electric motors, based on the criterion of the maximum energy characteristics of the dosing electric motors;

- to develop the functioning algorithm and structural diagram of the intelligent system for controlling the high-speed modes of the flow line for the production of solid fuel pellets;

- conduct experimental development studies

Додаток Б1

Розрахунок енергетичних характеристик електропривода дозаторів при корекції механічних характеристик за напругою і частотою

Два дозатори з асинхронними двигунами (АД) АИР80В4У3 і 2АИ80В6ПА працюють на потокову лінію виробництва твердопаливних пелет.

Для визначення параметрів вказаних АД нами розроблено програмний алгоритм у середовищі MATLAB, лістинг якого подано нижче.

```
Pn= ; Un= ; f= ; n= ; kkd= ; cosfi= ; Is= ; ki= ; mmax= ;
p= ;
Uf=Un/sqrt(3);
n1=60*f/p;
sn=(n1-n)/n1;
sk=(Mmax+sqrt(Mmax^2-1))*sn;
w1=2*pi*50;
w=pi*n/30;
Mn=Pn/w;
Rr=(1.015*Pn)/(3*Is^2*((1-sn)/sn));
Rs=((Uf*cosfi*(1-kkd))/Is)-(Rr*c^2)-(0.015*Pn/(3*Is^2));
Ll=Uf/(2*w1*Is*(1+c^2)*ki);
Ls=Uf/(w1*Is*sqrt(1-cosfi^2)-2*w1*Mmax*Mn*sn/1)/(3*Uf*sk);
Lm=Ls-Ll;
c1=1+Ll/Lm;
[Rs; Rr; Ll; Lm; c; c1]
end
```

Характеристики електродвигунів

Типи електродвигунів	Технічні дані електродвигунів											
	P , кВт	I_n , А	n_n , об/хв	S_H	$\cos \varphi_H$	η_H	X_m , Ом	R_1 , Ом	x_1 , Ом	R_2 , Ом	x_2 , Ом	Z_D , Ом
АИР80В4У3	1,5	3,55	1413	0,058	0,83	0,77	117,7	7,4	4,83	4,27	7,43	61,97
2АИ80В6ПА	1,1	3,0	925	0,075	0,74	0,75	139,2	8,09	7,85	6,31	10,1	73,3

За базисні одиниці прийняті $n_{1nom}=1500$ об/хв або $\omega_{1nom}=157$ рад/с., $X_s = \omega_s Lm = 117,7$ Ом. Необхідно скоректувати механічну характеристику електродвигуна АИР80В4У3 зменшивши за рахунок корекції (за напругою або

частотою) номінальну швидкість обертання з 1413 об/хв до номінальних обертів електродвигуна 2АИ80В6ПА – 1387 об/хв.

Виходячи з вищенаведених даних значення основних параметрів у відносних одиницях такі:

$$z = 0,527; \nu_H = 0,942; \Delta\nu = 0,017; \Delta\omega_1 = 0,023; l_1 = 0,041.$$

за формулою

$$\Delta z_u = z \frac{(1+l_1)\eta \cos^2 \varphi}{\nu s} \Delta\nu = \frac{0,527 \cdot (1+0,041) \cdot 0,77 \cdot 0,83^2}{0,942 \cdot 0,058} \cdot 0,017 = 0,091$$

за формулою

$$\Delta \eta_u = \left(\frac{\eta}{f^* - \nu} - \frac{(1+l_1)\eta^2}{\nu s} \right) \Delta\nu = \left(\frac{0,77}{1-0,942} - \frac{(1+0,041) \cdot 0,77^2}{0,942 \cdot 0,058} \right) \cdot 0,017 = 0,034$$

за формулою

$$\Delta \cos \varphi_u = \cos \varphi \sin^2 \varphi \frac{(1+l_1)\eta}{\nu s} \Delta\nu = 0,83 \cdot (1-0,83^2) \cdot \frac{1,041 \cdot 0,77}{0,942 \cdot 0,058} \cdot 0,017 = 0,064$$

