

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

---

Тернопільський національний педагогічний університет  
імені Володимира Гнатюка

**Федорейко Валерій, Горбатюк Роман, Іскерський Іван,  
Рутило Микола, Бурег Назар, Загородній Роман**

**ТЕХНОЛОГІЇ БІОРЕСУРСНОЇ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ  
НА БАЗІ ГЕНЕРАТОРІВ-УТИЛІЗАТОРІВ**

**М о н о г р а ф і я**

*За загальною редакцією  
д. т. н., професора, академіка Академії економічних наук України  
В. С. Федорейка*



Тернопіль

Видавництво «Підручники і посібники»  
2022

**УДК620925:502/504]:621.313.1**  
**Т38**

*Рекомендовано до друку вченою радою Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка  
 Протокол № 13 від 28.06.2022 р.*

*Рецензенти:*

- Русанов А. В. – директор Інституту проблем машинобудування імені А. М. Підгірного, академік НАН України, доктор технічних наук, професор (м. Харків);
- Козирський В. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електропостачання імені В. М. Синькова Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ);
- Бешта О. С. – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

*Матеріали подані в авторській редакції*

**Т38 Федорейко В. С., Горбатюк Р. М., Іскерський І. С., Рутило М. І., Бурега Н. В., Загородній Р. І.**

Технології біоресурсної диверсифікації джерел енергії на базі генераторів-утилізаторів: монографія; за заг. ред. В. С. Федорейка. Тернопіль: Підручники і посібники, 2022. 300 с.

ISBN 978-617-595-120-0

У монографії обґрунтовано напрями біоресурсної диверсифікації джерел теплової енергії, розглянуто методи і способи зменшення використання вуглеводневого палива в енергоємних технологіях. Подано математичні моделі та методики аналізу технічних систем і засобів для автономних джерел тепло- та електропостачання, наведено перспективні розробки для генерації нової біоенергії.

Видання призначене для наукових, науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників, які спеціалізуються в галузі енергоефективності, а також аспірантів і студентів закладів вищої освіти.

ISBN 978-617-595-120-0

© Федорейко В. С., Горбатюк Р. М.,  
 Іскерський І. С., Рутило М. І.,  
 Бурега Н. В., Загородній Р. І., 2022

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>7</b>
<b>РОЗДІЛ 1 БІОВІДХОДИ, ЯК ДЖЕРЕЛО ДЕШЕВОЇ «ЗЕЛЕНОЇ» ЕНЕРГІЇ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Аналіз сучасних технічних засобів виробництва твердого біопалива.....	13
1.2 Обладнання поточкових ліній приготування несертифікованого біопалива.....	26
1.3 Енергоефективність виробництва твердого біопалива.....	35
1.4 Статистичний аналіз процесу дозування сировини у поточкових лініях приготування двокомпонентного біопалива.....	40
1.5 Процес утворення двокомпонентного біопалива.....	49
1.6 Алгоритми і технічні засоби системи зв'язного дозування компонентів біопалива.....	55
1.7 Корекція динамічних та енергетичних характеристик дозаторів біопалива.....	66
1.8 Моделювання інтелектуальної системи управління поточною лінією...	81
1.9 Технологія приготування двокомпонентного несертифікованого біопалива.....	88
1.10 Організація логістичної діяльності підприємства з біоресурсною генерацією енергії.....	100
Висновки до розділу.....	107
Список використаних джерел.....	109
<b>РОЗДІЛ 2 ВИХРОВІ ГЕНЕРАТОРИ-УТИЛІЗАТОРИ В ТЕХНОЛОГІЯХ СУШІННЯ ЗЕРНА.....</b>	<b>113</b>
2.1 Твердобіопаливні теплогенератори як ефективні джерела теплової енергії для технологій сушіння зерна. Принцип роботи та типи теплогенераторів.....	115
2.2 Аналіз чинників ефективного горіння палива в біотеплогенераторі.....	124

2.3 Моделювання процесів горіння твердого біопалива в теплогенераторах.....	130
2.4 Особливості транспортування енергоефективної паливної суміші у камеру горіння теплогенератора.....	134
2.5 Апаратно-програмна реалізація системи керування дозуванням компонентів твердобіопаливних теплогенераторів .....	137
2.6 Імітаційне моделювання режимів роботи біотеплогенератора з метою оптимізації процесів генерації в системах вихрового горіння біопалива.....	143
2.7 Перспективи застосування інтелектуальних нейронечітких систем керування режимами роботи теплогенераторів у технологіях сушіння зерна.....	154
2.8 Модуль аналізу температури та вологості зерна в процесі сушіння.....	156
2.9 Виробничі дослідження теплогенератора із розробленою системою керування.....	162
Висновки до розділу.....	164
Список використаних джерел.....	166
<b>РОЗДІЛ 3 БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ ДЛЯ АВТОННОМНИХ ОБ'ЄКТІВ ГОСПОДАРЮВАННЯ ТА ПІДРОЗДІЛІВ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ.....</b>	<b>170</b>
3.1 Використання термоелектричних перетворювачів як складової когенераційної системи.....	171
3.2 Способи підвищення енергоефективності автономної когенераційної системи теплогенератора з інтегрованою термоелектричною панеллю.....	178
3.3 Енергоефективні алгоритми функціонування автономної системи засобами імітаційного моделювання.....	192
3.4 Особливості технічної реалізації установки.....	206
Висновки до розділу.....	219
Список використаних джерел.....	220

<b>РОЗДІЛ 4 ВИСОКОПРОДУКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ГЕНЕРАЦІЇ НОВОЇ БІОМАСИ НА ОСНОВІ ФОТОБІОРЕАКТОРІВ.....</b>	<b>224</b>
4.1 Фотобіореактор, як система регенерації енергії викидів у нову біомасу.....	227
4.2 Високоєфективні електрохімічні системи генерації енергії із біогазу на базі твердооксидних паливних елементів.....	257
4.3. Електротехнологічний комплекс генерації енергії та нової біомаси із замкнутим вуглецевим циклом.....	273
Висновки до розділу.....	291
Список використаних джерел.....	292

## ВСТУП

Наявні на сьогоднішній день фактологічні напрацювання свідчать, що світова енергетика, в силу об'єктивних і суб'єктивних факторів, входить у переломний період свого існування. Починаючи з 2022 року, завдяки прозорливій політиці урядів розвинутих економік спостерігається масштабний розвиток відновлювальної енергетики з одночасною стагнацією традиційних, у першу чергу, вуглеводневих джерел енергії.

Це, в свою чергу, призведе до модернізації і розформування економік у країнах, які усвідомлюють незворотність зазначених процесів.

Поряд із розвитком сонячної, вітрової та гідроенергетики в сегменті «зеленої» енергії прискорений розвиток отримає біоресурсна та утилізаційна енергетика, яка напряду пов'язана з екологічним станом довкілля. Останній із окреслених напрямів має надзвичайне значення для нашої держави. Україна приречена цивілізувати власну економіку і забути про світове лідерство в царині марнотратства природних ресурсів, адже наша держава щорічно в АПК продукує агротехнічно доступні біовідходи (соліма, насіннєві та елеваторні відходи) в обсязі 25...30 млн. тонн. В енергоеквіваленті це понад 10 млрд. м<sup>3</sup> природного газу. Це об'єм адекватний щорічному імпорту фатального для нашої держави вуглеводневого палива. У даний час в Україні функціонує орієнтовно 30 тисяч сміттєзвалищ. Щорічно накопичується 5...7 млн. тонн відходів, що стає причиною численних техногенних катастроф. Досвід країн Євросоюзу показує, що вказані утворення можуть стати суттєвим додатком до енергетичного балансу країни.

Отриманий статус кандидата на вступ до Євросоюзу зобов'язує Україну іти протореним цивілізаційним шляхом, стимулюючи розвиток відновлювальної енергетики в системах локальної розподільної генерації націленої на видалення природного газу з енергоємних технологічних процесів.

Загальновідомо, що Україна займає одне з останніх місць в системі генерації тепла з біопалива. У 2015 р., за даними Державної служби статистики України, структура загального первинного постачання енергії характеризувалася значною часткою природного газу (28,9 %, 26 млн. т н.е.), тоді, як біомаса, паливо

та відходи становили лише 2,2 % (2 млн. т н.е.). В той же час країни Європи (зокрема Литва, Швеція) перейшли 20 % відмітку у цій галузі.

У новій Енергетичній стратегії України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» від 18 серпня 2017 р. № 605-р, яка окреслює стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України на вказаний період, визначено обсяг використання відновлювальних ресурсів на рівні 25 %, у тому числі біомаси, біопалива та відходів – 11,5 %. Реалізація запропонованого дослідження є невід’ємною складовою енергетичної стратегії України. Без впровадження енергоефективних технологій генерації теплової енергії в системах вихрового горіння несертифікованого палива неможлива реалізація окресленої стратегії.

Сушіння зернових культур є найенергоємнішим сезонним технологічним процесом в агропромисловому комплексі. На це витрачається близько 1 млрд м<sup>3</sup> природного газу, а також пічне та дизельне паливо, використання яких призводить до різкого збільшення вартості продукції, що є однією з основних експортних статей фінансових надходжень до бюджету держави.

Наявні дослідження свідчать, що заміна традиційного палива на відновлювальні біологічні відходи місцевого походження сприяє кардинальному зменшенню споживання природного газу, створює практично нульове навантаження на довкілля, а також забезпечує створення додаткових робочих місць.

Загальновідомо, що 2,5–3,0 т несертифікованого палива з біовідходів заміщає 1000 м<sup>3</sup> природного газу. Утилізуючи 2,5–3,0 тонни відходів, вартістю 1400–1600 грн/т з урахуванням логістичних, експлуатаційних і зарплатних витрат, отримуємо ціну теплової енергії в 7...10 разів дешевшої від традиційної вуглеводневої (при сьогоднішніх цінах).

При таких техніко-економічних показниках термін окупності автоматизованого теплогенераторного комплексу не перевищує 2...3 місяці і в даний час є найперспективнішим інвестиційним проєктом у галузі енергетичного машинобудування. Це на 100 % український продукт. Метал, термобетон, електродвигуни, контролери, програмне забезпечення, пускорегулювальна

апаратура вироблені в Україні. При серійному виробництві це стимулюватиме розвиток суміжних галузей економіки.

Допоміжні технологічні процеси, пов'язані із заготівлею, підготовкою та подачею біопалива в теплогенератор, дають змогу створити додаткові робочі місця.

Найбільша доля енергетичних затрат припадає на системи та установки опалення. Одним із недоліків устаткування технологічних процесів, що використовують теплогенератори є те, що під час експлуатації розсіюється значна кількість теплової енергії, що є вагомим чинником термального забруднення навколишнього середовища. Тому актуальною проблемою є удосконалення вказаних технологій з точки зору енергоефективності та врахування факторів екологічної безпеки.

Перспективним напрямом у даному випадку є впровадження когенераційних технологій, які широко використовуються в малій енергетиці, що зумовлено наступними перевагами. По-перше, тепло використовується безпосередньо в місці отримання, що значно дешевше, ніж будівництво та експлуатація багатокілометрових теплотрас. По-друге, електроенергія використовується здебільшого в місці отримання без накладних витрат постачальників енергії, тому її вартість для споживача може бути дещо дешевшою, ніж енергія з мережі. Адже часто через зношеність обладнання існуючих електромереж ускладнено підключення нових промислових споживачів, а іноді й просто економічно недоцільно (у випадку значного віддалення споживача від лінії електропередачі). Крім того, зменшення теплових викидів в атмосферу сприяє вирішенню екологічних проблем.

У результаті застосування автономних енергоджерел із комбінованим виробництвом електричної і теплової енергії (когенерація) забезпечується певний енергетичний резерв у централізованій системі. Тому можливість використання теплових відходів у рекупераційному виробничому процесі як джерела отримання електричної енергії є важливим завданням, реалізувати яке можна використавши термоелектричні перетворювачі енергії.



Для створення енергоефективної системи термоелектричного генерування енергії шляхом використання тепла, що виводиться з димовими газами, проведено дослідження щодо визначення реальних енергетичних параметрів при різних режимах навантаження. Адже суттєвим обмеженням переваг термоелектричного перетворення залишається низький коефіцієнт ефективності перетворення теплового потоку в електричну енергію: від 3 до 8 %. Виходячи з цього, актуальним завданням є визначення доцільності застосування термоелектричних модулів, як складової когенераційної системи, в якості джерела акумуляції електроенергії з теплових викидів теплогенераторів.

Ініціативи Кіотського протоколу, Паризької конвенції про зміни клімату 2015 року, преміальний фонд підтримки революційних інновацій X Prize та оголошений гранд Ілоном Маском про винахід кращої технології утилізації вуглекислоти із загальним бюджетом у 100 млн доларів дають змогу стверджувати про високу актуальність проблеми абсорбції вуглекислого газу з атмосферного повітря.

Значною перспективою є використання біологічних фотосинтезуючих культур і технологічних рішень на їх основі, які забезпечуватимуть абсорбцію вуглекислого газу та дадуть змогу генерувати додаткову високоенергетичну сировину у короткі терміни та продукувати кисень. Такий підхід дає можливість генерувати нову біомасу з вищим показником виходу сировини з одиниці площі в 10–15 раз більше порівняно з класичними енергетичними культурами. Крім цього, використання фотобіореакторів, як елементів будівельних споруд дозволить не використовувати землі, виділені під посівні угіддя.

Імплементація даних технологій, як системи регенерації енергії викидів (вуглекислий газ) з електрохімічних джерел генерації енергії на базі твердооксидних паливних елементів, сприятиме будівництву вискоелективних комплексів із загальним ККД 75-85 % і замкнутим вуглецевим циклом.

Задекларовані науково-технічні проєкти спрямовані на диверсифікацію джерел енергії, реалізація яких дозволить вирішити існуючі проблеми в економіці, енергетиці, екології та соціальній сфері України.

Проведений аналіз праць науковців продемонстрував: загальну картину оцінки енергетичного потенціалу відновлюваного біопалива України; дослідження режимів роботи джерел поновлюваної енергії в контексті систем розподіленої генерації теплової енергії та характер розподілу надходження енергії з них; напрацювання в системах автономного теплопостачання та їх автоматизації, де в основному висвітлено загальні конструкційні особливості генераторів, що працюють на біопаливі (солома, відходи елеваторних та насінневих підприємств).

Слід також зазначити, що проведений аналіз праць та технологічних рішень вітчизняних і закордонних науковців продемонстрував недостатньо обґрунтований рівень проблеми використання регульованого електроприводу на генераторах із твердим несертифікованим паливом, відсутність моделей систем керування, адже в таких системах використовується паливо з нестабільними параметрами вологості, щільності, теплотворної здатності, що зумовлює використання нейронечітких систем для керування процесом горіння палива на базі штучного інтелекту.

Розглянутий закордонний досвід використання біопалива, як джерела теплової енергії, для різних споживачів продемонстрував розсіювання низькопотенційної теплової енергії, що негативно впливає на їхній ККД. Саме тому, для розв'язання проблеми створення систем на базі теплогенераторів, у наукових колах все частіше постає питання використання децентралізованої системи теплопостачання шляхом застосування генераторів-утилізаторів, що працюють на твердому біопаливі.

Запропонована монографія є результатом багаторічної діяльності науково-дослідної лабораторії «Енергетичний менеджмент» при Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка, створеної за ініціативи професора Федорейка Валерія Степановича у 1998 році. Складовою частиною до неї увійшли результати дисертаційних досліджень наукової школи керівника лабораторії, патенти, вітчизняні та міжнародні статті у наукових фахових виданнях, монографії, депоновані наукові звіти державних і госпдоговірних тематик, матеріали міжнародних науково-технічних конференцій.

Технологічні розробки авторів пройшли широку апробацію та комерціалізацію на підприємствах України. Науковці лабораторії є постійними учасниками інвестиційних форумів і міжнародних виставок.

За ініціативи професора В. С. Федорейка 8 червня 2021 року у м. Тернополі проведено першу в Україні міжнародну науково-технічну конференцію «Диверсифікація джерел енергії на базі використання альтернативних видів палива» на якій провідні вчені Європи та України одностайно одобрили напрацювання науковців ТНПУ ім. В. Гнатюка у сфері біоресурсної диверсифікації джерел енергії.

Враховуючи сучасні енергетичні виклики в Україні та світі, фахівці науково-дослідної лабораторії «Енергетичний менеджмент» прийняли рішення про створення діючого наукового парку на основі оновленого законодавства України. Представлені в цьому науковому виданні технології стануть програмними засадами діяльності наукового парку і внеском у статутний фонд в якості нематеріального активу.

## РОЗДІЛ 1

### БІОВІДХОДИ, ЯК ДЖЕРЕЛО ДЕШЕВОЇ «ЗЕЛЕНОЇ» ЕНЕРГІЇ

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 агротехнічно досяжний надлишок біосировини в Україні становить 25...30 млн тонн на рік, що дає підстави з великим оптимізмом розглядати цей вид палива як перспективний, про що свідчать останні урядові нормативні документи [1; 8; 14].

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.

#### **1.1 Аналіз сучасних технічних засобів виробництва твердого біопалива**

Для виявлення можливостей України щодо використання біомаси для виробництва енергії проведені дослідження щодо оцінки цих ресурсів, визначення територій, перспективних для організації виробництва енергії з використанням його різних видів. Терміном «біомаса» названі побічна продукція та відходи біологічного походження, що можуть використовуватись як паливо для виробництва енергії, а саме: солома і стебла сільськогосподарських культур, відходи деревини, тверді побутові відходи, біогаз, який можна виробляти з гною та посліду, осаду каналізаційних стоків, вилучати зі звалищ твердих побутових відходів.

Тверде біопаливо від традиційного відрізняється тим, що воно 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. Тобто, споживаючи біопаливо, можна призупинити глобальні зміни клімату. Тому з енергетичної, економічної й екологічної точок зору виробництво енергії з біомаси є актуальним напрямом розвитку аграрної сфери [8].

Біомаса – четверте за значенням паливо у світі, дає близько 2 млрд. т умовного палива на рік, що становить близько 14 % загального споживання первинних енергоносіїв у світі. При цьому, понад 70 % поновлюваних джерел енергії походить з неї. Відбувається швидкий перехід до раціонального використання біомаси, зокрема, соломи. Сьогодні до 20 % соломи можна використати на енергетичні потреби без будь-яких істотних наслідків для родючості ґрунтів.

Лідерами використання соломи для енергетичних потреб є Данія і Швеція. Активного розвитку цей напрям набуває у більшості країн Центральної Європи. Як енергоресурси, біомасу широко використовують й наші сусіди – Польща, Угорщина, Словаччина, Чехія та країни Прибалтики. Щорічно в цих країнах утилізують від 5 до 20 % виробленої соломи. Цей аграрний ресурс твердого біопалива може істотно поліпшити регіональні енергетичні потреби і в Україні. З кожного енергетичного гектара можна використати близько 2–3 тонн соломи, що є еквівалентом 1 тонни кам'яного вугілля.

Тверде біопаливо, як енергоресурс, відіграє суттєву роль в енергозабезпеченні промислово розвинених країн: якщо у США її частка становить близько 1/20 загального обсягу, то у Австрії та Швеції цей показник зростає до 1/5, тобто у 4 рази (рис. 1.1) [1; 8; 14].

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 %. З огляду на це, біопаливо за значенням у прогнозах посідає четверте місце серед палив і забезпечує близько 14 % загального споживання первинних енергоносіїв у світі (у країнах, що розвиваються – понад 30 %, іноді до 50-80 % [1; 8].

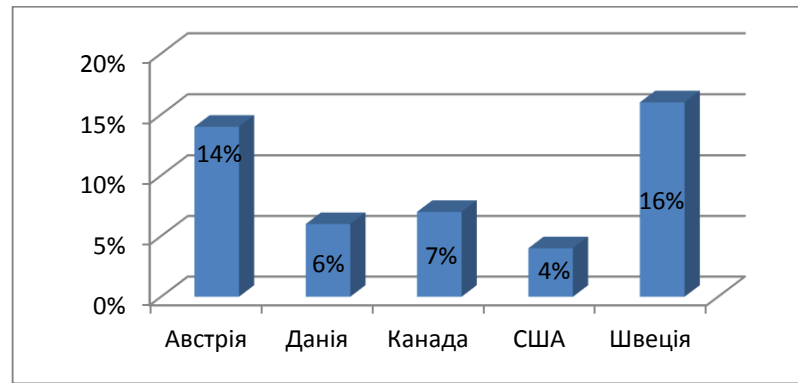


Рис. 1.1 Частка використання твердого біопалива у промислово розвинених країнах

Динаміка розвитку світової теплоелектроенергетики засвідчує впевнене зростання частки біоресурсних джерел у загальному балансі генерованої енергії. В секторі використання нетрадиційних джерел енергії Євросоюз розпочав роботи, націлені на використання біоенергетичних матеріалів тільки з річним циклом відновлення (солома, відходи насіннєвих та елеваторних виробництв).

Директивні рішення уряду України засвідчують початок широкого спектру робіт, спрямованих на використання біопалива. Так, до 2025 року за рахунок використання біоенергетичних установок планується заміщення більше 3 млрд м<sup>3</sup> природного газу в рік [1].

Згідно розрахунків НАНУ, використання лише 20 % ресурсів соломи в Україні (ця кількість соломи щорічно втрачається) дозволяє повністю забезпечити потреби населення, насамперед сільського, в електричній і тепловій енергії. Щоб використовувати ці потенційні можливості соломи, необхідно налагодити випуск техніки для її збору і пакування, котлів та іншого енергетичного оснащення [6].

Основними технологіями переробки біомаси, які можна рекомендувати до широкого впровадження є: пряме спалювання, газифікація, анаеробна ферментація з утворенням біогазу, виробництво спиртів і масел для отримання моторного палива [18].

Перспективними способами утилізації біомаси є їх тюкування, брикетування, гранулювання та подальше використання в якості твердих

біопалив. Ці альтернативи стали економічно доцільними у зв'язку з постійним зростанням вартості енергетичних ресурсів.

Тверде біопаливо від традиційного відрізняється тим, що воно за своєю сутністю практично нейтральне щодо впливу на зростання парникового ефекту, оскільки рослини, які використовуються для його виробництва, забирають вуглець з атмосфери і виділяють кисень. Тобто, споживаючи біопаливо, можна призупинити глобальні зміни клімату. З енергетичної, економічної й екологічної точок зору виробництво енергії з біомаси є актуальним напрямком розвитку альтернативної енергетики. Біомаса – четверте за значенням паливо у світі, дає близько 2 млрд тонн умовного палива на рік, що становить близько 14 % загального споживання первинних енергоносіїв. Відбувається швидкий перехід до раціонального використання біомаси й, зокрема, соломи злакових культур. Сьогодні до 25 % соломи можна використати на енергетичні потреби без будь-яких істотних наслідків для родючості ґрунтів.

В Україні виробляється близько 100 млн тонн соломи і стебел. Відомо, що 2,5...3,0 тонни соломи за теплотворною здатністю еквівалентні 1000 м<sup>3</sup> природного газу. Брикети з соломи при насипній щільності 400–500 кг/м<sup>3</sup> мають теплоту згоряння 16,5–17,5 МДж/кг.

Аналіз обсягу основних рослинних відходів українського сільського господарства дозволяє зробити висновок, що кількість сировини для виробництва твердого біопалива за останні 5 років має в загальному тенденцію до зростання, що ще більше ілюструє актуальність розвитку галузі виробництва та використання твердого біопалива на Україні.

Визначальною особливістю є недоцільність транспортування несертифікованого біопалива на відстань понад 50 км. Тому переробку біомаси (соломи зернових культур, стебел і качанів кукурудзи, соняшнику, лози винограду, відходів переробки очерету) слід вести недалеко від полів та інших угідь, на яких її виростили. Важливими елементами технічного забезпечення технологій переробки біомаси є:

- комплекси машин для вирощування й збирання біомаси;
- сховища та обладнання для зберігання сировини;

- теплотехнічне обладнання для спалювання біомаси;
- системи контролю та керування технологічними процесами на всіх етапах виробництва і застосування біопалива.

Біомаса, що використовується як паливо, має ряд особливостей, які відрізняють її від традиційних енергоресурсів. Найбільш вагомою паливно-технологічною характеристикою біомаси, що використовують як тверде біопаливо, є її теплотворна здатність, яка залежить від багатьох чинників: генетичних особливостей енергетичних рослин, впливу навколишнього середовища, умов зберігання, вологості тощо. У таблиці 1.1 наведено середню теплотворну здатність для деяких видів сільськогосподарської енергетичної сировини (що раніше відносили до відходів агропромислового виробництва) при абсолютній її вологості на рівні 20 %.

Таблиця 1.1

#### 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

Зазначимо, що важливу роль у процесі використання твердої біомаси в якості палива відіграє зольність (табл. 1.1), яка визначає вміст незгоряючого залишку у відсотках (на безводну масу), що утворюється з мінеральних домішок палива під час його повного згоряння.

Ще одним 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. 1.2). 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 1.2

### Потреба твердих паливних матеріалів у повітрі

Паливо	Питома потреба в повітрі під час горіння, м <sup>3</sup> /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 тверде біопаливо для безпосереднього спалювання, відносять деревину та відходи елеваторних і насінневих виробництв, а також солому різноманітних культур. Спалюванню біовідходів та соломи передують збирання, висушування (у випадку необхідності) та зберігання зібраної 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 твердого біопалива є технологія приготування біомаси до спалювання. Вона обумовлює конструктивно-технологічне виконання теплотехнічного обладнання, істотно впливає на економічні показники його роботи. Наведені в таблиці 1.3 енергетичні характеристики твердих видів біопалива в залежності від технологій приготування до спалювання дозволяють проаналізувати енергоємність певного типу сировини. Таким чином, питома енергоємність біопалива в брикетах у 10 разів більша, ніж у звичайної соломи, а питомих об'єм – у 10–15 разів менший. Тому, технології пілетування і брикетування застосовують при потребі транспортування біомаси на значні відстані, з метою зменшення логістичних затрат.

**Характеристика енергоємності твердих біопалив в залежності від технологій  
їх приготування до спалювання**

Вид твердого біопалива	Об'ємна маса, кг/м <sup>3</sup>	Питомий об'єм, м <sup>3</sup> /т	Питома енергоємність, МВт/м
<b>Солома</b>			
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
брикети	300–450	2,2–3,3	0,99–1,48
<b>Деревина</b>			
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
брикети	600–800	1,3–1,6	2,58–3,44

Способами утилізації пожнивних решток (соломи) для подальшого використання в якості твердого біопалива є його тюкування, брикетування, гранулювання.

Залежно від способу пресування частинок, пресоване біопаливо поділяють на два види: гранули і брикети. Гранулювання та брикетування – 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 брикетів або гранул в яких за мінімального об'єму концентрується максимальна кількість деревної речовини.

Гранула – це циліндр із розмеленої пресованої деревини (рис. 1.2). 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 їх виробництва не допускають застосування кори, оскільки вона має високу зольність. Промислові гранули можуть містити певну кількість кори (до 10 %) (табл. 1.4).



Рис. 1.2 Гранули

Широке розповсюдження паливні гранули отримали насамперед завдяки особливостям процесу їхнього згоряння. 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.

Таблиця 1.4

#### Властивості гранул

№ н/п	Властивості гранул	Гранули I класу	Гранули промислові
1	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	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 подрібненні кускових відходів у технологічну тріску і виготовлення з неї стружки. Отримана 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 15–17 %. Тому перед гранулюванням зволожують сировину водою або парою на 2–3 %. Ця поверхнева волога сприяє кращому зближенню й ущільненню дрібних частинок деревини. Під дією прикладеного зусилля 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 [8].

Основними механізмами виробництва паливних гранул є преси, які бувають з кільцевою і плоскою матрицями. В кільцевих пресах сировина продавлюється барабанами через матрицю і обрізується назовні. Енергозатрати на пресування в обох випадках однакові. Потім гранули охолоджують і упаковують [18].

Паливні брикети пресують у гідравлічних (рис. 1.3), ударно-механічних (рис. 1.4) і шнекових (рис. 1.5) пресах різноманітних конструкцій. Від застосованого пресового обладнання залежать форма і розміри брикетів.

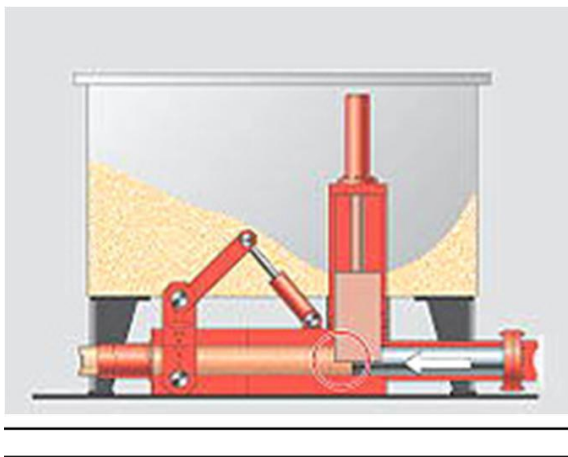


Рис. 1.3 Гідравлічний прес

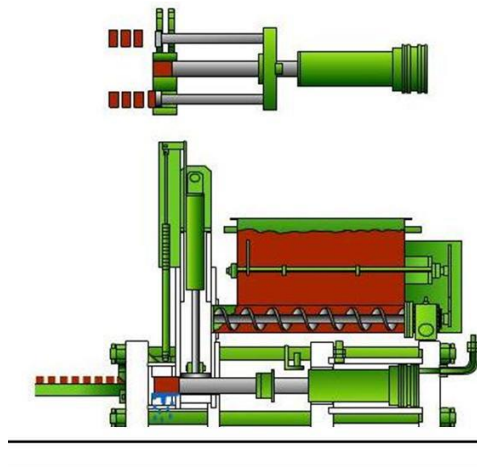


Рис. 1.4 Ударно-механічний прес

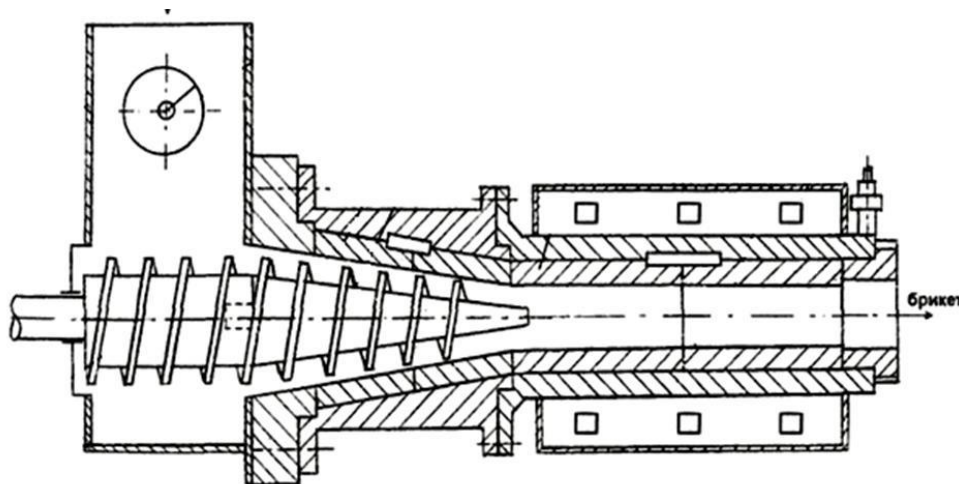


Рис. 1.5 Шнековий прес

Брикет виготовлений на гідравлічних пресах за допомогою високого тиску і за формою, нагадує невелику цеглу(рис. 1.6).



Рис. 1.6 Брикети, виготовлені на гідравлічних пресах

Брикет виготовлений на ударно-механічних (кривошипно-шатунних) пресах (рис. 1.7) (під дією високого тиску) має циліндричну форму. Перевагами такого типу брикетів є незначні вимоги до кваліфікації персоналу і до організації виробництва, невисока собівартість продукції. До недоліків можна віднести те, що брикети не стійкі до вологи (потрібна хороша упаковка). Даний тип брикетів широко застосовується на промислових електростанціях, бойлерних. Ринок споживання циліндричних брикетів постійно зростає.



Рис. 1.7 Брикет, виготовлений на ударно-механічних пресах

На механічних (шнекових) пресах брикети виготовляються за допомогою поєднання високого тиску і термічної (випалювання) обробки. Таке паливо має форму багатогранника з отвором в середині (рис. 1.8). До переваг такого виду брикетів відносять високу механічну стійкість до пошкоджень і високу вологостійкість. Недоліками такого виробництва є трудомісткість виробничого процесу, необхідність у висококваліфікованих фахівцях, значна енергоємність [2].



Рис. 1.8 Брикети, виготовлені на шнекових пресах

Для реалізації задекларованих напрямів в Україні та інших країнах виготовляється цілий ряд технологічних поточкових ліній для виробництва твердого біопалива. Всіх їх об'єднує спільний недолік – низька якість кінцевого продукту, пов'язана з неможливістю механічними методами згладити базові недетерміновані характеристики біосировини [2].

Тому розробка системи керування поточковими лініями продукування твердого біопалива з повноцінними теплотехнічними і товарними характеристиками є актуальною задачею для агропромислової енергетики.

Найбільш доцільним з економічної точки зору є виробництво брикетів на ударно-механічних пресах. Огляд існуючих ліній брикетування дозволив зробити висновок про перспективність вибору технології запропонованої фірмою Wektor (рис. 1.9), основною перевагою якої є можливість виготовлення двокомпонентного палива [8].

Конструкція преса забезпечує повний доступ до вузлів і агрегатів, що дозволяє проводити обслуговування, ревізію, а також ремонт, у максимально короткий час, в безпечних умовах. У конструкції преса передбачена можливість взаємозамінності запасних частин і комплектуючих.

У складі преса максимально 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 час.



Рис. 1.9 Лінія брикетування ВТ-60

Електрообладнання преса забезпечує управління механізмами 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.

Проведений аналіз видів біопалива за їх теплотворною здатністю, вартістю, екологічністю та доступністю свідчить, що найбільш доцільною сировиною для виготовлення брикетів, за допомогою даної технології, є використання соломи. Солома відноситься до палива з однорічним циклом відновлення, вартість такого палива порівняно нижча від традиційних. Потенційно технічно досяжний надлишок соломи в Україні складає 25...30 млн. тонн в рік, що дає підстави з великим оптимізмом розглядати цей вид біопалива як перспективний, про що свідчать останні декларації та постанови українського уряду [8]. Однак існують і недоліки використання соломи як палива – це велика зольність. Тому ми пропонуємо використовувати двокомпонентне паливо, що складається з соломи і кукурудзи. Для створення такого двокомпонентного палива найкраще підходять преси ліній брикетування 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 брикетування двокомпонентного біопалива, в тих випадках коли мова іде про брикетування соломи, енергоємність процесу та продуктивність. На наш погляд, для виготовлення двокомпонентного палива на основі соломи і кукурудзи найкраще підходить лінія брикетування 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 [21].

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 [25].

Спроби ліквідувати вказаний недолік за допомогою підпресовувальних 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 за кордоном 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.

Усе це пов'язано з недетермінованістю потокового процесу дозування сировини і відсутністю чітких методик для повноцінного математичного аналізу флуктуаційних явищ, характерних для вказаних технологій [9].

Оскільки дані процеси є стохастичними і характеризуються високим ступенем невизначеності, то для розробки автоматизованої системи керування доцільно використовувати інтелектуальні технології, зокрема нейроконтролери та Fuzzy-регулятори. Це дозволить оптимізувати технологію виготовлення двокомпонентного біопалива згідно критеріїв енергоощадності та вартості, а також підвищити якість брикетів та їх питому енергоємність.

## 1.2 Обладнання поточкових ліній приготування несертифікованого біопалива

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 [9].

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 [12]. При умові наявності коливань [9]

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

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

Приведені системи приготування сумішей 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 те, що при зважуванні легких компонентів (стружка, вата, солома тощо) на малих продуктивностях в потоці первинні перетворювачі важко імпламентувати 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 [10]. Дозатори з регулюванням кількості матеріалу на стрічці транспортера працюють при постійній швидкості її руху і регулюють її тільки при переналаштуванні дозатора на іншу продуктивність. На думку [9] використання регульованої заслінки для зміни січення випускного отвору не забезпечує необхідної точності дозування, особливо трудносіпучих стебельних матеріалів до яких відноситься біомаса. В дозаторах з регулюванням швидкості стрічки при збільшенні маси матеріалу на транспортері її швидкість відповідно зменшується і навпаки.

Вказані типи дозаторів мають цілий ряд суттєвих недоліків тому що в обох випадках транспортер є завантажувальною і масовимірювальною ланкою дозатора. Крім цього в цих дозаторах матеріал зважується і видається неодноразово, що призводить до хвилеподібних змін продуктивності [17].

Цих недоліків практично немає 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 (рис. 1.10). При зміні маси матеріалу на стрічці, яка рухається з постійною швидкістю, зважувальний транспортер діє на силовимірвальний елемент, від якого імпульси поступають на регулятор. Але ця система керування дозаторами має ряд недоліків [16]:

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

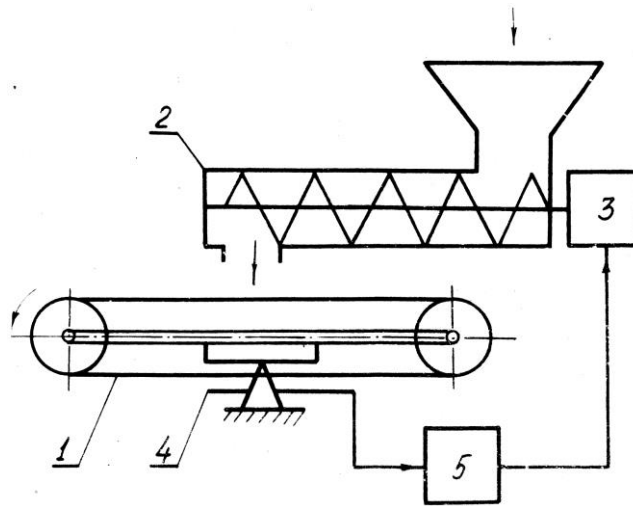


Рис. 1.10 Дозатор сипучих матеріалів фірми «Schenk»:

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

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

Вказаної мети досягають використовуючи властивість ультразвуку втрачати свою інтенсивність при проходженні через матеріал [9]. 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<sup>-2</sup>;

$I_k$  – кінцева потужність на приймачі витратоміра, Вт·м<sup>-2</sup>;

$a$  – коефіцієнт поглинання хвиль середовищем в технологічному проміжку між випромінювачем і приймачем, м<sup>-1</sup>;

$x$  – 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 [2].

Дозатори, транспортери, змішувачі різних типів відносяться до найпоширеніших технологічних машин (механізмів), для яких переважно використовується нерегульований асинхронний електропривод (ЕП). Такий спосіб його реалізації цілком виправданий у технологіях, в яких, згідно вимог, необхідно забезпечувати сталу продуктивність робочих машин.

Проте, у деяких випадках виникає необхідність регулювання швидкісних режимів технологій, зокрема у лініях зв'язного дозування компонентів суміші під час брикетування твердого біопалива.

Використання для вказаних технологій систем частотно-регульованого електропривода дозволить не тільки значно знизити втрати електроенергії [12], але й підвищити якісні показники кінцевого продукту.

З огляду на це можна розглядати наступні шляхи реалізації енергоощадних режимів роботи регульованого електропривода технологічних машин (шнекових та секторних дозаторів, шнекових транспортерів, пресів тощо):

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

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

функціонування;

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

Для прикладу, розглянемо існуючі алгоритми керування асинхронним електроприводом виконавчих механізмів технологічних ліній виробництва твердого біопалива на базі їх вхідних і вихідних параметрів [8; 9]. 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* (рис. 1.11). Таку характеристику мають конвеєри з постійною масою вантажу, що транспортується, а також змішувачі і дробарки.

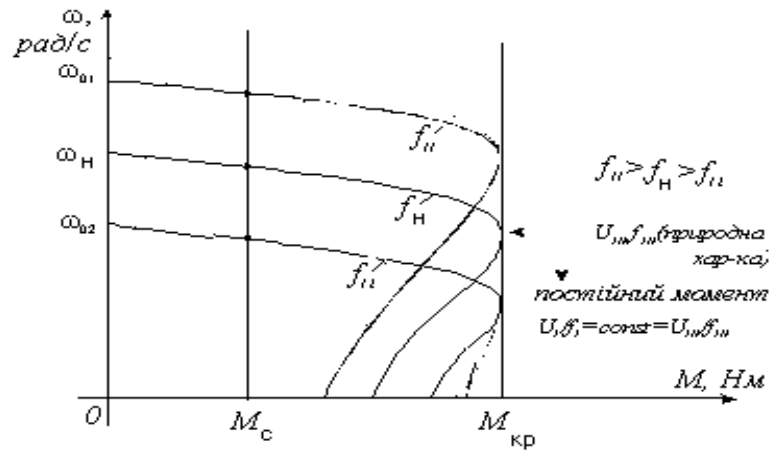


Рис. 1.11 Сумісні механічні характеристики електродвигуна та робочого механізму при  $M_c = const$

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

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

Зростаюче механічне навантаження (рис. 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.

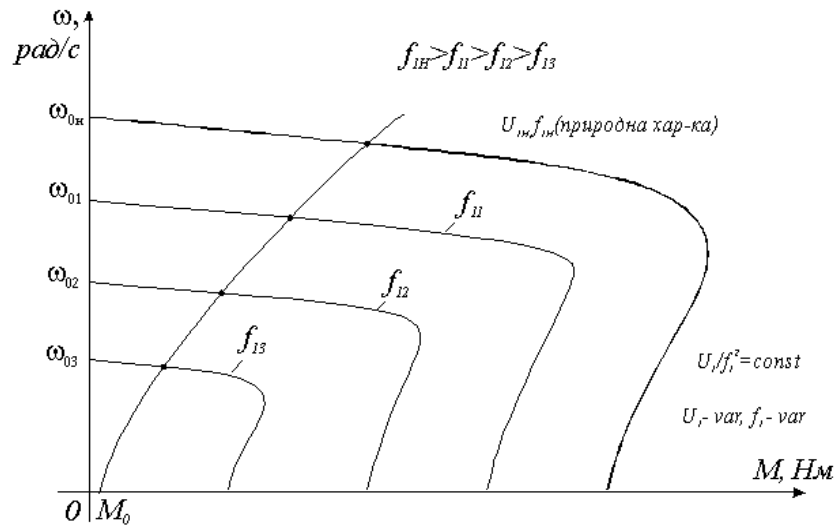


Рис. 1.12 Сумісні механічні характеристики електродвигуна при зростаючому навантаженні на валу

Цим пояснюється 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  $M_{c*} = f_{1*}^2$  або ж у розгорнутому вигляді:  $M_c = M_n \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2$ .

Аналіз механічних характеристик робочих органів технологічних машин, розглянутих вище та отримані експериментальні залежності статичного моменту від частоти обертання електродвигуна, дають змогу реалізувати раціональне керування АД 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 ЕП забезпечувати високий коефіцієнт потужності силового кола і водночас хороші статичні та динамічні показники системи регулювання. Спрощена функціональна схема частотно-регульованого ЕП показана на рис. 1.13.

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

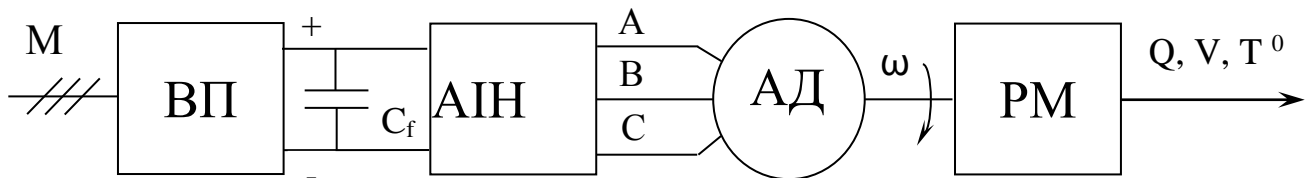


Рис. 1.13 Функціональна схема частотно-регульованого ЕП:

М – мережа, ВП – випрямляч,  $C_f$  – ємнісний фільтр, АІН – автономний інвертор напруги, АД – асинхронний двигун, РМ – робоча машина

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

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

де  $M^*$  – відносний момент холостого 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 % [12].

При зв'язному регулюванні подачі компонентів твердого біопалива можна успішно перерозподіляти спектральні густини їх потоків та ефективно використовувати згладжувальну здатність дозатора. Проведені дослідження дозаторів [9] показали, що крім технологічного ефекту можна зменшувати в 2–2,5 рази витрати електроенергії в динаміці.

Наведені вище приклади дають підставу стверджувати, що існують усі передумови для раціонального використання ресурсів частотно-регульованого ЕП в технологіях виробництва твердого біопалива, 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 30–50 %.

Відомі лінії з виробництва твердого біопалива (Україна, Польща) у зв'язку з випадковою продуктивністю робочих машин і відсутністю зв'язного регулювання мають високу енергоємність і не забезпечують необхідну якість продукції. Вказані недоліки обумовили необхідність створення енергозберігаючої інтелектуальної системи керування потоковою лінією виробництва твердого біопалива. 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 біопалива з використанням нейроконтролера на основі fuzzy-технологій [8; 19].

### **1.3 Енергоефективність виробництва твердого біопалива**

Ефективність поточного виробництва багатоконпонентного твердого біопалива, 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 [14; 22; 23].

Ступінь завантаження електродвигунів змішувача, дозаторів і пресу безперервної дії значною мірою визначає питому енергоємність процесу брикетування біомаси, яка згідно [1; 24] визначається за формулою:

$$E = \sum_i^n E_i + E_{зм}, \quad (1.8)$$

$$E = \sum_i^n \frac{W_i}{Q_i} + \frac{W_{зм}}{\sum_i^n Q_{зм}} + \frac{W_{пр}}{\sum_i^n Q_{пр}} \quad (1.9)$$

де  $i$  – номер компонента;  $n$  – кількість компонентів;

$E_i$  – питома енергоємність дозування  $i$ -го компонента, кВт·год.т<sup>-1</sup>;

$Q_i$  – продуктивність  $i$ -го компонента, т·год<sup>-1</sup>;

$E_{зм}$  – енергоємність процесу змішування, кВт·год.т<sup>-1</sup>;

$W_i$ ,  $W_{зм}$  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:

$$W = W_{xx} + k(\bar{Q} + \Delta Q) \quad (1.10)$$

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

$k$  – коефіцієнт пропорційності споживаної потужності від продуктивності, кВт·год. т<sup>-1</sup>;

$\bar{Q}$  – середня продуктивність, т·год<sup>-1</sup>;

$\Delta Q$  – випадкові відхилення продуктивності, т·год<sup>-1</sup>.

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 [1; 26], визначають еквівалентний струм і необхідну потужність.

Мінімізація другої складової рівняння (1.10) здійснюється за рахунок підвищення точності та рівномірності дозування компонентів у потоці. Вказану задачу успішно вирішують системи зв'язного регулювання продуктивності дозаторів компонентів твердого біопалива [2].