За формулою

$$\begin{aligned} \Delta \cos \varphi_f &= \cos \varphi_u - \left(\frac{1+l_1}{\nu} \eta + \frac{1}{f^*} \right) \Delta f^* \cos \varphi \sin^2 \varphi = \\ &= 0,064 - \frac{0,83 \cdot (1-0,83^2) (1,041 \cdot 0,77 + 1)}{0,942} \cdot 0,023 = 0,053. \end{aligned}$$

за формулою

$$\Delta \eta_f = \Delta \eta_u - \eta \left(\frac{\eta}{f^* - \nu} - \frac{(1+l_1)\eta}{\nu f^*} \right) \Delta f^* = 0,034 - 0,77 \cdot \left(\frac{0,77}{1-0,942} - \frac{1+0,041}{0,942} \right) \cdot 0,023 = -0,182$$

Зміна струму за

$$\Delta \eta_f - \Delta i_u = -i \frac{\Delta f^*}{2(f^* - \nu)} = -3,55 \cdot \frac{0,023}{2 \cdot 0,058} = -0,7 A.$$

Таким чином, при $\Delta P_2 > 0$ корекція механічної характеристики за напругою покращує ККД на 3,4 %, а коефіцієнт потужності на 6,4 %. При корекції за частотою струм електродвигуна при $\Delta P_2 > 0$ збільшується від номінального на 19,7 %.

Додаток Б2

Фрагмент лістингу програми створення та навчання fuzzy-контролера

```

wk_ws_k_d = (10, 14, 1; 10, 15, 1; 10, 16, 1; 10, 17, 1;10, 18, 1; 10, 19, 1; 10, 20, 1; 10,
21, 1 ;10, 22, 1; 10, 23, 1.17 ; 10, 24, 1.33 ; 10, 25, 1.5 ; 0; 10, 26, 1.67 ; 10, 27, 1.83 ;
10, 28, 2;10, 29, 2.17 ; 10, 30, 2.33 ; 10, 31, 2.5 ; 10, 32, 2.67 ; 10, 33, 2.83 ; 10, 34, 3;
10, 35, 3.17 ; 11, 14, 1; 11, 15, 1; 11, 16, 1; 11, 17, 1; 11, 18, 1; 11, 19, 1; 11, 20, 1; 11,
21, 1; 11, 22, 1.2; 11, 23, 1.4; 11, 24, 1.6; 11, 25, 1.8; 11, 26, 2; 11, 27, 2.2; 11, 28, 2.4;
11, 29, 2.6; 11, 30, 2.8; 11, 31, 3; 11, 32, 3.2; 11, 33, 3.4; 11, 34, 3.6; 11, 35, 3.8; 12,
14, 1; 12, 15, 1; 12, 16, 1; 12, 17, 1; 12, 18, 1; 12, 19, 1; 12, 20, 1; 12, 21, 1.25; 12, 22,
1.5; 12, 23, 1.75; 12, 24, 2; 12, 25, 2.25; 12, 26, 2.5; 12, 27, 2.75; 12, 28, 3; 12, 29,
3.25; 12, 30, 3.5; 12, 31, 3.75; 12, 32, 4; 12, 33, 4.25; 12, 34, 4.5; 12, 35, 4.75; 13, 14,