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

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + I^2 R, \quad (1.11)$$

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

$$\Delta A_p = \int_{m_{\omega} - \sigma_{\omega}}^{m_{\omega} + \sigma_{\omega}} J_{\Sigma}(m_{\omega} + \sigma_{\omega} + \omega) d\omega + M_c \int_0^{t_p} \omega dt \quad (1.12)$$

$$\Delta A_T = \int_{m_{\omega} + \sigma_{\omega}}^{m_{\omega} - \sigma_{\omega}} J_{\Sigma}(m_{\omega} - \sigma_{\omega} - \omega) d\omega + M_c \int_0^{t_T} \omega dt, \quad (1.13)$$

де  $\Delta A_p$  – втрати енергії при розгоні привода;

$\Delta A_T$  – втрати енергії при гальмуванні привода;

$m_{\omega}$  – математичне сподівання швидкості привода;

$J_{\Sigma}$  – сумарний приведений момент інерції привода;

$\sigma_{\omega}$  – середньоквадратичне відхилення швидкості привода;

$\omega$  – 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:  $\omega_3 + \sigma_{\omega}$

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_p + \Delta A_T = \int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} J_{\Sigma} (\omega_3 + \sigma_{\omega} + \omega) d\omega - \int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} J_{\Sigma} (\omega_3 - \sigma_{\omega} - \omega) d\omega \quad (1.14)$$

Виконавши дію сумування, отримаємо:

$$\Delta A_{\Sigma} = 2J_{\Sigma} \left( \int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} \sigma_{\omega} d\omega + \int_{\omega_3 - \sigma_{\omega}}^{\omega_3 + \sigma_{\omega}} \omega d\omega \right), \quad (1.15)$$

Визначивши суму інтегралів рівняння (5), отримаємо

$$\Delta A_{\Sigma} = 4J_{\Sigma} (\omega_3 \sigma_{\omega} + \sigma_{\omega}^2), \quad (1.16)$$

де  $\sigma_{\omega}^2$  – дисперсія швидкості електропривода.

Таким чином з аналізу (1.16) видно, що втрати енергії в електродвигунах шнекових дозаторів компонентів біопалива визначаються величиною інерції механізму шнека, а також заданою швидкістю його обертання. Вплив на втрати здійснює дисперсія швидкості  $\sigma_{\omega}^2$ , збільшення якої призводить до зростання витрат електроенергії в електроприводі.

У ході досліджень процесу дозування компонентів біопалива нами доказано, що під час зростання  $\sigma_{\omega}^2$  практично зростає  $\sigma_{\omega}^2$ , зменшення якої призводить до економії енергії, а також покращує збалансованість суміші біопалива. 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 біопалива. Проведений аналіз показав, що застосування системи дозволяє знизити енергоємність процесу виробництва твердого біопалива на 15–20 % [1; 11].

Як було задекларовано нами вище визначальний вплив на енергоємність процесу брикетування твердого біопалива має величина вологості базового компонента, яка в більшості випадків перевищує 20...30 %. Подрібнена пшенична «сіра» солома з такою вологістю не піддається брикетуванню 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 % [2].

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

Проведені дослідження показали, що при вологості понад 25 % і продуктивності у верхній шкалі дозатора на виробництво однієї тонни брикетів витрачається в 2...3 рази більше енергії, а це робить експлуатацію потокової лінії нерентабельною (рис. 1.14).

Таким чином, розширення вологісного діапазону базової сировини можливе тільки у випадку добавляння другого компоненту в біопаливо з низькою базовою вологістю, наприклад, подрібнених качанів кукурудзи після насінневих заводів, або відходів елеваторної промисловості, вологість яких не перевищує 11 %.

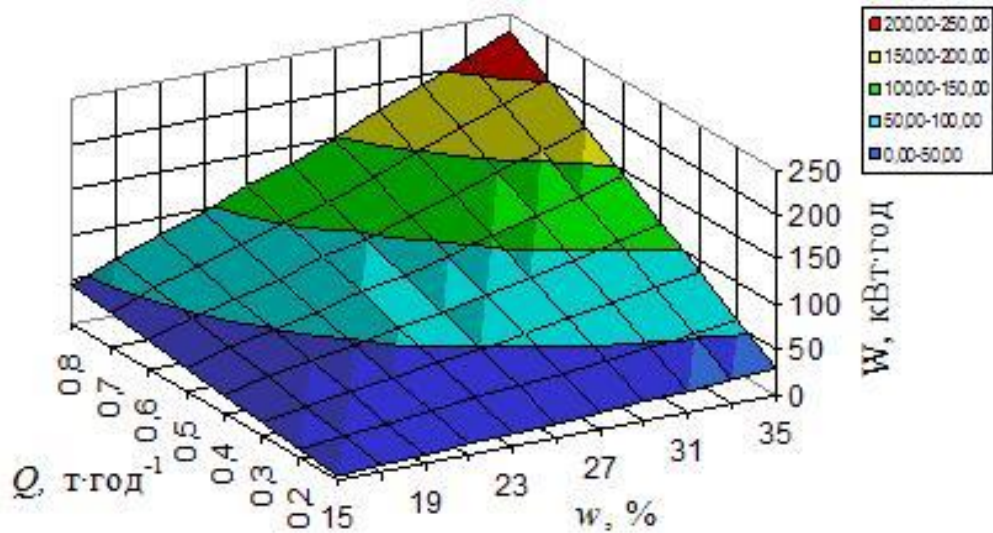


Рис. 1.14 Залежність енерговитрат на виробництво брикетів від вологості базової біосировини і продуктивності потокової лінії

#### 1.4 Статистичний аналіз процесу дозування сировини у потокових лініях приготування двокомпонентного біопалива

В Україні та за кордоном 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 [9]. Це пов'язано з недетермінованістю потокового процесу дозування сировини і відсутністю чітких методик для повноцінного математичного аналізу флуктуаційних явищ, характерних для вказаних технологій [5; 9]. Тому пошук раціональних математичних інструментів, що якісно описують процеси безперервного дозування матеріалу з властивостями випадкових функцій дозволять розробити

повноцінні передумови для створення систем керування технологіями виробництва твердого біопалива.

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 (1.10):

$$P = \chi \int_t^{t+t_1} Q(t) dt = \chi \int_t^{t+t_1} S_0(t) V_0(t) \cdot \rho(t) dt \quad (1.17)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт часового інтервалу інтегрування;

$S_0$  – площа визначального перерізу,  $m^2$ ;

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

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

Відповідно до рівняння (1.17) 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  $\rho$ , отримаємо значення масової продуктивності, яка найбільше застосовується на практиці:

$$P_M = P_V \cdot \bar{\rho}, \quad (1.18)$$

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

$$\bar{P}_1 = \chi \int_t^{t+t_1} Q(t) dt = \int_t^{t+t_1} P_V(t) \bar{\rho}(t) dt \quad (1.19)$$

де  $\bar{P}$  – середнє значення продуктивності.

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



$$\overline{P_2} = \int_0^{t+t_1} P_V(t) \overline{\rho}(t) + P_V \sigma_\rho, \quad (1.20)$$

де  $\sigma_\rho$  – середньоквадратичне відхилення щільності від середнього значення.

Порівнюючи (1.19) і (1.20) 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:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^k (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (1.21)$$

де  $t$  – час;  $\omega_k$  – частота;

$a_0, a_k, b_k$  – коефіцієнти Фур'є.

У нашому випадку коефіцієнти визначимо із залежності:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt; \quad a_k = \frac{2}{T} \int_0^T Q(t) \cos \omega_k t dt; \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T Q(t) \sin \omega_k t dt \quad (1.22)$$

Чим більше складових в залежності (1.22), 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 (1.21) можна брати обмежену кількість складових. Виходячи з вказаної умови робимо висновок, що

$$Q(t) \approx x(t) \quad (1.23)$$

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

З огляду на це, для визначення коефіцієнтів  $a_k$  і  $b_k$  можна використати коефіцієнти Бесселя

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N x_l; \quad a_k = \frac{2}{N-1} \sum_{l=1}^{N-1} x_l \cos \frac{2\pi}{N-1} kl \\ b_k &= \frac{2}{N-1} \sum_{l=1}^{N-1} x_l \sin \frac{2\pi}{N-1} kl \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

де  $N$  – кількість зафіксованих точок;

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

Знайдені за формулами (1.24) коефіцієнти визначають тригонометричний поліном

$$x_l^* = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos \frac{2\pi}{N-1} kl + b_k \sin \frac{2\pi}{N-1} kl) \quad (1.25)$$

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 (1.25) 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

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1.26)$$

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

$$f_{\min} = \frac{1}{T} \quad (1.27)$$

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 [9].

Після апробації процесу безперервного дозування сировини біопалива на стаціонарність обчислюємо статистичні оцінки функції  $Q(t)$  – математичне сподівання,  $-m_x$ ; дисперсію  $D_x$  функції  $x(t)$ ; середнє квадратичне відхилення  $\sigma$ , 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 [8] можна на попередньому етапі прогнозувати вимоги до електрообладнання лінії продукування твердого біопалива.

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

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Q(t)dt - \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Q_{зад}(t)dt \leq \pm \Delta \quad (1.28)$$

а при  $Q_{зад}(t) = const$

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Q(t)dt - Q_{зад}\Delta t \leq \pm \Delta \quad (1.29)$$

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

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

$\Delta$  – допустиме відхилення.

Враховуючи вираз (1.26) можна записати

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_{\max}} \quad (1.30)$$

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

Оскільки в нашому випадку швидкість подаючого шнекового транспортера ( $V = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) є визначальною по частоті, згідно [9] вибираємо  $\Delta t = 5 \text{ с}$ , що прийнятий для аналізу аналогічних дозуючих пристроїв.

Проведені нами дослідження за методикою висвітленою в [18] підтвердили позитивні регульовальні характеристики шнекового дозатора. Шкала продуктивності обладнання на двох компонентах сировини (подрібнена пшенична солома, подрібнені качани кукурудзи) носить лінійний характер (рис. 1.5).

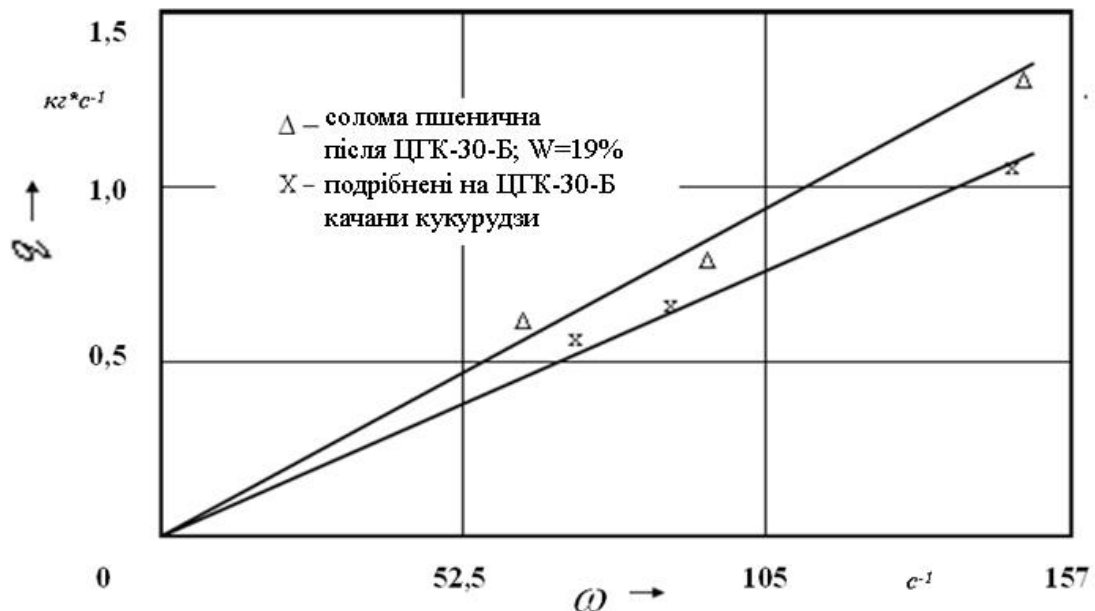


Рис. 1.5 Шкала продуктивності шнекового дозатора

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  $\tau$  вони затухають. Це підтверджує гіпотезу стаціонарності, що заангажована раніше (рис. 1.6).

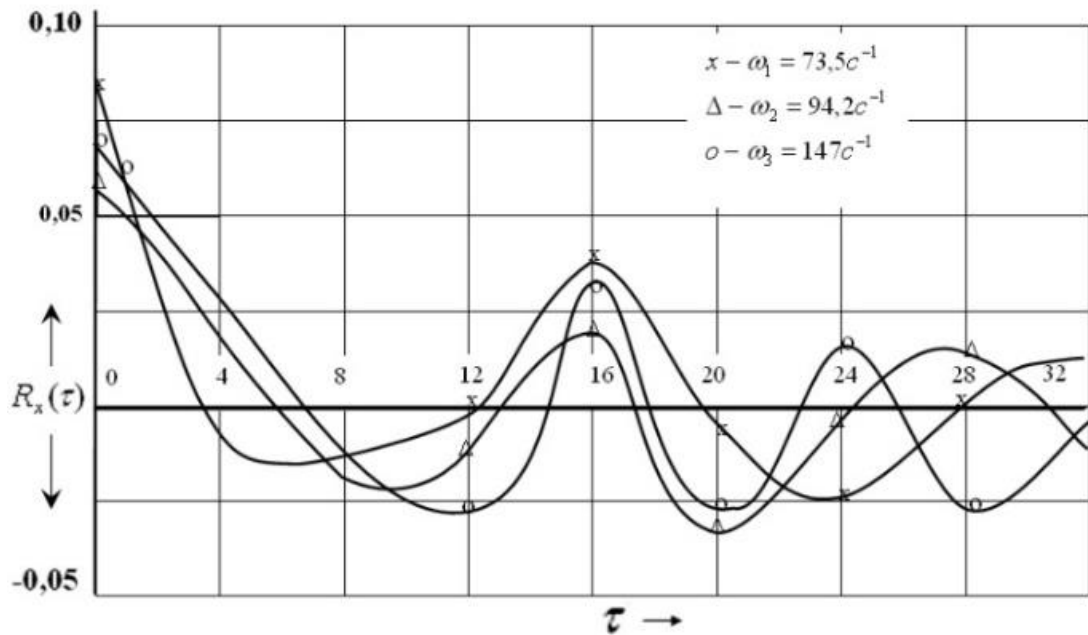


Рис. 1.6 Кореляційні функції потоків сировини при різних швидкостях шнекового дозатора

Побудувавши залежність  $c = f(\omega)$  (рис. 1.7) 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 брикетів працювати у верхньому діапазоні продуктивності дозаторів.

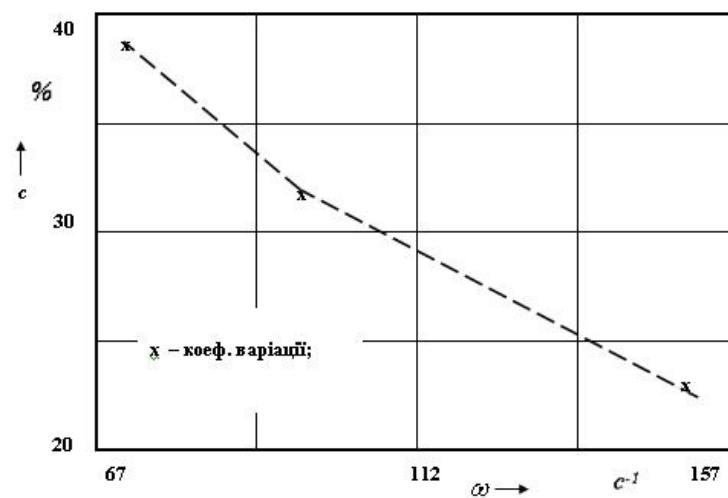


Рис. 1.7 Залежність коефіцієнта варіації від швидкості шнекового дозатора

Проведені нами дослідження процесу дозування подрібненої соломи дозатором безперервної дії показали, що основним джерелом дисперсії є шнековий механізм, а отримана спектральна щільність розподілу  $S(\omega)$  (рис. 1.8) апроксимується експоненціально–косинусними функціями виду:

$$S(\omega) = \frac{\alpha_1 Dx}{\pi} \left[ \frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega - \beta_1)^2} + \frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega + \beta_1)^2} \right] \quad (1.31)$$

де  $Dx$  – дисперсія,  $\text{кг}^2$ ;

$\alpha_1, \beta_1$  – параметри автокореляційної функції (АКФ);

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

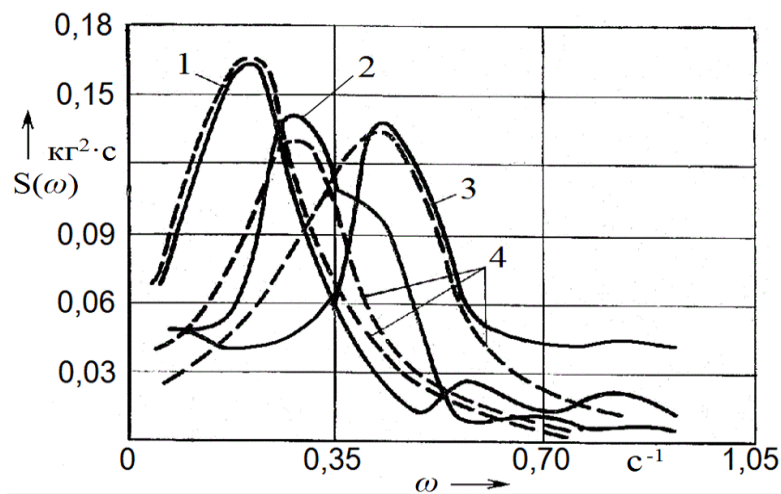


Рис. 1.8 Спектральні щільності потоків подрібненої соломи сформованих

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. 1.8) можна зазначити, 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 (1.26) потребує застосування спеціальних регуляторів, частотні характеристики яких мають вигляд вибіркового полосового фільтра [8]. Спектри 1, 2, 3 (рис. 1.8) апроксимуються виразом (1.26) 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  $\beta$  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  $\alpha$ . При збільшенні  $\alpha$  спектральна щільність потоку біомаси наближається до вигляду  $S(\omega) = \text{const}$ , а коливання продуктивності матеріалу корелює зі спектром «білого шуму». При зменшенні  $\alpha$  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 стебельної біомаси необхідно в потоці вимірювати продуктивність живильного пристрою. Для вказаних цілей використано акустичний витратомір, дослідження якого показали, що похибка вимірювань не перевищує 5 % на подрібненій соломі злакових та бобових культур.

Аналіз якості процесу дозування компонентів біопалива проводився методом пошуку мінімуму рівняння

$$D_{Q_A} = \frac{1}{\pi} S_{\Delta} Q(\omega) (W_H(p))^2 d\omega \quad (1.32)$$

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 (1.32) проводилась шляхом мінімізації відношення

$$m = \frac{D_{\Delta G_A}(\Delta t)}{D_{\Delta G}(\Delta t)} \quad (1.33)$$

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  $D_{\Delta G_A}(\Delta t) = D_{\Delta G} f(\alpha_i, \beta_i, \Delta t)$ , то критерій  $m$  в повній мірі є характеристикою  $Q(t)$  і  $G(t)$  при будь-яких  $\Delta t$ .

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  $\alpha_i$  при незначній зміні  $\beta_i$ .

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

$$W(p) = \overline{K} \quad (1.34)$$

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

Під час проходження 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 (1.34)  $\omega_f = 1,53 \text{ рад. с}^{-1}$ , а для витратоміра  $\omega_f = 5 \text{ рад. с}^{-1}$ , отримаємо вихідні дані для визначення граничних частот регулятора.

Для спектру розподілу потоку біомаси отриманого при технологічних дослідженнях (рис. 1.8) в частотному діапазоні  $\omega \leq 1 \text{ рад. с}^{-1}$ , виконується умова  $\omega_f \geq \omega_{\delta\ddot{e}}$ , 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 [8; 15].

Вибір регульованого електроприводу здійснюється за параметрами затухання спектрів (1, 2, 3) згідно з рекомендаціями [9]. Для дозування матеріалів з  $\alpha_i \approx 0,1$  рекомендується застосовувати серійні ПІ – регулятори, які в процесі роботи суттєво зменшують  $D_{GA}(\Delta t)$  за рахунок відсутності статичної похибки.

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

### **1.5 Процес утворення двокомпонентного біопалива**

Одним із пріоритетних напрямів зменшення обсягів використання традиційних енергоресурсів є використання твердого біопалива 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 [18].

Перспективною сировиною для виготовлення твердого біопалива є солома зернова, відходи елеваторної промисловості (продукти очистки зерна) та насінневих заводів (кукурудзяні качани). За своїми енергетичними характеристиками вони майже адекватні. 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 300...500 грн. за тонну. Це на порядок нижча ціна від природного газу, мазуту, пічного палива – традиційних для АПК джерел енергії.

Тому пошук раціональних способів продукування багатоконпонентного біопалива з характеристиками, що задовольняють теплогенеруючі установки, є надзвичайно актуальною задачею для агропромислової енергетики.

Теплоенергетики, зазвичай, обговорюють дві основні характеристики

твердого біопалива 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 твердого біопалива, яка коливається в межах 14–16 МДж/кг.

Одним із перспективних шляхів покращення теплоенергетичних властивостей твердого біопалива є його багатоконпонентність, яка дозволяє:

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

Дослідження в цьому напрямі засвідчили, що на даному етапі розвитку біоенергетичних зусиль в галузі продукування твердого біопалива найперспективнішою технологією є потокова лінія виробництва брикетів 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 [8]. Загальні витрати на виробництво 1 тонни брикетів за допомогою лінії Wektor коливаються в межах 3000–4000 грн. за тонну, в залежності від ціни сировини, при цьому енерговитрати не перевищують 500 грн.

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

Об'єктом дослідження були процеси виготовлення багатоконпонентного твердого біопалива з метою визначення його оптимального складу і формулювання вимог до існуючого технологічного обладнання.

В якості компонентів використовувались подрібнені качани кукурудзи з різним модулем помолу та подрібнена солома пшенична «сіра». Отримане тверде біопаливо виготовлялось в різних варіантах. На рис. 1.9–1.12 показано брикети як однокомпонентні – рис. 1.10 – подрібнені кукурудзяні качани, рис. 2.7 – подрібнена пшенична «сіра» солома ( $K_2/C_2$ ), так і у двокомпонентному варіанті –

рис. 1.11 (в пропорції  $K_2/C_2 = 3/1$ ), рис. 1.12 (в пропорції –  $K_3/C_3 = 4/1$ ).



Рис. 1.9 Брикет з подрібнених кукурудзяних качанів



Рис. 1.10 Брикет з подрібненої пшеничної соломи «сірої»



Рис. 1.11 Двокомпонентний брикет в пропорції  $K_2/C_2$



Рис. 1.12 Двокомпонентний брикет в пропорції  $K_3/C_3$

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

Брикети з соломи (рис. 1.10), при позитивних товарних характеристиках, мають підвищений вміст золи (до 4,5 %) та низьку температуру деформації і розщеплення біомаси (близько 1000 °С), що значно погіршує їх теплотехнічні властивості.

У той же час 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. 1.5).

Таблиця 1.5

### Характеристики палива

Характеристики палива	Однокомпонентні		Двокомпонентні	
	K <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	K <sub>2</sub> / C <sub>2</sub>	K <sub>3</sub> / C <sub>3</sub>
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

У таблиці 1.5:

K<sub>1</sub> – качани кукурудзи з модулем помолу 5,0 мм;

C<sub>1</sub> – солома пшенична «сіра» з модулем помолу 30...50 мм;

C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> – солома пшенична «сіра» з модулем помолу 30...50 мм і масою 1 кг;

K<sub>2</sub> – качани кукурудзи з модулем помолу 1,5 мм і масою 3 кг;

K<sub>3</sub> – качани кукурудзи з модулем помолу 5,0 мм і масою 4 кг.

Задекларована нами технологія приготування двокомпонентного твердого біопалива [7] передбачає безперервне дозування сировини в прес з подальшим продукуванням брикетів. Структурна схема технологічної лінії показана на

рис. 1.13.

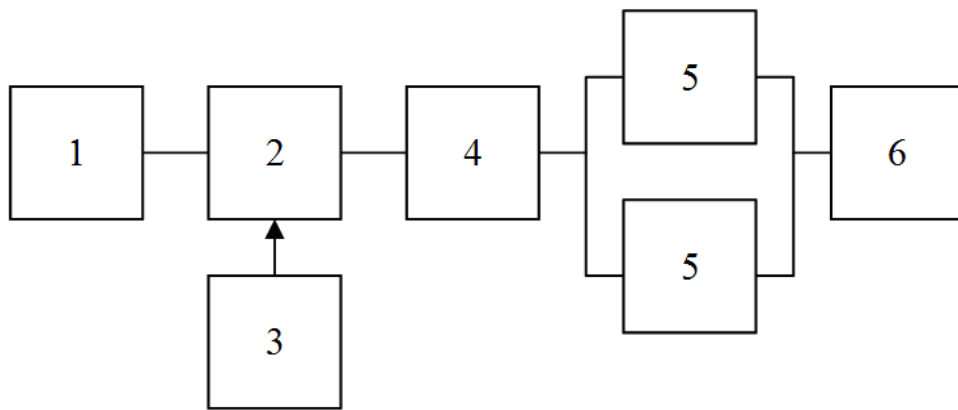


Рис. 1.13 Структурна схема потокової лінії приготування двокомпонентного твердого біопалива: 1 – подрібнювач соломи; 2 – дробарка; 3 – дозатор 2-го компоненту; 4 – силос-дозатор біопалива; 5 – преси; 6 – накопичувач готової продукції

Використання поточкових ліній продукування двокомпонентного твердого біопалива прискорює технологічний процес та зменшує експлуатаційні затрати на 30–40 % порівняно з обладнанням порційної дії еквівалентної продуктивності [8].

Задача безперервного дозування компонентів біопалива 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 [10] 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:

$$\omega_{\min} \geq \omega_{кр} = 2\pi(\Delta t)^{-1} \quad (1.35)$$

де  $\omega_{\min}$  – частота низькочастотних флуктуацій;

$\omega_{кр}$  – частота пропускання дозатора;

$\Delta t$  – час дози.

У процесі застосування потокової технології приготування двокомпонентного біопалива 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 біопалива і регулятори. Впровадження САК дозволяє підвищити якість сумішей і знизити витрати праці й електроенергії порівняно з системами дистанційного керування.

## **1.6 Алгоритми і технічні засоби системи зв'язного дозування компонентів біопалива**

Прогрес у виробництві напівпровідникової техніки та мікроелектроніки дозволяє створити електропривод, який відповідає будь-яким вимогам технологічного процесу. Застосування керованих перетворювачів частоти 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. Особливо суттєві переваги використання такого електропривода в агропромисловому комплексі України.

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 електроприводів в агропромисловому комплексі більшість складає група регульованих за швидкістю систем, що працюють, в основному, 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 твердого біопалива 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 [18].

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

З цією метою нами розроблено структурну схему автоматизованої потокової технологічної лінії виробництва двокомпонентного твердого біопалива (рис. 1.14). 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.



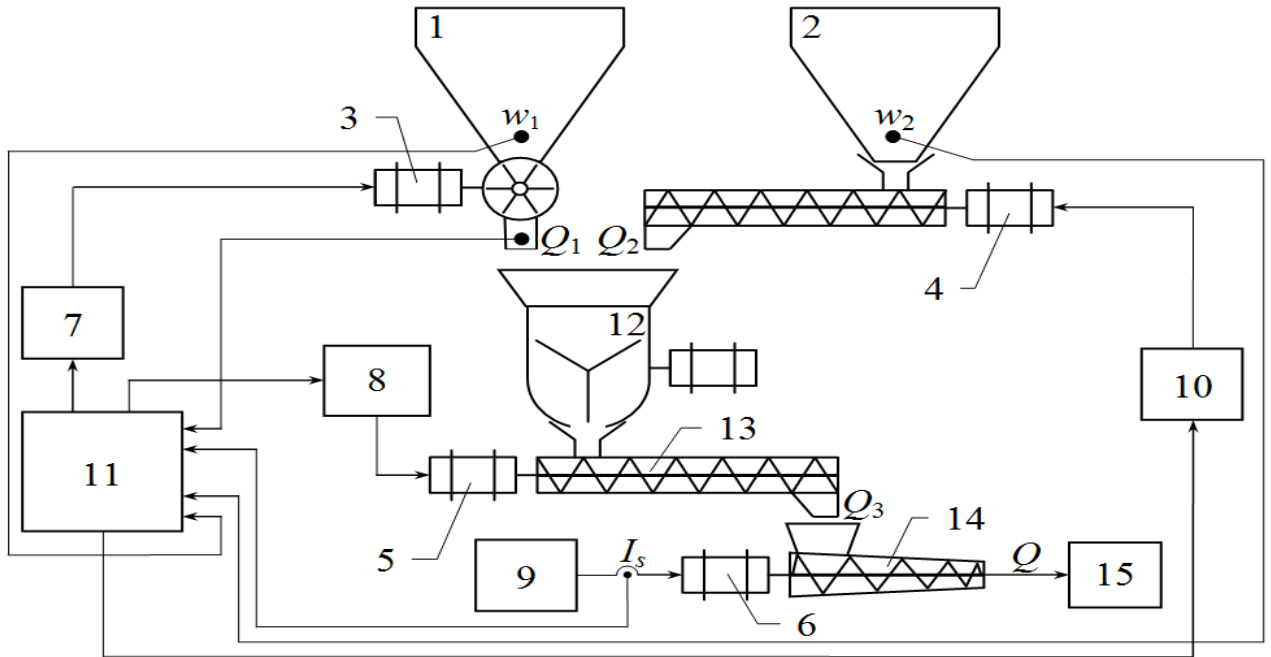


Рис. 1.14 Структура автоматизованої потокової технологічної лінії виробництва двокомпонентного твердого біопалива: 1 – бункер-дозатор секторний; 2 бункер-дозатор шнековий; 3, 4, 5, 6 – регульовані асинхронні двигуни; 7, 8, 9, 10 – перетворювачі частоти; 11 – нейроконтролер; 12 – бункер-змішувач; 13 – шнек-дозатор; 14 – підпресовувальний шнек; 15 – прес;  $w_1, w_2$  – давачі вологості;  $Q_1$  – давач продуктивності,  $I_s$  – давач струму статора АД

Для забезпечення сталого об'єму заповнення бункера-змішувача та постійної щільності брикетів 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  $Q$ :

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 = Q \quad (1.36)$$

Об'ємна продуктивність шнекового дозатора через його геометричні параметри

$$Q_v = 0,25\pi ((D + 2\delta)^2 - d^2)ns_i\gamma, \quad (1.37)$$

де  $D$  – діаметр шнека, м;

$\delta$  – зазор між корпусом і шнеком, м;

$d$  – діаметр вала шнека, м;

$n$  – частота обертання шнека, об/хв;

$s_i$  – крок навивки шнека, м;

$\gamma$  – коефіцієнт заповнення шнека.

Виразивши продуктивності через щільності компонентів отримаємо:

$$\sum_{i=1}^n S_1 v \rho_{1i} \Delta t_i + \sum_{i=1}^n S_2 k_i v \rho_2 \Delta t_i = \sum_{i=1}^n S_3 \alpha (v + k_i v) \rho_3 \Delta t_i = S_4 \beta (v + k_i v) \rho_4 T, \quad (1.38)$$

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;

$\alpha, \beta$  – 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;

$\rho_4$  – 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<sup>3</sup>), 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 двокомпонентного твердого біопалива 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  $0,25 \text{ кВт}$ .

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  $16\%$ .

В даний час у технологічному процесі виробництва твердого біопалива брикети 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  $250\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$  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 біопалива суттєво залежить від перерахованих вище чинників.

У процесі досліджень з'ясовувались 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 брикетування біопалива, 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 (рис. 1.15).

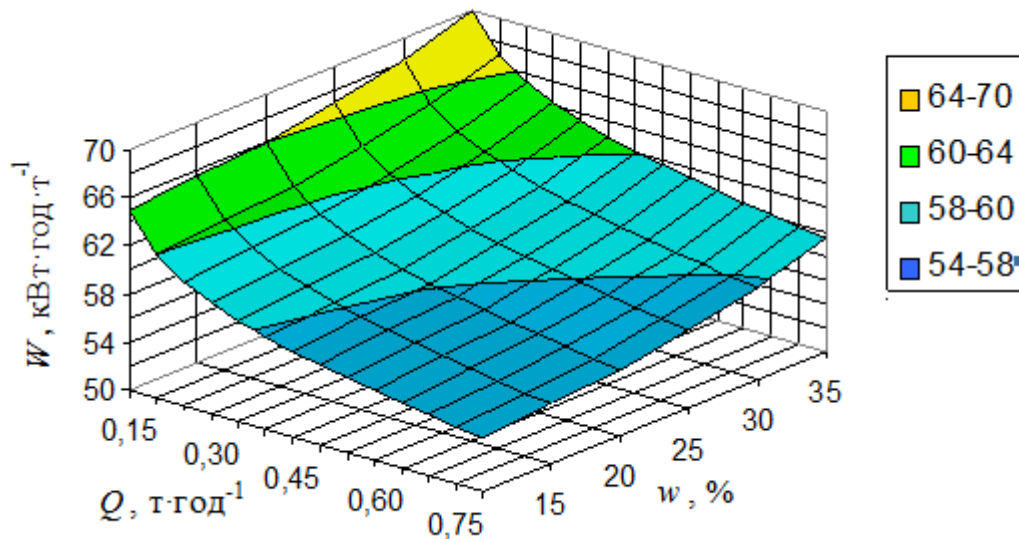


Рис. 1.15 Залежність питомих витрат електроенергії  $W$  від  $Q$  та  $w$  сировини

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

Величина струму  $I_s$  АД підпресувального шнека найбільш суттєво залежить від щільності пресування брикетів біопалива, що визначається його власною продуктивністю  $Q$ , а також продуктивностями преса та шнека-дозатора  $Q_3$  (див. рис. 1.14), тому необхідно забезпечити синхронну роботу вхідних і вихідних дозуючих пристроїв з урахуванням нерівномірності їх поточних продуктивностей.

За даними експериментальних досліджень встановлено, що потужність, яка споживається електроприводом підпресувального 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 [8]:

$$N_1 = \frac{\pi^3 (t - e) l_0 J \mu n^2}{t} + \alpha n \Delta P, \quad (1.39)$$

де  $J$  – коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$J = \frac{\pi^2 D_1^2 - 4t^2}{\pi^2} + \frac{(d + D_1)^3 - (d + D_2)^3}{3(D_1 - D_2)} + \frac{2,3\pi^2 D_1^5}{(t^2 + \pi^2 D_1^2)(h_1 - h_2)} \lg \frac{h_1}{h_2}, \quad (1.40)$$

$t$  – крок навивки гвинтової лінії шнека, м;

$e$  – товщина гребеня, м;

$l_0$  – довжина навивки, м;

$n$  – частота обертання, об/хв;

$\mu$  – коефіцієнт в'язкого тертя під час переміщення та ущільнення сировини, Па·с;

$\alpha$  – стала прямого потоку, м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  – 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  $\mu$ , частоти обертання  $n$  у другій степені та щільності пресування, вираженого через перепад тиску  $\Delta P$ .

Щільність пресування у вказаній технології становить близько 1:10 і задається співвідношенням об'ємних продуктивностей підпресувального шнека

та ударного преса, а також регулюванням величини зусилля на виході технологічного отвору під час проходження брикетів біопалива.

Механічна потужність шнека-дозатора визначається за формулою:

$$N = 10^3 Q L k, \quad (1.41)$$

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 (1.36). Виникають перевитрати електроенергії АД підпресовувального шнека внаслідок значного зростання його механічного навантаження, що призводить 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; 28] розроблено імітаційну модель технологічної установки (рис. 3.3), яка базується на створених математичних моделях шнекових

дозаторів та підпресовувального шнека-екструдера (за рівняннями 1.37–1.41) (рис. 1.17) і відтворює процес функціонування вказаних технологічних машин у замкнутій системі автоматичного керування (САК) продуктивністю завантажувального шнека-дозатора  $Q_1$ , що забезпечує задану номінальну величину струму статора АД вказаного обладнання.

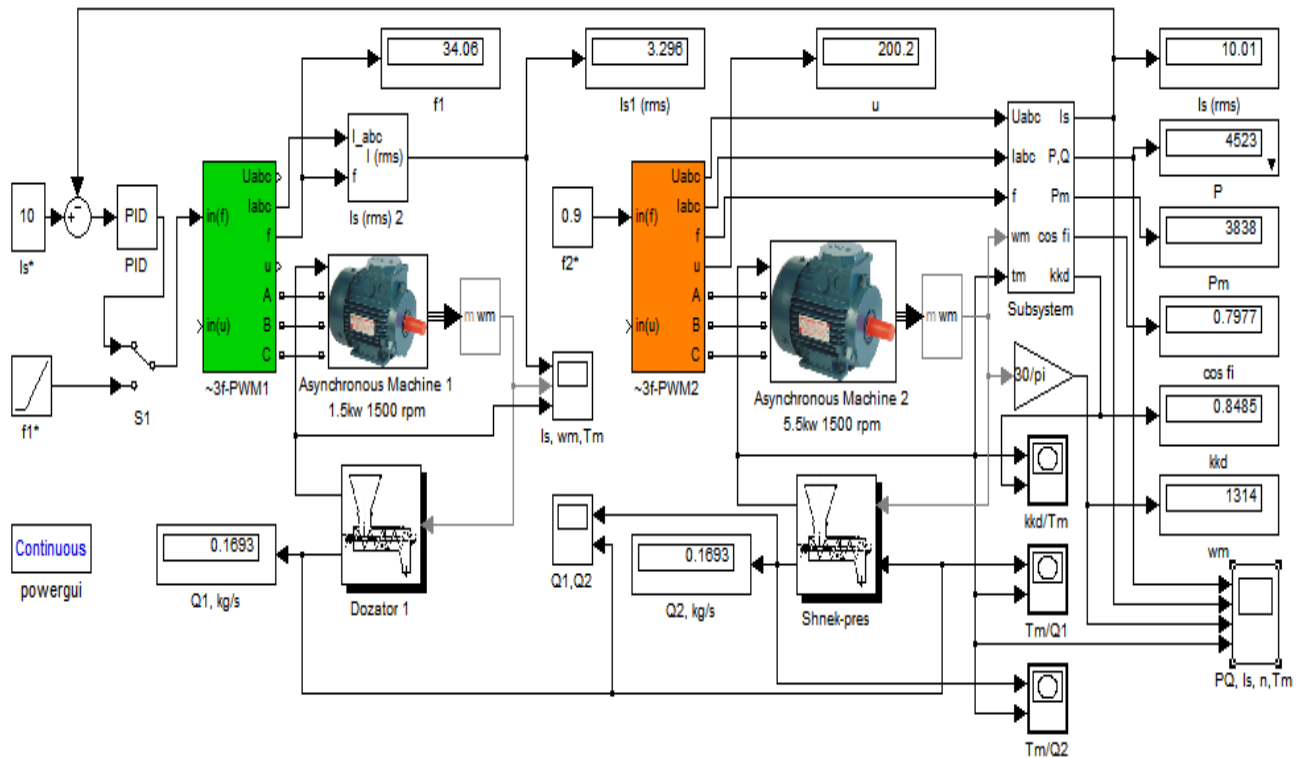


Рис. 1.16 Імітаційна модель установки для дослідження режимів роботи та енергетики технологічного обладнання

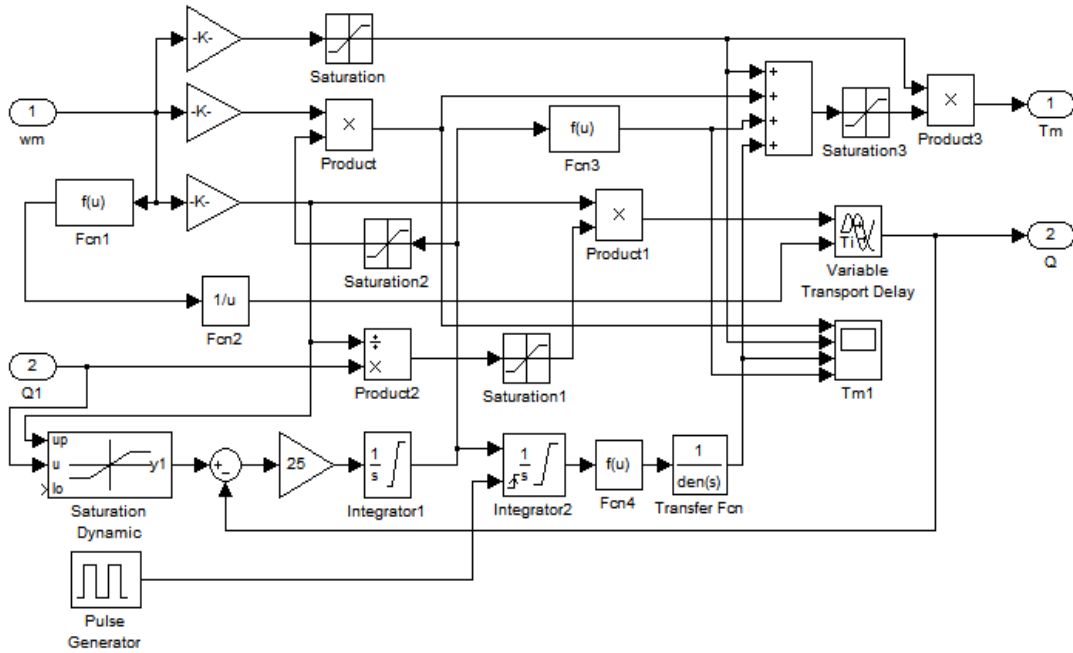


Рис. 1.17 Структура імітаційної математичної моделі підпресовувального шнека-екструдера

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 (рис. 1.18).

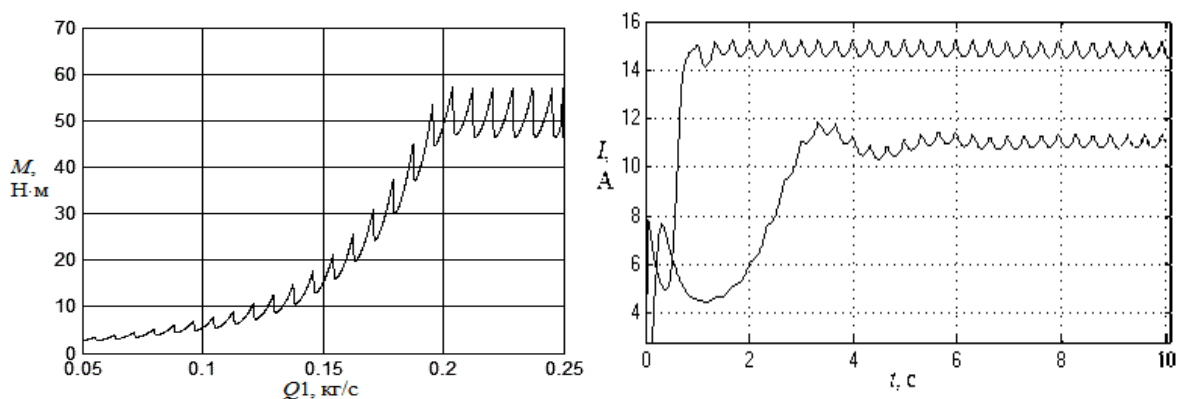


Рис. 1.18 Результати моделювання режимів роботи шнека-екструдера

На основі поданих вище результатів досліджень розроблено імітаційну модель установки для виробництва двокомпонентного твердого біопалива з



використанням нейроконтролера для здійснення керування технологічним процесом (рис. 1.19).

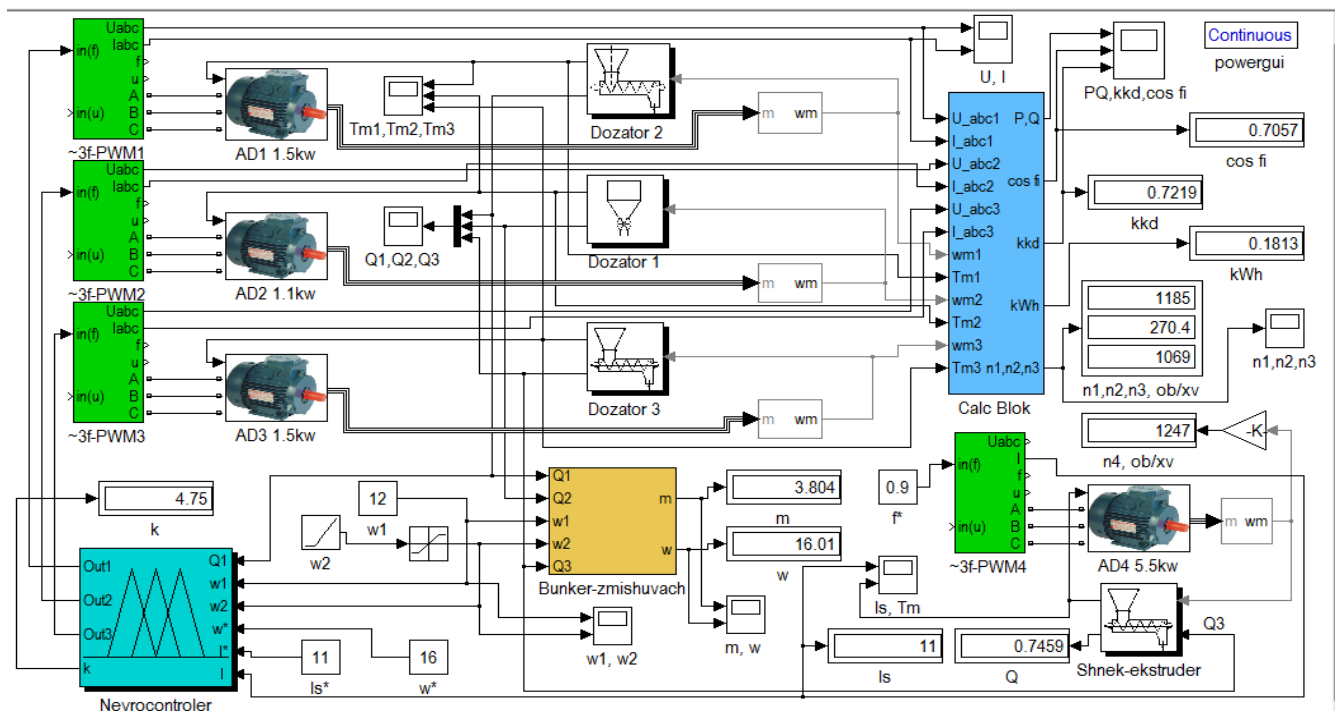


Рис. 1.19 Імітаційна модель системи керування потоковою лінією

У запропонованій структурі імітаційної моделі інтелектуальної системи керування (рис. 1.19) продуктивність шнека-дозатора  $Q_3$  задається, виходячи із величини струму статора АД підпресовувального шнека  $i$ , в свою чергу, визначає сумарну продуктивність дозаторів  $Q_1$ ,  $Q_2$ , яка встановлюється рівною продуктивності  $Q_3$ .

Таким чином, розроблена інтелектуальна система керування технологією брикетування твердого двокомпонентного біопалива 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 %.

## **1.7 Корекція динамічних та енергетичних характеристик дозаторів біопалива**

Корекцію характеристик зв'язних електроприводів можна дослідити на прикладі роботи потокової лінії виробництва твердого біопалива, 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 [21].