1; 13, 15, 1; 13, 16, 1; 13, 17, 1; 13, 18, 1; 13, 19, 1; 13, 20, 1.33; 13, 21, 1.67; 13, 22,
2; 13, 23, 2.33; 13, 24, 2.67; 13, 25, 3; 13, 26, 3.33; 13, 27, 3.67; 13, 28, 4; 13, 29, 4.33
; 13, 30, 4.67; 13, 31, 5; 13, 32, 5; 13, 33, 5; 13, 34, 5; 13, 35, 5; 14, 14, 1; 14, 15, 1; 14,
16, 1; 14, 17, 1; 14, 18, 1; 14, 19, 1.5; 14, 20, 2; 14, 21, 2.5 ; 14, 22, 3; 14, 23, 3.5 ; 14,
24, 4; 14, 25, 4.5; 14, 26, 5; 14, 27, 5; 14, 28, 5; 14, 29, 5; 14, 30, 5; 14, 31, 5; 14, 32, 5;
14, 33, 5; 14, 34, 5; 14, 35, 5)
t=reshape(wk_ws_k_d(:, 3), 5, 22);

sugfis=genfis1(wk_ws_k_d, [5, 3], 'trimf');

[sugfis, err]=anfis(wk_ws_k_d, sugfis, 300);

inp = [wk_ws_k_d(:, 1), wk_ws_k_d(:, 2)];

df=evalfis(inp, sugfis)-wk_ws_k_d(:, 3);

delta2=sum(abs(df))/length(df)*100;

fprintf('--- SugenoSecond Середня похибка становить: %0.3g%%',delta2);

gensurf(sugfis);

title('Trained Sugeno 0414');

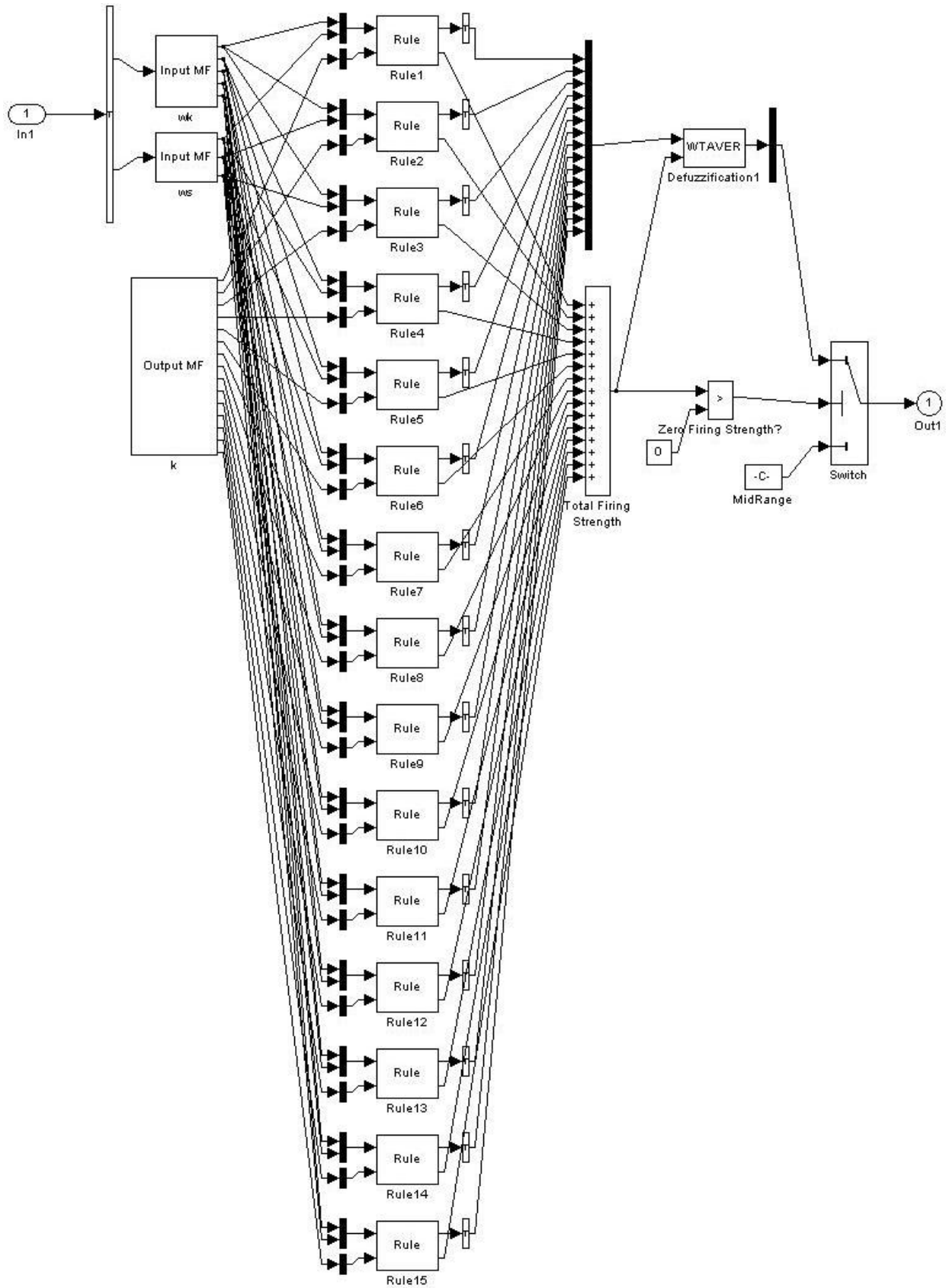
uiwait(gcf);

z=reshape(df, 6, 22);

```

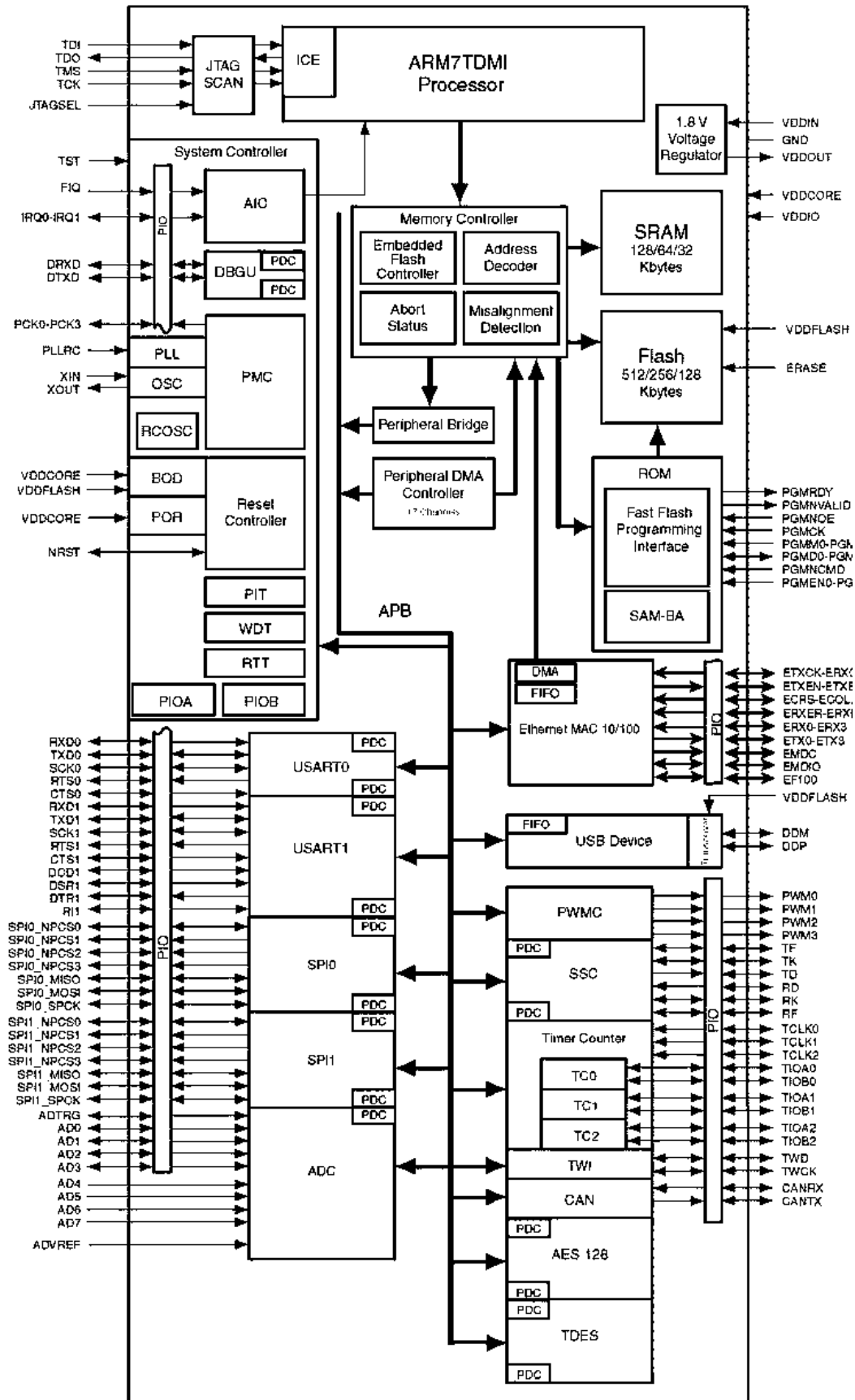
Додаток БЗ

Структура fuzzy-системи керування зв'язним дозуванням



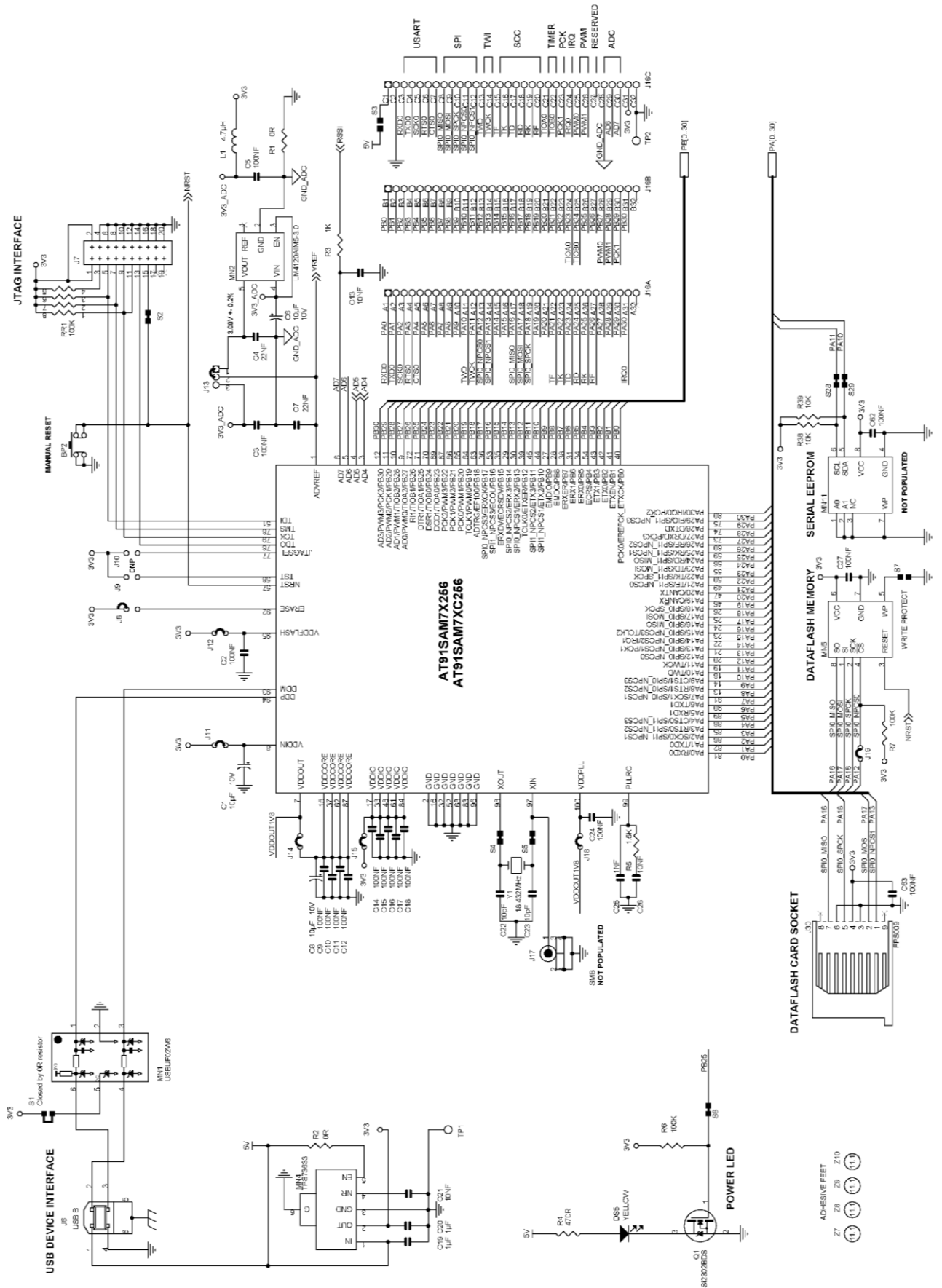
Додаток В1

Структурна схема мікроконтролера AT91SAM7XC512



Додаток В2

Принципова електрична схема мікроконтролера AT91SAM7XC512



Додаток ВЗ

**Фрагменти лістингів програмних модулів мікроконтролера
AT91SAM7XC512 системи керування потоковою лінією виробництва
твердопаливних пелет**

```

/*-----
 *   Name:  main.C
 *
 *-----*/
#include "common.h"
#include "log.h"
#include "params.h"
#include "nvs.h"
#include "mmap.h"
// #include "crc16.h"
#include <string.h>
// #include <stdio.h>
// #include <stddef.h>

unsigned short LastRecordID;
BOOL WriteToLogPending = __FALSE;

unsigned short LogGetLastRecordID(void)
{
#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Read(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
    *)&LastRecordID);
#endif
    return LastRecordID;
}

void ClearLogRecord(unsigned short RecordID)
{
    TLOGRECORD Record;
    memset(&Record, '\0', sizeof(Record));

#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Write(MM_LOG_BASE_ADDR+RecordID*sizeof(TLOGRECORD), sizeof(TLOGRECORD),
    (unsigned char *)&Record);
#endif
}

void ClearAllLogRecords(void)