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 твердого біопалива 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 багатокомпонентного твердого біопалива, 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 твердого біопалива (АИР80В4УЗ, 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; 30], на основі яких рівняння для визначення моменту електродвигуна має вигляд:

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

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_\mu + R_1)^2 + (X_\mu + X_1)^2}} \quad (1.42)$$

де  $U_1$  – напруга статора, В;

$\omega_0$  – кутова швидкість поля статора електродвигуна при частоті  $f_1$  підведеної напруги, рад/с;

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

$$c' = \frac{X_1 + X_\mu}{X_\mu}; \quad c'' = -\frac{R_1}{X_\mu}; \quad R_1, X_1; \quad R_2', X_2'; \quad R_\mu, X_\mu - \text{відповідно активний та}$$

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 степені [30]:

$$p_{cm} \cong k_{cm} \Phi^2 f_n = 3I_0^2 R_{\mu n} \quad (1.43)$$

Визначивши із досліду холостого ходу номінальні втрати в сталі і струм холостого ходу двигуна, із (1.43) визначаємо значення  $R_{\mu n}$ . Цю ж величину можна отримати якщо відомі втрати в сталі електродвигуна при номінальному режимі, шляхом рішення рівняння (1.43) і виразу для струму холостого ходу електродвигуна із системи рівнянь (1.42). Як видно з (1.43), активний опір намагнічування електродвигуна змінюється пропорційно частоті напруги живлення. Тому в систему рівнянь (1.42) при зміні частоти живлення значення активного опору намагнічування

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

Механічні втрати в електродвигуні приймаються пропорційними швидкості ротора в степені 2 [24]. Додаткові втрати приймають рівними 5 % від  $P_2$ .

Реалізацію системи рівнянь (1.42) в MATLAB зручніше здійснювати у відносних одиницях, які повинні бути наслідком основних вихідних рівнянь асинхронного електропривода й утворювати єдину систему.

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

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

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{\delta}}; M = U_{\delta} \cdot I_{1H} / \omega_{0H}; l_1 = \frac{L_1}{L_{1H}}; l_2 = \frac{L_2}{L_m}$$

де  $\omega_0$  – 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 (1.42) у відносних одиницях матиме вигляд:

$$\mu = \frac{3u_1^2 r_2' s f^*}{f^{*2} [s(1+l_2) \cdot r_1 + (1+l_1) \cdot r_2']^2 + f^{*2} [s(l_1+l_2+l_1 l_2) - r_1 r_2']^2}; \quad (1.44)$$

$$i_2'^2 = \frac{\mu s f^*}{3r_2'}; i_2''^2 = k i_2'^2; i_{2a}'' = \frac{(r_1 + r_2' / s)(i_2'')^2}{u_1}; i_{2p}'' = \frac{f^*(l_1+l_2)(i_2'')^2}{u_1};$$

$$i_0 = \frac{u_1}{\sqrt{(r_1 + r_{\mu} f^*)^2 + (f^*)^2 (1+l_1)^2}}; i_{0a} = \frac{u_1 (r_{\mu} f^* + r_1)}{(r_{\mu} f^* + r_1)^2 + (f^*)^2 (1+l_1)^2};$$

$$i_{0p} = \frac{u_1 f^* (1+l_1)}{(r_{\mu} f^* + r_1)^2 + (f^*)^2 (1+l_1)^2}; i_{1p} = i_{0p} + i_{2p}''; i_{1a} = i_{0a} + i_{2a}'';$$

$$i_1 = \sqrt{i_{1a}^2 + i_{1p}^2}; P^* = f^* \mu; P_2^* = P^* - P^* S - P_{\text{мех.н}}^* (f^*)^{\frac{3}{2}} - P_g;$$

$$\cos \varphi = \frac{i_{1a}}{i_1}; P_1^* = 3u_1 i_1 \cos \varphi; \mu - \mu_c = J \omega_{0H} / M_{\delta} \frac{d\omega^*}{dt}; s = 1 - \frac{\omega^*}{f^*}$$

Способи корекції зв'язних систем регулювання електроприводом розглянуті в [9]. Спосіб, запропонований у [9], вимагає давачів швидкості електродвигунів, після порівняння яких подаються сигнали для корекції швидкості. В [30] 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 (1.42) 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:

$$\mu = \frac{3u_1^2 r_2'}{(f^* - \nu) \left( [r_1 + (1 + l_2) r_2' / s]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 \right)} \quad (1.45)$$

З (1.45) видно, що обертовий момент асинхронного електродвигуна можна змінювати шляхом регулювання напруги живлення  $u_1$  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:

$$d\mu = \frac{\partial \mu}{\partial f^*} df^* + \frac{\partial \mu}{\partial u} du + \frac{\partial \mu}{\partial \nu} d\nu \quad (1.46)$$

Оскільки в процесі корекції зміна координат електропривода відносно невелика, то, змінивши в (1.46) повні диференціали кінцевими приростами відповідних величин, визначимо рівняння, які характеризують види корекції, що розглядаються.

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

$$\Delta\mu = \frac{\partial \mu}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial \mu}{\partial \nu} \Delta \nu, \quad (1.47)$$

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

$$\Delta\mu = \frac{\partial \mu}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial \mu}{\partial \nu} \Delta \nu \quad (1.48)$$

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

$$\frac{\partial \mu}{\partial f^*} \Delta f^* = \frac{\partial \mu}{\partial u} \Delta u \quad (1.49)$$

Знайдемо частинні похідні цього виразу з (1.45), продиференціювавши його за змінними  $f^*$ ,  $u$  і  $\nu$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu}{\partial f^*} = & \frac{-3u_1^2 r_2' \left\{ \left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)]^2 \right\} -}{(f^* - \nu)^2 \left\{ \left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)]^2 \right\}^2} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{-(f - \nu) \left\{ 2 \left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \frac{(1+l_1)r_2'(-\nu)}{(f - \nu)^2} + \right.}{\rightarrow} \\ & \left. + 2 [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)] [(l_1+l_2+l_1 l_2)] \right\}}{(f^* - \nu)^2} \rightarrow \end{aligned} \quad (1.50)$$

Якщо прийняти, що момент

$$\mu = \frac{3u_1^2 r_2}{(f - \nu) \left\{ \left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^*(l_1+l_1 l_2+l_2)]^2 \right\}} \quad (1.51)$$

тоді загальний опір електродвигуна

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

коефіцієнти потужності

$$\cos \varphi = \frac{r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s}}{\sqrt{\left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)]^2}} \quad (1.52)$$

$$\sin \varphi = \frac{f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)}{\sqrt{\left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^*(l_1+l_2+l_1 l_2)]^2}} \quad (1.53)$$

коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{r_2' \frac{(1-s)}{s}}{r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s}} \quad (1.54)$$

то вираз (1.50) можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial \mu}{\partial f^*} = \frac{\mu}{(f^* - \nu)} [2\eta(1+l_1) \cos^2 \varphi - 2s \sin^2 \varphi - 1] \quad (1.55)$$

Прийнявши

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

тоді

$$\frac{\partial \mu}{\partial f^*} = \frac{\mu}{(f^* - \nu)} \cdot A \quad (1.56)$$

Частинна похідна моменту за напругою дорівнюватиме

$$\frac{\partial \mu}{\partial u} = \frac{2 \cdot 3 r_2 u_1}{(f^* - \nu) [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 + f^{*2} \left[ r_1 + (l_1 + 1) \frac{r_2}{s} \right]^2} = \frac{2\mu}{u_1}. \quad (1.57)$$

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 (1.51),

(1.52), (1.53) і з урахуванням відносного моменту  $\mu = \frac{1}{(1 + l_2)} (i_{1b} \psi_{2a} - i_{1a} \psi_{2b})$ ,

отримаємо:

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

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

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



$$\frac{\partial \mu}{\partial \nu} = -\frac{\mu f^*}{(f^* - \nu)\nu} \cdot B \quad (1.58)$$

З урахуванням (1.56) і (1.57) умова рівності вихідних механічних параметрів двигуна (1.58) при частотній корекції і корекції за напругою запишеться так:

$$\Delta f^* = \frac{2(f^* - \nu)}{A \cdot u} \Delta u = \frac{2f_2^*}{A \cdot u} \Delta u \quad \text{або} \quad \Delta u = \frac{A \cdot u}{2f_2^*} \Delta f^* \quad (1.59)$$

де  $f_2^* = f^* - \nu$ .

Величина корекції за напругою визначається з виразу (1.48) після підстановки значень частинних похідних моменту за напругою і частотою обертання ротора, визначених виразами (1.57) і (1.58) матиме вигляд:

$$\Delta u = \frac{u}{2} \left( \frac{\Delta \mu}{\mu} + \frac{B \Delta \nu}{\nu \cdot s} \right) \quad (1.60)$$

або

$$\Delta u = \frac{u}{2} \left( \frac{\Delta \mu \cdot \nu \cdot s + B \cdot \Delta \nu \cdot \mu}{\mu \cdot \nu \cdot s} \right) \quad (1.61)$$

Оскільки в процесі застосування корекції електродвигун реалізує новий обертовий момент  $\mu_1$  при частоті обертання  $\nu_1$ , 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 (1.61) запишемо у вигляді

$$\Delta u = \frac{u}{2} \frac{\frac{\Delta \mu \nu + \Delta \nu B \mu / s}{\Delta \mu \nu + \Delta \nu \mu} (\Delta \mu \nu + \Delta \nu \mu)}{P_2^*} = \frac{u}{2} \frac{K \Delta P_2^*}{P_2^*} \quad (1.62)$$

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

Величина зміни частоти живлення  $f_1^* = f^* + \Delta f^*$  або корекція за частотою за умови рівності вихідних механічних параметрів електродвигуна визначається за виразом (1.47) з урахуванням значень частинних похідних за (1.56) і (1.58).

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

або, як і у випадку отримання виразу (1.62),

$$\Delta f^* = \frac{k(f^* - \nu) \Delta P_2^*}{A P_2^*} = \frac{k f_2^* \Delta P_2^*}{A P_2^*} \quad (1.63)$$

Оцінімо 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.

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

$$\begin{aligned} & + [f^*(l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2 \} + \left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right]^2 \frac{(1 + l_1) r'_2 v}{(f^* - v)^2} - \\ & \rightarrow \frac{-\frac{1}{f^*} \left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right] [f^*(l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2}{\rightarrow} \end{aligned}$$

Спростивши цей вираз, отримаємо:

$$\frac{\partial \cos \varphi}{\partial f^*} = -\sin^2 \varphi \cos \varphi \left( \frac{(1 + l_1) \eta}{f^* - v} - \frac{1}{f^*} \right) \quad (1.64)$$

Частинна похідна за абсолютною частотою ковзання

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \cos \varphi}{\partial (f^* - v)} = \frac{\frac{-r'_2 f^* (1 + l_1)}{(f^* - v)^2} \times}{\left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right]^2 + [f^*(l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{\sqrt{\left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right]^2 + [f^*(l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2} - \left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right] \times}{\rightarrow} \\ & \frac{1}{2} \frac{2 \left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right] \left( -\frac{r'_2 f^* (1 + l_1)}{(f^* - v)^2} \right)}{\sqrt{\left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right]^2 + [f^*(l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2}} \rightarrow \end{aligned}$$

Спростивши вираз, отримаємо

$$\frac{\partial \cos \varphi}{\partial (f^* - v)} = -\cos \varphi \sin^2 \varphi \frac{(1 + l_1) \eta}{s v} \quad (1.65)$$

Частинна похідна коефіцієнта корисної дії за частотою живлення

$$\frac{\partial \eta}{\partial f^*} = \frac{r'_2 \frac{-v}{(f^* - v)^2} \left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right] - r'_2 \frac{v}{f^* - v} (1 + l_1) r'_2 \frac{-v}{(f^* - v)^2}}{\left[ r_1 + (1 + l_1) \frac{r'_2}{s} \right]^2} =$$

$$= \frac{r_2' \frac{-v}{(f^* - v)^2}}{r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s}} + \frac{r_2'^2 (1+l_1) \frac{v^2}{(f^* - v)^3}}{\left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2}$$

Після спрощення отримуємо:

$$\frac{\partial \eta}{\partial f^*} = -\frac{\eta}{f \cdot s} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{f \cdot s} = -\eta \frac{1-(1+l_1)\eta}{f \cdot s} \quad (1.66)$$

Похідна ККД за абсолютною частотою ковзання

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

Спростивши вираз, отримуємо:

$$\frac{\partial \eta}{\partial (f^* - v)} = -\frac{\eta}{f^* - v} + \frac{\eta^2 f^* (1+l_1)}{v (f^* - v)} = -\frac{\eta}{f^* - v} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{vs} \quad (1.67)$$

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

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

При зміні напруги нова абсолютна частота ковзання буде рівною

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

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

$$\Delta \cos \varphi_u = \cos \varphi \sin^2 \varphi \frac{(1+l_1)\eta}{vs} \Delta v, \quad (1.68)$$

$$\Delta \eta_u = \frac{\partial \eta}{\partial f_2^*} \Delta f_2^* = \left( \frac{\eta}{f^* - v} - \frac{(1+l_1)\eta^2}{vs} \right) \Delta v \quad (1.69)$$

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

$$\Delta \cos \varphi_f = \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial \cos \varphi}{\partial f_2^*} \Delta f_{2_f}^* \quad (1.70)$$

При корекції за частотою абсолютна частота ковзання

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

а її зміна

$$\Delta f_{2_f}^* = f_{2_f}^* - f_2^* = f^* - \nu_1 + \Delta f^* - f^* + \nu = \Delta f^* - \Delta \nu \quad (1.71)$$

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

$$f_{2_u}^* - f_{2_f}^* = \Delta f^* - \Delta \nu + \Delta \nu = \Delta f^* \quad (1.72)$$

Підставляючи у (1.69) значення частинних похідних за виразами (1.65) і (1.66), а значення зміни абсолютної частоти ковзання за (1.71), отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta \cos \varphi_f &= \sin^2 \varphi \cos \varphi \left( \frac{1+l_1}{f^* - \nu} \eta - \frac{1}{f^*} \right) \Delta f^* + \left( -\cos \varphi \sin^2 \varphi \frac{(1+l_1)\eta}{\nu s} \right) (\Delta f^* - \Delta \nu) = \\ &= \frac{(1+l_1)\eta}{\nu s} \Delta \nu \cos \varphi \sin^2 \varphi + \sin^2 \varphi \cos \varphi \left( \frac{(1+l_1)\eta}{f^* - \nu} - \frac{1}{f^*} - \frac{(1+l_1)\eta}{\nu s} \right) \Delta f^* = \\ &= \cos \varphi_u - \left( \frac{(1+l_1)}{\nu} \eta + \frac{1}{f^*} \right) \Delta f^* \cos \varphi \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (1.73)$$

Зміна коефіцієнта корисної дії при частотній корекції

$$\Delta \eta_f = \frac{\partial \eta}{\partial f^*} \Delta f^* + \frac{\partial \eta}{\partial f_2^*} \Delta f_{2_f}^*$$

Підставивши у це рівняння значення частинних похідних за (1.67) і (1.68), а зміну абсолютної частоти ковзання за виразом (1.71), отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta \eta_f &= \left( \frac{-\eta}{f^* - \nu} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{f^* - \nu} \right) \Delta f^* + \left( \frac{-\eta}{f^* - \nu} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{\nu s} \right) (\Delta f^* - \Delta \nu) = \\ &= \left( \frac{\eta}{f^* - \nu} - \frac{(1+l_1)\eta^2}{\nu s} \right) \Delta \nu + \left( \frac{-2\eta}{f^* - \nu} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{f^* - \nu} + \frac{(1+l_1)\eta^2}{\nu s} \right) \Delta f^* = \\ &= \Delta \eta_u - \eta \left( \frac{2}{f^* - \nu} - \frac{(1+l_1)\eta}{\nu f^*} \right) \Delta f^* \end{aligned} \quad (1.74)$$

Співставивши вирази для  $\cos \varphi$  і  $\eta$  при корекції за напругою, за умови

$\Delta f^* > 0$ ,  $\Delta f_2^* > 0$ , при корекції за частотою, відповідно, вирази (1.68) і (1.73) та (1.69) і (1.74), робимо висновок, що корекція за напругою енергетично більш ефективна, ніж за частотою, оскільки

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

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

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

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

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

Враховуючи той факт що

$$i = \frac{u}{z}, \text{ то } \frac{\partial i}{\partial u} = \frac{1}{z}, \frac{\partial i}{\partial z} = -\frac{u}{z^2} \text{ і } \Delta i_u = i \left( \frac{\Delta u}{u} - \frac{\Delta z_u}{z} \right) \quad (1.75)$$

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

З виразу (1.42) повний опір у відносних одиницях

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

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

Спростивши цей вираз, отримаємо:

$$\frac{\partial z}{\partial f^*} = z \left( -\frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{f^* - \nu} + \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \right), \quad (1.76)$$

$$\frac{\partial z}{f_2^*} = \frac{1}{2} \frac{2 \left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right] \frac{-f^* (1+l_1) r_2'}{(f^* - \nu)^2}}{\sqrt{\left[ r_1 + (1+l_1) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + [f^* (l_1 + l_2 + l_1 l_2)]^2}} = -z \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{\nu s} \quad (1.77)$$

Так як при корекції за напругою  $\omega_1 = const$ , то

$$\Delta z_u = \frac{\partial z}{\partial f_2^*} \Delta f_{2u}^* = z \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{\nu s} \Delta \nu. \quad (1.78)$$

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 (1.76) і (1.77), а значення зміни абсолютної частоти ковзання за (1.71), отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta z_f &= z \left( \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{f_2^*} + \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \right) \Delta f^* - z \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{\nu s} (\Delta f^* - \Delta \nu) = \\ &= z \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{\nu s} \Delta \nu + z \left[ (1+l_1) \eta \cos^2 \varphi \left( \frac{1}{f^* - \nu} - \frac{1}{\nu s} \right) \Delta f^* + \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \Delta f^* \right] = \\ &= \Delta z_u - z \left[ \frac{(1+l_1) \eta \cos^2 \varphi}{(f^* - \nu)} - \frac{\sin^2 \varphi}{f^*} \right] \Delta f^* \end{aligned} \quad (1.79)$$

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

$$\Delta I_u = I \left( \frac{A \Delta f^*}{2 f_2^*} - \frac{\Delta z_u}{z} \right) \quad (1.80)$$

При частотній корекції зміна струму залежить тільки від зміни опору електродвигуна

$$\Delta i_f = \frac{\partial i}{\partial z} \Delta z_f = -i \frac{\Delta z_f}{z} = i \left\{ \left[ (1+l_1) \eta \cos^2 \varphi - s \cdot \sin^2 \varphi \right] \frac{\Delta f^*}{f_2^*} - \frac{\Delta z_u}{z} \right\} \quad (1.81)$$

Різниця зміни струму при корекції за напругою і частотою

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

Підставивши у цей вираз значення  $A$  за (1.55) і врахувавши (1.57), отримаємо

$$\Delta i_u - \Delta i_f = -i\Delta \frac{\Delta f^*}{2(f^* - \nu)} = -i \frac{K\Delta P_2^*}{2\Delta P_2^*} \quad (1.82)$$

Із (1.75) 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. 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.

## **1.8 Моделювання інтелектуальної системи управління потоковою лінією**

Система керування технологією брикетування твердого двокомпонентного біопалива 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 біопалива є:



- відхилення регульованої вологості суміші від заданого значення в сталому режимі має бути не більше 5 %;
- час регулювання не більше 7 с;
- 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:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (1.83)$$

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

$$Q_1(w - w_1) + Q_2(w - w_2) = 0 \quad (1.84)$$

$$w = (Q_1 w_1 + Q_2 w_2) / Q \quad (1.85)$$

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:

$$Q_1 = \frac{Q_3(w_3 - w_2)}{w_1 - w_2}; \quad Q_2 = \frac{Q_3(w_1 - w_3)}{w_1 - w_2} \quad (1.86)$$

Структурна схема системи керування вологістю та продуктивністю суміші представлена на рис. 1.20, де підсистема 1 реалізує залежність (1.85) – визначення кінцевої вологості, а підсистема 2, яка безпосередньо під'єднується до регуляторів, що визначають оптимальні значення  $Q_1$  та  $Q_2$ , – залежності (1.86).

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

$$G_1(s) = G_2(s) = \frac{a}{s+a} \quad (1.87)$$

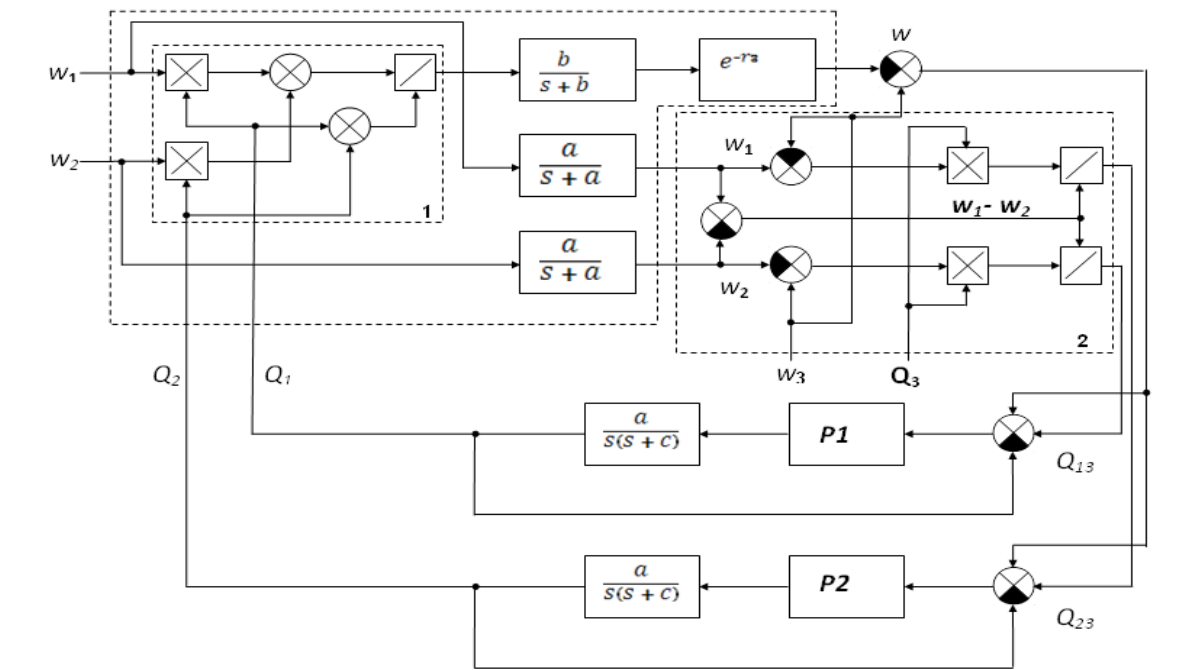


Рис. 1.20 Структурна схема системи керування зв'язним дозуванням компонентів біопалива

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

$$Q_{1p} = \frac{Q_3(w_3 - w_{2\epsilon})}{w_{1\epsilon} - w_{2\epsilon}}; \quad Q_{2p} = \frac{Q_3(w_{1\epsilon} - w_3)}{w_{1\epsilon} - w_{2\epsilon}} \quad (1.88)$$

$$w_p = (Q_{1p} w_{1\epsilon} + Q_{2p} w_{2\epsilon}) / Q_3 \quad (1.89)$$

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

$$G_0(s) = \frac{b}{s+b} e^{-r \cdot s} \quad (1.90)$$

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

$$G(s) = \frac{a}{s(s+c)} \quad (1.91)$$

Аналіз співвідношень продуктивностей дозаторів (1.88) для підтримання необхідної продуктивності на виході змішувача при заданих значеннях вологостей  $w_1$  та  $w_2$  дозволяють визначити коефіцієнт пропорційності  $k$ , оптимальне значення якого лежить в діапазоні від 1 до 5 (рис. 1.21).

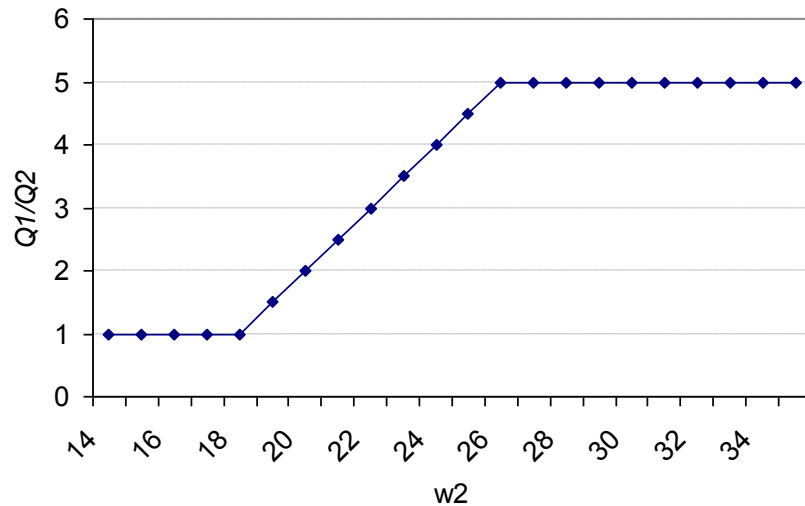


Рис. 1.21 Співвідношення продуктивностей для значень вологостей  $w_1 = 14 \%$ ;  
 $w_2 = 14 \dots 35 \%$

Дослідження процесу брикетування біопалива 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) [3; 8; 20].

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 [8].

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.

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 вологостей  $w_1, w_2$ ;

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

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

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

- вологість соломи,  $ws$  – 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 (рис. 1.22).

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 –  $check\_k\_d.dat$ ) (рис. 1.23).

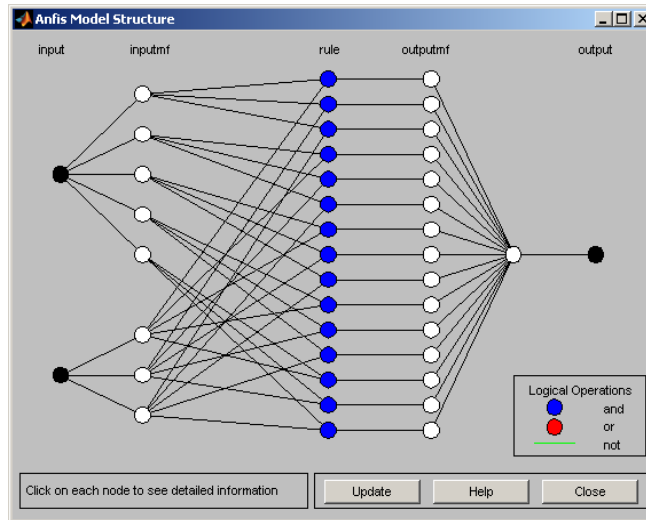


Рис. 1.22 Структура Anfis-моделі типу Sugeno для знаходження коефіцієнта масового співвідношення компонентів суміші  $k$

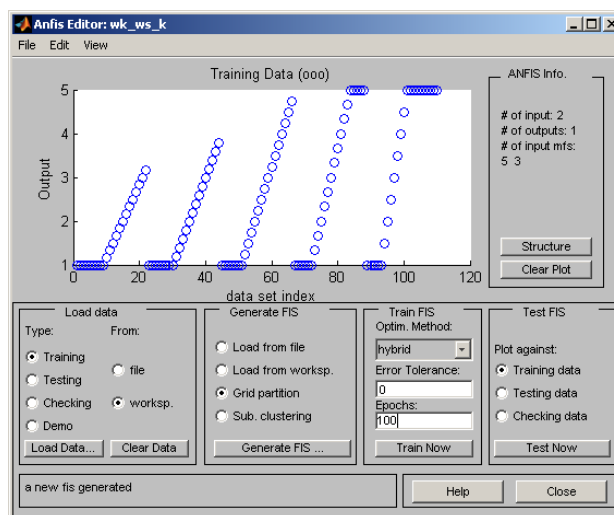


Рис. 1.23 Розподіл даних для навчання нечіткої системи НР

Для навчання експертної системи встановлено 100 епох 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 (рис. 1.24). Порівняння результатів моделювання з використанням класичних імітаційних схем та зі створеною гібридною мережею довели адекватність отриманих результатів.

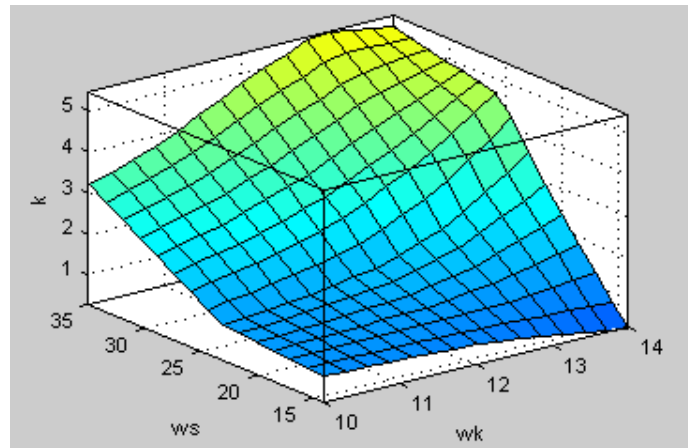


Рис. 1.24 Поверхня, що відтворюється навченою гібридною мережею

На основі поданих вище результатів досліджень у середовищі MATLAB розроблено імітаційну модель системи керування зв'язним дозуванням компонентів біопалива з використанням нейроконтролера для здійснення керування технологічним процесом (рис. 1.25).

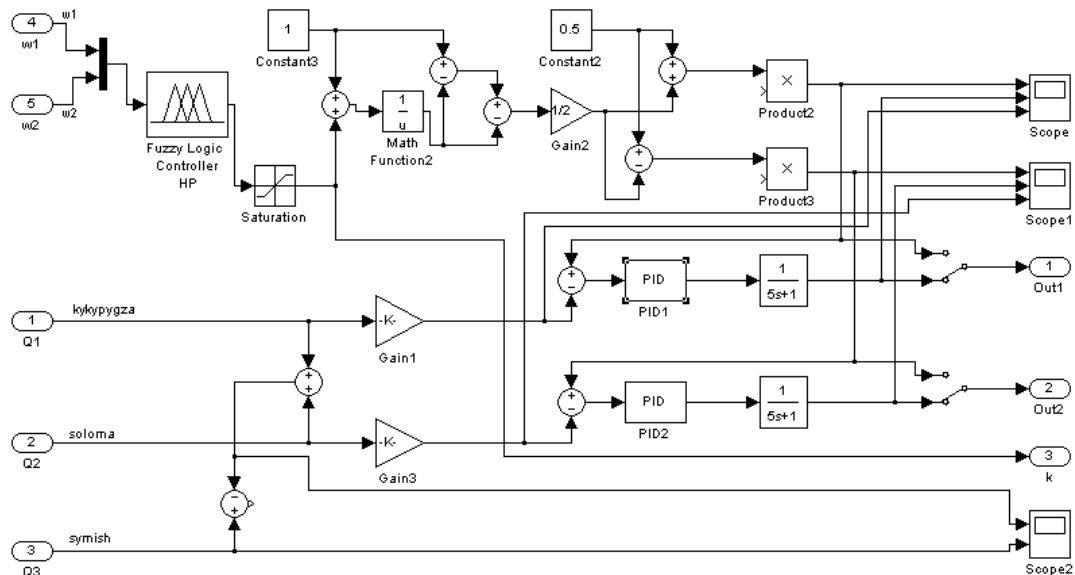


Рис. 1.25 Імітаційна модель системи керування зв'язним дозуванням компонентів біопалива

На рис. 1.26 представлено результати моделювання, які відображають дисперсії продуктивності дозаторів в процесі регулювання швидкості робочих

органів у встановленому діапазоні зміни  $k$  та вологість суміші  $w$  при фіксованій вологості подрібнених качанів кукурудзи  $w_1 = 12\%$  та зміні вологості подрібненої соломи  $w_2$  в межах  $14\text{--}35\%$  без корекції та з корекцією швидкості робочих органів дозаторів за поточними продуктивностями  $Q_1, Q_2, Q_3$ .

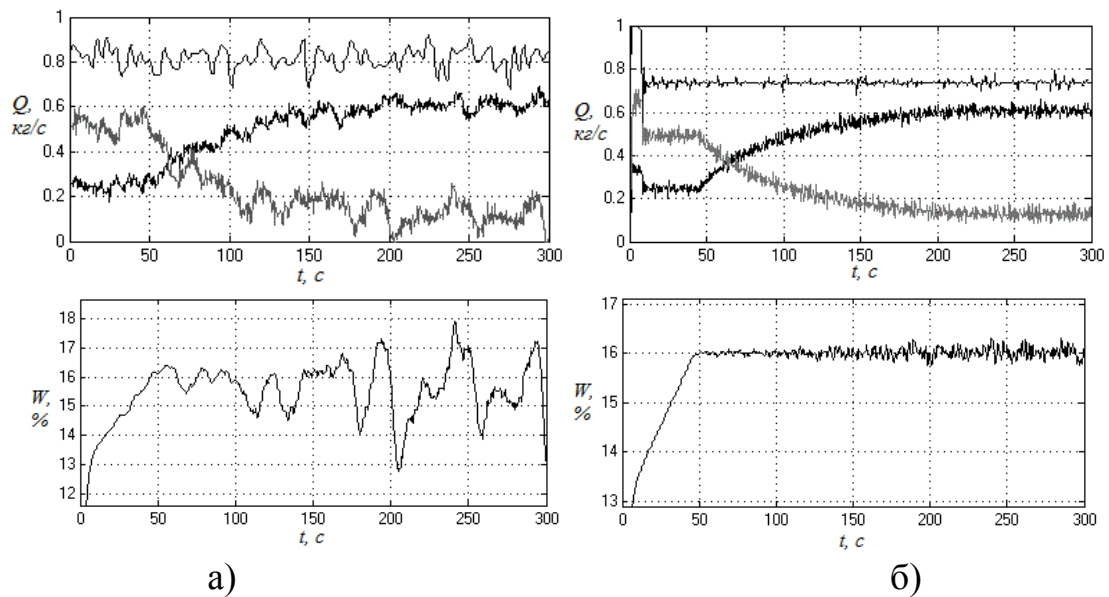


Рис. 1.26 Дисперсії продуктивностей дозаторів  $Q_1, Q_2, Q_3$  і вологості суміші  $w$ :

а) без корекції; б) з корекцією швидкостей робочих органів дозаторів

Таким чином, розроблено інтелектуальні алгоритми керування потоковою лінією виробництва біопалива, 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, вхідними 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  $10\text{ с}$ , перерегулювання не перевищує  $2,5\%$ ). Тому застосування нечітких регуляторів доцільно і перспективно.

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

### **1.9 Технологія приготування двокомпонентного несертифікованого біопалива**

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.

Розробка нового способу роботи технологічної потокової лінії належить до технології виробництва твердого біопалива з біологічної сировини однорічного циклу відновлення і може бути використана в галузі агропромислового та енергетичного машинобудування.

Відомий спосіб приготування твердого біопалива брикетуванням, який включає подачу рослинних відходів вологістю 4–12 % і фракційним складом 2–10 мм, їх пресування, наступне формування і ділення, при цьому брикети піддають додатковій термообробці, причому формування проводять безперервно і одночасно з термообробкою при температурі 150–250 °C 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 брикетів із вуглецевмісних матеріалів, який включає підготовку сировини в дисковому екструдері при температурі 70–100 °С, завантаження в брикетуючий пристрій, брикетування 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 брикетів.

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

Поставлена задача вирішується тим, що необхідна якість приготування брикетів 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 брикетів зображена на рис. 1.27 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.

Спосіб приготування твердого біопалива 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.

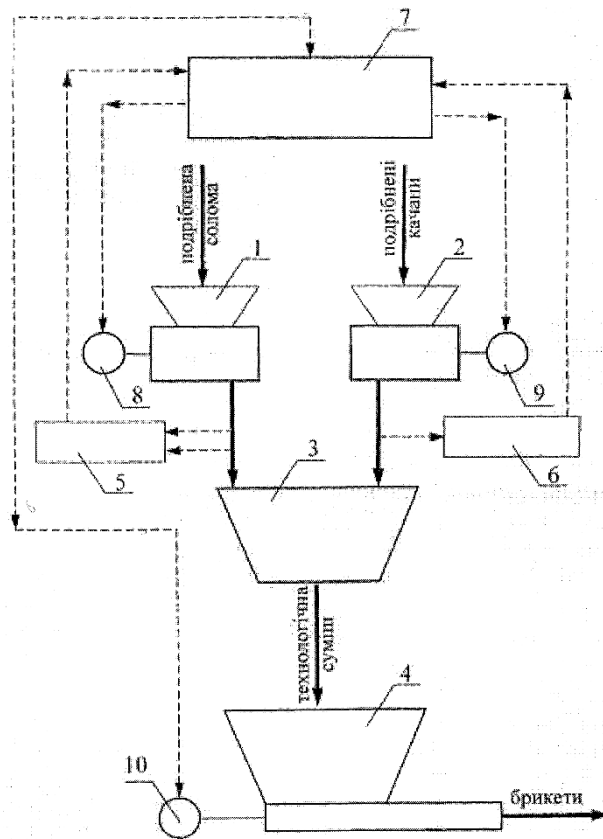


Рис. 1.27 Структура автоматизованої технологічної лінії виробництва двокомпонентного твердого біопалива

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 брикетів вологістю 14,5–15,5 %, теплотою згоряння 4400–4500 ккал/кг і щільністю 1000–1100 кг/м<sup>3</sup>.

Запропонована технологія приготування твердого біопалива 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 брикетах.

Одним із напрямів модернізації виробництва твердого біопалива 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 твердого біопалива 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 біопалива повинна аналізувати величини їх вологостей, 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 рис. 1.28.

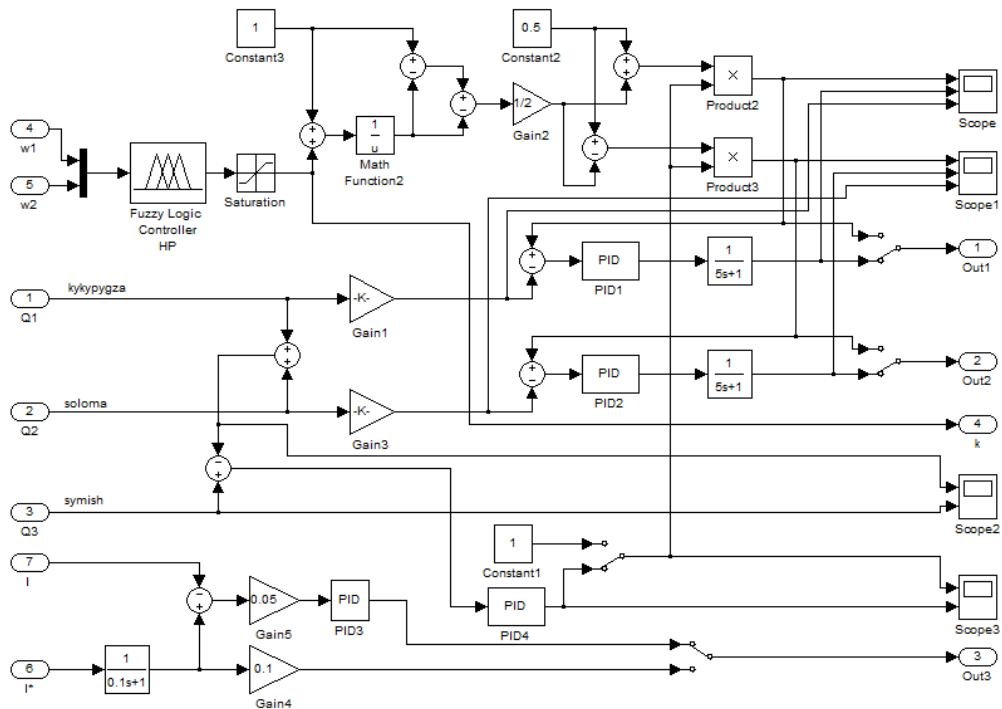


Рис. 1.28 Імітаційна схема контролера інтелектуальної системи керування потоковою лінією виробництва твердого біопалива

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 (рис. 1.29), що дає змогу

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.



Рис. 1.29 Загальний вигляд мікропроцесорного модуля САК

Також до складу системи керування потоковою лінією виробництва твердого біопалива повинні входити виконуючі механізми (частотно-регульовані електроприводи дозаторів) із можливістю плавного регулювання їх продуктивностей (рис. 1.30).

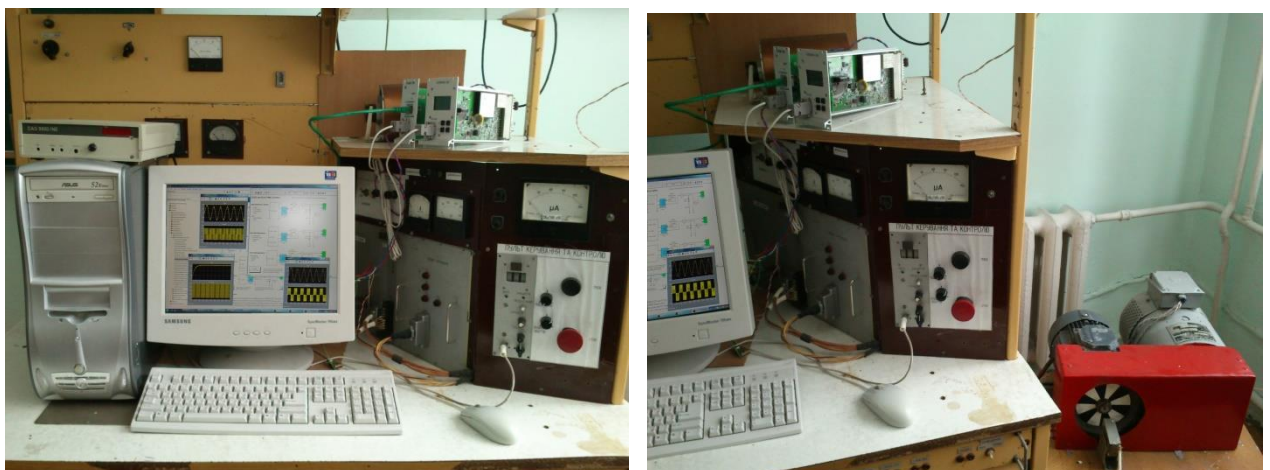


Рис. 1.30 Стенд для моделювання і дослідження інтелектуальної системи керування

Виходячи із вказаних вище вимог, розроблено структурну схему інтелектуальної мікропроцесорної системи керування потоковою технологічною лінією виробництва двокомпонентного твердого біопалива (рис. 1.31).

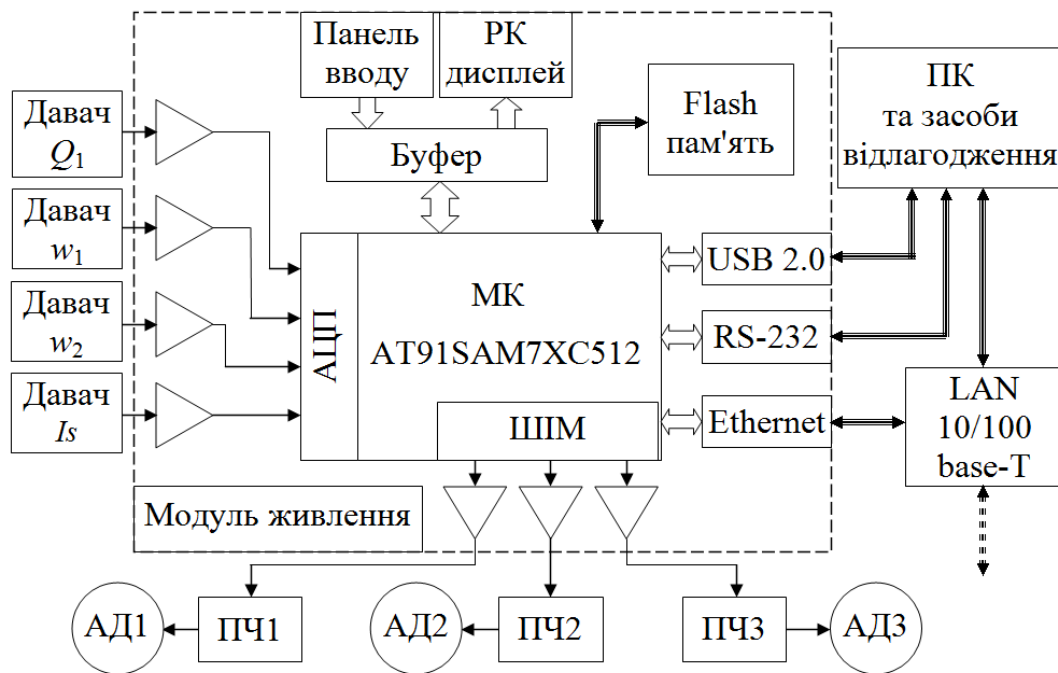


Рис. 1.31 Структурна схема інтелектуальної системи

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 канальний 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 фаззі-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.

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 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:

- MII / RMIІ 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 посилянь.

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 біопалива.

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 біопалива.

### **1.10 Організація логістичної діяльності підприємства з біоресурсною генерацією енергії**

Процес сушіння зернових культур є найбільш енергоємним технологічним процесом в агропромисловому комплексі. На це витрачається близько 1 млрд. м<sup>3</sup> природного газу, дизельного палива, використання яких призводить до різкого збільшення вартості продукції, яка є однією із основних експортних статей валютних надходжень в бюджет держави [27].

Дослідження свідчать, що заміна традиційного палива на відновлювальні біологічні відходи місцевого походження сприяє зменшенню споживання природного газу, створює практично нульове навантаження на довкілля [8], а також забезпечує створення додаткових робочих місць.

Наразі несертифіковане біопаливо та агробіопалива не набуло широкого застосування в енергетиці. В той же час потенціал для використання є досить великим, зокрема в аграрних країнах, таких як Україна. Розвиток нових, ефективних технологій і доступність до сучасного обладнання створює передумови для широкого використання сільськогосподарських відходів у майбутньому. Наявність обмеженої кількості власного викопного палива і національні плани з розвитку відновлюваної енергетики та скорочення викидів парникових газів вимагають залучення нових видів сировини і палива для виробництва енергії. Обмежений потенціал для збільшення використання деревного біопалива і значно вищий потенціал сільськогосподарських відходів відкривають нові можливості розвитку як для сектору енергетики, так і для сільського господарства. Аналіз структури споживання біомаси свідчить про необхідність більш широкого використання аграрних відходів та спеціальних енергетичних культур як палива [2].

Враховуючи той факт, що для стабільної роботи енергоефективного теплотехнічного комплексу необхідно забезпечити безперервне постачання несертифікованого біопалива місцевого походження в обсягах адекватних 2000-3000 тонн, одною з основних техніко-економічних задач є архітектура логістичних зусиль підприємства. Оскільки у нашому випадку ми маємо справу з проектом в галузі первинної генерації екологічно чистої енергії викликає необхідність в усесторонньому вивченні та організації раціональної логістичної діяльності підприємства, в конкретному випадку іде мова про виробничі потужності «Науково-виробничого об'єднання «Енергоощадні технології».