{
    unsigned int i;
    for (i=0; i<=LOG_MAX_RECORD_ID; i++)
        ClearLogRecord(i);
    LastRecordID = LOG_MAX_RECORD_ID;

#ifdef KVM2011_BOARD

```

```

    nvs_Write(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
*)&LastRecordID);
#endif
}

```

```

void WriteLogRecord(unsigned short RecordID, PLOGRECORD LogRecord)
{
#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Write(MM_LOG_BASE_ADDR+RecordID*sizeof(TLOGRECORD), sizeof(TLOGRECORD),
(unsigned char *)LogRecord);
#endif
}

```

```

void ReadLogRecord(unsigned short RecordID, PLOGRECORD LogRecord)
{
#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Read(MM_LOG_BASE_ADDR+RecordID*sizeof(TLOGRECORD), sizeof(TLOGRECORD),
(unsigned char *)LogRecord);
#endif
}

```

```

void WriteToArchive(void)
{
    WriteToLogPending = __TRUE;
}

```

```

void Log_Process(void)
{
    TLOGRECORD LogRecord;
    unsigned char i;

```

```

    if (WriteToLogPending != __FALSE) {

```

```

#ifdef KVM2011_BOARD

```

```

    nvs_Read(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
*)&LastRecordID);
    LastRecordID++;
    if (LastRecordID > LOG_MAX_RECORD_ID) LastRecordID = 0;
    nvs_Write(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
*)&LastRecordID);

```

```

    LogRecord.DateTime = gDevStateEx.DateTime;
    LogRecord.TemperatureAB = gDevStateEx.TempSens.Value;
    LogRecord.TemperatureCU = gDevStateEx.TempSensProc.Value;

```

```

    for (i=0; i<8; i++) LogRecord.ADCChnlValue[i] = gDevStateEx.Channel[i].Value;
    LogRecord.Faults = gDevStateEx.Faults;
    LogRecord.Alarms = gDevStateEx.Alarms;

```

```

    WriteLogRecord(LastRecordID, &LogRecord);

```

```

#endif

}
WriteToLogPending = __FALSE;

}

/*-----
 *   Name:  log.C
 *
 *-----*/
#include "common.h"
#include "log.h"
#include "params.h"
#include "nvs.h"
#include "mmap.h"
// #include "crc16.h"
#include <string.h>
// #include <stdio.h>
// #include <stddef.h>

unsigned short LastRecordID;
BOOL WriteToLogPending = __FALSE;

unsigned short LogGetLastRecordID(void)
{
#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Read(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
    *)&LastRecordID);
#endif
    return LastRecordID;
}

void ClearLogRecord(unsigned short RecordID)
{
    TLOGRECORD Record;
    memset(&Record, '\0', sizeof(Record));

#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Write(MM_LOG_BASE_ADDR+RecordID*sizeof(TLOGRECORD), sizeof(TLOGRECORD),
    (unsigned char *)&Record);
#endif
}

void ClearAllLogRecords(void)
{
    unsigned int i;
    for (i=0; i<=LOG_MAX_RECORD_ID; i++)
        ClearLogRecord(i);
}

```

```

LastRecordID = LOG_MAX_RECORD_ID;

#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Write(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
*)&LastRecordID);
#endif
}

void WriteLogRecord(unsigned short RecordID, PLOGRECORD LogRecord)
{
#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Write(MM_LOG_BASE_ADDR+RecordID*sizeof(TLOGRECORD), sizeof(TLOGRECORD),
(unsigned char *)LogRecord);
#endif
}

void ReadLogRecord(unsigned short RecordID, PLOGRECORD LogRecord)
{
#ifdef KVM2011_BOARD
    nvs_Read(MM_LOG_BASE_ADDR+RecordID*sizeof(TLOGRECORD), sizeof(TLOGRECORD),
(unsigned char *)LogRecord);
#endif
}

void WriteToArchive(void)
{
    WriteToLogPending = __TRUE;
}

void Log_Process(void)
{
    TLOGRECORD LogRecord;
    unsigned char i;

    if (WriteToLogPending != __FALSE) {

#ifdef KVM2011_BOARD

        nvs_Read(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
*)&LastRecordID);
        LastRecordID++;
        if (LastRecordID > LOG_MAX_RECORD_ID) LastRecordID = 0;
        nvs_Write(MM_LOG_LAST_RECORD_ID_ADDR, sizeof(LastRecordID), (unsigned char
*)&LastRecordID);

        LogRecord.DateTime = gDevStateEx.DateTime;
        LogRecord.AB = gDevStateEx.MSens.Value;
        LogRecord.CU = gDevStateEx.MSensProc.Value;

        for (i=0; i<8; i++) LogRecord.ADCChnIValue[i] = gDevStateEx.Channel[i].Value;
        LogRecord.Faults = gDevStateEx.Faults;