Алгоритм постачання несертифікованого палива на елеватор включає в себе наступні етапи: пошук доступного якісного біопалива, його транспортування від товаровиробника до споживача, довготривале та оперативне складування, завантаження в бункер-дозатор-накопичувач генератора-утилізатора. І якщо завантаження в більшості випадків є детермінованою складовою, то затрати на транспортування і вид палива є змінними факторами, які суттєво впливають на вартість теплової енергії і в кінцевому результаті на кінцеву політику підприємства. Тому вивчення логістичної архітектури постачання палива, шляхів

доставки, якісного складу транспортних засобів (витрати палива, вантажність) надає можливість менеджменту елеватора впливати на свою цінову політику і в результаті на успішність ведення бізнесу.

Основними завданнями логістичної інфраструктури підприємства є:

- складування несертифікованого біопалива;
- переміщення палива за допомогою транспортних і маніпуляційних засобів від місця складування до накопичувального бункера теплогенератора-утилізатора;
- подача палива з накопичувального бункера в операційний за допомогою транспортера.

Також, важливою складовою логістичної діяльності підприємства з біоресурсною генерацією енергії є транспортування несертифікованого палива з місць його отримання на підприємство. Щоб оцінити вартість транспортування необхідно проаналізувати функціональну спроможність транспортного засобу. Вартість транспортування елеваторних відходів залежить від місткості транспортного засобу та витрати палива. В залежності від виду палива (елеваторних відходів), а саме насипної щільності, корисне навантаження коливається від 5,5 т (27,5 % від тоннажу вантажного автомобіля) до 18,7 т (85 % від тоннажу вантажного автомобіля) (табл. 1.6). Від наведених вище параметрів буде залежати термін окупності теплогенератора-утилізатора.

*Таблиця 1.6*

**Порівняльна характеристика логістичних витрат транспортування різного виду несертифікованого палива**

Вид палива	теплотворна	щільність	вартість транспортування
	кВт×год/кг	кг/м <sup>3</sup>	грн/т км
Солома	4	50	1,82
Соняшник	4,7	83	1,10
Соя	4,7	78	1,17
Кукурудза	4	80	1,14
Пшениця	3,5	70	1,30

З метою вивчення впливу логістичної складової вартості біопалива на термін окупності (ТО) теплогенераційного комплексу нами проведено експериментальні дослідження та виконано математичне моделювання щодо виявлення пов'язаних із вказаними складовими закономірностей.

Зазвичай ТО показує, за який час можуть окупитися інвестиції протягом інвестиційного періоду і також враховує початкові капітальні вкладення. У такому випадку під прибутком розуміють чистий прибуток (тобто, після вирахування податку, плюс фінансові витрати, відсотки та амортизація). В ТО можна також включати період будівництва, який, відповідно, його подовжує.

Термін окупності розраховується за формулою:

$$TO = I / ЧП,$$

де  $I$  – величина інвестицій;

$ЧП$  – чистий річний прибуток.

У випадку реалізації проекту, спрямованого на біоресурсну диверсифікацію джерел теплової енергії для сушіння зернових, чистий прибуток можна розглядати як вартість заміщеного традиційного вуглеводневого палива (природного газу) в обсягах споживання сушильним комплексом з вирахуванням фінансових витрат на транспортування несертифікованого палива та його вартість, електроенергію, споживану теплогенераційним комплексом, амортизацію обладнання та заробітну плату обслуговуючому персоналу.

Тому, з огляду на викладене вище, термін окупності можна представити у такому вигляді:

$$TO = I / (B_z - B_{\text{біо}} - B_{\text{тр}} - B_{\text{ел}} - B_{\text{ам}} - ЗП)$$

де  $B_z$  – вартість спожитого природного газу;

$B_{\text{біо}}$  – вартість несертифікованого біопалива;

$B_{\text{тр}}$  – вартість транспортування біопалива;

$B_{\text{ел}}$  – вартість спожитої електроенергії теплогенераційним комплексом;

$B_{\text{ам}}$  – вартість амортизації;

ЗП – заробітна плата персоналу з обслуговування теплогенераційного комплексу.

На підставі даних, отриманих шляхом моделювання, побудовано тримірну графічну залежність, представлену на рис. 1.32.

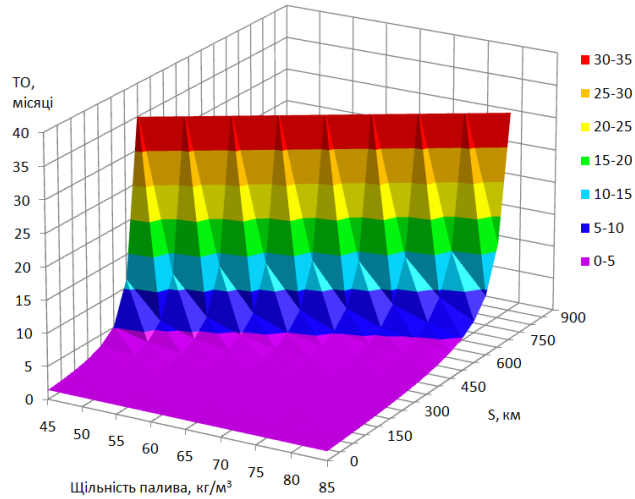


Рис. 1.32 Залежність терміну окупності проекту (ТО) від щільності палива та відстані його транспортування (S)

Як видно із графіка термін окупності теплогенераційного комплексу суттєво залежить від логістичної складової вартості біопалива (відстані транспортування), яка, в свою чергу, залежить від його теплотворної здатності та насипної щільності, тобто від виду палива (див. табл. 1.6).

Найкращі показники щодо корисного навантаження транспортного засобу, вартості доставки та швидкості зростання ціни, що доставляється, пов'язані з гранульованими залишками. Гранули з біомаси можна економічно доцільно та безпечно транспортувати на великі відстані. Це слід враховувати при розробці відповідних логістичних та бізнес-моделей.

Тоді загальна схема організації логістичної діяльності підприємства з біоресурсною генерацією енергії представлена на рисунку 1.33.

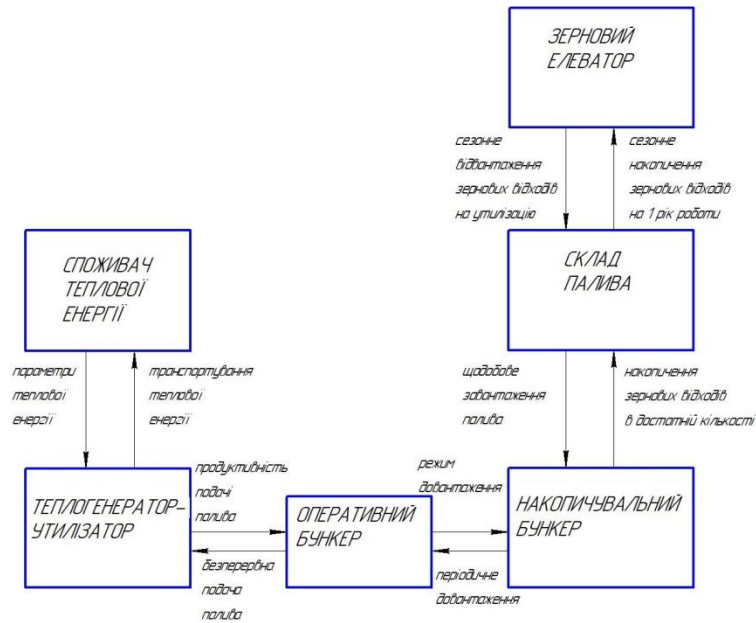


Рис. 1.33 Схема організації логістики біоресурсної сировини для генерації енергії

Цінністю очікуваних результатів цього дослідження є те, що в якості палива можна використовувати різну твердопаливну сировину: подрібнені відходи, паливо біологічного походження з річним циклом повного відновлення (качани кукурудзи, солома, лущиння соняшника, відходи промислових деревопереробних підприємств тощо).



## Висновки до розділу 1

Фактологічно обґрунтовано перспективність використання біоресурсної диверсифікації джерел теплової енергії в енергоємних технологіях. В якості первинного джерела енергії запропоновано використовувати несертифіковане паливо місцевого походження (солома, відходи насіннєвих та елеваторних виробництв) агротехнічно доступний об'єм якого в Україні складає 25...30 млн. тонн, що в енергетичному еквіваленті більше 10 млрд. м<sup>3</sup> природного газу. Обґрунтовано економічні та логістичні показники біопалива. На даний час відстань доставки біовідходів від виробника до місця генерації складає 50 км. При цьому ціна «зеленої» біоенергії в 7...10 разів нижча за вуглеводневу. Для довготривалого зберігання біовідходів запропоновано технологію її ущільнення шляхом брикетування. Проведено енергетичний аналіз ліній брикетування, отримані результати дозволили сформулювати основні вимоги до системи керування поточковими лініями та силового електроприводу з метою мінімізації затрат електроенергії на процес ущільнення біопалива. Враховуючи недетермінований характер параметрів сировини (фізико-механічні характеристики, зольність, вологість, нерівномірність подачі) розроблена інтелектуальна система керування процесом приготування двохкомпонентного біопалива, використання якого дозволяє значно покращити енергетичні та експлуатаційні характеристики генераторів-утилізаторів як вихрового так і піролізного типів.

Моделювання технологічного процесу потокової лінії виробництва твердого біопалива дозволило дослідити швидкісні режими роботи електроприводів дозаторів й 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 підпресувального 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 біопалива, 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 %.

Реалізація заангажованих наукових напрацювань дозволить витіснити з енергоємних технологій сушіння зерна, обігріву теплиць, виробництва цегли, бетону тощо мільярди м<sup>3</sup> природного газу і перенаправити вказаний об'єм у побутовий сектор. Це однозначно призведе до покращення енергобалансу України, зменшення економічного навантаження на довкілля, створення тисяч додаткових робочих місць, а основне – до енергетичної незалежності нашої держави.

### Список використаних джерел

1. Іскерський І. Енергоефективність виробництва двокомпонентного твердого біопалива. *Світлотехніка й електроенергетика : історія, проблеми, перспективи* : мат. VI Міжн. наук.-техн. конф., (ТНТУ ім. І. Пулюя, Тернопіль, Україна, 24–26 квітня 2012). Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. С. 96–98.
2. Іскерський І. С. Рациональне керування швидкісними режимами електропривода потокової лінії виробництва двокомпонентного твердого біопалива: дис. к. т. н : 05.09.03. Київ, 2013. 191 с.
3. Когенераційна термоелектрична автонномна система на базі біогенератора. Звіт про науково-дослідну роботу. № державної реєстрації 0115U000192. 2017. 129 с.
4. Корчемний М. О., Гаран Є. В., Федорейко В. С. Підвищення якості приготування кормосуміші шляхом зв'язного регулювання продуктивності дозаторів. *Вісник Тернопільського держ. техн. унів. ім. І. Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2002. Т. 7, Ч. 2. С. 50–54.
5. Корчемний М. О., Федорейко В. С., Сладик В. Й. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. *Проблеми і рішення : праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь : ТДТА, 2000. С. 8–18.
6. Корчемний М. О., Федорейко В. С., Щербань В. П. Енергозбереження в агропромисловому комплексі : монографія. Тернопіль : Підручники і посібники, 2001. 984 с.
7. Пат. 73475 Україна, МПК C10L 5/06 (2006. 01); C10L 5/08 (2006.01); C10L 5/44 (2006.01). Спосіб приготування багатокомпонентного твердого біопалива / В. С. Федорейко, І. С. Іскерський, Ю. Я. Петрикович ; Заявник і патентовласник : Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка, Тернопіль; заявл.12.03. 2012; опубл. 25.09. 2012; Бюл. № 18.
8. Пат. 68806 Україна, МПК H02P 1/26 (2006.01). Спосіб адаптивного частотного керування асинхронним двигуном / В. С. Федорейко, М. І. Рутило, Ю. Я. Петрикович, І. Б. Луцик, І. С. Іскерський ; Заявник і патентовласник: Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка, Тернопіль ; заявл. 06.10. 2011 ; опубл. 10.04. 2012 ; Бюл. № 7.

9. Федорейко В. С. Енергозберігаючі швидкісні режими технологій: дис. докт. т. наук: 05.09.03. Київ, 2004. 333 с.
10. Федорейко В. С. Енергетично ефективні режими роботи регульованого асинхронного електропривода. *Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2004. Т. 9. № 3. С. 83–90.
11. Федорейко В. С. Регулювання швидкісних режимів технологій як ефективний засіб енергозбереження. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь. 2004. Вип. 72. С. 123–129.
12. Федорейко В. С. Регульований асинхронний електропривод, як засіб енергозбереження. *Вісник Тернопільського державного технічного університету імені І. Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2002. Т. 7. № 3. С. 48–52.
13. Федорейко В. С. Енергооптимальні швидкісні режими пневмотранспорту в технологічних процесах виробництва борошна. *Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2003. Том 8. № 2. С. 58–61.
14. Федорейко В. С. Система електрообладнання дозуючого механізму потокової лінії приготування грубих кормів: дис. к. т. н. : 05.09.03. Київ, 1984. 103 с.
15. Федорейко В. С. Енергозберігаючі швидкісні режими технологій в агропромисловому комплексі. *Проблеми економії енергії* : зб. мат. IV Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2003. С. 122–123.
16. Федорейко В. С. Корекція швидкісних режимів в системах зв'язного дозування компонентів суміші. *Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту*. Тернопіль : ТДТУ, 2004. Т. 9. № 1. С. 52–57.
17. Федорейко В. С. Дворівнева мікропроцесорна система керування поточковими лініями комбікормового виробництва. *Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту. ім. І. Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2000. Т. 5. № 2. С. 50–54.
18. Федорейко В. С., Гаран Є. В. Енергоефективність приготування багатокомпонентних кормових сумішей. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь : ТДАТА, 2002. Вип. 5. С. 26–30.

19. Федорейко В. С., Іскерський І. С. Дослідження характеристик багатокomпонентного твердого біопалива. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітопіль : ТДАТУ, 2011. Т.4. Вип. 24. С. 80–88.

20. Федорейко В. С., Іскерський І. С. Енергоощадність в Україні: проблеми, задачі, рішення. *Наукові нотатки : міжвузівський зб.* Луцьк : ЛНТУ, 2009. Вип. 25. Ч. II. С. 290–292.

21. Федорейко В. С., Іскерський І. С. Регулювання продуктивності дозаторів у технології брикетування біомаси. *Енергетика і автоматика*. 2010. № 3 (5). 5 с. URL : [http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/eia/2010\\_3/10fvstbb.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/eia/2010_3/10fvstbb.pdf).

22. Федорейко В. С., Корчемний М. О., Гаран Є. В. Підвищення якості приготування кормосуміші шляхом зв'язного регулювання продуктивності дозаторів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2002. Том 7. Ч. 2. С. 50–54.

23. Федорейко В. С., Лучко М. Р., Іскерський І. С., Загородній Р. І. Підвищення ефективності біотвердопаливних систем генерації енергії: технічний та економічний аспекти. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НГУ, 2019. № 2. С. 94–100.

24. Федорейко В., Рутило М., Луцик І., Іскерський І. Енергоефективне керування електроприводом технологічних установок. *Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи*: мат. VI Міжн. наук.-техн. конф. (24-26 квітня 2012 р., Тернопільський нац. техн. унів. ім. Пулюя). Тернопіль, 2012. С.121–123.

25. Федорейко В., Петрикович Ю. Перспективи використання паливних елементів в технологічних лініях приготування твердого біопалива. *Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи* : мат. VI Міжн. наук.-техн. конф. (24–26 квітня 2012 р., Тернопільський нац. техн. унів. ім. Пулюя). Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. С. 119–121.

26. Федорейко В. С., Рутило М. І., Іскерський І. С. Система керування процесом виробництва двокомпонентного твердого біопалива. *Науковий вісник*

*Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП. Вип. 174. Ч. II, 2012. С. 93–98.

27. Федорейко В. С., Рутило М. І., Клендій П. Б., Луцик І. Б. та ін. Енергозберігаючі інтелектуальні системи керування потоковими лініями виробництва твердого біопалива. Науковий звіт. Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка. Тернопіль-Київ, 2015. Депонований в УкрІНТЕІ, державний обліковий № 0215 U007182. 124 с.

28. Fedoreiko V. S., Lutsyk I. B., Iskerskyi I. S., Zagorodnii R. I. Increase of energy efficiency of heat generator through batching components of burning. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro. 2014. no. 4, pp. 27–32. URL : <http://nv.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/960-2014/zmist-4-2014/elektrotekhnichni-kompleksi-ta-sistemi/2630>.

29. Fedoreiko V. S., Rutylo M. I., Iskerskyi I. S. Increase of energy efficiency of the electrotechnological complex for the production of solid biofuels using a neurocontroller. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. Dnipro. 2013. N 5, pp. 78–85. URL : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2013\\_5\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_5_15).

30. Fedoreiko V. S., Rutylo M. I., Iskerskyi I. S., Zagorodnii R. I. Optimization of heat production processes in the biofuel vortex combustion systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro. 2020. No 6, pp. 83–88. URL : <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/083>.

## РОЗДІЛ 2

### ВИХРОВІ ГЕНЕРАТОРИ-УТИЛІЗАТОРИ В ТЕХНОЛОГІЯХ СУШІННЯ ЗЕРНА

У зв'язку з енергетичною кризою і поступовим переходом на альтернативні джерела палива для сушіння, зерно стає не тільки гарантом продуктової безпеки країни, а й енергетичної. Тому завдання з впровадження сучасних енергоефективних технологій із малим терміном окупності у сфері альтернативної енергетики є пріоритетними завданнями нашої держави на сучасному етапі розвитку.

В таких умовах виникає необхідність у створенні нових автоматизованих інтелектуальних систем, які б змогли забезпечити енергоощадні режими роботи обладнання технологічних процесів обробки зерна при мінімальних затратах.

Однією з проблем, яка виникає у процесі сушіння зерна, є визначення часу необхідного для нагрівання зерна до певної максимально допустимої температури. У цьому випадку повинна враховуватись початкова вологість зерна та його температура. Від правильного вибору часу нагрівання залежить енергетична ефективність зерносушарки та якість висушеного зерна. Коли зерно недостатньо нагрівається – знижується ефективність процесу сушіння, а у випадку, коли нагрівання зерна триває занадто довго – знижується його якість, внаслідок перегрівання. Особливо небезпечне перегрівання для насінного зерна, оскільки в майбутньому це призведе до зниження урожайності.

Таким чином, підвищення енергоефективності та енергоощадності зерносушарок, в першу чергу, пов'язане із переходом до застосування теплогенераторів, що працюють на твердому біопаливі, а також удосконаленням сервісних можливостей систем контролю стану зерна в процесі сушіння та аналізу результатів вимірювань, які визначають функціональність і гнучкість автоматизованої системи.

Вітчизняними та закордонними вченими досліджено режими роботи джерел поновлювальної енергії в контексті систем розподіленої генерації теплової енергії та характер розподілу надходження енергії із них, розроблено системи

автономного теплопостачання і системи їх автоматизації та проаналізовано енергетичний потенціал відновлювального біопалива [3; 5]. У дослідженнях висвітлено загальні конструкційні особливості котлів що працюють на біопаливі та газовому паливі [3–5;19]. В якості палива тут можна використовувати подрібнену деревину, соломку, відходи елеваторних та насінневих виробництв. Розглянуто закордонний досвід у використанні біопалива як джерела теплової енергії для різних споживачів [25]. Але у зазначених вище установках відбувається розсіювання низькопотенційної теплової енергії, що негативно впливає на їхній ККД. Тому для розв'язання проблеми створення систем на базі теплогенераторів в наукових колах все частіше постає питання використання децентралізованої системи теплопостачання, шляхом застосування генераторів-утилізаторів, що працюють на твердому біопаливі.

Також розглянуто питання застосування регульованого електроприводу в теплогенераторах, що працюють на твердому паливі. Адже у даних системах використовується паливо з нестабільними параметрами вологості, щільності, теплотворної здатності, що зумовлює використання нейронечітких систем для керування процесом горіння палива. Запропоновано моделі систем керування процесом дозування компонентів паливної суміші у даних технологіях на базі штучного інтелекту [11; 13; 26].

## **2.1 Твердобіопаливні теплогенератори як ефективні джерела теплової енергії для технологій сушіння зерна. Принцип роботи та типи теплогенераторів**

Твердопаливні теплогенератори за принципом роботи поділяються на: газогенератори, що функціонують в режимі піролізу (розкладання органічних природних сполук за нестачі кисню з отриманням генераторного газу і наступним його спалюванням), твердопаливні теплогенератори з вихровим горінням палива (процес горіння відбувається в топках циклонного типу, спалюються в основному легкі види палива: соняшникове лушпиння, лушпиння від насіння гречки, рису, вівса і т.д.) і на традиційні котли з шаровим спалюванням палива з примусовою і природною подачею повітря. Залежно від подачі повітря, зверху чи знизу,



твердопаливні теплогенератори цього типу поділяються на котли верхнього та нижнього горіння відповідно. Як паливо використовуються дрова, деревна тріска, кускове паливо (торф, брикети з тирси). Горіння може здійснюватися в теплогенераторах з нижнім способом горіння також за рахунок природної тяги. Котли з рухомими колосниками дозволяють спалювати дрібнодисперсні палива (тирса, пелети з тирси, торфу, зерно і т.д.). Подача палива, видалення золи можуть здійснюватись у ручному або автоматичному режимі [5; 19].

Паливом для біотеплогенераторів можуть бути місцеві енергоресурси, наприклад відходи деревообробної промисловості, лісгоспів, аграрних підприємств, а також енергетичні корисні копалини, що є альтернативою природному газу та електроенергії. Безпосередній перелік такого палива: дрова, тріска, тирса, лушпиння, пелети, солома, зерно, торф, буре, кам'яне вугілля і т.д.

Перспективним типом теплогенератора на твердому біопаливі є піролізний. Його принцип роботи полягає в анаеробному (в умовах браку кисню) спалюванні твердого палива (деревини). У наслідку чого утворюється леткий компонент, так званий деревний або піролізний газ і залишається тверда частина – кокс. Процес піролізу палива є екзотермічним, тобто йде з виділенням тепла, що забезпечує додаткове прогрівання для подальшого спалювання газу і просушування деревини. У результаті на виході ми отримуємо практично повністю окислені продукти горіння – вуглекислий газ і воду.

Основними перевагами піролізних теплогенераторів є:

- мінімальний вміст шкідливих домішок в продуктах згоряння, а також у наслідок практично повного згоряння палива утворюється мінімальна кількість золи і сажі;

- потреба в очищенні виникає набагато рідше ніж у твердопаливних теплогенераторів інших типів;

- простота управління процесом піролізу. Діапазон регулювання потужності газогенераторного котла практично ідентичний діапазонам газових і рідкопаливних котлів і лежить в діапазоні від 30 до 100 %.

Особливо актуальне застосування твердопаливних котлів там, де немає можливості встановити газові, електричні та інші види такого обладнання.

Слід зазначити, що у більшості твердопаливних теплогенераторів є один недолік – це потреба в постійному контролі за горінням і часте завантаження паливних матеріалів. Однак на сьогоднішній день існують теплогенератори тривалого горіння, які не вимагають такого частого завантаження палива. Ця їх властивість забезпечується певними системами, які регулюють випромінюване тепло і знижують інтенсивність горіння палива.

Аналізуючи існуючі установки для спалювання твердого біопалива, в залежності від основних та додаткових видів палива, умовно їх можна розділити на п'ять груп [5; 26]:

- 1) теплогенератори, які працюють на дровах та паливних брикетах (брикети з тирси, лушпиння насіння, костриці льону, торфу та ін.);
- 2) теплогенератори, що працюють на сипких матеріалах (кусковій деревині, відходах деревообробки, лушпиння насіння, стеблах кукурудзи, торфові);
- 3) газогенераторні установки, що працюють на кусковій деревині і відходах деревообробки підвищеної вологості (до 60 %);
- 4) теплогенератори-автомати, які працюють на паливних гранулах, зерні, кукурудзі;
- 5) теплогенератори, що працюють на соломі.

Для об'єктивної оцінки ефективності використання побутових теплогенераторів визначено три основні питомі показники [5]:

$$\text{питому витрату палива: } q = \frac{Q}{P \cdot \eta}, \text{ кг/(кВт} \cdot \text{год);} \quad (2.1)$$

$$\text{питому масу: } m = \frac{M}{P \cdot \eta}, \text{ кг/кВт;} \quad (2.2)$$

$$\text{питому вартість: } u = \frac{C}{P \cdot \eta}, \text{ грн./кВт;} \quad (2.3)$$

де  $P$  – паливна потужність теплогенераторів, кВт;

$Q$  – витрата палива, кг/год;

$C$  – вартість, грн.;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

Визначені показники енергоефективності та вихідні технічні характеристики за вищевказаними групами теплогенераторів подано у таблицях 2.1–2.5. Аналіз технічних характеристик котлів фірми VIADRUS (Чехія) і BUDERUS (Німеччина) свідчить, що вони мають, порівняно, вищі показники питомої витрати палива ( $q = 0,366...0,379$  кг/(кВт·год), ніж всі інші ( $q = 0,240...0,343$  кг/(кВт·год)). Це пояснюється тим, що в теплогенераторах вищенаведених фірм використано спосіб звичайного спалювання палива, а в інших теплогенераторах – метод піролізного горіння. Поряд з цим, піролізні теплогенератори мають більшу питому масу ( $m = 11,3...32,7$  кг/кВт) та значно вищу питому вартість ( $\zeta = 403...1020$  грн/кВт). Для звичайних теплогенераторів ці показники становлять:  $m = 8,7...14,3$  кг/кВт та  $\zeta = 270...422$  грн/кВт відповідно. Дані факти можна пояснити тим, що піролізні теплогенератори мають більшу кількість робочих камер (камери газифікації палива та спалювання газів) чим забезпечують більш складний, але значно ефективніший спосіб спалювання [3; 5].

Таблиця 2.1

Характеристика котлів, які працюють на дровах та паливних брикетах

Фірма (країна виробник)	Марка котла	Потужність N, кВт	Витрати палива Q, кг/год	ККД $\eta$ , %	Маса M, кг	Вартість $\zeta$ , грн	$q$ , кг/(кВт*год)	$m$ , кг/кВт	$\zeta$ , грн/кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОАО Могилів- Поділь- ський МБЗ (Україна)	Р6-КОВП	10- 25	3-6	85	240	11280	0.28	11.3	530
Антол (Україна)	Антол 25	22	5.5	92	410	13000	0.27	20.3	642
	Антол 32	30	7	92	440	15000	0.25	15.9	543
	Антол 40	42	9	88	480	17000	0.25	13.6	482
	Антол 60	62	13	88	670	28000	0.24	12.7	530
KALVIS (Литва)	К-10	25	6.6	82	395	12839	0.32	19.3	626
	К-11	32	9	82	410	130221	0.34	15.6	503
АТМОС	DC18S	20	4.5	89	273	11357	0.25	15.3	638

(Чехія)	DC25G	25	5.6	89	408	22676	0.25	18.3	1019
BUDERUS (Німеччина)	LOGANO S1 11 32D	28	8.4	82	240	7855	0.37	10.5	342
	LOGANO S1 11 45D	45	14	82	320	9979	0.38	8.7	270
VIADRUS (Чехія)	U22D/4	23	6.8	78	257	7572	0.38	14.3	422
	U22D/5	29	8.4	78	295	8374	0.37	13	370
	U22D/6	35	10.1	78	333	9160	0.37	12.2	335
DAKON (Чехія)	KP PYRO 18	21	5.7	85	310	13132	0.32	17.7	735
	KP PYRO 24	25	7	85	350	13775	0.33	16.5	648
	KP PYRO 32	40	10	85	410	15476	0.29	12.1	455
HERLT (Німеччина)	HV 35	35	9	93	740		0.28	22.7	
	HV 65	65	16.6	93	1350		0.27	22.3	
LOPPER (Німеччина)	DRAHON 25	28	8	88	805		0.32	32.7	
	DRAGON 70	69	14.6	88	1360		0.24	22.4	
VERNER (Чехія)	VERNER V25	25	7.5	91	445	12225	0.33	19.6	537
	VERNER V45	45	13.5	91	630	16500	0.33	15.4	402

Таблиця 2.2

Характеристики котлів, що працюють на сипких матеріалах  
(кусковій деревині, відходах деревообробки, лушпиння насіння, стеблах  
кукурудзи, торфові)

Фірма (країна виробник)	Марка котла	Потужність N, кВт	Витрати палива Q, кг/год	ККД η, %	Маса M, кг	Вартість Ц, грн	$\frac{Q}{\text{кг}/(\text{кВт} \cdot \text{го д})}$	m, кг/кВт	ц, грн/кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KALVIS (Литва)	K-100M	100	28	88	800	41425	0.32	9.1	477.3
	K-140M	140	39	88	900	48884	0.32	7.3	405.8
ЗАО	KBm(a)-	300	85	80	2920	116750	0.35	12.2	486.5

«Житомир-ремхарчмаш» ТД КРИГЕР (Україна)	0,3 КВм(а)- 0,5	500	185	80	5900	159020	0.46	14.75	397.55
ООО «Теплосфера» (Україна)	КРГ-40 КРГ- 100	40 100	13 32	82 82	700 1600	22160 39600	0.4 0.39	21.34 19.5	675.6 482.9
HEIZOMAT (Німеччина)	HSK- RA-30 HSK- RA-50	30 50	9 15	96 96	770 860		0.31 0.31	26.7 17.9	

Таблиця 2.3

Характеристики газогенеруючих установок, що працюють на кусковій деревині та відходах деревообробки підвищеної вологості (до 60 %)

Фірма (країна виробник)	Марка котла	Потужність N, кВт	Витрати палива Q, кг/год	ККД η, %	Маса M, кг	Вартість Ц, грн	q, кг/(кВт*год)	m, кг/кВт	ц, грн/кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gefest- Profi (Україна) Серія S 30 - 1150 кВт	АГГУ-60	60	26	82	1300	59300	0,51	25,5	1162
	АГГУ-120	120	50	85	1950	70380	0,49	19,1	690
	АГГУ-250	250	104	85	3000	113320	0,49	14,1	533,3
Ідмар (Україна) КВ-ЖСН 150-1100 кВт	КСДО-125	125	54	82	3000	65985	0,53	29,3	643,8
	КСДО-250	250	107	82	4000	81872	0,52	19,5	399,4
	КСДО-500	500	214	82	6000	125067	0,52	14,6	305
Thermo Alliance (Україна) Vulcan PROM 150-1000 кВт	КВу-0,07	70	31	83	1785	47500	0,53	30,7	817,6
	КВу-0,1	100	44	83	1885	50500	0,53	22,7	608,4
	КВу-0,25	250	108	83	2890	101160	0,52	13,9	487,5

Таблиця 2.4

Характеристики котлів-автоматів, які працюють на паливних гранулах, зерні,  
кукурудзі

Фірма (країна виробник)	Марка котла	Потужність N, кВт	Витрати палива Q, кг/год	ККД η, %	Маса M, кг	Вартість Ц, грн	q, кг/(кВт*год)	m, кг/кВт	ц, грн/кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KALVIS (Литва)	K30MPP	34	6.5	80	690	27430	0.24	25.4	1008
	K50MPP	50	9.5	80	800	32960	0.24	20	824
ОАО Моги-лів- Поділь- ський МБЗ (Україна)	P6-КОВА- 25	7- 25	2-8 3-15	85 90	380 410	19200 22000	0.38 0.33	17.9 9.11	903.5 488.9
	P6-КОВА- 50	18- 50							
АТМОS (Чехія)	D20P	22	6.0	93	305	27854	0.29	14.9	1361
	D30P	30	7.0	93	370	29640	0.25	13.3	1062
ОРОP (Чехія)	BioComfort 16	16 24	5 6.5	93 93	160 200	28980 30560	0.33 0.29	10.7 8.9	1941 1364
	BioComfort 24								
FACI (Італія)	ECO 2	33	7	80	510	46000	0.27	19.3	1742
	ECO 3	42	8.5	80	590	48000	0.25	17.6	1428
	ECO 4	56	11.5	80	680	50000	0.26	15.1	1116

## Характеристики котлів, які працюють на соломі

Фірма (країна вироб-ник)	Марка котла	Потужність N, кВт	Витрати палива Q, кг/год	ККД η, %	Маса M, кг	Вартість Ц, грн	q, кг/(кВт*год)	m, кг/кВт	ц, грн/кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gizex (Польща)	БІО-PAL 40	40	11	82	830		0.34	25.3	
	БІО-PAL 100	100	27	82	2095		0.33	25.5	
	БІО-PAL 150	150	42	82	2560		0.34	20.8	
MetalERG (Польща)	RM 5	40	12	82	1500	26855	0.37	45.7	818.8
	RM 20	70	21	82	1800	36387	0.37	31.4	633.9
	RM 30	100	30	82	2200	55350	0.37	26.8	675
	RM 40P	180	55	82	4000	99425	0.37	27.1	673.6
ECO-KOŚIOL (Польща)	ECO-KOŚIOL 35	35	10	83	1300	14350	0.34	44.8	493.9
	ECO-KOŚIOL 45	45	12	83	1700	16400	0.32	45.5	439.1
	ECO-KOŚIOL 100	110	27	83	2300	28700	0.3	25.2	314.3
	ECO-KOŚIOL 140	140	36	83	3200	41000	0.31	27.5	352.8
HERLT (Німеч- чина)	HSV 85	85	22	86	7200		0.3	98.5	
	HSV 200	200	50	86	10800		0.29	62.8	

Аналізуючи характеристики теплогенераторів, що працюють на сипких матеріалах з відходів переробки кускової деревини, поданих у таблиці 2.2, можна зазначити, що вони, порівняно з вищенаведеними теплогенераторами, характеризуються дещо вищими значеннями питомої витрати палива і ширшими її межами ( $q = 0,313 \dots 0,463$  кг/(кВт·год)). Даний факт пояснюється використанням більш вологих та різних за теплотворною здатністю видів палива. Теплогенератори фірми HEIZOMAT (Німеччина) мають найнижче значення  $q$ , але найбільше значення  $m$  у своїй групі ( $m = 7,3 \dots 26,7$  кг/кВт). Завдяки

конструкційним перевагам та ефективнішій організації процесу горіння палива ККД теплогенератора становить 96 % [5; 26].

Інша ситуація із газогенераторними установками, які, порівняно з усіма іншими групами теплогенераторів (таблиця 2.3), мають найбільші значення питомих витрат палива ( $q = 0,490...0,534$  кг/(кВт·год)) через технологічну можливість спалювання палива з найвищою вологістю (до 60 %), тобто палива із найнижчою теплотворною здатністю. У більшості випадків, газогенераторні установки для спалювання вологих матеріалів складаються із трьох фізично відокремлених об'єктів: бункера, газогенератора та теплогенератора для спалювання газів. Така конструкція безпосередньо впливає на показник питомої маси  $m$ , тому в цій групі він теж один із найвищих ( $m = 14...31$  кг/кВт) [5; 26].

Аналіз характеристик теплогенераторів-автоматів (таблиця 2.4) свідчить, що питома витрата палива у них має найменше значення ( $q = 0,228...0,376$  кг/(кВт·год)) з усіх приведених груп, із-за високого ККД теплогенераторів ( $\eta = 80...94$  %) та, порівняно, найбільших значень теплотворної здатності використовуваних палив (для паливних гранул вологістю 8-10 % їх теплотворна здатність становить 18...20 МДж/кг, тоді як для тріски дерев і опилок вологістю 14-17 % – 10,5...12,0 МДж/кг, а для тюкованої соломи вологістю 14-17 % – ~14,2 МДж/кг [26].

Значення параметрів, наведених в табл. 2.5, показують, що для теплогенераторів, які працюють на соломі, питома витрата палива ( $q = 0,290...0,406$  кг/(кВт·год)) та питома вартість обладнання ( $\mu = 315...1496$  грн/кВт) мають приблизно середні значення серед усіх груп. Разом з тим, питома маса для даної групи теплогенераторів має максимальне значення (до 98,5 кг/кВт) серед усіх представлених груп із-за великих об'ємів камер для завантаження та спалювання рулонів чи тюків соломи. Мінімальне значення питомої витрати палива ( $q = 0,29...0,30$  кг/(кВт·год)), та максимальне значення питомої маси ( $m = 62,8...98,5$  кг/кВт) в даній групі мають теплогенератори німецької фірми HERLT. Останні факти пояснюються наявністю в цих теплогенераторах двох робочих камер з масивною теплоізоляцією, в яких, на відміну від інших теплогенераторів цієї групи, проходить ефективніше піролізне

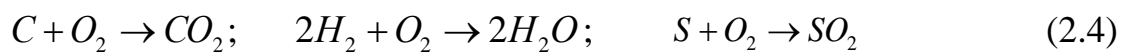


спалювання соломи, що сприяє підвищенню ККД теплогенератора до 86 % [5; 26].

Подана вище методика визначення питомих показників теплогенераторів за їхніми технічними характеристиками дає змогу об'єктивно оцінити ефективність роботи устаткування для отримання теплової енергії в залежності від використання того чи іншого наявного виду твердого біопалива.

## 2.2 Аналіз чинників ефективного горіння палива в біотеплогенераторі

Для ефективного горіння палива потрібні певні умови. У залежності від цих умов можливе повне або часткове окислення горючих частин. При повному окисленні, продукти, що утворилися не можуть більше з'єднуватися з окислювачем і виділяють теплоту. Продуктами повного окислення горючих елементів є оксиди вуглецю ( $CO_2$ ), водню ( $H_2O$ ) і сірки ( $SO_2$  і в меншій мірі  $SO_3$ ). Реакціями повного окислення горючих елементів є наступні [5] :



Причинами неповного згорання палива є те, що не всі горючі елементи окислюються. Крім того, при окисленні горючих елементів утворюються продукти, які б могли брати участь в процесі горіння. При неповному окисленні горючих елементів можуть утворитися з'єднання:



Неповне окислення горючих елементів пов'язано з недостатньою подачею окислювача, невідповідною подачею палива і повітря за часом, недостатнім перемішуванням палива і повітря. Найбільша кількість теплоти виділяється за умови повного окислення горючих елементів [2].

Витрати палива на горіння визначають за повним згоранням палива в топці теплогенератора. Мінімальну кількість повітря  $V^0$ , достатню для повного згорання одиниці маси палива, називають теоретично необхідною кількістю повітря.

Величина  $V^0$  і кількісне співвідношення між масами або об'ємами взаємореагуючих речовин визначають за реакціями окислення горючих елементів [5]:

$$V_{O_2}^H = 5,55 \frac{H}{100} \quad (2.6)$$

$$V_{O_2}^S = 0,7 \frac{S}{100} = 0,375 \cdot 1,866 \frac{S}{100} \quad (2.7)$$

$$V_{H_2O}^H = 11,1 \frac{H}{100} \quad (2.8)$$

$$V_{SO_2}^S = 0,7 \frac{S}{100} \quad (2.9)$$

З урахуванням вказаних співвідношень об'ємного вмісту кисню у повітрі і паливі, отримуємо кількість повітря, теоретично необхідного для повного окислення горючих елементів:

$$V^0 = 0,0476 \left[ 1,866(C + 0,375S) + 5,55H - \frac{O}{\rho_{O_2}} \right] \quad (2.10)$$

або

$$V^0 = 0,0889(C + 0,375S) + 0,265H - 0,0333O \quad (2.11)$$

де  $C$ ,  $S$ ,  $H$ ,  $O$  – масові частки (%) горючих елементів і кисню у даному паливі.

Переважно  $V^0$  розраховують для робочої маси палива. Для запобігання неповного згорання палива у топку подають кількість повітря  $V_\epsilon$  більшу від теоретично необхідної [2; 5].

Під час проектування теплогенераторів і аналізу їх роботи користуються коефіцієнтом надлишку повітря  $a$ , який дорівнює відношенню фактично поданої кількості повітря до теоретично необхідної:

$$\alpha = V_g / V^0. \quad (2.12)$$

Крім того, також враховують значення вищої та нижчої теплоти згоряння палива, які залежать від виду біомаси та її вологості (табл. 2.6). Вищою теплотою згоряння робочого палива називають кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні 1 кг палива, з урахуванням того, що водяна пара, яка утворюється при згорянні, конденсується. Нижчою теплотою згоряння робочого палива називають кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні 1 кг палива, за винятком тепла, витраченого на випаровування вологи, яка міститься в паливі, та вологи, яка утворюється від згоряння водню [5].

Таблиця 2.6

### Характеристика різних видів біомаси як палива

Вид БМ	Вологість*, % (мас.)	Теплота згоряння, кВт·год/кг		Об'ємна щільність *, кг/м <sup>3</sup>	Енергетична щільність, кВт·год/м <sup>3</sup>
		вища**	нижча*		
* Розрахунок за масою вологої сировини.      ** Розрахунок за масою сухої сировини.					
Деревні гранули	10,0	5,5	4,6	600	2756
Деревна тріска твердих порід	50,0	5,5	2,2	450	1009
	30,0	5,5	3,4	320	1094
Деревна тріска м'яких порід	50,0	5,5	2,2	350	785
	30,0	5,5	3,4	250	855
Кора	50,0	5,6	2,3	320	727
Деревна тирса	50,0	5,5	2,2	240	538

На теплотворну здатність палива  $Q$  також впливає вологість деревини  $W$  (рис. 2.1) [5].

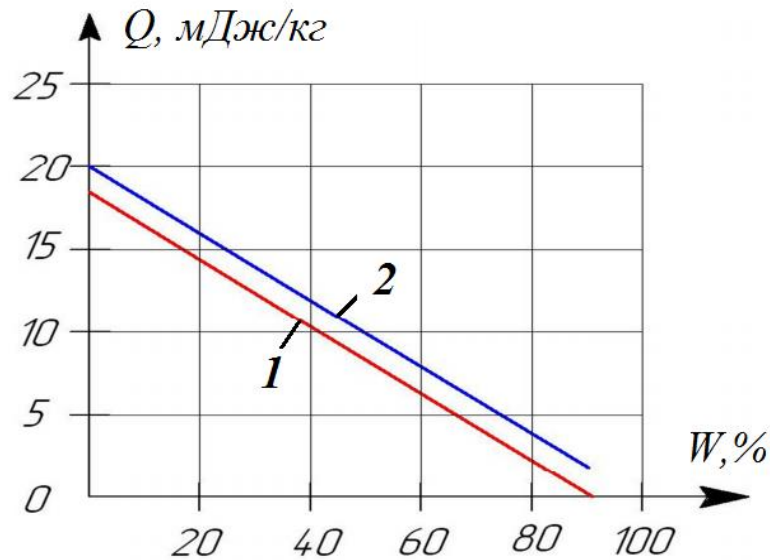


Рис. 2.1 Залежність теплоти згоряння від вологості палива:

1 – нижча теплота згоряння; 2 – вища теплота згоряння

Рациональне протікання процесу горіння вимагає сталості його стехіометрії, тобто забезпечення відповідного надлишку кисню (повітря), що обумовлюється стехіометричним коефіцієнтом  $a$ . Для ефективного протікання процесу горіння твердого біопалива у природному вигляді величина  $a$  повинна знаходитись в межах 1,4 – 1,6 (рис. 2.2).

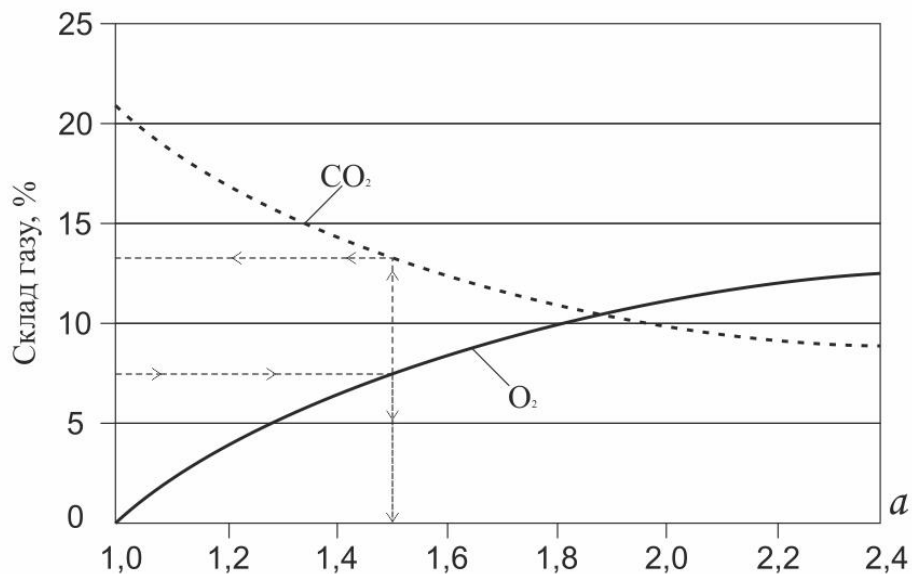


Рис. 2.2 Рациональний коефіцієнт надлишку повітря  $a$  при спалюванні деревини (ефективне спалювання)

Залежно від виду палива та заповнення камери згоряння дійсний коефіцієнт надлишку повітря складає 1,5–2,0. Найвищі величини  $a$  (навіть  $>2,0$ ) можливі при спалюванні полін, середні (1,4–1,6) відносяться до зрубків деревини, а найнижчі (1,2–1,3) необхідні для пилу, тирси та брикетів (гранул). Надлишкова величина коефіцієнту  $a$  підвищує температуру в камері спалювання і може викликати плавлення попелу [3].

Внаслідок недосконалої організації процесів горіння забезпечити повне спалювання всього палива, яке вводиться в топку або камеру згоряння, не вдається.

Деяка частина палива в топці провалюється крізь колосникову решітку, частина найбільш дрібного палива відноситься в газоходи котельного агрегата продуктами згоряння, які швидко рухаються; незгорілі частки палива, оточені золою і шлаком, видаляються з топки разом з вогнищевими залишками.

Ці втрати від так званого механічного недопалу складають повну втрату від механічної неповноти горіння, яка позначається  $q_M$ . Необхідна кількість повітря з урахуванням механічного недопалу становить,  $\text{м}^3/\text{кг}$ :

$$V_0 = \left(1 - \frac{q_M}{100}\right) V_0' \quad (2.13)$$

У правильно спроектованих камерах згоряння і топках за нормальної їх роботи хімічний недопал зводиться майже до нуля, а в димових газах міститься лише невелика кількість CO. При незадовільній їх роботі в димових газах можуть з'явитися також  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , сажистий вуглець та інші продукти неповного горіння [26].

Сучасні системи керування котлів та теплогенераторів дозволяють організувати роботу цього обладнання повністю в автоматичному режимі. Використання нових технологій забезпечує контроль роботи з максимальною точністю, і, у випадку порушень теплового режиму, агрегат відключається автоматично.

Важливим завданням є, в першу чергу й те, щоб пристрої електронного управління дозволяли не тільки налаштовувати температуру сушіння і тривалість роботи такого обладнання, а й контролювали всі необхідні процеси

біотеплогенератора: запуск пальника, включення сервоприводів і насосів, подачу палива і розподіл тепла. Це значно спростить експлуатацію обладнання і дозволить запобігти поломці обладнання.

Таким чином, система автоматичного керування (САК) теплогенератора повинна забезпечувати виконання таких функцій:

- визначення тривалості сушки, необхідної потужності котла та напору вентилятора в залежності від виду зерна, його вологості а також від вологості та температури навколишнього середовища;
- регулювання режимів роботи теплогенератора: швидкісних режимів електроприводів шнека-дозатора біопалива і вентилятора;
- плавне регулювання продуктивності тепла;
- контроль роботи вентилятора;
- сигналізація про порушення заданих параметрів;
- аварійне відключення.

Система керування повинна контролювати включення і виключення сушки, вентиляторів, теплогенератора і давати можливість програмувати зміни режимів роботи через певний проміжок часу, що дозволяє значно знизити витрати палива і електроенергії.

Оскільки основні процеси, які відбуваються у процесі сушіння зерна і при згорянні біопалива у теплогенераторі є недетермінованими і нечітко визначеними, тому для реалізації окремих модулів імітаційної моделі доцільно застосовувати апарат адаптивних нейро-нечітких систем виводу.

Побудова системи адаптивного керування на основі апарату нечіткої логіки дозволяє спростити елементи структури системи, наділяючи дискретний за своєю суттю метод адаптивного керування деякими неперервними властивостями, що дає змогу підвищити якість керування і зменшити обсяг бази правил [13].

Використання експертних систем на базі нечіткої логіки, об'єднаних з моделями роботи технологічної та екосистеми, призводить до нового шляху вирішення проблем і прийняття практичних рішень на виробництві [11].

## 2.3 Моделювання процесів горіння твердого біопалива в теплогенераторах

Моделювання режимів роботи теплогенераторів та технології спалювання твердого біопалива ґрунтується на аналітичних залежностях, що описують фізико-хімічні процеси горіння твердого палива в камерах згорання теплогенераторів у статичному та динамічному режимах, що найбільш повно представлені в [5; 26].

Для раціоналізації дозування компонентів твердого біопалива і повітря проводився аналіз характеристик технології спалювання, який враховував взаємозв'язок фізико-хімічних та електрофізичних властивостей процесу, зокрема:

- рух компонентів паливної суміші в камері горіння;
- наявність турбулентної та молекулярної дифузії вихідних речовин і продуктів реакції;
- теплообмін у газових потоках продуктів згорання і димових газах;
- конвективний теплообмін горючих часток з газовим середовищем;
- процеси нагріву частинок, сублімації летких речовин і горіння їх у газовому об'ємі.

Створення комплексної математичної моделі, яка враховувала б вказані аеродинамічні і фізико-хімічні процеси, будується на ряді припущень, а саме:

- горіння летких речовин і догорання продуктів неповного згорання відбувається у газовому середовищі;
- реагування протікає на поверхні вуглецевих частинок сферичної форми однакових розмірів;
- знехтування конвективним переносом теплоти з системи та дифузною теплопровідністю.

З урахуванням прийнятих припущень опис процесів горіння твердого палива базується на законах збереження маси, енергії та кількості руху, що є наслідками першого і другого законів термодинаміки.

Загальна система рівнянь законів збереження маси для компонентів суміші, що описує процеси горіння, яка включає також питомі потужності, зміни мас

компонентів, має вигляд (2.14–2.16) [5]:

$$\frac{\partial(\rho_j)}{\partial t} = -\text{div}(\rho_j \cdot v_j) + m_j, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial(\rho_j \cdot v_j)}{\partial t} = -\text{div}Je, \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho_j \cdot v_j)}{\partial t} = -\text{div}(\rho_j \cdot v_j \cdot v_j + P), \quad (2.16)$$

де  $\rho_j$  – щільність потоку маси, яка переносить  $i$ -го компонента в елементарному об'ємі;

$v_j$  – швидкість центру мас елементарного об'єму, м/с;

$e$  – повна енергія на одиницю маси  $i$ -го компонента, Дж/кг;

$Je$  – повний питома-масовий потік енергії, Вт/м<sup>2</sup>;

$P$  – тензор тисків на елементарний об'єм, Па;

$m_j$  – питома потужність зміни маси  $j$ -го компонента, (кг/с)/м<sup>3</sup>.

Рішення цієї системи рівнянь у загальному вигляді є неможливим, тому було здійснено перехід до одновимірної моделі з розподіленими параметрами.

При цьому система рівнянь (2.14–2.16) приймає наступний вигляд :

$$\frac{\partial(M_j)}{\partial t} = D_j(t) + m_j \cdot \partial V, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial(M_j \cdot i_j)}{\partial t} = D'_j(t) + i_j \cdot D''_j(t) + m_j \cdot \partial V \cdot Q_j^p, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial(M_j \cdot v_j)}{\partial t} = P' \cdot F' - P'' \cdot F'', \quad (2.19)$$

де  $D'_j$  і  $D''_j$  – витрата  $j$ -го компонента суміші на вході і на виході модельованої системи;

$M_j$  – маса  $j$ -го компонента в об'ємі;

$\partial V$  – об'єм модельованої елементарної області;

$i'_j$  і  $i''_j$  – ентальпія  $j$ -го компонента суміші на вході і на виході модельованої системи;

$Q_j^p$  – теплота згоряння  $j$ -го компонента.



У результаті загальна система рівнянь, що описує процеси спалювання твердого палива, матиме вигляд:

$$\frac{\partial(M_j)}{\partial t} = D'_j(t) - D''_j(t) - \frac{\partial G_j}{\partial t} \cdot M_{noj} \cdot F_{нов} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial(M_j \cdot i_j)}{\partial t} = D'_j(t) \cdot i'_j - D''_j(t) \cdot i''_j - \frac{\partial G_j}{\partial t} \cdot M_{noj} \cdot F_{нов} \cdot Q_j^p \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial(M_j \cdot v_j)}{\partial t} = P' \cdot F' - P'' \cdot F'' \quad (2.22)$$

Наведена система рівнянь повинна бути доповнена рівнянням швидкості горіння (2.23) компонентів вихідної суміші  $G_j$ , необхідним для розрахунку зміни маси:

$$\frac{\partial G_j}{\partial t} = C_j \cdot k_{0j} \cdot e^{\frac{E_j}{R+T}} = C_j \cdot k_j \quad (2.23)$$

та рівнянням для розрахунку концентрацій оксидів азоту в продуктах згорання у зоні горіння (2.24):

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t} = \frac{2K_o \cdot k_1}{\sqrt{C_{O_2}}} \cdot \frac{1}{K^2} \cdot (C_{(NO)}^2 - C_{NO}^2) \quad (2.24)$$

Аналіз наведеної системи рівнянь, що описує процес горіння твердого біопалива, дозволяє стверджувати про необхідність подальших досліджень щодо раціоналізації дозування компонентів для підвищення енергоефективності теплогенератора. Тому доцільним є проведення експериментальних досліджень на фізичній та імітаційній моделі твердопаливного теплогенератора. Для цього є необхідним розгляд теплового балансу газодинаміки паливного простору.

Паливний простір умовно можна розділити на три зони, середовище яких є гомогенне:

- I – зона змішування компонентів;
- II – зона горіння;
- III – зона теплообміну.

Тоді матеріальний баланс областей можна представити системою рівнянь [5; 26]:

$$\begin{cases} \frac{dm_I}{dt} = F_{\text{пал}} + F_{\text{нов}} - v_I S \rho_I \\ \frac{dm_{II}}{dt} = v_I S \rho_I - v_{II} S \rho_{II} \\ \frac{dm_{III}}{dt} = v_{II} S \rho_{II} - F_{\text{дим}} \end{cases} \quad (2.25)$$

де  $m_I, m_{II}, m_{III}$  – маси;

$v_I, v_{II}, v_{III}$  – швидкості потоків;

$c_I, c_{II}$  – щільність газів у відповідних зонах;

$S$  – площа поперечного перерізу камери горіння;

$F_{\text{пал}}, F_{\text{нов}}$  – потоки паливного газу і повітря.

Тепловий баланс зон [5; 26]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(c_I m_I T_I) = c_{\text{пал}} F_{\text{пал}} T_0^{\text{пал}} + c_{\text{нов}} F_{\text{нов}} T_0^{\text{нов}} - c_I F_I T_I \\ \frac{d}{dt}(c_{II} m_{II} T_{II}) = c_I F_I T_I + q F_I - c_{II} F_{II} T_{II} \\ \frac{d}{dt}(c_{III} m_{III} T_{III}) = c_{II} F_{II} T_{II} - Q - c_{\text{дим}} F_{\text{дим}} T_{III} \end{cases} \quad (2.26)$$

де  $c_I, c_{II}, c_{III}$  – питомі теплоємності у відповідних областях;

$T_I, T_{II}, T_{III}$  – температури газів у відповідних областях;

$c_{\text{пал}}, c_{\text{нов}}$  – теплоємності паливного газу і повітря;

$T_0^{\text{пал}}, T_0^{\text{нов}}$  – початкова температура паливного газу і повітря;

$F_{\text{дим}}$  – потік димових газів;

$F_I, F_{II}$  – потік суміші газів із першої і другої області, відповідно;

$q$  – питома теплота згоряння паливного газу;

$Q$  – теплота нагріву, що чисельно дорівнює тепловому потоку, який поступає від згоряння палива.

## **2.4 Особливості транспортування енергоефективної паливної суміші у камеру горіння теплогенератора**

Підвищення ефективності роботи твердопаливних теплогенераторів можливе за рахунок інтенсифікації процесу спалювання в них твердого біопалива і унеможливлення потрапляння вогню чи іскри у паливний бункер з камери горіння.

Використання існуючих систем автоматичного керування процесом спалювання палива не забезпечує, у повній мірі, енергоефективні та безпечні режими роботи теплогенераторного обладнання. Система керування, описана в [26], базується на вимірюваннях тиску й витрат матеріальних засобів (води, повітря, димових газів) та формує керуючі впливи на виконавчі механізми витрат матеріальних засобів для підтримки необхідної потужності котлоагрегату, а також передбачає підтримку співвідношення паливо-повітря шляхом визначення параметра-критерію, що характеризує оптимальність горіння. Алгоритм роботи передбачає запам'ятовування даних, на основі яких разом із обліком вимірених поточних значень контрольованих параметрів, проводять розрахунок корегуючого сигналу, що змінює поточне співвідношення паливо-повітря.

Недоліком даного способу є те, що у вказаній системі корекція зазначеної величини виконується із затримкою щодо останнього моменту зміни співвідношення паливо-повітря. Крім цього, вона є складною у реалізації та використанні, потребує великих матеріальних затрат в експлуатації. Застосування ж цього способу на малих опалювальних системах є недоцільним.

Відомий спосіб застосування систем автоматичного регулювання процесом горіння гранульованого палива [5], який базується на вимірюванні температури теплоносія, димових газів на виході з теплогенератора, повітря навколишнього середовища. Отримані значення доводять до номінальних співвідношень паливо-повітря й формують їхній вплив на виконавчі механізми дозування повітря й палива. Недоліком зазначеного вище способу є неточність отриманих співвідношень паливо-повітря, в результаті чого ускладнюється інтерпретація отриманих даних з суттєвими похибками.

Поставлену задачу можна вирішити шляхом забезпечення ефективності

спалювання за рахунок системи дозування повітря і палива за допомогою шнекового механізму в камеру згоряння твердопаливного теплогенератора на основі аналізу відсоткового складу  $O_2$  в димових газах.

Безпечна подача палива забезпечується тим, що паливо з паливного бункера (2) подається шнековим механізмом (8) на вентилятор (10), який задуває його у камеру горіння (11) (рис. 2.3).

Технологічна біомаса (паливо) засипається у бункер (2) і за допомогою зворушувача (4) та шнека (8) подається на вентилятор (10). Вентилятор задуває паливо разом із повітрям у камеру згоряння теплогенератора (11), де відбувається спалювання завантаженої біомаси [5].

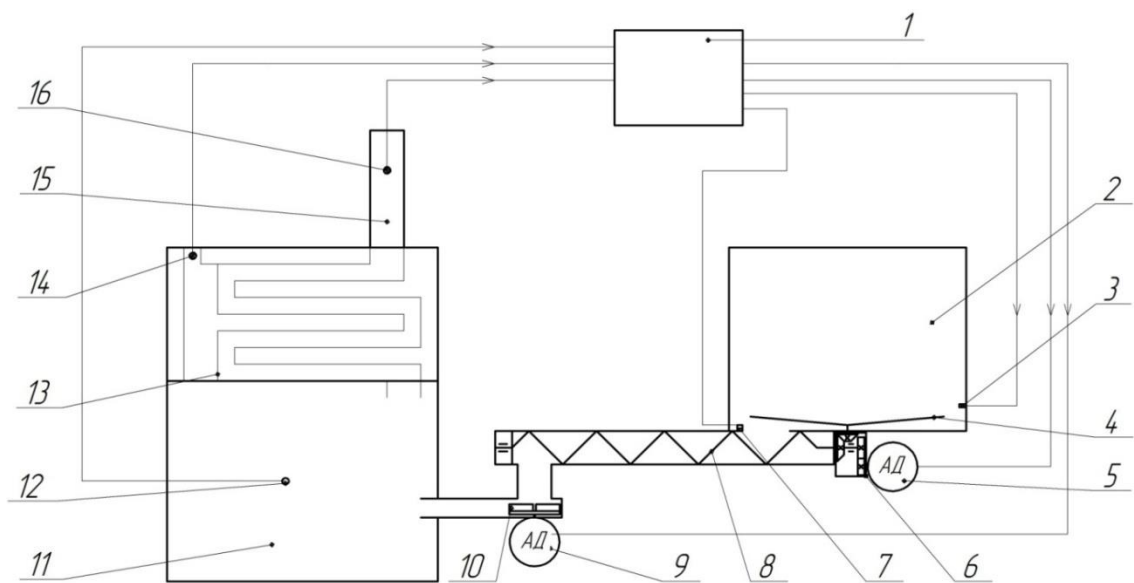


Рис. 2.3 Структурна схема подачі палива у теплогенератор:

1 – система автоматичного керування; 2 – паливний бункер; 3 – датчик рівня палива; 4 – зворушувач; 5 – двигун; 6 – редуктор; 7 – датчик вологості палива; 8 – шнек; 9 – регульований електродвигун; 10 – вентилятор; 11 – камера згоряння палива; 12 – датчик температури; 13 – теплообмінник; 14 – датчик температури; 15 – димовивідна труба; 16 – кисневий  $\lambda$ -зонд

Контроль необхідної кількості повітря, що нагнітається вентилятором, здійснюється системою автоматичного керування (1) шляхом визначення швидкісних режимів двигуна на основі даних кисневого  $\lambda$ -зонду (16), який знаходиться у димовивідній трубі (15).

Одночасно системою контролюється ефективність нагрівання теплообмінника, шляхом обробки даних від датчика температури для забезпечення раціонального дозування палива, що подається шнеком у камеру горіння.

З цією ж метою у паливному бункері датчиком рівня палива відслідковується наявність достатньої кількості палива і в разі зменшення його допустимого рівня виводиться повідомлення на АСК. Крім цього, відслідковується вологість палива, що знаходиться у паливному бункері, на основі якої через АСК вносяться корективи у подачу палива.

Запропонований спосіб подачі енергоефективної паливної суміші в атмосферних теплогенераторах, у порівнянні з аналогами, забезпечує зменшення загальної витрати палива, безпечну подачу палива у камеру горіння та підвищує коефіцієнт корисної роботи твердопаливних теплогенераторів.

## **2.5 Апаратно-програмна реалізація системи керування дозуванням компонентів горіння твердодіопаливних теплогенераторів**

Електрична схема модуля первинних перетворювачів системи наведена на рис. 2.4. Кожен канал модуля містить відповідний давач температури ТХК1, ТХК2, концентрації кисню  $O_2$  та відповідні масштабні підсилювачі А1–А3. Спільними для них є джерела живлення і 4-канальний аналого-цифровий перетворювач (АЦП). В якості первинних перетворювачів температури в модулі використовуються термопари типу ТХК (хромель-копель).

У схемі вимірювання температури застосовано інструментальні високоточні підсилювачі INA114 компанії-виробника Texas Instruments, необхідні для узгодження сигналів термопар з вхідним діапазоном роботи АЦП. Для їх функціонування потрібна мінімальна кількість елементів обв'язки. Вони характеризуються низьким температурним дрейфом ( $0,25 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ), значною компенсацією синфазної завади (115 дБ при  $K = 1000$ ) і високим коефіцієнтом підсилення  $K$  (до 10 000) [26].

Коефіцієнт підсилення задається резисторами  $R5$ ,  $R6$  та  $R13$ ,  $R14$  (рис. 2.4), опір яких, відповідно для кожного із каналів, розраховується за формулою:

$$R10 = 50/(K - 1) \text{ [кОм]}.$$

Смуга пропускання залежить від коефіцієнта підсилення і, для  $K = 100$ , становить 10 кГц.

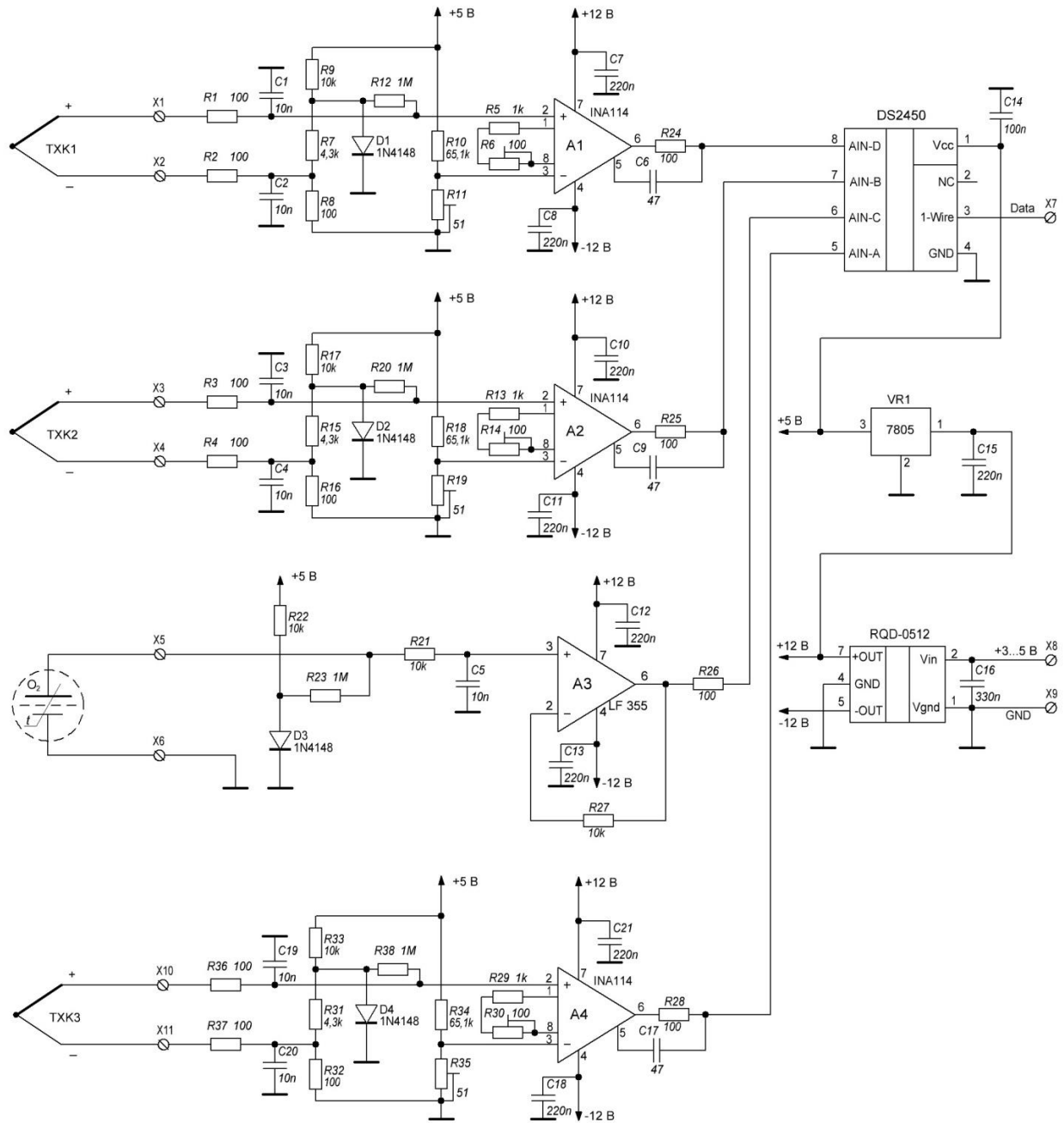


Рис. 2.4 Принципова електрична схема модуля первинних перетворювачів

Для підвищення завадостійкості схеми в джерелах живлення RQD-0512 і VR1 встановлені низькочастотні  $RC$  фільтри. Компенсація температури холодного спаю реалізується за допомогою діодів 1N4148. У модулі використовується 4-канальний АЦП DS2450 (12...16 біт) з інтерфейсом MicroLAN і технічними характеристиками, поданими у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

### Технічні характеристики АЦП DS2450

1. Число розрядів	12
2. Час перетворення $t_{\text{АЦП}}$ , мкс	12,5
3. Нелінійність $\delta_L$ , %	$\pm 0,049$ %
4. Диференціальна нелінійність $\delta_{LD}$ , %	$\pm 1$ м.р. = $\pm 0,024$ %
5. Вхідний аналоговий сигнал, В	(0...5,12)

Джерело живлення модуля виконане на DC/DC перетворювачі RQD-0512, що перетворює 5 В від зовнішнього джерела в напругу  $\pm 12$  В, необхідну для роботи схеми. Крім цього у схемі використані ємнісні фільтри  $C7$ ,  $C8$ ,  $C10 - C14$  для усунення паразитного зв'язку підсилювачів кожного каналу щодо джерел живлення та інтегральний стабілізатор 7805 на напругу 5В (VR1) для живлення АЦП та схем мостів.

Лінеаризація кожного із термоперетворювачів проводилася за двома контрольними точками: 0, 100 °С та 0 і 1000 °С. Перед початком вимірювань необхідно виконати калібрування системи, під час якого встановлюється нульовий рівень вихідної напруги масштабних підсилювачів. Здійснюється воно за допомогою резисторів  $R11$  та  $R19$  (типу СП5-2), які балансують мости, що складаються з резисторів  $R7 - R12$  та  $R15 - R20$ . Вказані резистори повинні бути високої точності (похибкою не більше 1 %) з якнайменшим термічним коефіцієнтом опору (ТКО). Тип термопар необхідно вибирати, виходячи із заданого діапазону контролю температур, погоджуючи при цьому вихідний сигнал підсилювача з входом АЦП за діапазоном і полярністю.

Автоматизована система керування швидкісними режимами

електропривода шнека-дозатора та вентилятора біотеплогенераторної установки, яка забезпечує подачу теплоносія у зерносушарку, складається з: мікроконтролерного модуля, модуля вимірювальних перетворювачів із джерелами стабілізованих опорних напруг, датчиків температур (термопар), датчик концентрації  $O_2$  (лямбда-зонда), RC-фільтрів для усунення паразитних зв'язків між вимірюваними каналами та для зменшення чутливості до завад.

Програмний код мікроконтролера включає в себе три основні модулі, що працюють одночасно. Основний модуль контролює послідовний порт введення і виконує запити комп'ютера. Другий модуль визначає температуру і адаптує це значення до подальшої обробки. Третій модуль контролює швидкість обертання вентилятора.

Згідно з поставленим завданням, автоматизована система керування повинна аналізувати температуру та вологість повітря, вологість палива, температуру теплоносія, вміст кисню у викидних газах та виробляти керуючі дії для підтримання потужності теплогенератора на заданому в програмі рівні.

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

Конструктивне виконання структури можливе у вигляді окремого виносного модуля з невеликими габаритними розмірами, що дає змогу 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.

Виходячи із вказаних вище вимог, розроблено структурну схему інтелектуальної мікропроцесорної системи керування процесом приготування твердодіопаливної суміші для теплогенераторів (рис. 2.5).

До її складу входять:

1. Блок частотного регулювання швидкості обертання АД;
2. Блок контролера, до складу якого входять такі основні вузли:



однокристальний мікроконтролер (MC); 8-ми каналний аналого-цифровий перетворювач (ADC); 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.

Налаштування системи здійснено експериментальним поетапним тестуванням за допомогою середовища MATLAB. Процес підготовки програмного забезпечення до експлуатації зводиться до наступного:

1. Ввід початкової інформації: допустимі значення температури в камері горіння; характеристики електроприводів вентилятора та шнека.
2. Зчитування портів, обробка інформації та цифрова фільтрація даних про температуру теплоносія та вміст кисню в димових газах.

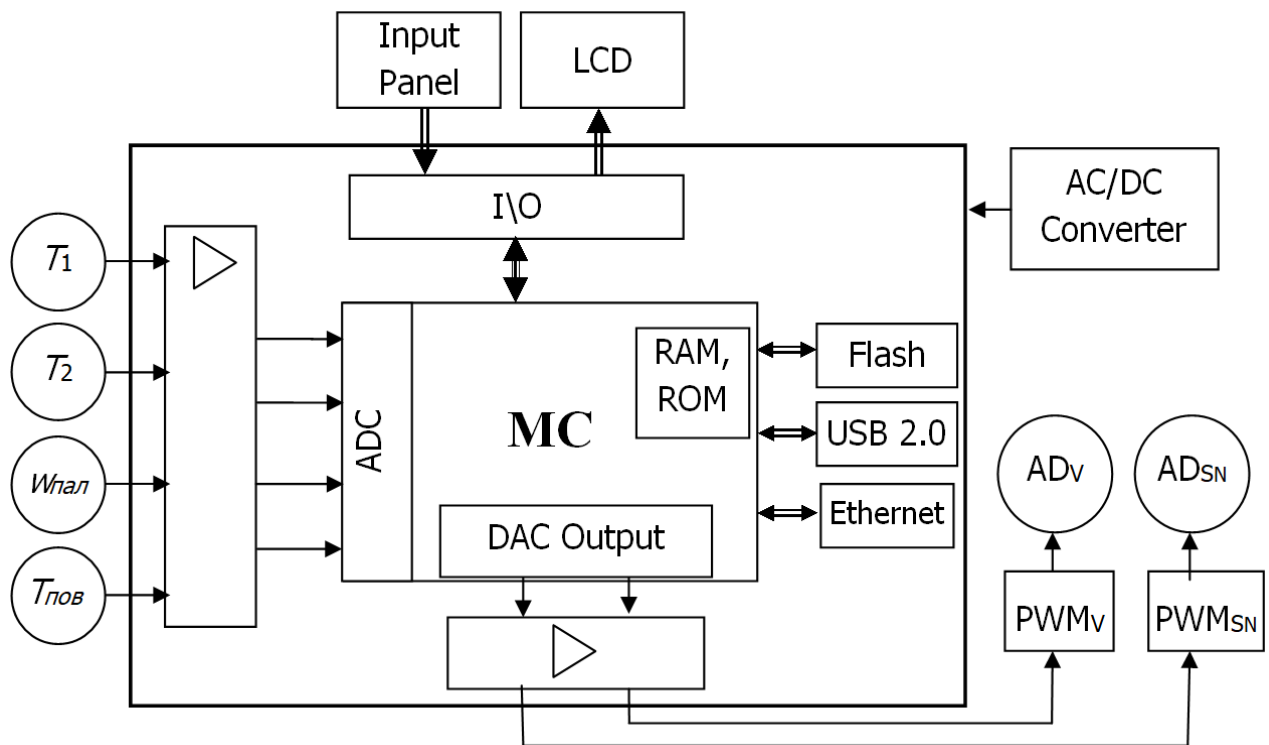


Рис. 2.5 Структурна схема системи керування

1. Обробка й розрахунок отриманої інформації за відомими функціональними та табличними залежностями.
2. Розрахунок оптимальних значень управляючої дії на привід шнека-дозатора та управляючої дії на привід вентилятора.
3. Після перевірки закінчення виводу сигналів виконується вивід

управляючих сигналів на порт або повернення до циклу перевірки закінчення такту роботи системи.

Для підвищення швидкодії системи керування здійснено апаратну реалізацію алгоритмів її роботи. У даному випадку використано мікроконтролер, що поєднує аналоговий і цифровий принцип дії які легко підключаються до датчиків і виконавчих механізмів. Обраний однокристальний мікроконтролер AT91SAM7XC512, який містить ROM-пам'ять із програмою завантажувачем, дозволяє програмувати зовнішню флеш-пам'ять (DataFlash) серії AT45, підключену до МК, та завантажувати з оперативної пам'яті програмні модулі без застосування будь-яких додаткових апаратних засобів, окрім USB або RS-232 кабелю.

Перевагою використання мікросхем Atmel AT91SAM7X є те, що вони володіють високопродуктивним 32/16-бітним ядром ARM7TDMI, великим обсягом флеш і оперативної пам'яті на кристалі, набором широко застосовуваних інтерфейсів. Крім того, компіляція, налагодження та програмування пристрою може здійснюватися програмним забезпеченням, що входить у стандартний комплект, який додається до мікросхем.

У мікроконтролері передбачено можливість обробки даних і передачі їх по каналам Ethernet. Для реалізації протоколів взаємодії в мережі використовується вільно розповсюджувана 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 модуля, є можливість переглянути поточну статистику її роботи (в тому числі запущених завдань чи статистику з'єднання), використовуючи локальну мережу або підключивши плату до комп'ютера, використовуючи крос-кабель.

Ефективність функціонування системи керування, яка реалізована на базі мікроконтролера AT91SAM7XC512 з використанням програмного забезпечення, що розроблено на основі створених нами алгоритмів підтверджено тестуванням, яке здійснювалось безпосередньо у виробничих умовах.

У ході експериментальних випробувань на виробничих потужностях ТОВ «Українські технологічні системи» в Тернопільській області система

керування (рис. 2.6) продемонструвала належну роботу на технологічному обладнанні підприємства, що дозволяє стверджувати про доцільність її застосування на переробних підприємствах великої і малої потужності, які націлені на використання альтернативних джерел енергії.



Рис. 2.6 Система керування теплогенератором

## 2.6 Імітаційне моделювання режимів роботи біотеплогенератора з метою оптимізації процесів генерації в системах вихрового горіння біопалива

Дослідження передбачає комплексну автоматизацію процесів генерації теплової енергії з несертифікованих видів палива на базі систем штучного інтелекту, регульованих асинхронних електроприводів, спеціально адаптованих датчиків: температури, вологості, обертів, тиску, рівня тощо. Враховуючи

недетермінований характер зміни технологічних параметрів, створювалися моделі технологічних процесів, розроблялися адаптивні алгоритми керування, програмне забезпечення, які в комплексі дали змогу раціоналізувати процес горіння несертифікованого палива у вихровій топці безперервної дії, узгодити подачу продуктів згоряння в теплообмінник, визначити діапазон подачі повітря для його підігріву до необхідної температури на вході. При цьому необхідно враховувати вид палива, його теплотворну здатність, вологість, гранулометричний склад для можливості здійснення керування регульованою подачею дозатором-вентилятором. Регульовані вентилятори вихрової камери згоряння забезпечують максимальну зону згоряння несертифікованого палива, запобігаючи його швидкому переміщенню у верхню частину теплогенератора, що захищає від перегріву первинну камеру теплообмінника.

З урахуванням викладеного вище, розроблено систему керування, яка забезпечує узгодження усіх вище зазначених недетермінованих параметрів технологічного процесу для оптимізації енергоефективних режимів теплогенерації в системах вихрового горіння несертифікованого палива.

В розробку імплементовано дослідження, що базувалися на теоретичних засадах теплотехніки, законах термодинаміки, теорії теплопередачі та супроводжувалися розробленням математичної моделі, яка виконана із використанням теорії ідентифікації, теорії експерименту та комп'ютерного моделювання. Математичні моделі теплових процесів у системах генерації теплової енергії з вихровим горінням несертифікованого палива, з урахуванням впливу зовнішніх факторів, розроблено з використанням теорії теплових процесів.

У розробці перевагу надали використанню теплогенераторів на базі вихрового безперервного горіння несертифікованого подрібненого палива (рис. 2.7). Подача палива в них здійснюється за допомогою дозатора-вентилятора з використанням частотно-регульованого асинхронного електроприводу.



Рис. 2.7 Дослідний зразок теплогенератора-утилізатора 2500 кВт із принципом вихрового горіння несертифікованого палива

З метою підвищення енергоефективності роботи систем генерації теплової енергії розроблено автоматизовану систему керування комплексом, алгоритм функціонування якої враховує ряд недетермінованих чинників, зокрема й таких, що впливають на його роботу: теплотворні властивості та вологість палива, температуру і вологість повітря, що подається в камеру згорання.

Проведені дослідження свідчать, що для визначення оптимальних режимів роботи систем генерації теплової енергії, які використовують несертифіковане паливо, необхідно враховувати його теплотворні характеристики. Ефективність процесу горіння палива забезпечує економічність роботи теплогенератора і сприяє зниженню забруднення навколишнього середовища. Процес вихрового горіння потребує регулювання подачі повітря, відповідно до вологості та теплотехнічних властивостей палива, зокрема з урахуванням значення коефіцієнта надлишку повітря. Також для ефективного горіння твердого палива

необхідно забезпечити узгоджене керування окремими модулями електротехнологічного комплексу теплогенератора, зокрема вирішення задачі регулювання частоти обертання електроприводів вентиляторів та шнека, що визначають об'єми дозування компонентів паливної суміші та режими вихрового горіння.

Для створення комп'ютерних моделей застосовано теорію імітаційного моделювання та використано програмне середовище MATLAB/Simulink; графічне представлення результатів моделювання здійснено засобами MS EXCEL та середовища MATLAB.

Аналіз та оптимізація параметрів функціонування системи, виконані засобами імітаційного моделювання, забезпечують відтворення алгоритму роботи системи в довільному часовому інтервалі при різноманітних поєднаннях значень технологічних параметрів та параметрів зовнішнього середовища [25].

Імітаційна модель твердопаливного теплогенератора (*Biogen*) з інтегрованою системою керування містить декілька підсистем, виконаних засобами стандартних бібліотек Sim Power System, Sim Scape та Thermal (рис. 2.8).

До складу комплексної моделі входять наступні модулі (підсистеми):

1. Модуль системи керування – *Control System*.
2. Імітаційна модель топки – *Biokotel* (вхідні параметри:  $Q_{vent}$  – продуктивність вентилятора на горіння,  $Q_{bio}$  – продуктивність шнека,  $W_{bio}$ , % – вологість палива,  $T_{atm}$  – температура повітря,  $w_{atm}$ , % – вологість повітря).
3. Підсистеми вентиляторів – *Vent\_1* та *Vent*, у які входять моделі асинхронних двигунів типу AIR56A4.
4. Підсистеми частотних перетворювачів  $-3f-PWM1$  та  $-3f-PWM2$ .
5. Модель дозатора палива *Bunker\_Shnek*.

В імітаційній моделі, згідно з алгоритмом роботи, продуктивність вентилятора ( $Q_{vent}$ ), що подає повітря у камеру горіння та продуктивність шнека подачі біопалива ( $Q_{bio}$ ) розраховується системою в залежності від вологості палива ( $W_{bio}$ , %), температури повітря ( $T_{atm}$ , °C), вологості повітря ( $w_{atm}$ , %). Вказані показники продуктивностей повинні забезпечувати необхідну

температуру у камері горіння ( $T_1, ^\circ\text{C}$ ) та температуру теплоносія ( $T_2, ^\circ\text{C}$ ). Водночас система також повинна підтримувати, згідно із запропонованим нами способом, необхідний відсоток кисню у димових газах.

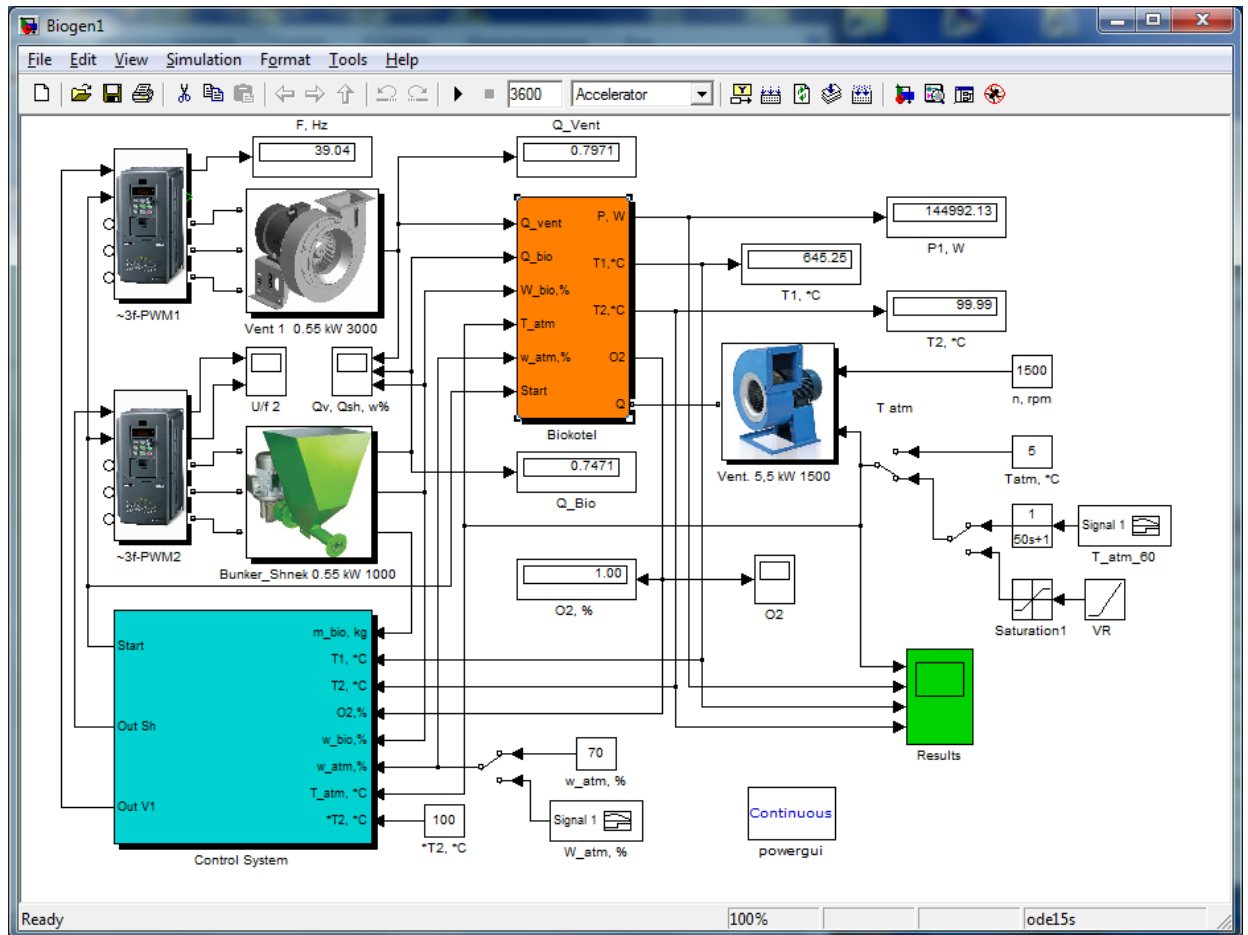


Рис. 2.8 Імітаційна модель твердопаливного теплогенератора

Розроблена модель дає змогу дослідити параметри теплогенератора при використанні різного виду біопалива, а також перевірити роботу системи у нормальних та критичних умовах.

Частотно-регульовані електроприводи вентилятора та шнека дозатора ( $-3f\text{-PWM1}$  та  $-3f\text{-PWM2}$ ) забезпечують плавне регулювання частоти обертання їх робочих органів, шляхом зміни частоти струму живлення асинхронних двигунів у межах 5–50 Гц.

Імітаційна модель підсистеми *Biokotel* (рис. 2.9) реалізована як традиційними блоками середовища Simulink, так і блоками *Thermal* бібліотеки *SimScapе*, зокрема: *Ideal Heat Flow Source* (ідеальне джерело теплової

потужності), *Thermal Mass* (маса конструкції біокотла, яка зазнає нагрівання), *Conductive Heat Transfer* (поверхня теплообміну теплообмінника).

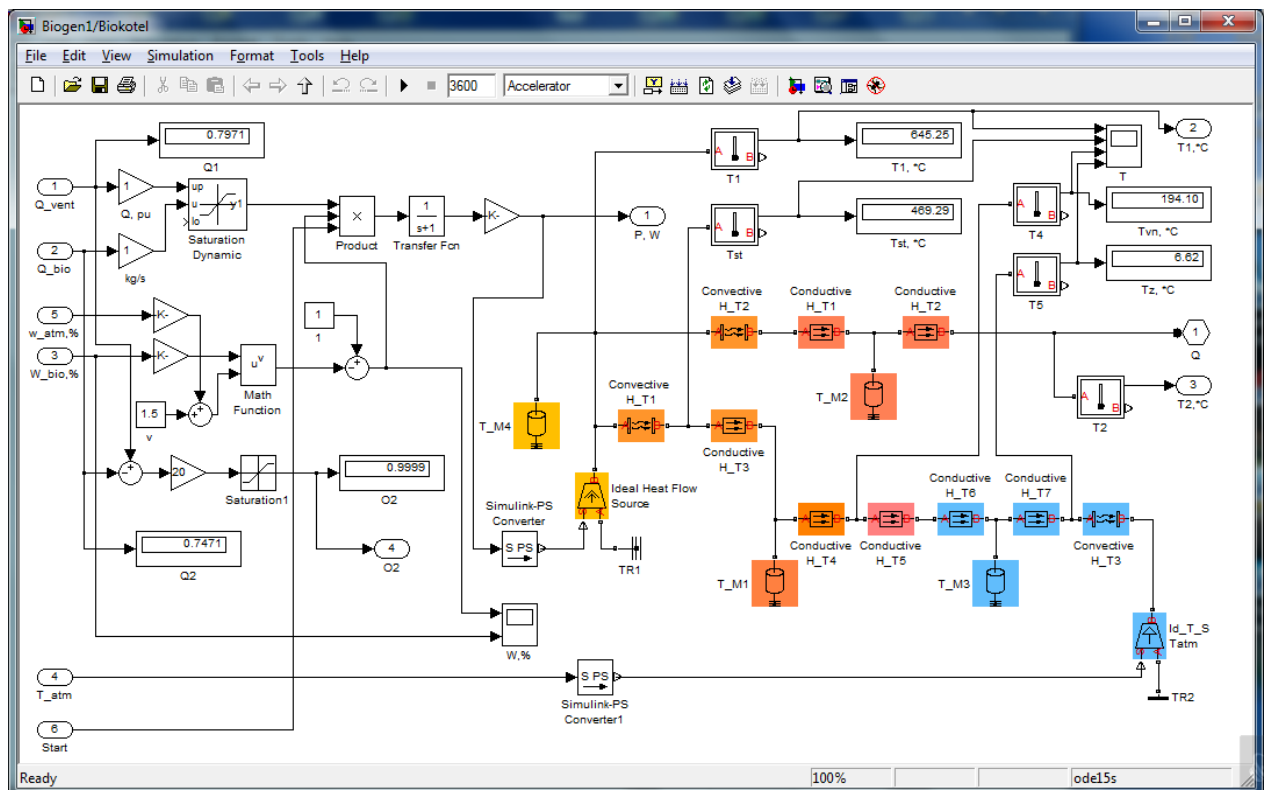


Рис. 2.9 Імітаційна модель підсистеми «*Biokotel*»

Процес моделювання відтворює роботу теплогенератора, вихідною характеристикою якого є забезпечення необхідної температури теплоносія для сушіння зерна.

На рис. 2.10 представлено структурну схему модуля системи керування технологічними режимами роботи теплогенератора (підсистема *Controll System*). Вона є однією із найважливіших складових компонентів загальної структури представленої імітаційної моделі, виконаної засобами комп'ютерного імітаційного моделювання у середовищі *MATLAB*.



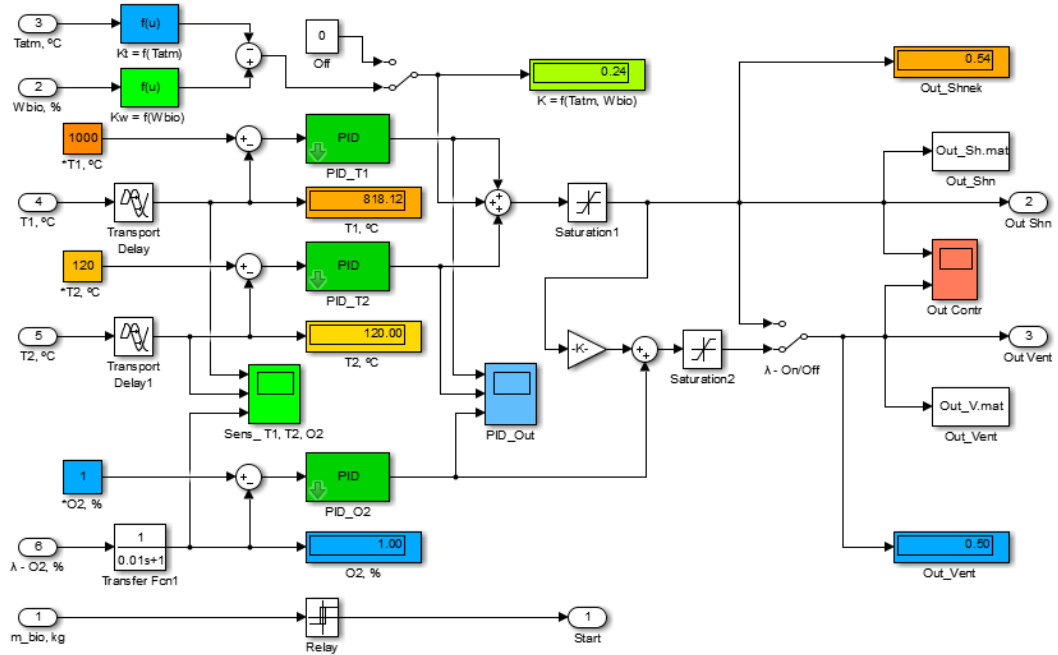


Рис. 2.10 Система керування теплогенератором з триконтурним взаємозв'язаним пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) регулюванням

Особливістю цієї системи є триконтурне взаємозв'язане пропорційно-інтегрально-диференціальне регулювання продуктивностей дозаторів палива та повітря з урахуванням їх вологості та температури оточуючого повітря, а також здійснення на підставі цих даних корекції керуючих впливів вказаних виконавчих пристроїв (дозаторів).

Такий підхід дає змогу забезпечити зниження похибки регулювання у динамічних перехідних режимах функціонування обладнання, особливо виражених під час виникнення стохастичних змін вологості несертифікованого палива та значних транспортних затримок сигналів технологічних параметрів, обумовлених специфікою процесу теплогенерації.

Регулятор PID\_T1 забезпечує підтримання заданої температури  $T_1$  (1000 °C) в камері згоряння (топці) до моменту встановлення на виході теплогенератора заданої температури теплоносія  $T_2$  (120 °C), після чого переходить у режим обмеження вихідної величини і таким чином не здійснює впливу на процес регулювання. Температура в топці знижується, а температура теплоносія ( $T_2$ ) підтримується сталою шляхом введення у процес регулювання регулятора PID\_T2. Сигнали із регуляторів PID\_T1 та PID\_T2 надходять на суматор, до якого

також поступають сигнали корекції  $K = f(W_{bio}, T_{atm})$ , функціонально пов'язані із вологістю біопалива  $W_{bio}$  та температурою зовнішнього повітря  $T_{atm}$ . Відповідні керуючі сигнали, сформовані таким чином, подаються в канал керування шнеком-дозатором палива Out Shn.