```



```

LogRecord.Alarms = gDevStateEx.Alarms;

WriteLogRecord(LastRecordID, &LogRecord);

#endif

}
WriteToLogPending = __FALSE;
}
/*-----
*   Name:  sysinfo.C
*
*-----*/
#include "sysinfo.h"
#include "nvs.h"
#include "mmap.h"
#include "crc32.h"
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stddef.h>

TSysInfo gSysInfo;

BOOL SysInfoLoad(void)
{
#ifdef KVM2011_BOARD
    // Зчитуємо дані
    nvs_Read(MM_SYSINFO_BASE_ADDR, sizeof(TSysInfo), (unsigned char *)&gSysInfo);
#endif

    // Перевіряємо контрольну суму
    return (gSysInfo.CRC==crc32((unsigned char *)&gSysInfo, offsetof(TSysInfo, CRC),
CRC32_INIT));
}

BOOL SysInfoStore(void)
{
    // Розраховуємо CRC
    gSysInfo.CRC = crc32((unsigned char *)&gSysInfo, offsetof(TSysInfo, CRC), CRC32_INIT);

#ifdef KVM2011_BOARD
    // Записуємо дані
    nvs_Write(MM_SYSINFO_BASE_ADDR, sizeof(TSysInfo), (unsigned char *)&gSysInfo);
#endif

    return (__TRUE);
}

```

```
/* Device Name */
void SysInfoGetHardwareID(U8 * pHardwareID)
{
    //SysInfoLoad();
    mem_copy (pHardwareID, gSysInfo.HardwareID, sizeof(gSysInfo.HardwareID));
}

void SysInfoSetHardwareID(U8 * pHardwareID)
{
    mem_copy (gSysInfo.HardwareID, pHardwareID, sizeof(gSysInfo.HardwareID));
    SysInfoStore();
}

/* Device Name */
void SysInfoGetDevName(U8 * pDevName)
{
    //SysInfoLoad();
    mem_copy (pDevName, gSysInfo.DevName, sizeof(gSysInfo.DevName));
}

void SysInfoSetDevName(U8 * pDevName)
{
    mem_copy (gSysInfo.DevName, pDevName, sizeof(gSysInfo.DevName));
    SysInfoStore();
}

/* Serial Number */
void SysInfoGetSerialNumber(U8 * pSN)
{
    //SysInfoLoad();
    mem_copy (pSN, gSysInfo.SerialNumber, sizeof(gSysInfo.SerialNumber));
}

void SysInfoSetSerialNumber(U8 * pSN)
{
    mem_copy (gSysInfo.SerialNumber, pSN, sizeof(gSysInfo.SerialNumber));
    SysInfoStore();
}

/* Customer */
void SysInfoGetCustomer(U8 * pCustomer)
{
    //SysInfoLoad();
    mem_copy (pCustomer, gSysInfo.Customer, sizeof(gSysInfo.Customer));
}

void SysInfoSetCustomer(U8 * pCustomer)
{
    mem_copy (gSysInfo.Customer, pCustomer, sizeof(gSysInfo.Customer));
    SysInfoStore();
}
```

```

/* SysLocation */
void SysInfoGetSysLocation(U8 * pSysLocation)
{
    //SysInfoLoad();
    mem_copy (pSysLocation, gSysInfo.SysLocation, sizeof(gSysInfo.SysLocation));
}

void SysInfoSetSysLocation(U8 * pSysLocation)
{
    mem_copy (gSysInfo.SysLocation, pSysLocation, sizeof(gSysInfo.SysLocation));
    SysInfoStore();
}

void LoadSysInfo(void)
{
    if (!SysInfoLoad()) {
        // Load Defaults
        printf ("\r\n --NVS[SysInfo] Checksum failed. Reinitialized to defaults.\r\n");

        memset (&gSysInfo, '\0', sizeof(TSysInfo));
        str_copy (gSysInfo.HardwareID, "VPMA.758725.037");
        str_copy (gSysInfo.DevName, "KVM48-20");
        str_copy (gSysInfo.SerialNumber, "0000000000000000");
        str_copy (gSysInfo.Customer, "FreshTel");
        str_copy (gSysInfo.SysLocation, "Local");
        SysInfoStore();
    }
}

```