Для забезпечення повноти згоряння палива і разом з цим високої енергоефективності функціонування теплогенератора у системі передбачено контроль відсоткової концентрації кисню ( $O_2$ ) у димових газах шляхом використання  $\lambda$ -зонда. Інформація з цього сенсора надходить через порівнювальний елемент на вхід регулятора PID\_O2 і відповідні керуючі сигнали з нього через суматор подаються в канал керування вентилятором-дозатором повітря Out Vent. Керування продуктивностями дозаторів компонентів паливної суміші здійснюється частотно-регульованими асинхронними електроприводами із функціями оптимізації енергоспоживання.

Результати моделювання відображено на рис. 2.11.

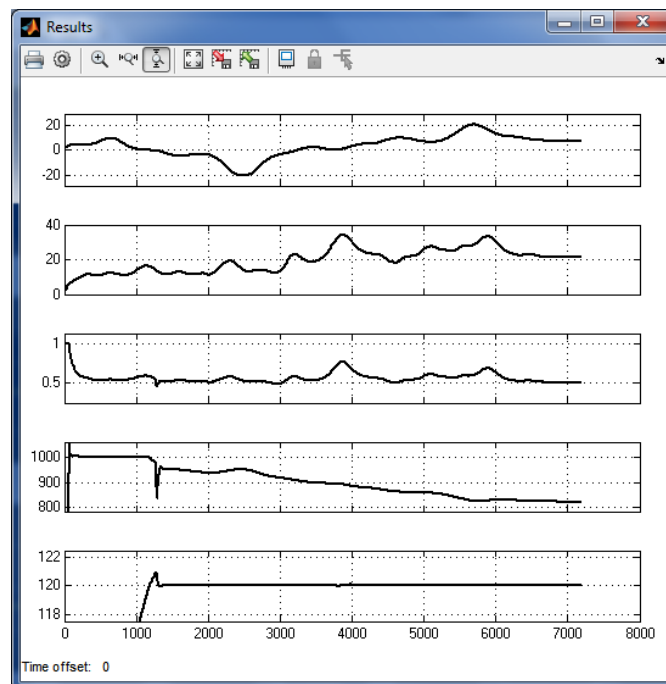


Рис. 2.11 Часові залежності функціонування теплогенератора: 1 – температура навколишнього середовища, °С; 2 – відносна вологість біопалива, %; 3 – продуктивність дозатора біопалива, в.о.; 4 – температура в топці теплогенератора, °С; 5 – температура теплоносія на виході теплогенератора, °С

За результатами моделювання отримано графічну залежність (рис. 2.12) показника енергоефективності теплогенератора  $\eta$  від відносної вологості біопалива  $W$  та коефіцієнта надлишку повітря (за показником  $\lambda$ ).

Розглянувши проблеми керування процесом сушіння встановлено, що для реалізації енергоефективних режимів роботи стаціонарної сушарки необхідно визначити оптимальну потужність електроприводів біотеплогенератора, які б змогли підтримувати температуру в сушарці із врахуванням вологості зерна та забезпечити необхідні продуктивності вентилятора для подачі повітря в котел та шнека-дозатора біопалива в залежності від вмісту кисню в димових газах.

Одним із методів зниження витрат енергії на вентилявання та дозування сировини є впровадження частотно-регульованих асинхронних електроприводів та застосування сучасних частотних перетворювачів із вбудованою функцією оптимізації енергоспоживання.

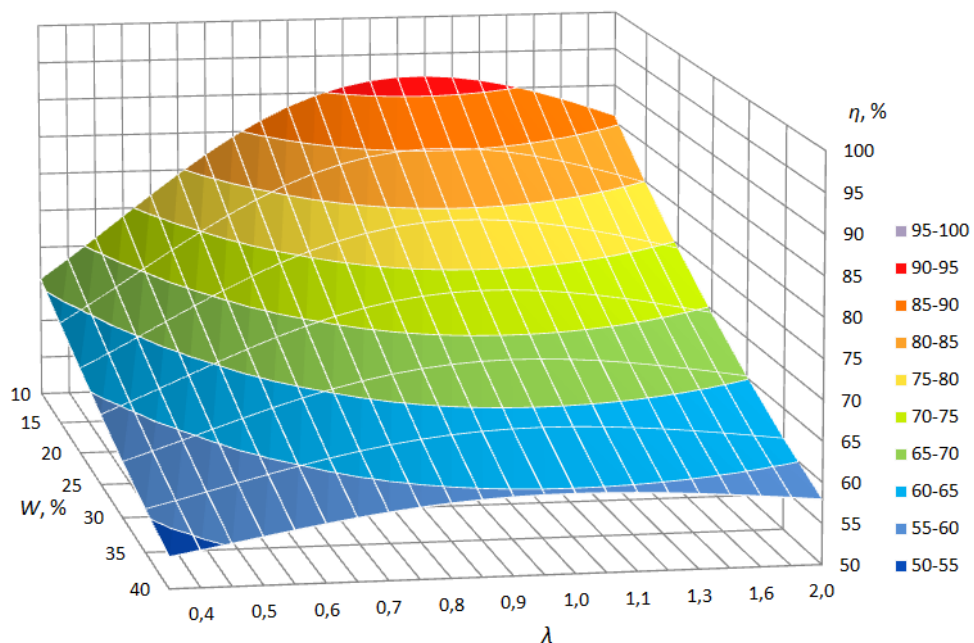


Рис. 2.12 Залежність показника енергоефективності  $\eta$  теплогенератора від величини  $\lambda$  та відносної вологості біопалива  $W$

Система керування теплогенератора сушарки забезпечує регульовану подачу повітря і біопалива в залежності від необхідної температури сушіння. Отже, головними завданнями підсистеми керування дозуванням компонентів

горіння в теплогенераторі є підтримання необхідної температури з теплообмінника  $T_2$  на заданому технологічному рівні (60–120 °С), температури в топці – не вище 1000 °С та концентрації кисню в димових газах – до 1 %.

З урахуванням вказаних параметрів і в залежності від співвідношення вологості і температури навколишнього середовища, виду біопалива, його щільності та вологості розраховується значення продуктивності шнека і вентилятора для здійснення корекції керуючих впливів на відповідні дозатори.

Алгоритм роботи підсистеми регулювання подачі повітря і біопалива у теплогенератор наступний:

1. Обробка інформації від датчиків температури, рівня палива, лямбда-зонду, а також значень вологості повітря та палива з певною дискретністю у часі;

2. Обчислення необхідної продуктивності  $Q_{шн}$  шнека-дозатора:

$$Q_{шн} = f(w_{пал}, t_{вих}), \quad (2.27)$$

де  $w_{пал}$  – вологість палива;

$t_{вих}$  – необхідна вихідна температура теплоносія.

$$Q_{шн} = f(t_{нов}, Q_{шн}'), \quad (2.28)$$

де  $t_{нов}$  – температура повітря навколишнього середовища;

3. Обчислення необхідної продуктивності  $Q_v$  вентилятора:

$$Q_v = f(w_{нов}, Q_{шн}, \lambda), \quad (2.29)$$

де  $w_{нов}$  – вологість повітря;

$\lambda$  – відсоток кисню у викидних газах.

Для реалізації вказаного алгоритму розроблено підсистему *Control System*, що дозволяє відслідковувати вплив вхідних параметрів на вихідні як незалежно один від одного, так і, враховуючи їх взаємозв'язок.

Згідно з алгоритмом керування, на першому етапі визначається продуктивність шнека в залежності від необхідної температури на виході теплоносія, із врахуванням впливу вологості палива.

Для розрахунку продуктивності шнека спираємось на наступне. З 1 кг умовного палива можна згенерувати приблизно 4 кВт·год енергії. Враховуючи теплову потужність теплогенератора сушарки 2500 кВт, матимемо максимальну продуктивність шнека:

$$Q_{\text{шн.маx}} = 2500/4/3600 \approx 0,17 \text{ кг/с}$$

Для діапазону вихідної температури 60 – 120 °С і вологості палива 7–50 % залежність  $Q_{\text{шн}}' = f(w_{\text{нал}}, t_{\text{вих}})$  у відносних одиницях від  $Q_{\text{шн.маx}}$  з достовірністю апроксимації не нижче 0.98 можна представити наступними рівняннями:

для  $t_{\text{вих}} = 120$  °С

$$Q_{\text{шн}}' = 0,0001 \cdot w_{\text{нал}}^2 - 0,0019 \cdot w_{\text{нал}} + 0,675$$

для  $t_{\text{вих}} = 110$  °С

$$Q_{\text{шн}}' = 0,00005 \cdot w_{\text{нал}}^2 - 0,0017 \cdot w_{\text{нал}} + 0,5813$$

для  $t_{\text{вих}} = 100$  °С

$$Q_{\text{шн}}' = 0,0004 \cdot w_{\text{нал}}^2 - 0,0016 \cdot w_{\text{нал}} + 0,52$$

для  $t_{\text{вих}} = 90$  °С

$$Q_{\text{шн}}' = 0,0004 \cdot w_{\text{нал}}^2 - 0,0012 \cdot w_{\text{нал}} + 0,4963$$

З метою подальшої корекції продуктивності шнека й з урахуванням впливу температури повітря навколишнього середовища  $Q_{\text{шн}}'' = f(t_{\text{нов}}, Q_{\text{шн}}')$  використано функціональну залежність, що встановлена експериментальним шляхом:

$$Q_{\text{шн}}''(t) = Q_{\text{шн}}' - 0,0057 \cdot t_{\text{нов}} + 0,7507 \quad (2.30)$$

де  $Q_{\text{шн}}$  – продуктивність шнека, в.о.,

$t_{\text{нов}}$  – температура навколишнього середовища, °С

Цінністю очікуваних результатів цього дослідження є те, що в якості палива можна використовувати різну твердопаливну сировину: подрібнені відходи, паливо біологічного походження з річним циклом повного відновлення (качани кукурудзи, солома, лушпиння соняшника, відходи промислових деревопереробних підприємств тощо. Перехід на альтернативні, відновлювані джерела енергії, зважаючи на потенціал України, значно знизить залежність нашої держави від імпортованої енергосировини та дасть можливість для отримання дешевої теплової та електричної енергії і часткового вирішення екологічної проблеми утилізації побутових відходів.

## 2.7 Перспективи застосування інтелектуальних нейронечітких систем керування режимами роботи теплогенераторів у технологіях сушіння зерна

Забезпечення енергоефективних режимів роботи сушарки з використанням інтелектуальних технологій, потребує ідентифікації стану об'єкта та відповідної адаптації параметрів системи керування з урахуванням вимог щодо інваріантності та робастності електромеханічних систем відносно параметричних і силових збурень [10; 11; 14].

Як було зазначено у пункті 2.6 із врахуванням вказаних параметрів та в залежності від співвідношення вологості і температури навколишнього середовища, виду біопалива, його щільності і вологості за залежностями (2.27-2.30) визначаються значення продуктивності шнека і вентилятора.

Для реалізації алгоритму за вказаними залежностями розроблено модель інтелектуального модуля у вигляді підсистеми *Intellectual Control System* на базі адаптивних нейронечітких інтелектуальних систем (рис. 2.13).

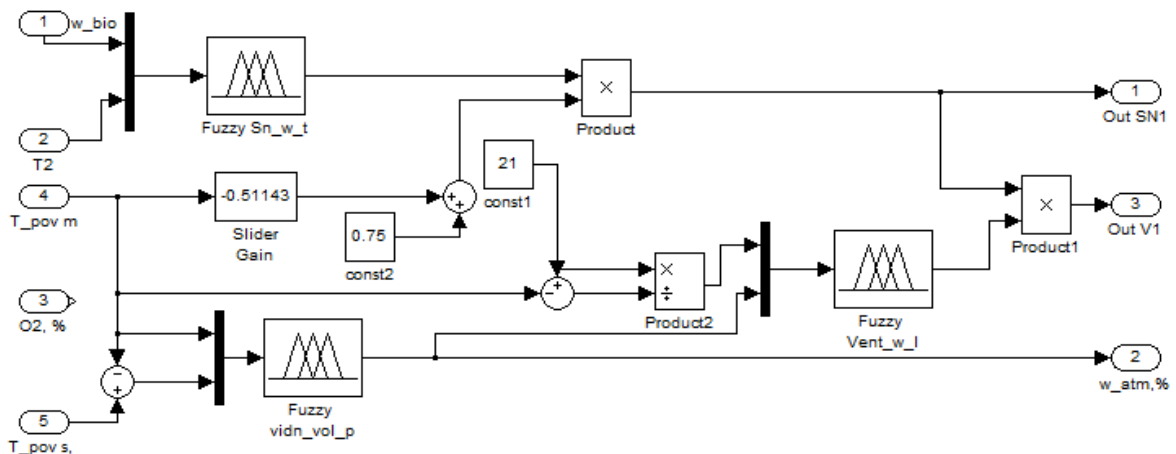


Рис. 2.13 Імітаційна модель модуля *Intellectual Control System*

Блок сформовано за каскадним методом, що дозволяє відслідковувати вплив вхідних параметрів на вихідні як незалежно один від одного, так і, враховуючи їх взаємозв'язок.

Згідно з алгоритмом керування, на першому етапі визначається продуктивність шнека в залежності від необхідної температури на виході теплоносія, із врахуванням впливу вологості палива. Оскільки, залежність  $Q'_{\text{шн}} = f(w_{\text{пал}}, t_{\text{вих}})$  є нечітко визначеною, тому в даному випадку використано fuzzy-регулятор, що функціонує за алгоритмом Sugeno. Вибірка, на основі якої

проходить генерація системи, сформована для діапазону вихідної температури 90–120 °С і вологості палива 7–50 %.

Після навчання нечіткої системи, результат якого представлено на рис. 2.14, похибка відтворення становить 0,37 % – така точність цілком достатня для проведення інженерних розрахунків.

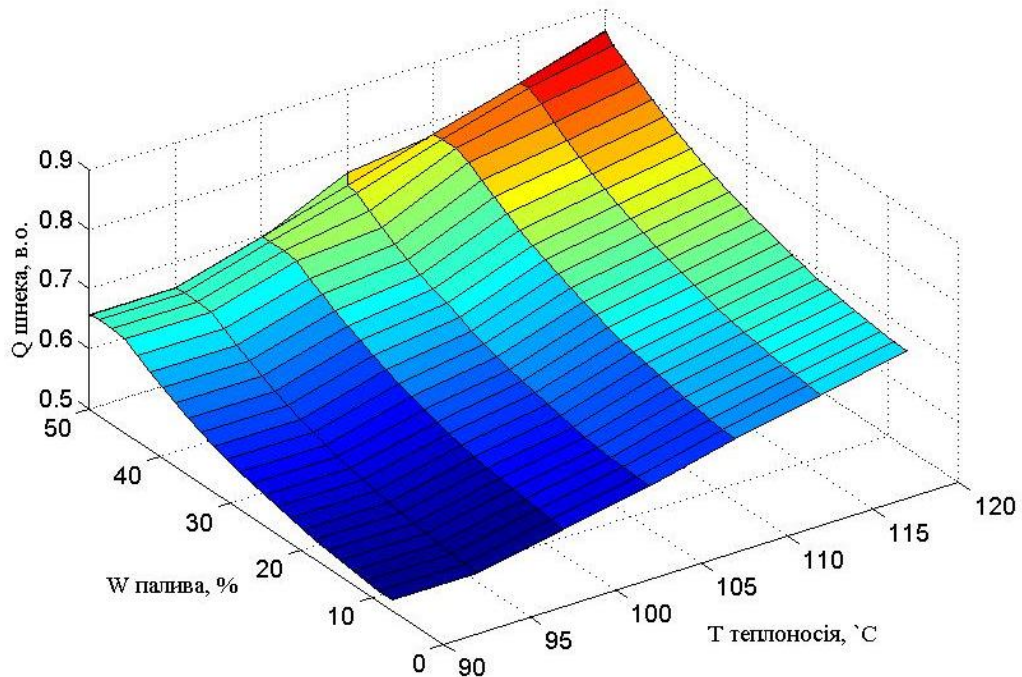


Рис. 2.14 Поверхня навченої системи визначення продуктивності шнека в залежності від вологості палива

Для подальшої корекції продуктивності шнека із врахуванням впливу температури повітря навколишнього середовища використано функціональну залежність (2.30), встановлену експериментальним шляхом.

Корекцію продуктивності вентилятора потрібно здійснювати в залежності від продуктивності шнека із врахуванням коефіцієнта надлишку повітря  $\lambda$  та відносної вологості повітря. Надлишок повітря  $\lambda$  можна визначити з достатньою для практичних цілей точністю, знаючи вміст кисню  $O_2$  в димових газах із рівняння [2]:

$$\lambda \approx \frac{21}{21 - O_2} \quad (2.31)$$

Похибка розрахунків для твердого палива не перевищує 1 %.

Оскільки, потужність теплогенератора є максимальною у межах коефіцієнта

надлишку повітря 1,2–1,4, тому продуктивність вентилятора повинна регулюватись, забезпечуючи вказані межі [15; 19].

Таким чином, модуль керування дозуванням компонентів горіння, що входить до складу інтелектуальної системи керування дозволяє визначити необхідні швидкісні режими подачі палива і повітря, що забезпечують максимальну енергоефективність біотеплогенератора.

## 2.8 Модуль аналізу температури та вологості зерна в процесі сушіння

З метою встановлення необхідних затрат теплоти  $Q$  (кДж/год) для сушарки, що відповідно визначає необхідну температуру теплоносія на виході теплогенератора, засобами Simulink синтезовано нечітку систему керування *SAU\_Heating\_grain*. Вхідними параметрами системи є початковий вологовміст та температура зерна, вологість та температура вхідного повітря, температура сушильного агента, продуктивність зерносушарки та вологовміст вихідного зерна.

Система базується на використанні модулів оцінки температури зерна в процесі сушіння та модуля оцінки вологості зерна під час сушіння *Subsystem NN*.

Для визначення часу необхідного для нагрівання зерна до заданої температури використовується наступна залежність [10; 11]:

$$\bar{\Theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4Bi}{\mu_n^2 [\mu_n^2 + Bi^2]} \cdot e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (2.32)$$

де  $Bi = \frac{\alpha r}{\lambda}$  число Біо – відношення внутрішнього термічного опору до зовнішнього,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі ( $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ),  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності зерна ( $Bm/(m \cdot ^\circ C)$ ),  $r$  – радіус зернини;

$Fo = \frac{a\tau}{r^2}$  число Фур'є – безрозмірний час,  $a$  – коефіцієнт температуропровідності ( $m^2/c$ ),  $\tau$  – час (с).

На основі функціональної залежності (2.32) сформовано модуль оцінки температури зерна в процесі сушіння *Subsystem Fo/Bi*, який скомпонований з трьох нечітких систем, згенерованих за алгоритмом Сугено (рис. 2.15).



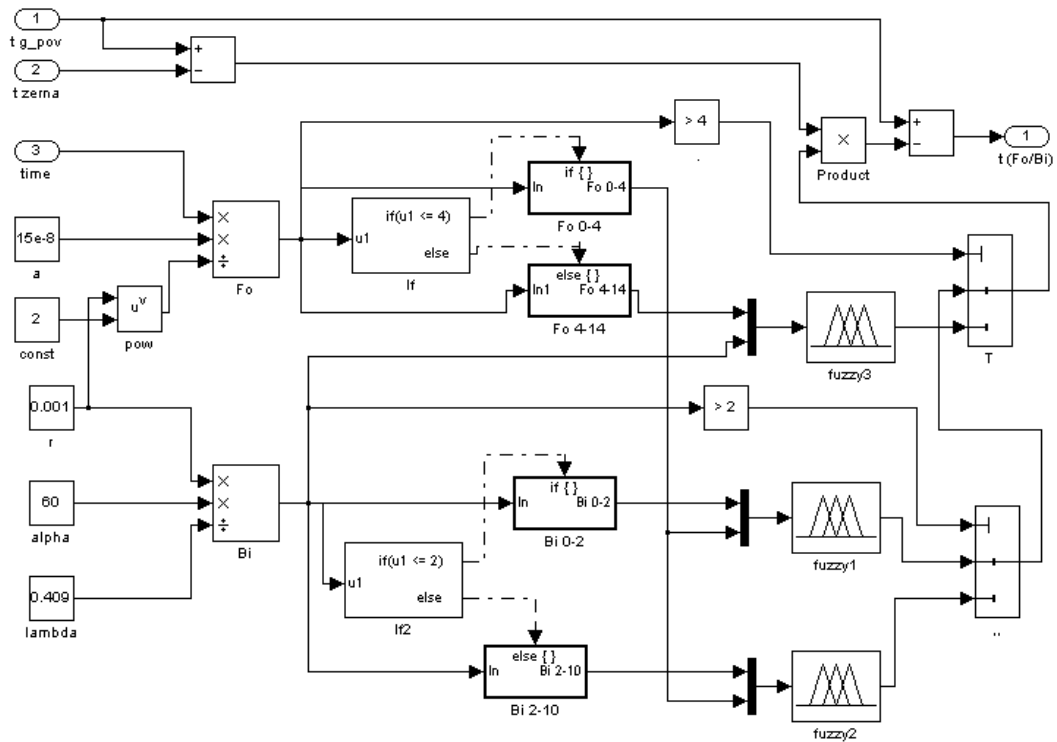


Рис. 2.15 Модуль оцінки температури зерна в процесі сушіння *Subsystem Fo/Bi*

Вхідними величинами для цього модуля є: температура нагрітого сушильного агента, початкова температура зерна, час нагрівання. На основі цих величин визначається температура зерна після нагрівання.

Алгоритм визначення температури зерна після нагрівання наступний: на основі аналізу часу нагрівання та враховуючи теплофізичні властивості зерна: (коефіцієнт температуропровідності, коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнт теплопровідності, радіус зерна) визначаються змінні  $Bi$  та  $Fo$ , за якими обчислюється температура зерна.

Вибір кількості нечітких систем обумовлений особливістю графіка залежності безрозмірної температури від чисел Біо та Фур'є  $t = f(Bi, Fo)$ .

Аналіз графіку дозволив сформувати матриці з конкретними вибірками – даними для генерації та навчання fuzzy-модулів. Нечітка система *fuzzy1* відтворює залежність, яка відповідає проміжку чисел Фур'є  $Fo$  від 0 до 4 та чисел  $Bi$  від 0 до 2 (рис. 2.16). Середня похибка відтворення навченої системи становить 0,31 %.

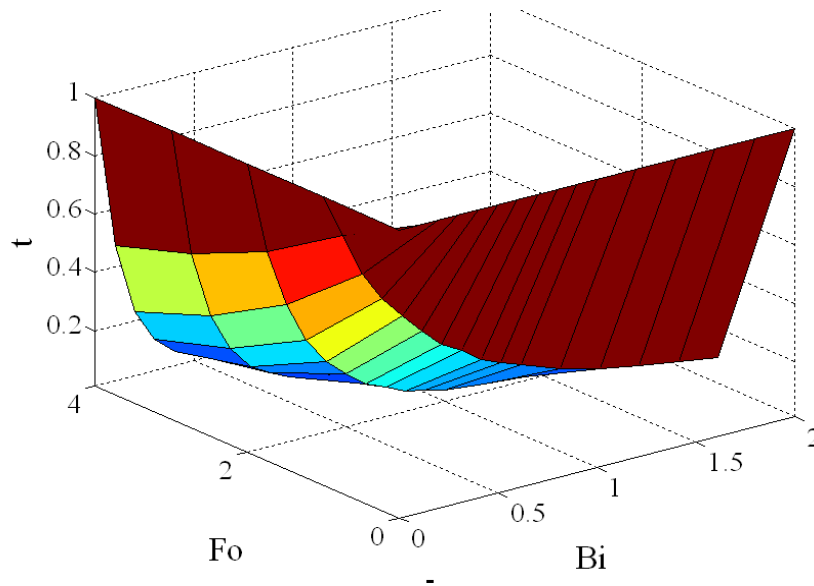


Рис. 2.16 Залежність безрозмірної температури від чисел Біо [0:2] та Фур'є [0:4]

Для проміжку чисел Фур'є від 0 до 4 та чисел  $Bi$  від 2 до 10 нечітка система *fuzzy2* відтворює залежність (рис. 2.17) з похибкою 0,47 %.

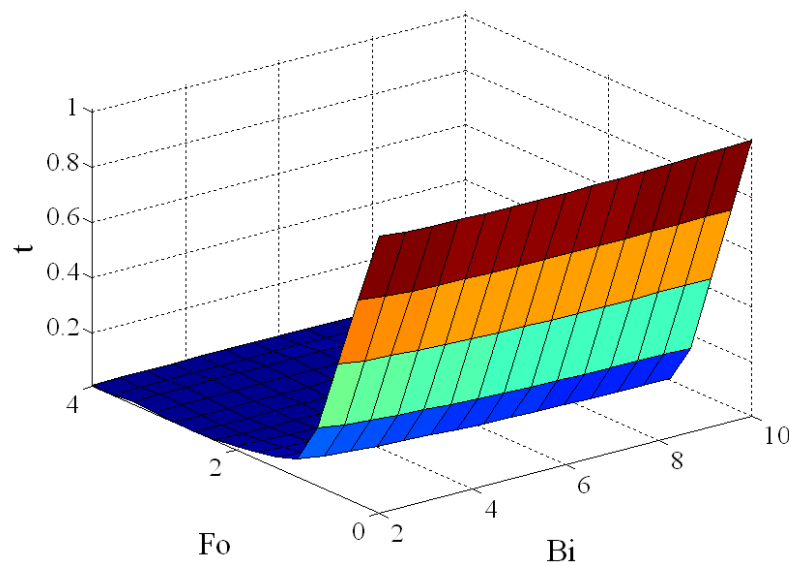


Рис. 2.17 Поверхня навченої системи *fuzzy2*

Нечітка система *fuzzy3* відтворює залежність (рис. 2.18) для проміжку чисел Фур'є від 4 до 14 та чисел  $Bi$  від 0 до 0,6 з середньою похибкою 0,17 %.

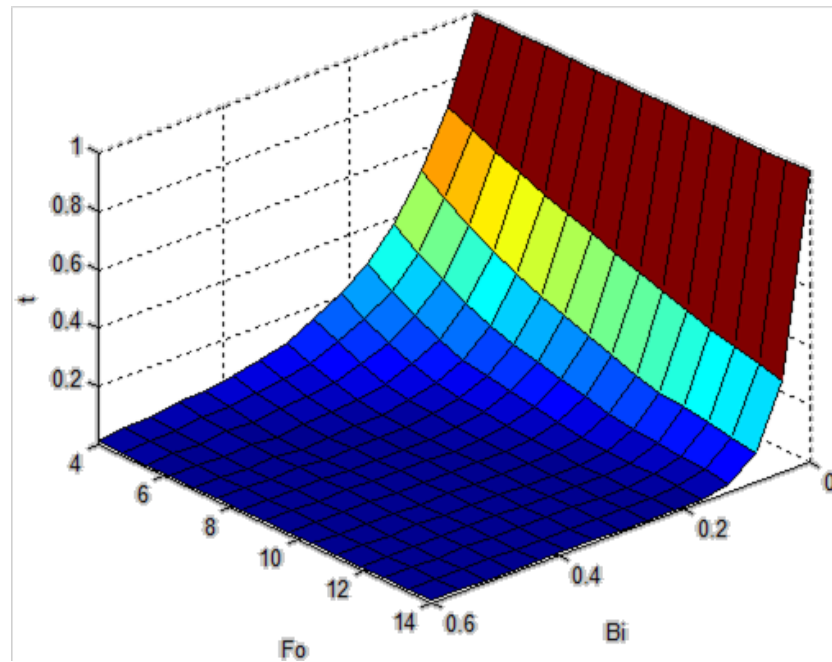


Рис. 2.18 Поверхня навченої системи *fuzzy3*

Обчислення зміни вологості потоку сушильного агента здійснюється за допомогою *j-d* діаграми [10; 11].

Алгоритм використання *j-d* діаграми реалізується у моделі системи керування за допомогою каскадного поєднання інтелектуальних модулів на базі нейронних мереж з прямою передачею сигналу (рис. 2.19), середня похибка відтворення яких не перевищувала 0,29 %.

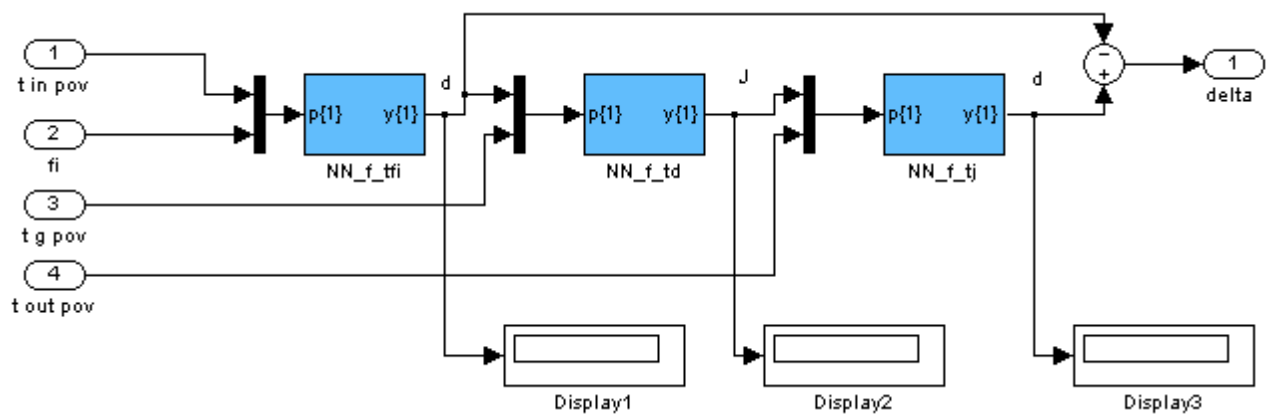


Рис. 2.19 Модель підсистеми *Subsystem NN*

Згідно алгоритму, нейронмережа *NN\_f\_tfi*, на основі температури та відносної вологості повітря, яке надходить у сушарку, визначає абсолютну вологість повітря на вході в зерносушарку від його температури та відносної вологості  $d=f(t, fi)$  (рис. 2.20);

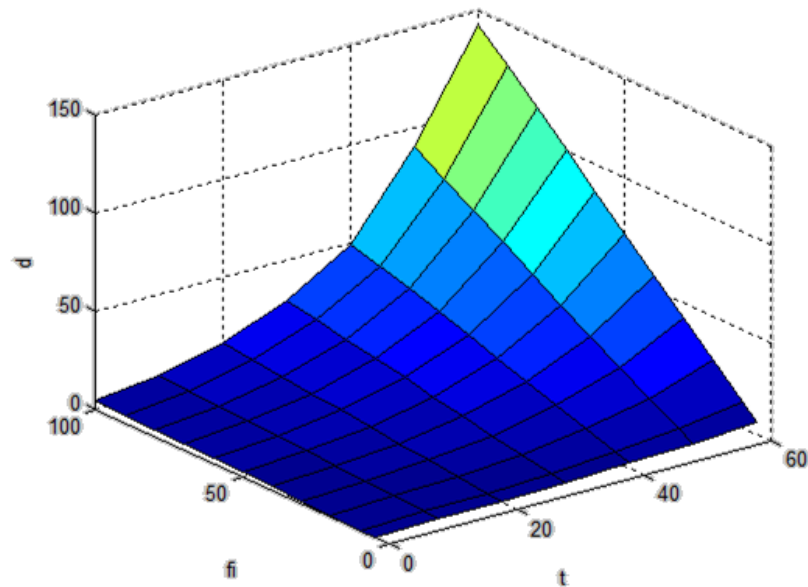


Рис. 2.20 Залежність абсолютної вологості повітря на вході в зерносушарку від його температури та відносної вологості

На наступному кроці модуль  $NN_{f_{td}}$ , на основі абсолютної вологості та температури теплоносія, дозволяє розрахувати ентальпію теплоносія (рис. 2.21).

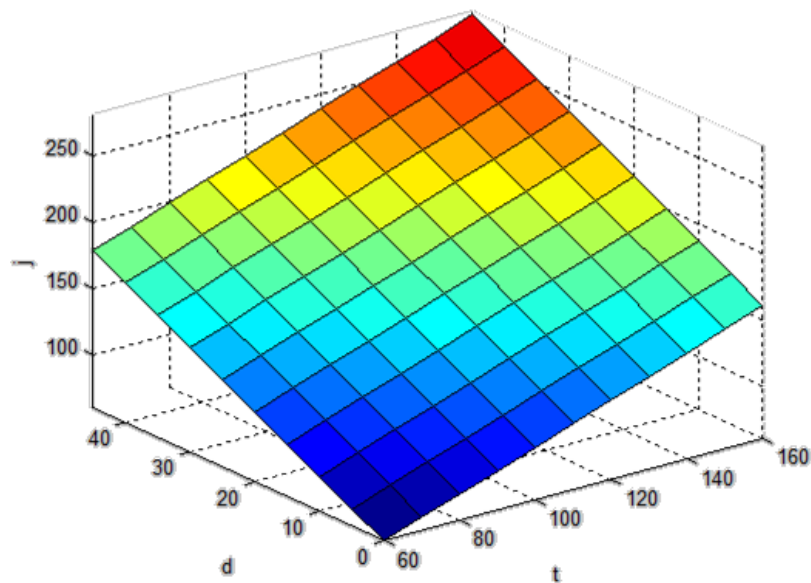
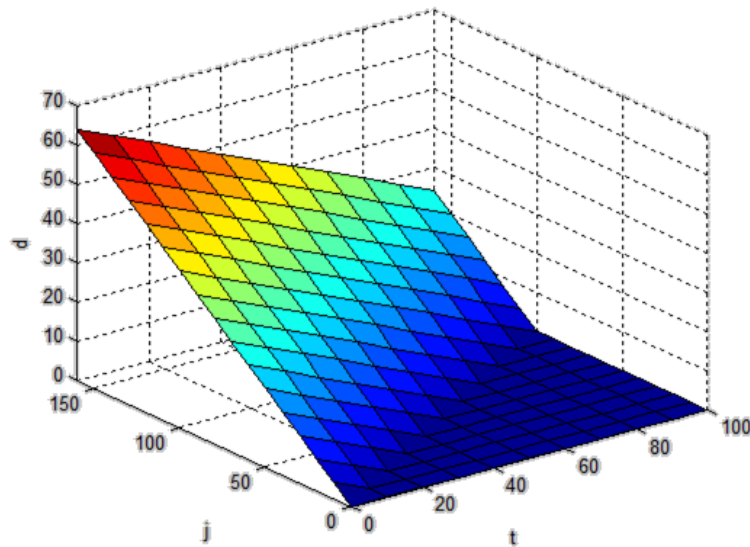


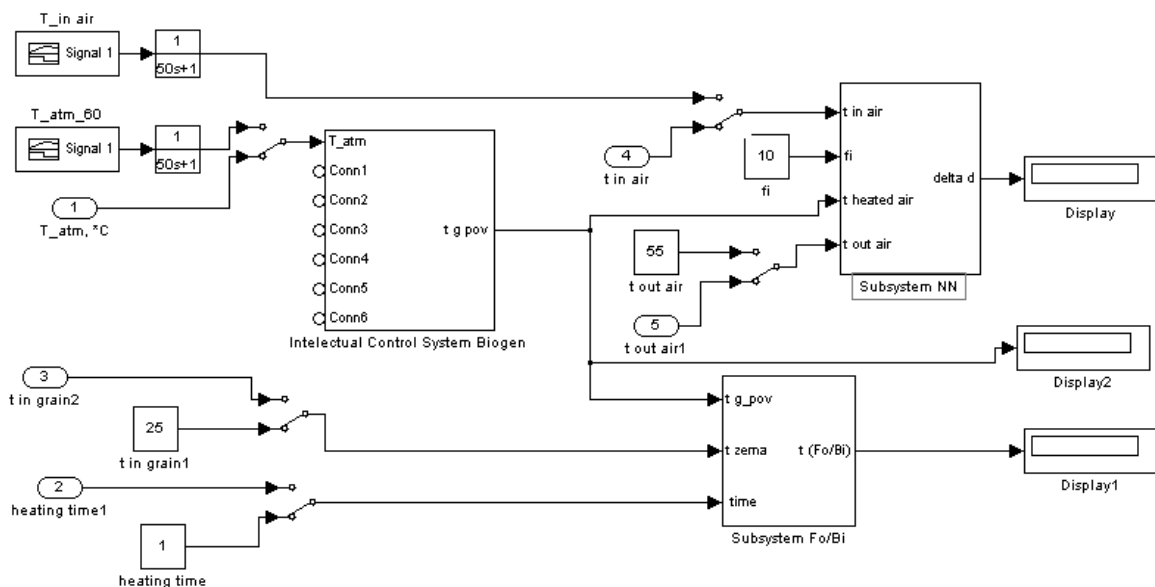
Рис. 2.21 Залежність ентальпії сушильного агента від температури та абсолютної вологості

За допомогою нейромережі  $NN_{f_{tj}}$ , на основі ентальпії  $j$  та температури повітря на виході із сушарки  $t$ , визначається абсолютна вологість відпрацьованого теплоносія  $d$  (рис. 2.22).

Рис. 2.22 Залежність  $d = f(t, j)$ 

Таким чином за допомогою модуля *Subsystem NN* можна визначити кількість вологи, яку поглинув теплоносії із зерна.

З метою узгодження параметрів сушіння зерна з режимами роботи теплогенератора для забезпечення енергоощадності електротехнологічного комплексу розроблено модуль системи керування, імітаційна модель якого подана на рис. 2.23.

Рис. 2.23 Імітаційна модель системи керування *SAU\_Heating\_grain*

До складу імітаційної моделі входять: модуль керування процесом дозування компонентів горіння теплогенератора, а також модулі визначення

параметрів сушіння: аналізу температури та вологості зерна в процесі сушіння. Об'єднання цих модулів в одну систему дозволяє узгоджувати роботу усього електротехнологічного комплексу, що забезпечує його енергоефективність та якість роботи.

## **2.9 Виробничі дослідження теплогенератора із розробленою системою керування**

Виробнича перевірка проводилась науково-дослідною лабораторією «Енергетичний менеджмент» протягом 2021 року згідно технічного завдання на виробничих потужностях «Енергоощадні технології» в Тернопільській області (рис. 2.24).



Рис. 2.24 Теплогенератор зернової сушарки з інтегрованою інтелектуальною системою керування

В якості компонентів біопалива використовувались подрібнена солома вологістю 25–37 % та подрібнені качани кукурудзи 12–15 %. У ході експериментальних випробувань розроблена система керування продемонструвала належну роботу на технологічному обладнанні підприємства.

Отримані результати довели, що застосування запропонованої нами технології дозволяє підвищити енергоефективність теплогенераторної установки в середньому на 11 %. Очікуваний економічний ефект від впровадження інтелектуальної системи керування 47 000 грн за рік.

Даний спосіб, що реалізовується на основі використання інтелектуальної системи керування, може застосовуватись на зернопереробних підприємствах великої і малої потужності, які націлені на використання альтернативних джерел енергії.

## Висновки до розділу 2

Проаналізовано фактори, що впливають на зниження енергетичних витрат зерносушарки. Доведено, що вирішення завдання підвищення енергоефективності сушіння зерна можливе шляхом використання вихрового генератора-утилізатора, алгоритми роботи якого базуються на приготуванні і подачі в топку енергоефективної паливної суміші з урахуванням аналізу складу димових газів.

На основі аналізу характеристик вологості, фізико-хімічного та гранулометричного складу твердого несертифікованого палива, температури та вологості зовнішнього повітря, а також відсоткового вмісту кисню у димових газах обґрунтовано ефективність реалізації раціонального дозування компонентів горіння з використанням регульованих режимів роботи дозаторів подачі палива та нагнітальних вентиляторів для забезпечення необхідної кількості повітря у процесі вихрового горіння, яке може бути досягнуто шляхом застосування інтелектуальної системи керування.

Вперше розроблено комплексну імітаційну модель системи генерації теплової енергії з інтегрованою системою керування, яка дає змогу дослідити параметри теплогенератора при використанні різного виду подрібненого палива, а також перевірити функціонування системи у штатному та критичному режимах. Це підтверджує необхідність застосування засобів штучного інтелекту для оптимізації енергоефективних процесів теплогенерації в системах вихрового горіння несертифікованого палива.

Вперше запропоновано модель системи керування теплогенератором з триконтурним взаємозв'язаним ПД-регулюванням, яка дає змогу дослідити параметри теплогенератора при використанні різного виду подрібненого палива, а також перевірити функціонування системи у штатному та критичну режимах. Це підтверджує необхідність застосування засобів штучного інтелекту для оптимізації енергоефективних процесів теплогенерації в системах вихрового горіння несертифікованого палива.

Створено імітаційні моделі, що відтворюють алгоритми розрахунку необхідних витрат теплоти для сушіння зерна. Розроблені нейронечіткі модулі для аналізу температури та вологості зерна в процесі сушіння імплементовані у



комплексну модель системи керування біотеплогенератором сушарки. Перевірка на адекватність функціонування нейронечітких модулів показала, що середня похибка не перевищує 0,47 %.

Кінцевим результатом виконаних досліджень – є створення автоматизованого комплексу сушіння зерна на базі біотеплогенератора вихрового горіння несертифікованого палива. Аналогів такої розробки не існує, оскільки основне паливо, що використовується у процесі сушіння – це відходи очистки зерна та відходи зернових елеватора, подрібнена солома, тирса та будь-яке інше подрібнене біопаливо. Ефективність функціонування комплексу підтверджено виробничою перевіркою, яка проводилась науково-дослідною лабораторією «Енергетичний менеджмент» протягом 2021 року згідно технічного завдання на виробничих потужностях «Енергоощадні технології» в Тернопільській області.

Отримані результати дозволили встановити, що застосування розробленої інтелектуальної системи керування біотеплогенератором зерносушарки дає змогу підвищити енергоефективність електротехнологічного комплексу в середньому на 11 %. Система керування може застосовуватись на зернопереробних підприємствах великої і малої потужності, які націлені на використання альтернативних джерел енергії. Згенерована енергія, у цьому випадку, в 7–10 разів дешевша від виробленої з використанням вуглеводневого палива.

Комерціалізація задекларованих досліджень та розробок дозволить одночасно вирішити економічні, енергетичні, екологічні та соціальні проблеми в Україні, а саме:

- зменшення обсягів споживання природного газу;
- забезпечення нових робочих місць;
- зменшення шкідливих викидів у атмосферу.

### Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245239554>
2. Загородній Р. І. Дослідження процесу горіння твердого біопалива засобами моделювання. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ. 2013. Вип. 184. Ч. 2. С. 261–264.
3. Загородній Р. І. Підвищення ефективності спалювання твердої біомаси у теплогенераторах. *Енергетика та комп'ютерно-інформаційні технології* : мат. Міжн. наук.-техн. конф. Бережани : ВП НУБіП України «БАТІ», 30–31 травня 2013. С. 37–42.
4. Загородній Р. І. Передумови визначення раціональних режимів регулювання процесу горіння у твердопаливних теплогенераторах. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування* : мат. міжн. наук.-техн. конф. Київ : НУБіП України, 14–26 жовтня 2013. С. 85–86.
5. Загородній Р. І. Автонномна когенераційна система електроживлення на базі біотеплогенератора : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03. Київ, 2016. 154 с.
6. Закони України. Офіційний вебпортал парламенту України. URL : Про затвердження плану заходів... | від 06.06.2018 № 497-р (rada.gov.ua)
7. Корчемний М. О. Дослідження асинхронного електропривода за допомогою математичного моделювання. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Київ : Урожай, 1971. С.67–76.
8. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль : Підручники і посібники, 2001. 984 с.
9. Корчемний М. О., Федорейко В. С. Комп'ютерне моделювання електроприводів сільськогосподарських машин. *Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя, 2000. Т.5, № 4. С. 35–41.
10. Корчемний М. О., Федорейко В. С. Моделювання нелінійних процесів за допомогою нейронних мереж. *Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. Том 14. № 1. С. 100–109.

11. Корчемний М. О., Федорейко В. С. Інтелектуальні технології управління та прийняття рішень. Ч.1. Розмита логіка : навчально–методичний посібник. Тернопіль : ТНПУ. 2007. 140 с.

12. Луцик І. Б., Матвійків В. П., Чайківська Ю. В. Нейромережевий підхід в задачах діагностики стану зернової маси. *Системний аналіз та інформаційні технології*: SAIT : міжнар. наук.-техн. конф., 23–28 трав. 2011 р. : матеріали доп. Київ, 2011. С. 280.

13. Луцик І. Б. Моделювання системи керування біотеплогенератором з використанням адаптивних fuzzy-регуляторів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені П. Василенка. Технічні науки*. Вип. 154. Харків : ХНТУСГ, 2014. С. 46–48.

14. Луцик І. Б. Використання нейронечітких технологій в системах керування електротехнологічними комплексами. *Енергетика і автоматика*. Київ : НУБіП України, 2014. № 3 (21). С. 81–85.

15. Рутило М. І. Моделювання регульованого електропривода вентиляційних установок з адаптивною структурою керування. *Енергетика і автоматика*. Київ, 2011. №2 (8). URL : [http://www.nbu.gov.ua/e-urnals/eia/2011\\_2/11rmiasd.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-urnals/eia/2011_2/11rmiasd.pdf).

16. Федорейко В. С., Горбатюк Р. М., Рутило М. І., Брездень Т. І та ін. Енергозберігаючі інтелектуальні системи керування потоковими лініями виробництва твердого біопалива. Звіт про науково-дослідну роботу. Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка. Тернопіль, 2012. 164 с. Деп. в УкрІНТЕІ 24.01.2013, № 0213U003108.

17. Федорейко В. С., Загородній Р. І., Шутьга В. М., Павх І. І. Пат. 83633 Україна МПК F23N 5/18 (2006.01). Спосіб ефективного згорання твердого біопалива в атмосферних котлах ; Заявник і патентовласник : Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Тернопіль ; заявл. 18.02.2013; опубл. 25.09. 2013; Бюл. 18. 4 с.

18. Федорейко В.С., Іскерський І.С., Загородній Р.І. Дослідження теплових викидів біотеплогенератора зернової сушарки. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України,

2017. Вип. 268, С. 22–28.

19. Федорейко В. С., Луцик І. Б., Іскерський І. С., Загородній Р. І. Підвищення енергоефективності біотеплогенератора шляхом раціонального дозування компонентів горіння. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпропетровськ : НГУ, 2014. № 4. С. 27–32.

20. Федорейко В. С., Луцик І. Б., Іскерський І. С. Нейронечітка система керування вентиляванням біосировини. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : ВЦ НУБіП України, 2014. Вип. 194, ч. 1 С. 80–86.

21. Федорейко В. С., Луцик І. Б., Рутило М. І. Адаптивне частотне керування асинхронним електроприводом вентиляційних установок. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України, 2011. Вип. 166, Т. 4. С. 89–94.

22. Федорейко В. С., Луцик І. Б., Рутило М. І. Енергоефективне керування електроприводом технологічних установок. *Світлотехніка й електроенергетика : історія, проблеми, перспективи* : IV міжнар. наук.-техн. конф., 24–25 квіт. 2012 р. Тернопіль : ТНПУ, 2012. С. 121–123.

23. Федорейко В. С., Луцик І. Б., Рутило М. І., Іскерський І. С. Імітаційне моделювання раціональних швидкісних режимів технологічних процесів. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України, 2013. Вип. 184. Ч. 2. С. 54–60.

24. Федорейко В.С., Лучко М.Р., Іскерський І.С., Загородній Р.І. Підвищення ефективності біотвердопаливних систем генерації енергії: технічний та економічний аспекти. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НГУ, 2019. № 2. С. 94–100.

25. Федорейко В. С., Рутило М. І., Іскерський І. С., Загородній Р. І. Оптимізація процесів теплогенерації в системах вихрового горіння біопалива. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НГУ, 2020, № 6. С. 83–88.

26. Федорейко В. С., Рутило М. І., Клендій П.Б., Іскерський І. С. та ін. Енергоощадні інтелектуальні системи керування процесом приготування

твердобіопаливної суміші для теплогенераторів. Звіт про науково-дослідну роботу. Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка. Тернопіль, 2014. 124 с. Деп. в УкрІНТЕІ 24.01.2015, № 0215 U007182.

27. Федорейко В. С., Рутило М. І., Іскерський І. С. Підвищення енергоефективності електротехнологічного комплексу для виробництва твердого біопалива з використанням нейроконтролера. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпропетровськ : НГУ, 2013. №5. С. 78–85.

### РОЗДІЛ 3

## БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ ДЛЯ АВТОННОМНИХ ОБ'ЄКТІВ ГОСПОДАРЮВАННЯ ТА ПІДРОЗДІЛІВ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

Основними напрямками вирішення питання енергетичної безпеки країни є використання принципів рекуперації і застосування альтернативних видів палива, зокрема – перетворення твердих відходів у побутові енергетичні ресурси. Крім того, важливим є впровадження енергозберігаючих технологій, серед яких на першому місці стоїть когенерація як спосіб суттєвого збільшення коефіцієнту корисної дії усіх типів енергогенеруючих установок, зокрема й для теплогенераторів.

Одним із недоліків устаткування технологічних процесів, що використовують теплогенератори є те, що під час своєї роботи вони розсіюють величезну кількість теплових відходів, які, крім того, є ще й вагомим чинником термального забруднення навколишнього середовища. Тому можливість використання теплових відходів у рекупераційному виробничому процесі як джерела отримання електричної енергії для забезпечення резервного живлення системи керування теплогенератором є важливим завданням. Реалізувати дане завдання можна використавши термоелектричні перетворювачі енергії [1].

Для створення енергоефективної системи термоелектричного генерування енергії шляхом використання тепла, що виводиться з димовими газами, необхідно провести дослідження щодо визначення реальних енергетичних параметрів при різних режимах навантаження. Адже суттєвим обмеженням переваг термоелектричного перетворення залишається низький коефіцієнт ефективності перетворення теплового потоку в електричну енергію: від 3 до 8 %. Тому, виходячи із цього, актуальним завданням є визначення доцільності застосування термоелектричних модулів як складової когенераційної системи в якості джерела акумуляції електроенергії з теплових викидів теплогенераторів.

### **3.1 Використання термоелектричних перетворювачів як складової когенераційної системи**

В даний час в Україні, особливо гострим є завдання економії паливно-енергетичних ресурсів. Це, насамперед, пов'язано зі зменшенням запасів органічного палива і, відповідно, різким збільшенням його вартості, що приводить до порушення і перебоїв постачання окремих регіонів і споживачів паливом, тепловою та електричною енергією. Вирішити це питання можна шляхом впровадження автономних когенераційних систем, що забезпечуватимуть процес спільного вироблення електричної та теплової енергії [1].

Основною метою когенерації є вироблення теплової енергії потрібних параметрів за заданим графіком навантаження, а отримана електрична енергія є супутнім продуктом, що підвищує економічність всієї установки. Економічний ефект при цьому визначається зниженням енергетичних втрат на першому етапі технологічного процесу (за рахунок більш повного використання енергії продуктів згоряння) [1].

В законі України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» [12] зазначено, що: когенераційні установки, які відпускають частину або весь обсяг виробленої електричної енергії споживачам, крім потреб власного споживання, можуть бути визнані як кваліфіковані, якщо вони відповідають кваліфікаційним показникам однієї з двох таких умов:

1) як основне паливо використовується скидний енергетичний потенціал технологічних процесів; для таких установок виробництво теплової енергії не є обов'язковим. Якщо застосовується додаткове паливо, то ефективність використання додаткового палива протягом одного року з дня введення в експлуатацію цієї установки і кожних наступних 12 місяців повинна бути не меншою 42 відсотків.

2) як основне паливо використовується традиційне паливо, при цьому обсяг відпущеної теплової енергії повинен бути не менше 10 відсотків від загального виробництва електричної і теплової енергії протягом одного року з дня її

введення в експлуатацію і протягом кожних наступних 12 місяців; протягом вказаного строку обсяг відпущеної електричної та теплової енергії по відношенню до енергії основного та додаткового палива повинен становити не менше 42 відсотків.

Когенераційні установки широко використовуються в малій енергетиці, що зумовлено наступними передумовами:

- тепло використовується безпосередньо в місці отримання, що коштує дешевше, ніж будівництво та експлуатація багатокілометрових теплотрас;
- електроенергія використовується здебільшого в місці отримання без накладних витрат постачальників енергії, і її вартість для споживача може бути дещо менше, ніж у енергії з мережі;
- екологічність.

Системи когенерації, зазвичай, класифікують за типом первинного двигуна, генератора, а також за типом споживаного палива. Від цього залежить технічна реалізація такої системи [1].

У когенераційних установках для виробництва енергії найбільшого поширення набуло викопне паливо – природний газ, пічне і дизельне паливо, мазут, бензин і т.п. [1; 22]. Щодо нетрадиційних джерел в даний час практичне застосування отримали 3 способи генерації електроенергії з використанням відновлюваної сировини (біопалива). Перший – це застосування парового котла із паровою турбіною. Як паливо тут можна використовувати подрібнену деревину, соломку, енергетичні рослини. Однак в котлах невеликої потужності (5–10кВт) при спалюванні в них біомаси важко отримати пару з високими технологічними параметрами – перегріта пара. Коефіцієнт корисної дії (ККД) системи, яка генерує електричну енергію потужністю до 1 МВт, зазвичай, не перевищує 10–15 %, а при використанні відпрацьованої пари для підігріву термофікаційної води загальний ККД становить 60–70 % [1].

При виборі схеми регенерації для когенераційної установки слід керуватися основними показниками економічності роботи установки. До таких показників, в першу чергу, відноситься коефіцієнт використання теплоти палива (ККД установки) і величина витрат палива на одиницю вироблення теплової (те,



тепловий ККД) та електричної (ел, електричний ККД) енергії, що характеризують витрату палива на одиницю виробленої електричної та теплової енергії відповідно. Розраховуються значення цих ККД за формулами [1]:

$$\eta_{\text{ел}} = \frac{N_{\text{Е}}}{G_{\text{пал}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{р}}}; \eta_{\text{ел}} = \frac{Q_{\text{ТЕ}}}{G_{\text{пал}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{р}}}; Q_{\text{ТЕ}} = Q_{\text{КУ}} + Q_{\text{ГВП}} \quad (3.1)$$

де  $G_{\text{пал}}$  – розхід палива, кг/с;

$Q_{\text{КУ}}, Q_{\text{ГВП}}$  – тепла потужність відповідно теплогенератора-утилізатора та газоповітряного підігрівача, кВт;

$Q_{\text{ТЕ}}$  – тепла потужність усієї когенераційної установки, кВт.

А також коефіцієнт використання теплоти палива ( $\eta_{\text{кеу}}$ ), що характеризує ефективність роботи усієї установки:

$$\eta_{\text{кеу}} = \frac{Q_{\text{ТЕ}} + N_{\text{Е}}}{G_{\text{пал}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{р}}} = \eta_{\text{ел}} + \eta_{\text{те}} \quad (3.2)$$

де  $\eta_{\text{кеу}}$  – коефіцієнт використання теплоти палива.

Аналіз ефективності застосування регенерації для роботи когенераційних установок проведений у роботі [1], але всі розглянуті в даних роботах схеми мають в якості первинного двигуна газопоршневий двигун внутрішнього згорання.

Виходячи з сказаного вище, існує потреба проведення аналізу ефективності застосування різних схем регенерації для когенераційних енергетичних установок на базі твердопаливного теплогенератора. Це дозволить знайти шляхи удосконалення вже існуючих та створення нових когенераційних установок шляхом введення або збільшення ступеня використання регенерації теплоти відхідних газів [22].

В останні роки питання підвищення ефективності перетворення теплової енергії в електричну набуло особливого значення у зв'язку з нестачею викопних видів палива та значними викидами в атмосферу великої кількості шкідливих газів, які забруднюють оточуюче середовище, пошкоджують озоновий шар Землі та викликають глобальні зміни клімату. Приблизно 90 % світової потужності

генерується тепловими двигунами, які використовують спалювання викопного палива в якості джерела тепла і, як правило, працюють на 30–40 % ефективності, так, що приблизно 15 терават тепла втрачається у навколишнє середовище. Термоелектричні модулі потенційно можуть перетворити частину цього втраченого тепла в електроенергію [22].

Крім того, якщо ще до початку 2000 р. основною вимогою було збільшення виробництва електроенергії, то в останні 2–3 роки на передній план виходять додаткові умови: енергія повинна вироблятися екологічно чистим шляхом, має бути відновлювана та не пов'язана з вуглецем [1]. У такому випадку термоелектрична генерація є перспективним, доступним джерелом перетворення теплової енергії в електричну.

Генератори, створені на основі термоелектричного ефекту, використовують не лише для перетворення сонячного тепла в електричну енергію, але й тепла, яке виділяється від багатьох інших джерел, як наприклад, автомобільних відпрацьованих газів, термальних вод, промислових процесів агрегатів, навіть людського тіла чи окремих його органів. Враховуючи високу надійність термоелектричних пристроїв (твердотільні пристрої без рухомих частин), вони мають широке застосування. За останні роки у різних країнах світу були розроблені, випробувані і поставлені на серійне виробництво термоелектричні генератори (ТЕГ) потужністю від декількох мікروات до десятків кіловат, більшість з яких призначені для так званої «малої енергетики». Вони володіють такими унікальними якостями як:

- повна автономність,
- висока надійність,
- простота експлуатації,
- безшумність та довговічність.

Термоелектричні генератори використовуються для енергопостачання об'єктів, віддалених від ліній електропередач, та коли вони є єдиною можливим джерелом електричної енергії [22].

ТЕГ можна використовувати вже при мінімальних перепадах температур, в тому числі на поверхні промислових агрегатів, хоча часто вважають, генератор

буде економічно ефективним, якщо різниця температур буде не нижчою за 50 °С. Також практичне застосування отримали пристрої, які перетворюють енергію теплових потоків при різниці температур менше 10 °С. Використання невеликих різниць температур стає актуальним, якщо врахувати, що до 90 % теплової енергії виділяється на промислових об'єктах та устаткуванні при температурі поверхонь до 300 °С (рис. 3.1) [1].

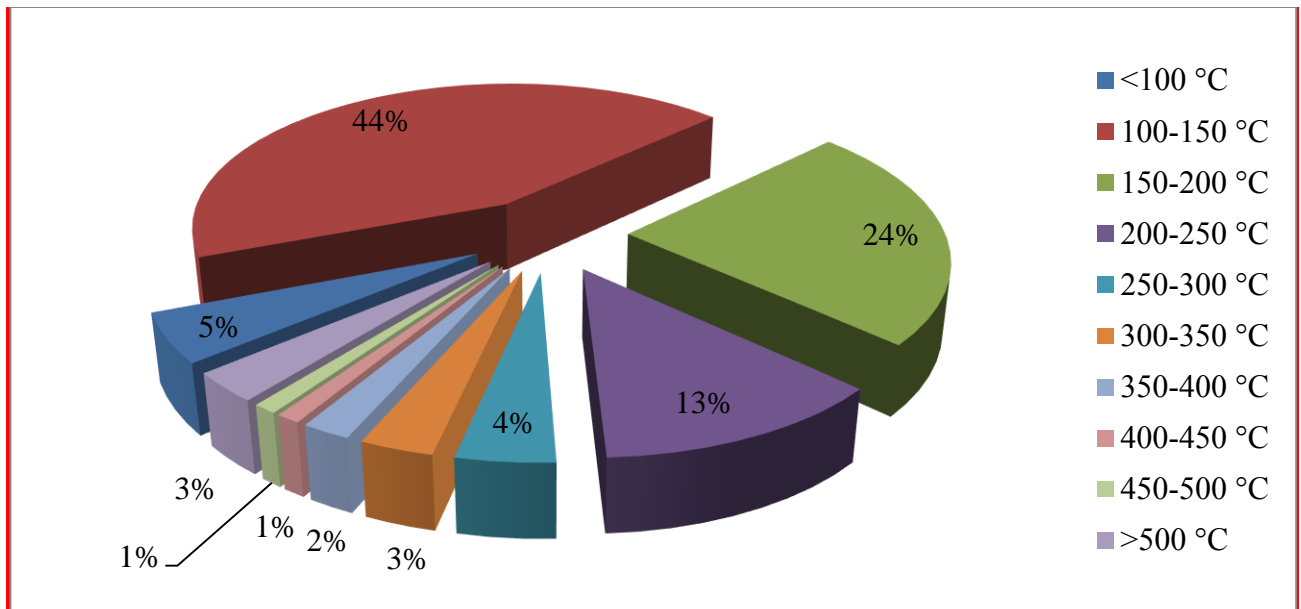


Рис. 3.1 Розподіл температури на поверхні промислових агрегатів

Основними напрямками практичного використання термоелектричних перетворювачів на даний час є [1]:

- використання відпрацьованого тепла двигунів (автомобільних, корабельних та ін.);
- автономні джерела електроенергії для забезпечення роботи котелень, установок з переробки відходів та ін.;
- джерела живлення для катодного захисту нафто- і газопроводів;
- перетворення тепла природних джерел (наприклад, геотермальних вод) в електричну енергію;
- забезпечення живлення різних пристроїв телеметрії та автоматики на об'єктах, віддалених від ліній електропередач;
- вимірювання теплових потоків (теплоти);

– забезпечення автономним живленням малопотужних електронних пристроїв (бездротові датчики) за рахунок накопичуваної енергії, яка збирається за наявності мінімальних перепадів температур (менше 10 °С);

– отримання електричної енергії на сонячних концентраторах за рахунок різниці температур гарячого і охолодженого теплоносія в контурі.

Таким чином, використання термоелектричних генераторів у когенераційних системах є перспективним напрямком. Проте доцільність та ефективність використання ТЕГ, як джерела автономного живлення у когенераційних системах, що базуються на теплогенераторах малої та середньої потужності, потребує більш детального дослідження.

Ефективність термоелектричних пристроїв характеризується безрозмірною величиною – добротністю термоелектричного матеріалу [1; 22] (3.3):

$$ZT = \left( \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi} \right) T \quad (3.3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт Зеєбека;

$\sigma$  – електропровідність;

$\chi$  – теплопровідність;

$T$  – абсолютна температура.

Ефективність термоелектричного генератора для вироблення електроенергії безпосередньо пов'язана із значенням  $ZT$  і становить (3.4):

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_1}{T_2}} \quad (3.4)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  температури холодного та гарячого контактів відповідно, і  $\bar{T}$  середня температура  $T_1$  і  $T_2$ . Таким чином, важливо використовувати матеріали з високим значенням  $ZT$  для практичного застосування.

Принцип дії будь-якого ТЕГ базується на зворотних термоелектричних ефектах Пельтьє, Томсона (Кельвіна) і Зеєбека. Визначальна роль в ТЕГ належить ефекту термо-ЕРС (Зеєбека). Перетворення енергії супроводжується незворотними (дисипативними) ефектами: передачею теплоти за рахунок теплопровідності матеріалу ТЕГ і протікання струму [1].

Нагрівання (охолодження) контакту можна розглядати з точки зору поглинання чи випромінювання енергії (рис. 3.2), або ж задавати як потік

електронів, що рухаються із напівпровідника у металічні електроди (і навпаки) на їх контакті, тому цей процес прийнято називати оборотним (рис. 3.3).

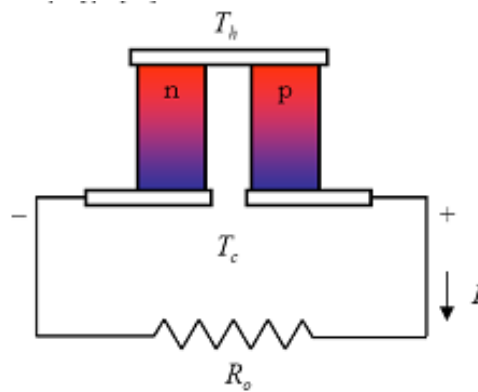


Рис. 3.2 Схематичне зображення термоелектричного модуля генерування електроенергії

Коли електричний струм проходить через два різні матеріали (метали або напівпровідники), один з яких має два спаї (рис. 3.3), то на одному спаї тепло буде поглинатися, а на іншому – виділятися. При цьому один спай охолоджується, а другий нагрівається, залежно від напрямку струму.

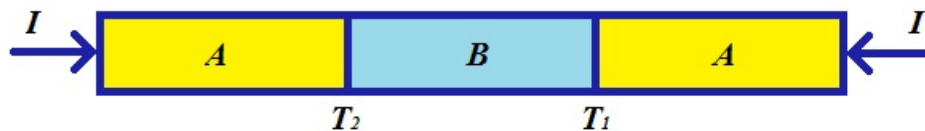


Рис. 3.3 Приклад реалізації термоелектричного ефекту

Під час проходження струму через елементи, тепло поглинається на контакті  $T_2$  і виділяється на контакті  $T_1$ , у випадку якщо диференційний коефіцієнт Пельтьє  $\Pi_{AB}$  – негативний. Теплота Пельтьє ( $Q$ ), яка поглинається на холодному спаю в одиницю часу визначається згідно виразу (3.5) [1]:

$$\frac{dQ}{dt} = \Pi_{AB} I = (\Pi_A - \Pi_B) I \quad (3.5)$$

де  $\Pi_A$  і  $\Pi_B$  – коефіцієнти Пельтьє матеріалів А і В, відповідно [22].

Вибір термогенеруючого елемента доцільно здійснювати згідно наступних критеріїв: ККД, питома потужність одного елемента, питома вартість генерації

енергії. Таким чином, нами обрано низькотемпературний термоелектричний елемент TEG241-1,4-1,2.

### **3.2 Способи підвищення енергоефективності автономної когенераційної системи теплогенератора з інтегрованою термоелектричною панеллю**

Визначення способів підвищення енергоефективності автономної когенераційної термоелектричної системи повинні ґрунтуватись на поетапному аналізі термодинамічних, хімічних та термоелектричних процесів, які відбуваються в процесі функціонування комплексу.

Встановлення критеріїв ефективності системи потребує визначення теплового балансу когенераційної установки та подальшого поетапного розгляду шляхів підвищення ефективності усіх етапів технологічного процесу [1; 22]:

- процесу горіння в топці теплогенератора для збільшення теплового ККД;
- втрат енергії з відхідними газами для визначення можливостей їх використання як джерела для електрогенеруючого модуля;
- процесу термоелектричних перетворень, що відбувається в електрогенераторному модулі когенераційної системи для визначення можливості збільшення його ККД.

Отримані математичні залежності є основою для подальших експериментальних та комп'ютерно-модуючих досліджень.

Ефективність використання палива у твердопаливному теплогенераторі визначається двома факторами: повнотою процесу спалювання палива і глибиною охолодження продуктів згорання. Більша частина теплоти, яка вноситься у теплогенератор, сприймається поверхнями нагріву і передається робочому тілу. За рахунок цієї теплоти відбувається корисний нагрів теплоносія. Це – корисно використана теплота.

Решта теплоти, що складає приблизно 6–20 %, не використовується, що пояснюється різного роду втратами теплоти, що супроводжують роботу теплогенератора.

З метою знаходження шляхів підвищення енергоефективності когенераційної системи на базі біотеплогенератора та забезпечення автономності

його енергоспоживання першочергово також необхідно проаналізувати втрати енергії, що виникають в процесі його функціонування.

У теплогенераторі відбувається ряд фізико-хімічних процесів, кожен з яких має свій ККД і, відповідно, втрачає частину енергії палива в цих процесах (рис. 3.4). Спрощено схема цих процесів зображена на рисунку 3.4 [1].

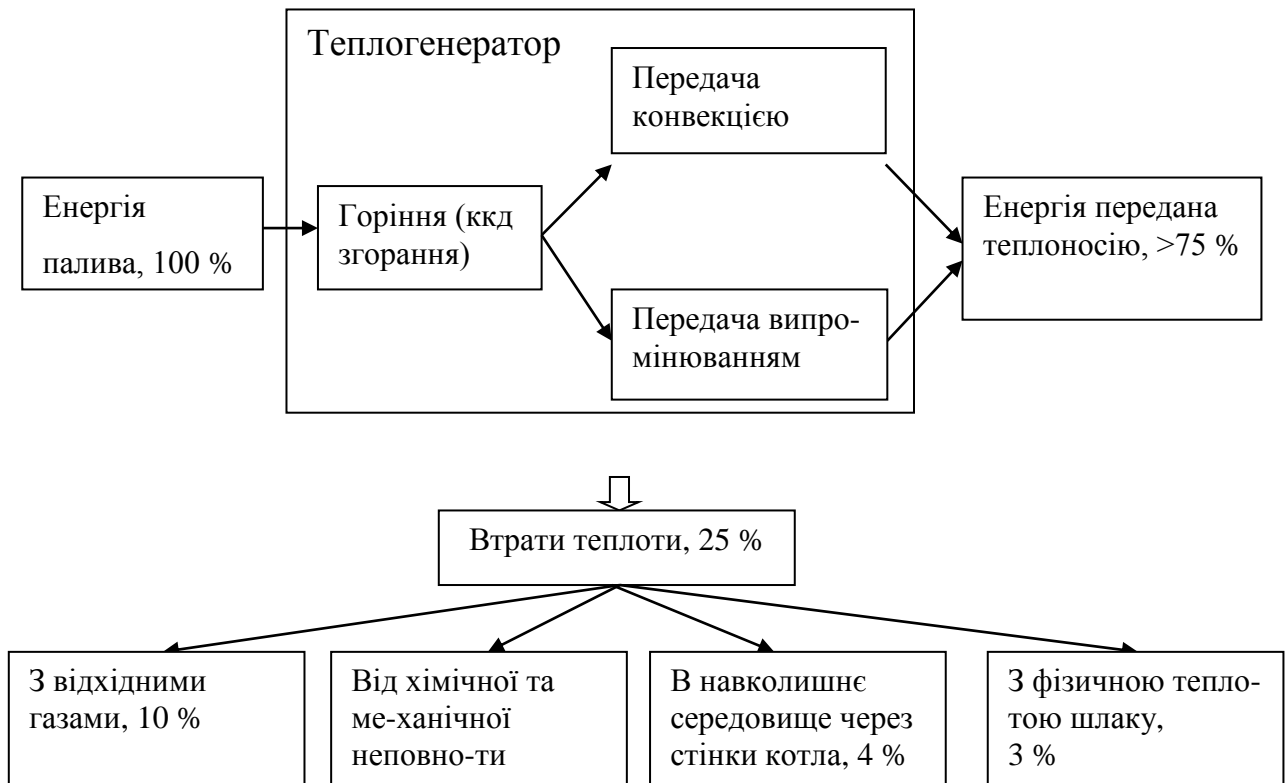


Рис. 3.4 Схема фізико-хімічних процесів, що відбуваються в теплогенераторі

На ділянці виробництва теплової енергії при нормальній роботі котлоагрегату завжди існують три види основних втрат:

- з недопалом палива і димовими газами (зазвичай не більше 18 %);
- втрати енергії через стінки теплогенератора (не більше 4 %);
- втрати з продувкою і на власні потреби котельні (близько 3 %).

Зазначені цифри теплових втрат приблизно близькі для нормального нового вітчизняного теплогенератора (з ККД близько 75 %). Більш досконалі сучасні котлоагрегати мають реальний ККД близько 80–90 % і стандартні ці втрати у них нижче.

Перераховані джерела виникнення додаткових втрат енергії в котельні не є явними і прозорими для їх виявлення. Наприклад, одна з основних складових цих втрат – втрати з недопалу, можуть бути визначені тільки за допомогою хімічного аналізу складу відхідних газів. У той же час, збільшення цієї складової може бути викликано цілим рядом причин: не дотримується правильне співвідношення суміші паливо-повітря, відбуваються неконтрольовані присоси повітря в топку теплогенератора, паливковий пристрій працює в неоптимальному режимі тощо.

Таким чином, постійні неявні додаткові втрати тільки при виробництві тепла в теплоагрегаті можуть досягати величини 20–25 %.

Для підвищення економічності роботи вже теплогенератора необхідним є:

- комплексне обстеження котлоагрегату, включаючи газовий аналіз продуктів згоряння;
- режимне налагодження теплогенератора з інвентаризацією шкідливих викидів;
- чистка зовнішніх і внутрішніх поверхонь котлоагрегату;
- відновлення теплоізоляції котлоагрегату, виявивши і усунувши неконтрольовані джерела присосів повітря в топку.

Під час спалювання палива необхідно мінімізувати втрати енергії. Внесок у загальні втрати вносять незгорілі речовини і втрати при горінні, викликані надмірною кількістю надлишкового повітря. Показник ефективності процесу згоряння – вміст  $CO$  у відхідних газах. У процесі спалювання палива необхідно забезпечити утримання максимальної кількості  $CO_2$  і відсутність  $CO$  у відхідних газах.

Крім того, 10 % втрат теплоти, які відходять з димовими газами, частково можна використати для генерації електроенергії шляхом використання термоелектричних модулів, прикріплених до димовивідної труби. Для отримання максимальної вихідної потужності ТЕГ, яка б забезпечила автономність роботи когенераційної системи, доцільним є встановлення системи автоматичного керування.

Щоб встановити втрати теплоти з димовими газами теплогенератора необхідно скласти тепловий баланс когенераційної термоелектричної системи. В



загальному випадку рівняння теплового балансу теплогенератора можна записати у вигляді (3.6) [1; 22]:

$$Q_3 = Q_{кор} + Q_{втрат} \quad (3.6)$$

де  $Q_3$  – загальна теплота теплогенератора, кДж;

$Q_{кор}$  – корисна теплота, кДж;

$Q_{втрат}$  – теплота втрат, кДж.

Якщо ж теплогенераторну установку доповнити термоелектрогенераторною панеллю на димовідводах, тоді частина потужності теплових втрат  $Q_{втрат}$  використовується як джерело електричної енергії  $P_{ТЕП}$ , решта – неутилізовані втрати  $Q_{неут.втрат}$ :

$$Q_{втрат} = P_{ТЕП} + Q_{неут.втрат} \quad (3.7)$$

У свою чергу  $Q_{втрат}$  є функцією від загальної теплової потужності теплогенератора:

$$Q_{втрат} = Q_3 - Q_3 \cdot \eta_{mг} = (1 - \eta_{mг}) \cdot Q_{пал}^H \cdot m \quad (3.8)$$

де  $\eta_{mг}$  – коефіцієнт корисної дії теплогенератора;

$Q_{пал}^H$  – теплотворна здатність палива;

$m$  – маса палива.

У свою чергу, теплотворна здатність твердого біопалива є функцією від виду деревини та її вологості. Аналіз даних дозволив встановити залежність для порід деревини, що найбільш поширені на теренах України (рис. 3.5):

– для дуба:  $q_o(w) = 3920 - 5613 \cdot w$ ;

– для берези:  $q_o(w) = 3145 - 4504 \cdot w$ ;

– для сосни:  $q_c(w) = 2516 - 3605 \cdot w$ ;

– для тополі:  $q_m(w) = 1936 - 2772 \cdot w$ .

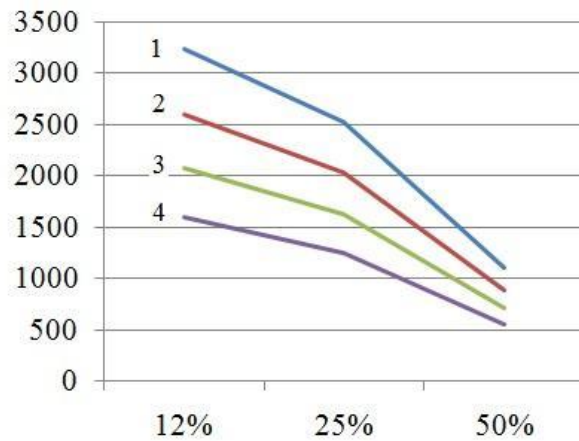


Рис. 3.5 Залежність теплотворної здатності від вологості та виду деревини:

1 – дуб; 2 – береза; 3 – сосна; 4 – тополя

З урахуванням вказаного вище потужність, яку можна використати як джерело електричної енергії для термоелектрогенераторної панелі визначається як:

$$P_{ТЕГ} = (1 - \eta_{те}) \cdot Q_{пал}^h \cdot m - Q_{неут.втрат} \quad (3.9)$$

де  $Q_{неут.втрат}$  – неутилізовані втрати теплоти теплогенератора.

Таким чином, збільшення енергетичної ефективності технологічного процесу здійснюється за рахунок збільшення загального ККД перетворення і передачі енергії технологічного обладнання, що забезпечує технологічний процес [21]. Загальний коефіцієнт корисної дії когенераційного комплексу складається з ККД теплогенератора та електричного ККД (долі електроенергії від загальної енергії згоряння палива) (рис. 3.6).

Якщо ж врахувати, що ККД теплогенераторів, які працюють на твердому біопаливі становить до 85 % [22], то встановлення електрогенеруючої панелі дозволяє збільшити загальний коефіцієнт корисної дії, використавши залишкову енергію.

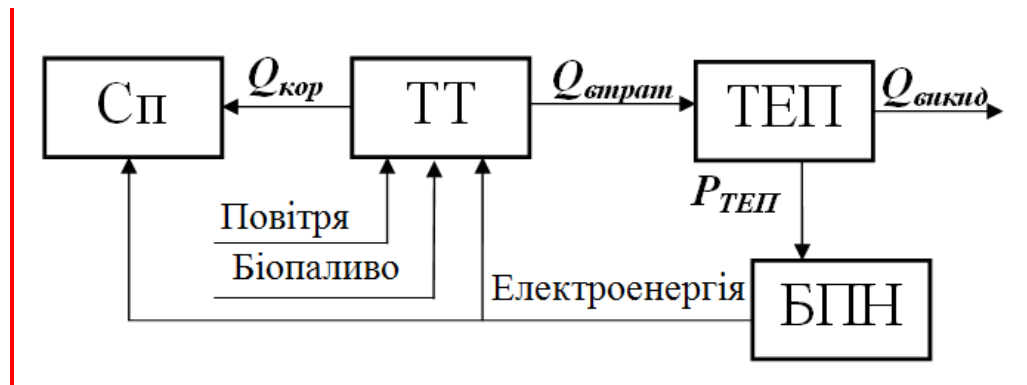


Рис. 3.6 Структурна схема функціонування когенераційної системи на базі твердопаливного теплогенератора: СП – споживач теплової енергії, ТТ – твердопаливний теплогенератор; ТЕП – термоелектрична панель; БПН – блок перетворення напруги

У даному випадку матимемо залежні процеси перетворення енергії. За таких умов перш за все потрібно підвищувати ККД того перетворювача енергії, в якого мінімальний базовий ККД і суттєве його зростання від збільшення ККД тих перетворювачів енергії, які на нього впливають [1]. Тому головним акцентом нашої роботи є підвищення коефіцієнта корисної дії термоелектричного перетворювача як складової електрогенераторного модуля.

Зазвичай, термоелектричне обладнання, яке використовується для рекуперації відпрацьованого тепла змінює температурний режим теплогенератора (термоелектричний генератор перебуває в контакті з нагрітою поверхнею, яка віддає тепло) [22]. У такому випадку є доцільним розміщення термоелектричних модулів на димовідводах, що дозволить не тільки виробляти електроенергію, а й зменшити теплові викиди у атмосферу.

З метою більш детального аналізу теплових втрат залежність (3.6) можна представити наступним чином [1]:

$$Q_3 = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{в.вг}} + Q_{\text{в.нз.х}} + Q_{\text{в.нз.м}} + Q_{\text{в.ст.к}} + Q_{\text{в.шлак}} \quad (3.10)$$

де  $Q_3$  – загальна теплота на 1 кг палива, кДж/кг;

$Q_{\text{кор}}$  – корисно використана теплота, кДж/кг;

$Q_{\text{в.вг}}$  – втрати теплоти з відхідними газами, кДж/кг;

$Q_{\text{в.нз.х}}$  – втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння, кДж/кг;

$Q_{\text{в.нз.м}}$  – втрати теплоти від механічної неповноти згоряння, кДж/кг;

$Q_{\text{в.ст.к}}$  – втрати теплоти в навколишнє середовище через стінки теплогенератора, кДж/кг;

$Q_{\text{в.шлак}}$  – втрати теплоти з фізичною теплотою шлаку, кДж/кг.

Для когенераційної системи, оснащеної ТЕГ, втрати теплоти з відхідними газами  $Q_{\text{в.вг}}$  зменшуються за рахунок часткового відбору тепла димових газів як джерела генерування електроенергії:

$$Q_{\text{в.вг}} = P_{\text{ТЕП}} + Q_{\text{в.вг}}^1 \quad (3.11)$$

Тоді, з урахуванням (3.7):

$$Q_3 = Q_{\text{кор}} + P_{\text{ТЕП}} + Q_{\text{в.вг}}^1 + Q_{\text{в.нз.х}} + Q_{\text{в.нз.м}} + Q_{\text{в.ст.к}} + Q_{\text{в.шлак}} \quad (3.12)$$

Коефіцієнт корисної дії теплогенератора за прямим балансом становить:

$$\frac{Q_{\text{кор}}}{Q_3} = q_{\text{кор}} = \eta_{\text{к}} \quad (3.13)$$

Відповідно ККД теплогенератора за зворотнім балансом визначається за формулою:

$$\eta_{\text{к}} = 100 - (q_{\text{в.вг}} + q_{\text{в.нз.х}} + q_{\text{в.нз.м}} + q_{\text{в.ст.к}} + q_{\text{в.шлак}}) \quad (3.14)$$

Втрати теплоти з відхідними газами  $q_2$  обумовлені тим, що димові гази викидаються з теплогенератора з температурою, вищою, ніж температура палива і повітря на вході в теплогенератор, тобто вищою, ніж температура навколишнього середовища.

Якщо знехтувати теплотою палива та золи і врахувати зменшення об'єму газів через втрати  $q_{\text{в.нз.м}}$ , то втрати теплоти з відхідними газами визначаються за формулою [1]:

$$q_{\text{в.вг}} = \frac{(a_{\Sigma} \cdot L'_0 + 1) \cdot c_p^{\Gamma} \cdot t_{\Gamma} - a_{\Sigma} \cdot L'_0 \cdot c_p^{\text{В}} \cdot t_{\text{п}}}{Q_{\text{пал}}^{\text{н}}} \quad (3.15)$$

де  $a_{\Sigma}$  – сумарний коефіцієнт надлишку повітря;

$L'_0$  – теоретична кількість повітря, необхідного для повного згорання 1 кг палива, кг;

$c_p^{\Gamma} \cdot c_p^{\text{В}}$  – середня питома масова ізобарна теплоємність продуктів горіння і повітря, кДж/(кг К);

$t_r$  – температура відхідних газів, °С;

$t_n$  – температура повітря зовнішнього середовища, °С;

$Q_{\text{пал}}^H$  – нижча робоча теплота згоряння палива, кДж/кг.

Абсолютна кількість теплоти ( $Q_{\text{в.вг}}$ ), яка виходить з димовими газами, кДж/год, визначається за формулою:

$$Q_{\text{в.вг}} = q_{\text{в.вг}} \cdot G_{\text{в.вг}} \cdot Q_{\text{пал}}^H \quad (3.16)$$

Розхід димових газів за годину  $G_{\text{в.вг}}$ , кг/год, визначається як:

$$G_{\text{в.вг}} = G_{\text{пов}} + G_{\text{пал}} \quad (3.17)$$

де,  $G_{\text{пов}}$  – годинний розхід (витрати) повітря, кг/год, що визначається через сумарний коефіцієнт надлишку повітря і годинний розхід палива [1]:

$$G_{\text{пов}} = 14,32 \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot G_{\text{пал}} \quad (3.18)$$

Тоді, із врахуванням (3.17) і (3.18) втрати теплоти  $Q_{\text{в.вг}}$ , яку потенційно можна використати як джерело генерування електричної енергії для ТЕГ становить:

$$Q_{\text{в.вг}} = q_{\text{в.вг}} \cdot G_{\text{пал}} (1 + 14,32 \cdot \alpha_{\Sigma}) \cdot Q_{\text{пал}}^H \quad (3.19)$$

Зниження втрат теплоти з димовими газами можливе за рахунок зменшення коефіцієнта надлишку повітря в топці  $\alpha_T$  (рис. 3.7).

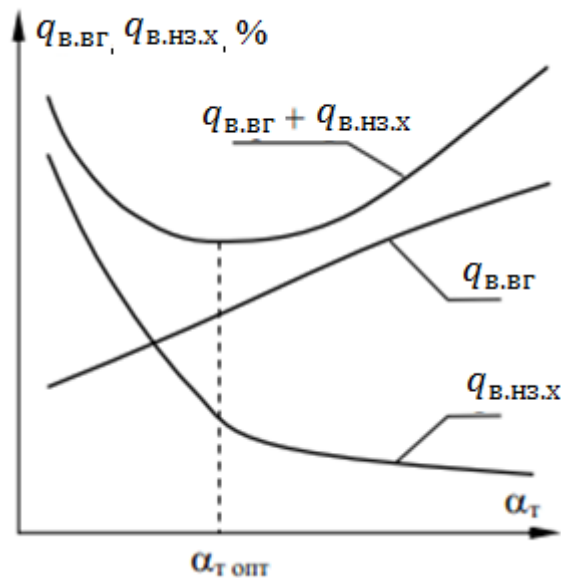


Рис. 3.7 Вплив коефіцієнта надлишку повітря на втрати теплоти

Але зміна  $\alpha_T$ , впливає на інші втрати – від хімічної неповноти згоряння  $q_3$  (див. рис. 3.7). Оптимальне значення  $\alpha_T$ , залежить від виду палива та умов змішування палива з повітрям. Для ефективного протікання процесу горіння твердого біопалива у природному вигляді величина  $\alpha$  повинна знаходитись в межах 1,4–1,6. Оптимальним значенням є  $\alpha_T$ , при якому сумарні втрати  $q_{v.v.g.} + q_{v.n.z.x}$  наближаються до мінімуму [1].

Діапазон втрат теплоти з відхідними газами складає 8–12 %. В процесі руху температура димових газів буде зменшуватися. Охолодження газів в трубі на 1 метр висоти визначають за формулою [1]:

$$\Delta t_{v.g.} = \frac{B}{\sqrt{\frac{Q_k}{1000}}}, \quad (3.20)$$

де  $Q_k$  – корисна теплота теплогенератора,

$B$  – коефіцієнт: 0,85 – для неізолюваної металеві труби, 0,34 – для ізолюваної труби.

Інтенсивність зменшення залежить від характеру руху газів (ламінарний чи турбулентний). Характер руху газів залежить від співвідношення сили інерції і сили внутрішнього тертя в потоці. Це співвідношення визначається критерієм Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{\omega d \gamma}{\eta_t} = \frac{\omega d}{\nu} \quad (3.21)$$

де  $\omega$  – швидкість руху газу, м/с;

$d$  – товщина потоку, м<sup>2</sup>;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, кг×с/м<sup>2</sup>;

$\eta_t$  – коефіцієнт внутрішнього тертя при температурі газу =  $t_r$ ,

$$\eta_t = \eta_0 \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T} \sqrt{\frac{T}{273}}} \quad (3.22)$$

де  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Потік у димовій трубі теплогенератора із самотягою є ламінарним ( $Re < 2100$ ), тоді:

$$\omega_{кр} = \frac{Re \cdot \nu}{d} \quad (3.23)$$

Втрати динамічного напору під час руху потоку димових газів по трубі димовиводу пов'язані з тертям його об стінку, що супроводжується переходом кінетичної енергії в теплову, а також втратами на подолання місцевих опорів.

Втрати напору на тертя визначаються за формулою Жираро [1]:

$$h_{тр} = \lambda \frac{W^2}{2} \rho \frac{l}{d_{екв}} = \lambda \frac{W_0^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t) \frac{l}{d_{екв}} \quad (3.24)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт тертя;

$W$  – дійсна швидкість потоку;

$\rho$  – щільність потоку;

$l$  – довжина каналу;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення газу;

$d_{екв}$  – еквівалентний діаметр каналу ( $d_{екв} = \frac{4F}{S}$ );

$F$  – переріз каналу;

$S$  – периметр.

Для прямокутних каналів  $d_{труб} = \frac{2ab}{a+b}$ .

Додаткові втрати напору виникають також при зміні напрямку руху потоку або внаслідок зміни поперечного перерізу каналу (рис. 3.8). При зміні напрямку

руху потоку або перерізу каналу змінюються епюри швидкостей по перерізу потоку. Це супроводжується втратами кінетичної енергії потоку, що переходить в теплоту.

Таким чином, в процесі розрахунку теплового балансу для електрогенераторного модуля когенераційної системи необхідно враховувати, що потік тепла з відхідними газами димовивідної труби, який є джерелом генерування електроенергії, залежить як від швидкості руху газів, так і від параметрів труби [1].

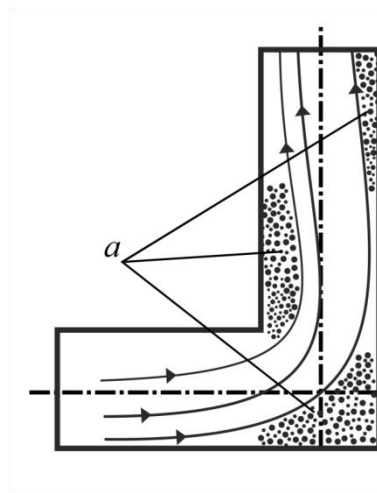


Рис. 3.8 Зміна напрямку руху потоку  
(а – мертві зони, заповнені малорухомими газами)

Подальші втрати потоку тепла з відхідними газами пов'язані з теплопередачею через плоску одношарову стінку труби (рис. 3.9).

Враховуючи те, що розмір стінок труби більший за її товщину, площа поверхні  $F=const$ , і, припускаючи, що усереднений коефіцієнт теплопровідності  $\lambda=const$ , тепловий потік, що проходить через стінку, згідно закону Фур'є:

$$Q_{ст.тр} = -\lambda F grad T \quad (3.25)$$



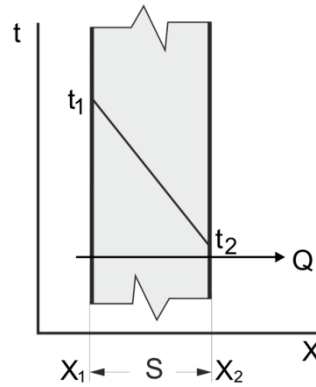


Рис. 3.9 Зміна температури в плоскій одношаровій стінці:  
 $t_1$  і  $t_2$  – температура на внутрішній та зовнішній стороні труби

Для того, щоб не порушувалась умова стаціонарності, припустимо:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{Q_{ст.тр}}{\lambda F} = const \quad (3.26)$$

Отримаємо

$$Q = \frac{\lambda F}{S} (t_1 - t_2) \quad (3.27)$$

де  $\frac{\lambda F}{S} = R$  – тепловий опір стінки, К/Вт.

Таким чином, у процесі проходження димових газів по димовідводу їх теплота зменшується, що залежить від параметрів і матеріалів труби та напору газового потоку. Крім того, втрати теплоти пов'язані також із теплопередачею через стінку труби.

Також важливою складовою є підвищення коефіцієнта корисної дії електрогенераторного модуля когенераційної системи. Електрична потужність  $P_{ТЕП}$ , що виробляється генераторним модулем визначається, згідно із законом збереження енергії, за різницею теплових потоків його холодної  $Q_x$  та гарячої  $Q_z$  сторін [1; 5; 16]:

$$P_{ТЕП} = Q_z - Q_x \quad (3.28)$$

Термоелектричний генератор на зовнішньому навантаженні  $R_n$  створює напругу  $U$ , рівну термоелектрорушійній силі  $E_{mEPC}$ , із врахуванням спаду напруги на внутрішньому опорі генератора  $R$  [16]:

$$U = E_{mEPC} - I \cdot R \quad (3.29)$$

Сила струму  $I$  в колі прямо пропорційна різниці температур  $\Delta T$  і визначається за виразом:

$$I = \frac{2N \cdot S \cdot \Delta T}{R + R_n} \quad (3.30)$$

де  $N$  – число пар термоелектричних елементів у модулі;

$S$  – коефіцієнт Зеебека (термоЕРС).

Потужність, що відводиться в зовнішнє коло прямо пропорційна квадрату різниці температур [1; 16]:

$$P = I^2 \cdot R_n = \frac{(2N \cdot S)^2 \cdot \Delta T^2}{(R + R_n)^2} R_n \quad (3.31)$$

Отже, для забезпечення ефективної роботи термоелектричного генератора необхідно досягнути максимально допустимої різниці температур між поверхнями модуля. Різниця температур на поверхнях модуля, встановленого у біотеплогенераторі, який працює на твердому паливі, залежить від цілого ряду факторів, що залежать від взаємозв'язку теплоенергетичних характеристик біопалива та технічних параметрів теплогенератора [16].

Крім того, величина електричного опору навантаження має наближатися до величини внутрішнього опору генераторного модуля в умовах експлуатації. Тому, основною характеристикою термоелектричного циклу є баланс потужності в ТЕГ, який використовують для генерування електричного струму [1; 22].

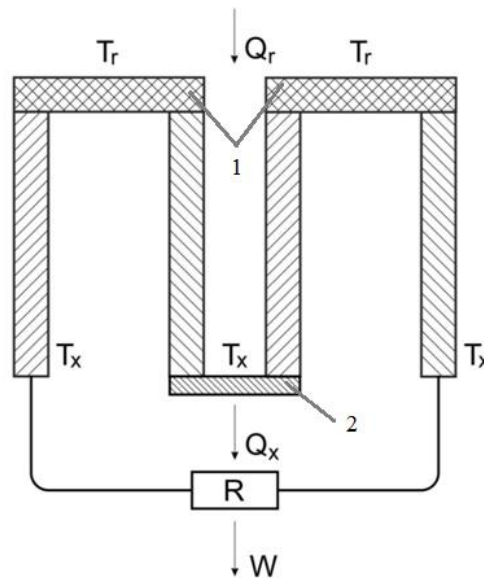


Рис. 3.10 Послідовне з'єднання двох ТЕГ в просту батарею

Тепло у батареї елементів (рис. 3.10) поступає до гарячих кінців елементів через комутаційні пластини 1 і відводяться від холодних кінців через пластину 2 при температурі  $T_r$  і  $T_x$  відповідно. Оскільки втрати теплоти в навколишнє середовище з бокових поверхонь ТЕГ малі, тому ними можна знехтувати.

Кількість теплоти, використаного гарячим спаєм термоелементу,  $Q_r$  складається з наступних частин [1]:

– тепло Пельтьє, поглинене гарячим спаєм:

$$Q_{\pi_r} = \pi_{1,2}(T_r) \quad (3.32)$$

– тепло, що втрачається внаслідок теплопровідності матеріалів ТЕГ;

$$Q_K = k(T_r - T_x) \quad (3.33)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопровідності.

– половина тепла Томсона, що виділяється з обидвох віток ТЕГ (половина його поступає до гарячого спаю, половина до холодного);

$$\frac{1}{2}Q_\tau = \frac{1}{2}I \int_{T_x}^{T_r} (\tau_2 - \tau_1) dT \quad (3.34)$$

– половина тепла Джоуля, що виділяється в термоелементі при струмі  $I$  і опорі  $r$  (вважаємо, що друга половина цього тепла відводиться холодним спаєм ТЕГ)

$$(1/2)Q_d = I^2 r \quad (3.35)$$

Кількість теплоти, що поступає до гарячих спаїв визначаються з виразу:

$$Q_{\Gamma} = P + Q_{\kappa} + \frac{Q_{\tau}}{2} - \frac{Q_{\delta}}{2} == \pi_{1,2}(T_{\Gamma})I + k(T_{\Gamma} - T_{\chi}) + \frac{1}{2}I \int_{T_{\chi}}^{T_{\Gamma}} (\tau_2 - \tau_1) dT - \frac{I^2 r}{2} \quad (3.36)$$

Аналогічно кількість тепла, що відводиться від холодних спаїв ТЕГ рівна:

$$Q_{\chi} = \pi_{1,2}(T_{\chi})I + k(T_{\Gamma} - T_{\chi}) + \frac{I^2 r}{2} - \frac{1}{2}It \int_{T_{\chi}}^{T_{\Gamma}} (\tau_2 - \tau_1) dT \quad (3.37)$$

Очевидно, що баланс витрат потужності для ТЕГ визначаються як [1]

$$Q_{\Gamma} - Q_{\chi} - P = 0 \quad (3.38)$$

де  $P$  – корисна електрична потужність, яка може бути визначена з останнього співвідношення :

$$P = Q_{\Gamma} - Q_{\chi} \quad (3.39)$$

Підставивши сюди значення  $Q_{\Gamma}$  (3.36) та  $Q_{\chi}$  (3.37), отримаємо:

$$P = I \left[ \pi_{1,2}(T_{\Gamma}) - \pi_{1,2}(T_{\chi}) + \int_{T_{\chi}}^{T_{\Gamma}} (\tau_2 - \tau_1) dT - Ir \right] \quad (3.40)$$

З енергетичного балансу оборотних процесів:

$$E_{1,2}(T_{\Gamma}, T_{\chi}) = \pi_{1,2}(T_{\Gamma}) - \pi_{1,2}(T_{\chi}) + \int_{T_{\chi}}^{T_{\Gamma}} [\tau_2(T) - \tau_1(T)] dT \quad (3.41)$$

Внівши це значення в попереднє рівняння, будемо мати

$$= I(E - Ir) = IE_{\Pi} \quad (3.42)$$

де  $E_{\Pi}$  – різниця потенціалів на навантаженні.

Визначені залежності дозволяють встановити взаємозв'язок корисної електричної потужності ТЕГ від різниці температур на його холодній і гарячій стороні.

### **3.3 Енергоефективні алгоритми функціонування автономної когенерації системи засобами імітаційного моделювання**

Аналіз та оптимізацію параметрів функціонування когенераційної системи доцільно проводити засобами імітаційного моделювання. Це дозволяє відтворити алгоритм функціонування досліджуваного об'єкта в часі при різноманітних поєднаннях значень параметрів системи і зовнішнього середовища [1].

Універсальність моделей визначається їх повнотою, яка оцінюється можливістю всебічного описання об'єкта, ієрархічністю, тобто здатністю до

послідовного, алгоритмічного визначення закономірностей і особливостей його поведінки, комплектністю, високою продуктивністю та надійністю [22].

Таким чином, для визначення енергоефективних алгоритмів функціонування автономної когенераційної системи розроблено комплексну імітаційну модель, яка складається з підсистем, що імітують процеси у термоелектричному перетворювачі, модуля біотеплогенератора, системи керування та інших модулів, які є складовими когенераційної установки.

Для дослідження ефективності застосування термоелектричних панелей в електрогенеруючому модулі автономної когенераційної системи розроблено імітаційну модель термоелектричного модуля (рис. 3.11) [1; 22] та дослідної установки (рис. 3.12) [16].

Створена модель термоелектричного перетворювача враховує теплопровідність стінок, їх площу, товщину, теплоємність, внутрішній опір та контактну різницю потенціалів на межі гарячої та холодної поверхонь, яка становить приблизно 0,104 В на 1 °С. Внутрішній опір елемента для нормальних умов (20 °С) становить 3 Ом.

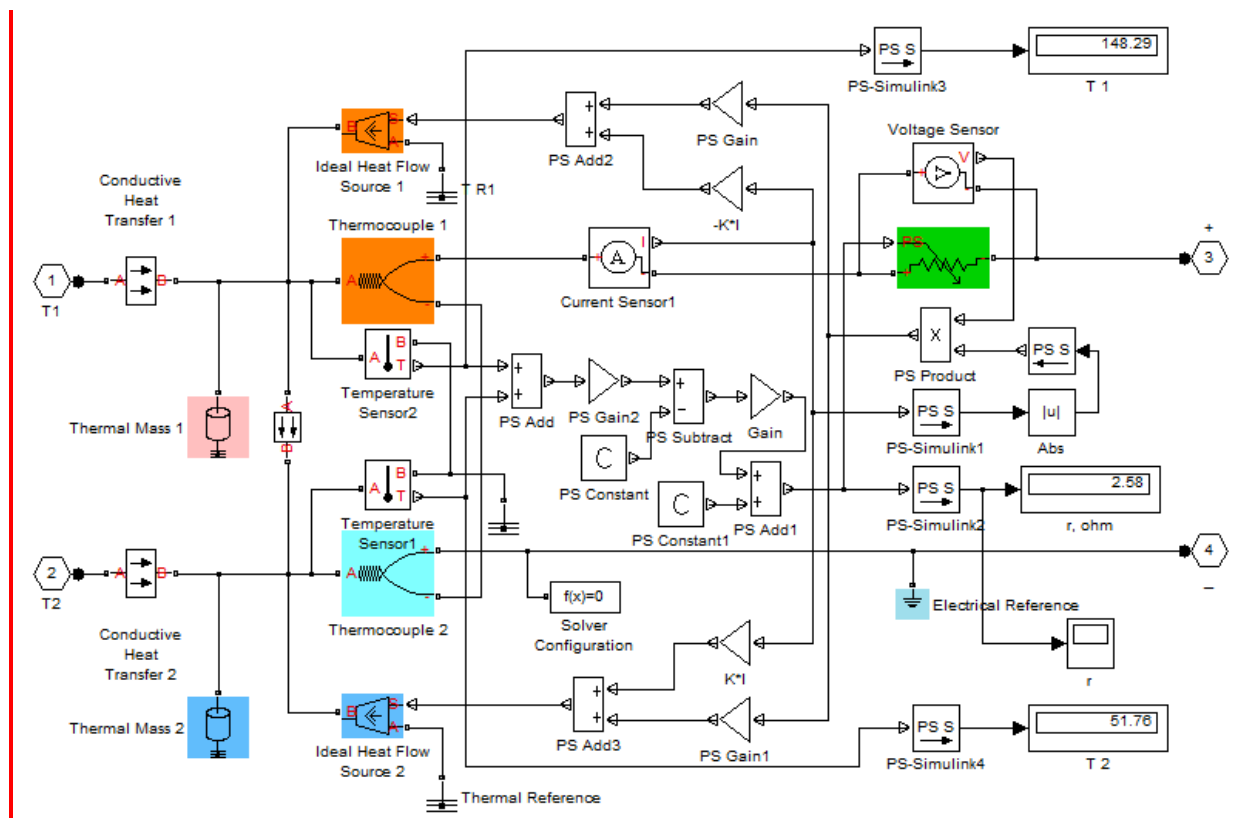


Рис. 3.11 Імітаційна модель термоелектричного перетворювача

Навантаженням термоелектричного перетворювача служить резистор, величина опору якого, для досягнення максимальної вихідної потужності була вибрана приблизно 4,5 Ом з урахуванням температурного коефіцієнта зміни внутрішнього опору та зворотнього ефекту Пельтьє.

Розроблена імітаційна модель термоелектричного модуля є підсистемою моделі дослідної установки (рис. 3.12).

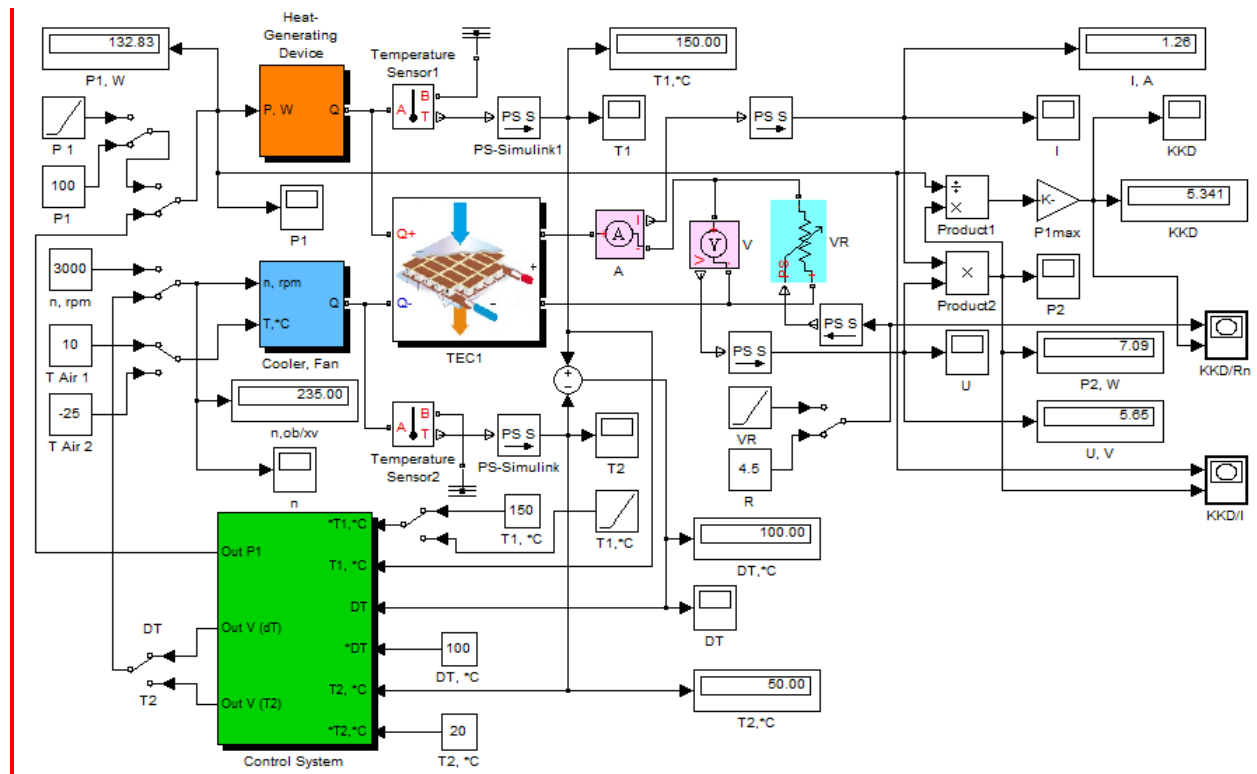


Рис. 3.12 Імітаційна модель дослідної установки на базі термоелектричного елемента

В її структуру входять:

- імітаційна модель підсистеми термоелектричного елемента, що базується на поданих вище аналітичних виразах (3.30–3.40);
- підсистема теплогенеруючого пристрою (Heat-Generating Device);
- підсистема пристрою для охолодження з вентилятором (Cooler, Fan);
- засоби задання та вимірювання вхідних та вихідних параметрів, у тому числі навантаження.

Підсистема охолодження реалізована на базі моделі тепловідводу з вентилятором із урахуванням площі, маси, теплоємності та теплопровідності

матеріалів конструкції. У ній передбачено можливість задання температури холодоносія (повітря), швидкості обертання вентилятора та коефіцієнта тепловіддачі.

Порівняння отриманих в процесі імітаційного моделювання результатів з експериментальними даними, свідчить про достовірність розробленої моделі [22] (рис. 3.13).

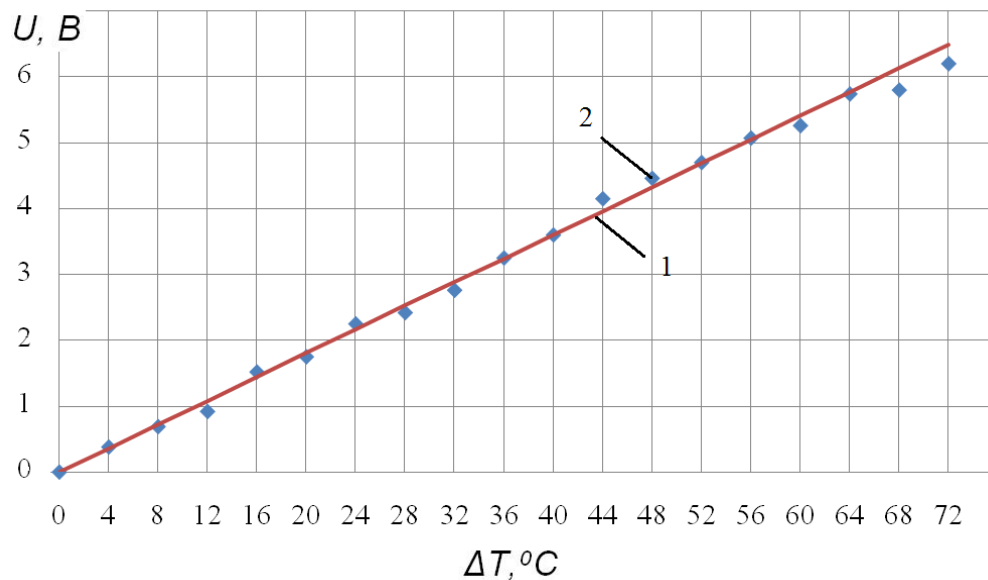


Рис. 3.13 Залежність ЕРС від різниці температур на поверхнях ТЕГ:

1 – результати імітаційного моделювання

2 – результати експериментальних досліджень

Таким чином, це дозволяє стверджувати, що залежність ЕРС від різниці температур на поверхнях елемента ТЕГ можна, з достовірністю апроксимації 0,9, описати лінійним рівнянням (3.43):

$$U(\Delta T) = 0,104 \cdot \Delta T - \gamma \Delta T \quad (3.43)$$

де  $\gamma$  – введений нами коефіцієнт нелінійності термоелектричного перетворення 0,017.

Оскільки, ККД термоелектричних модулів істотно залежить від температурних режимів їх роботи, тоді отримано залежності ККД термоелектричного модуля від опору навантаження (1) та споживаного струму (2)

для температур на гарячій поверхні 90 °С (а) і 150 °С (б) з дотриманням їх сталої різниці:  $\Delta T = 100$  °С [1, 16] (рис. 3.14).

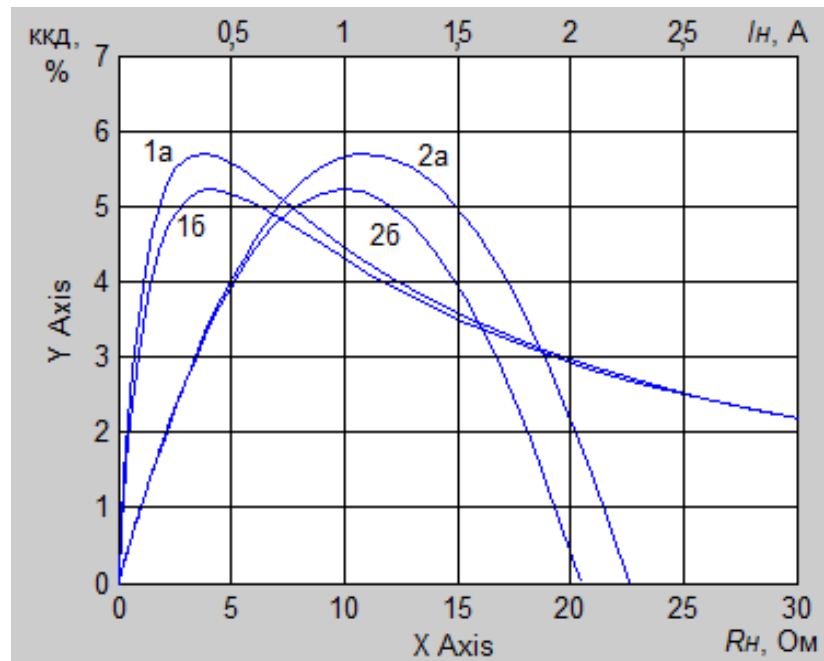


Рис. 3.14 Залежність коефіцієнта корисної дії термоелектричного модуля від струму та опору навантаження за різних  $T_c$

У момент досягнення теплового балансу в системі, одержано наступні результати. Для режиму роботи без навантаження з максимально допустимою різницею температур поверхонь термоелектричного елемента (100 °С) електрорушійна сила становила 8,7 В. У режимі роботи з навантаженням (4,5 Ом) величина вихідної потужності досягла 7,1 Вт, ККД термоперетворювача – 5,8 %.

На рисунку 3.15 представлено результати імітаційного моделювання, що відображають залежність ККД термоелектричного перетворювача від опору навантаження та температурних режимів роботи.

Таким чином, виходячи з результатів моделювання, для отримання максимальної ефективності показників ККД, доцільно підтримувати мінімально можливу середню температуру модуля та опір навантаження в діапазоні 2–10 Ом.

На рисунку 3.16 представлено результати імітаційного моделювання, що відображають залежність вихідної потужності ТЕГ від різниці температур та опору навантаження [1; 16].



Таким чином, виходячи з результатів моделювання, для отримання максимальної вихідної потужності ТЕГ, доцільно підтримувати якомога вищу різницю температур та опір навантаження в діапазоні 2–10 Ом.

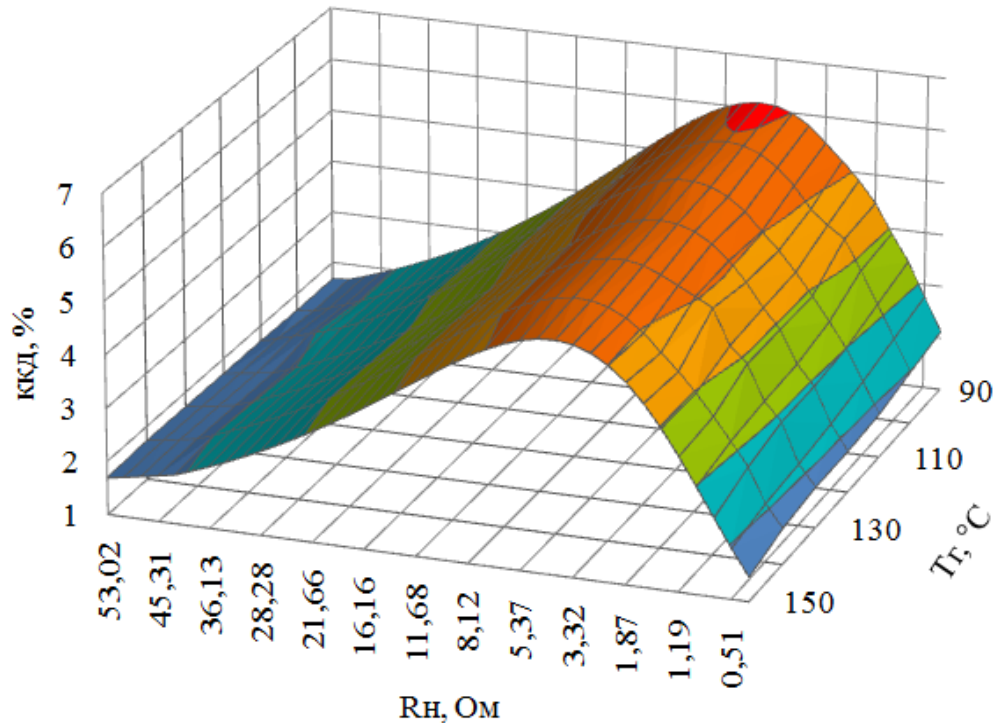


Рис. 3.15 Залежність коефіцієнта корисної дії ТЕГ від опору навантаження ( $R_n$ ) та температури на гарячій стороні ( $T_g$ ) при сталій  $\Delta T = 100$  °C

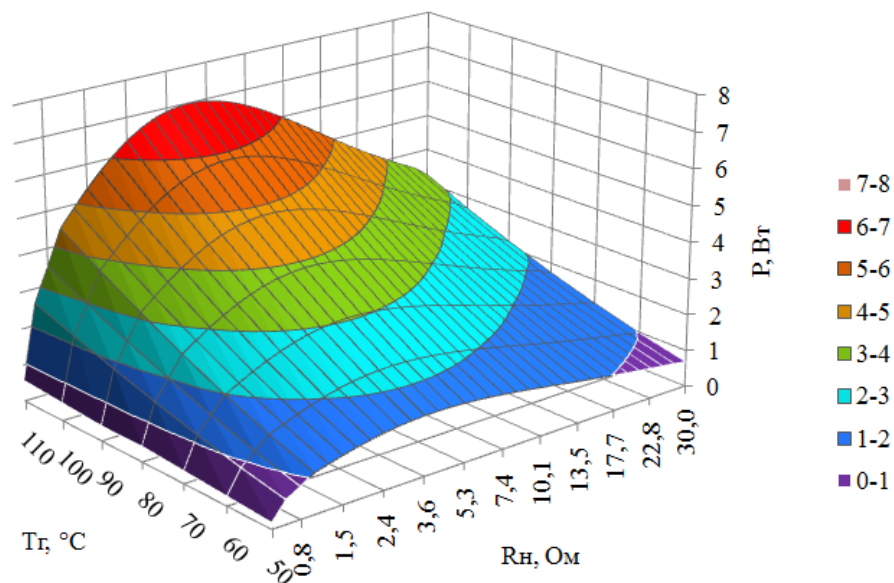


Рис. 3.16 Залежність вихідної потужності ТЕГ від різниці температур та опору навантаження

Для визначення енергоефективного діапазону струму навантаження електрогенеруючого модуля проведено аналіз залежності (3.44), дотримання максимально допустимого значення  $\Delta T$  зростання потужності термомодуля можна досягти, зменшуючи середнє значення температур  $T_c$ . Тобто ефективність модуля зростає при зменшенні його середньої температури [1].

$$\Delta T = \frac{U + I \left( R_0 + \alpha \left( \frac{T_1 + T_2}{2} - T_0 \right) \right)}{k} \quad (3.44)$$

$$T_c = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.45)$$

За таких умов струм навантаження, який забезпечує максимальну вихідну потужність, визначається за залежністю, виходячи з навантажувальної характеристики ТЕГ:

$$I = \frac{k \Delta T}{2(R_0 + \alpha(T_c - T_0))} \quad (3.46)$$

де,  $T_0$  – температура термоелектричного модуля за нормальних умов (20 °C);  
 $R_0$  – опір термоелектричного модуля за нормальних умов (20 °C).

За заданим алгоритмом розраховується вхідний споживаний струм термоелемента з метою встановлення максимальної потужності у допустимому температурному діапазоні  $\Delta T$ : 50-110 °C (рис. 3.17).

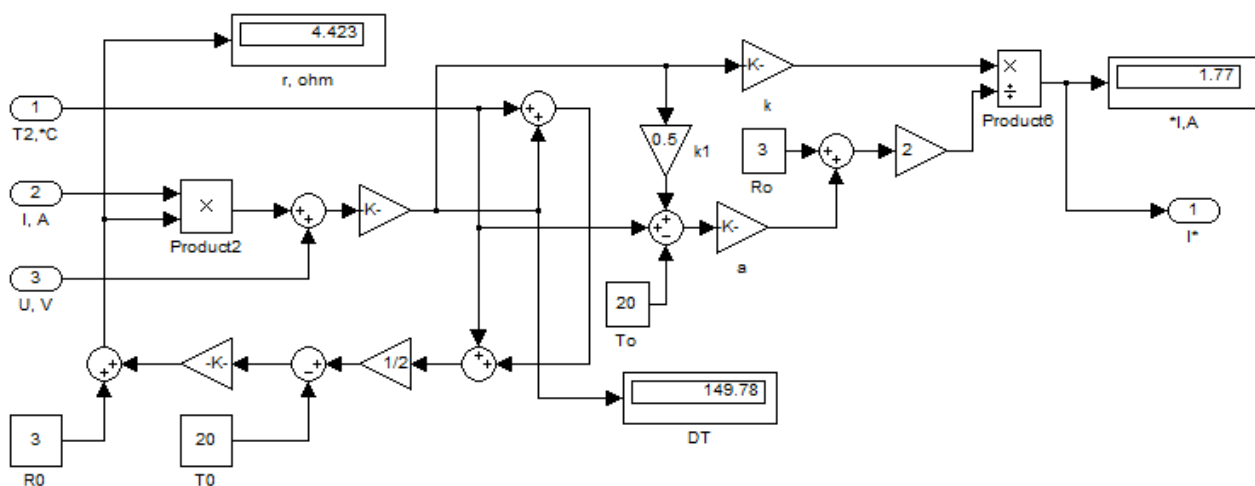


Рис. 3.17 Імітаційна модель алгоритму підтримання максимальної потужності ТЕГ з урахуванням зміни його внутрішнього опору

Алгоритм реалізовано окремим модулем системи керування перетворювача напруги зарядного пристрою батареї (рис. 3.18).

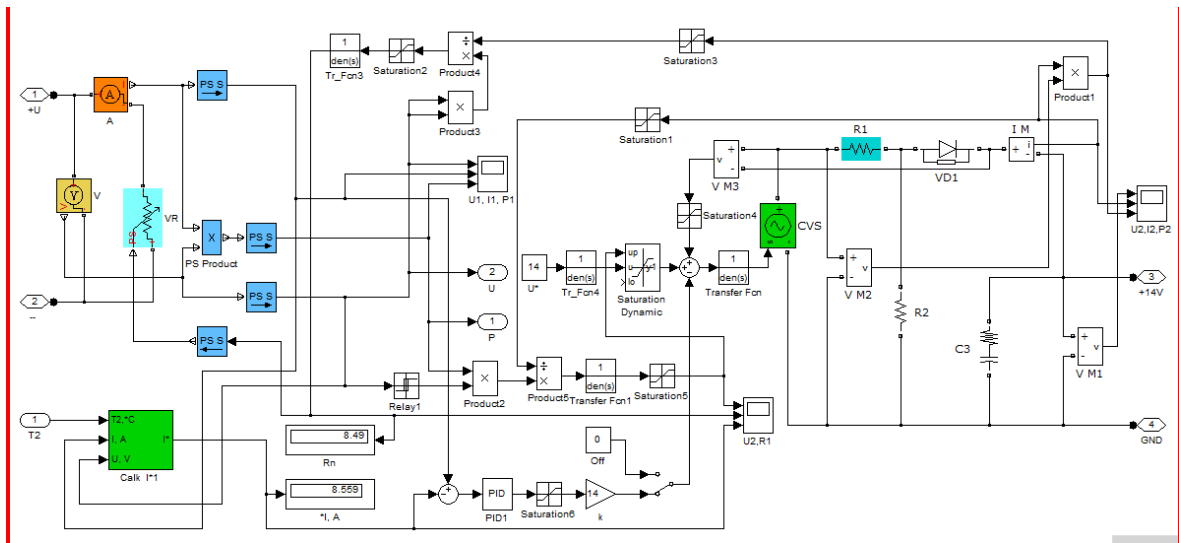


Рис. 3.18 Імітаційна модель перетворювача напруги DC-DC з алгоритмом забезпечення максимальної вихідної потужності термоелемента

Проведені дослідження дозволили проаналізувати динаміку змін потужності у процесі заряджання батареї від 10 % до 100 % (рис. 3.19), а також перехідні процеси на вході та виході перетворювача (рис. 3.20–3.21) [1; 22].

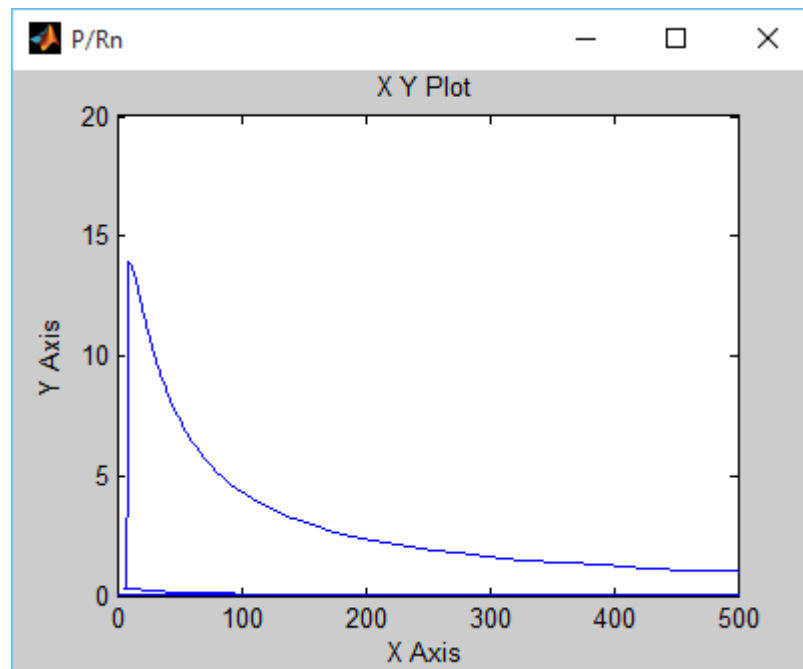


Рис. 3.19 Залежність потужності ТЕГ від опору навантаження

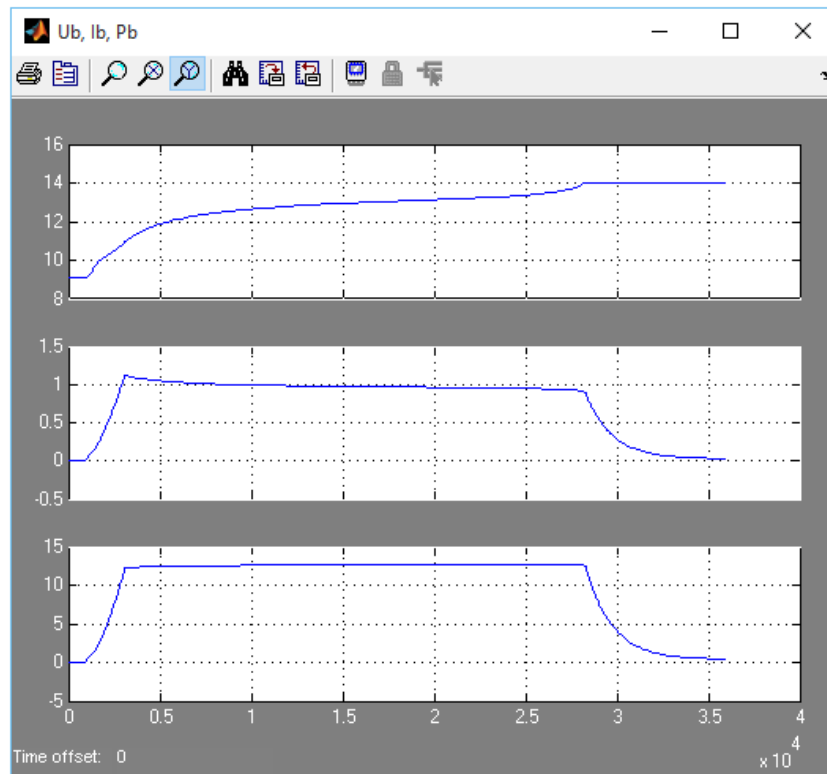


Рис. 3.20 Перехідні процеси на виході перетворювача

Аналіз графічних залежностей, представлених на рис. 3.20, свідчить про несталість вихідної напруги перетворювача під час заряджання батареї, проте вхідні параметри перетворювача (напруга, струм і потужність) залишаються сталими до моменту повного заряджання.

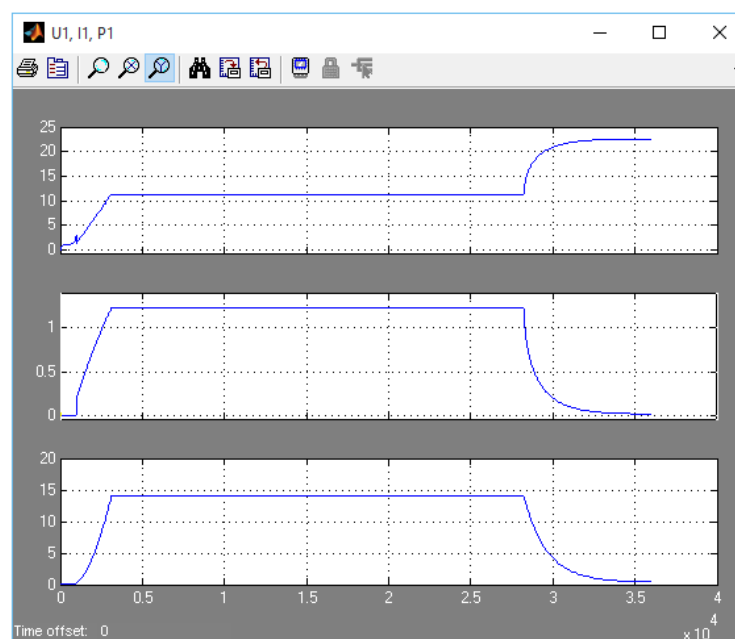


Рис. 3.21 Перехідні процеси на вході перетворювача

Незмінність споживаного струму в часі на проміжку заряджання батареї 10–100 % свідчить про енергоефективність (раціональність) запропонованого алгоритму, оскільки споживана потужність від ТЕГ є максимальною.

З метою оцінки функціонування термоелектричного модуля як складової когенераційної системи розроблено комплексну модель, яка дозволяє відслідковувати взаємозв'язок параметрів електрогенеруючого модуля та теплогенератора.

Використовуючи імітаційні моделі, представлені на рис. 3.11–3.12 у вигляді окремих блоків, а також деякі стандартні блоки із загальної бібліотеки Simulink та Simscape, підкатегорій Electrical, Physical Signals, Thermal сконструйовано імітаційну модель когенераційної установки, в структуру якої входять (рис. 3.22) [1; 22]:

- імітаційна модель електрогенераторної панелі (28×TEG Module);
- імітаційна модель теплогенератора (Therlogenerator);
- підсистема охолодження з вентилятором (Vent\_2);
- підсистема шнека та вентилятора для забезпечення процесу горіння (Shnek, Vent\_1);
- підсистеми перетворювачів (3f-PWM1, 3f-PWM2, 3f-PWM3);
- підсистема контролю (Control System);
- підсистема інвертора (Inverter);
- батарея живлення (Bat);
- пристрої вимірювання вхідних та вихідних параметрів (Scope, Display);
- навантаження з комутаційним пристроєм (Load).

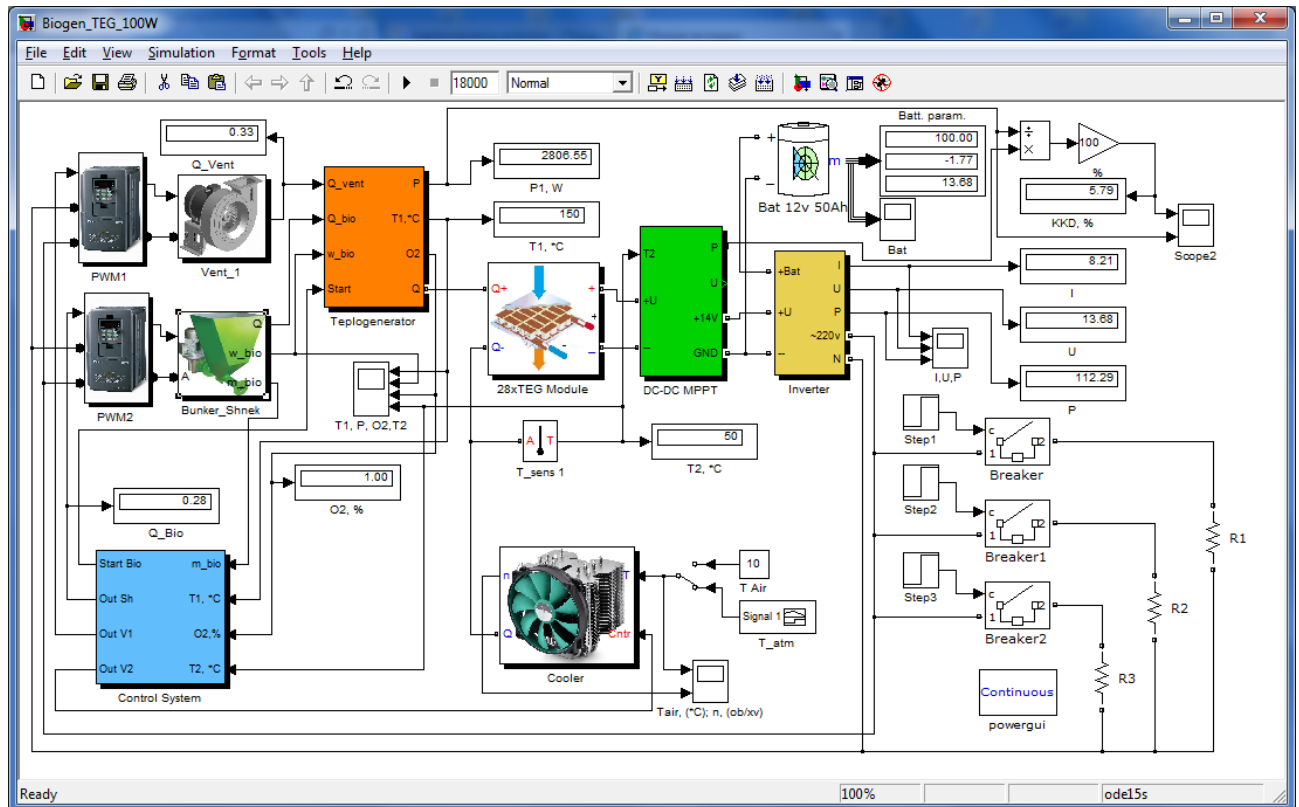


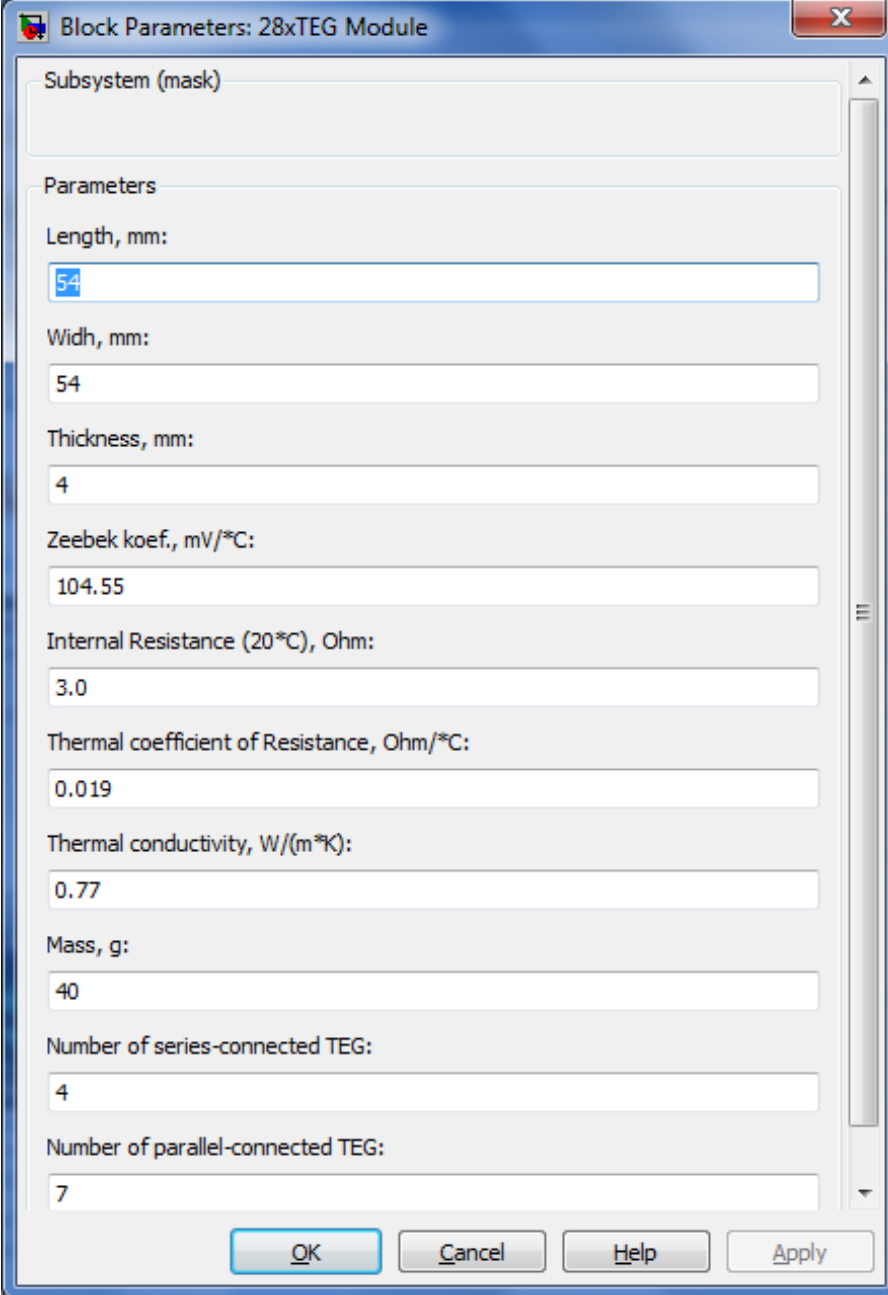
Рис. 3.22 Структура комплексної імітаційної моделі когенераційної установки

Модель електрогенераторної панелі (28×TEG Module) реалізує підсистему елементів із врахуванням їхніх загальних мас, теплоємностей, площ та товщин стінок, їхньої теплопровідності та інших фізичних характеристик. Вхідні параметри блоку в режимі електрогенерування, що задаються у вікні налаштувань (рис. 3.23) – теплові характеристики вибраної кількості елементів ТЕГ, вихідні – електричні. Створена модель є універсальною, оскільки дозволяє формувати електрогенераторний модуль з довільної кількості елементів ТЕГ із врахуванням їх теплофізичних та електроенергетичних параметрів.

Дана модель є оборотною: електричні характеристики можуть бути вхідними, тоді на виході відобразатимуться теплові показники роботи моделі.

Блок «Teplogenerator» задає загальну масу конструкції, її теплоємність. На вході блоку задається, в умовних одиницях, необхідна кількість повітря та біопалива, що подається, відповідно, вентилятором (Vent\_1) і шнеком (Bunker\_Shnek). Кількість теплоти в початковий момент роботи установки умовно дорівнює 1. На виході блоку визначаються параметри теплової потужності, температура на виході установки, концентрація кисню та тепла потужність, яка

подається на «гарячу» сторону підсистеми термоелементів. Із «холодної» сторони модуля ТЕГ підсистемою Cooler відбирається залишкова теплота.



Parameter	Value
Subsystem (mask)	
Length, mm:	54
Width, mm:	54
Thickness, mm:	4
Zeebek coef., mV/°C:	104.55
Internal Resistance (20°C), Ohm:	3.0
Thermal coefficient of Resistance, Ohm/°C:	0.019
Thermal conductivity, W/(m·K):	0.77
Mass, g:	40
Number of series-connected TEG:	4
Number of parallel-connected TEG:	7

Рис. 3.23 Вікно налаштувань параметрів електрогенераторного модуля

Модуль контролю (Control System) регулює режими роботи установки залежно від значення напруги, вихідної температури та кількості кисню: при збільшенні напруги, зменшується кількість обертів вентилятора системи охолодження (*Cooler*), а тому підвищується температура на «холодній» стороні ТЕГ; у свою чергу кількість обертів дозуючого вентилятора (*Vent\_1*) також

зменшується, за рахунок чого знижується теплова потужність теплогенератора (рис. 3.24) [22].

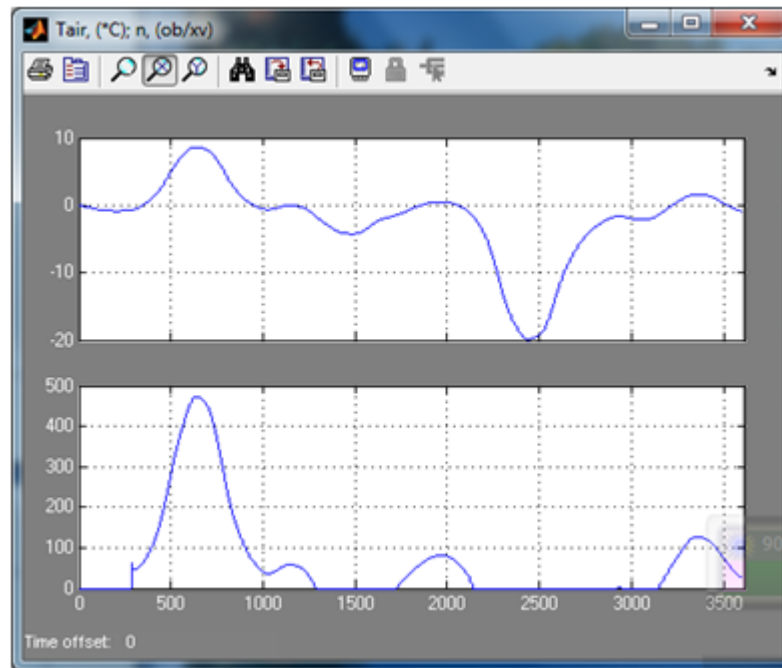


Рис. 3.24 Графіки зміни температури навколишнього повітря та регулювальної характеристики вентилятора охолодження ТЕГ

На вході підсистеми інвертора (DC-AC) подаються напруга з батареї живлення, яка спершу використовується для старту роботи установки, а потім заряджається згенерованою електроенергією.

На вхід підсистеми перетворювача (DC-DC), який використовується для заряджання батареї, надходить напруга з підсистеми термоелектричних елементів. Процес заряджання відбувається в автоматичному режимі, і струм на виході термоелектричного модуля підтримується на ефективному рівні і не перевищує заданого, незалежно від вихідного навантаження перетворювача.

Результати імітаційного моделювання функціонування автономної когенераційної системи електроживлення на виході ТЕГ ( $U$ ,  $I$ ,  $P$ ) з увімкненим алгоритмом задання максимальної потужності представлені на рисунку 3.25.

На рис. 3.26 представлено графіки перехідних процесів енергетичних параметрів на виході ТЕГ ( $U$ ,  $I$ ,  $P$ ) з вимкненим алгоритмом задання максимальної потужності [1].



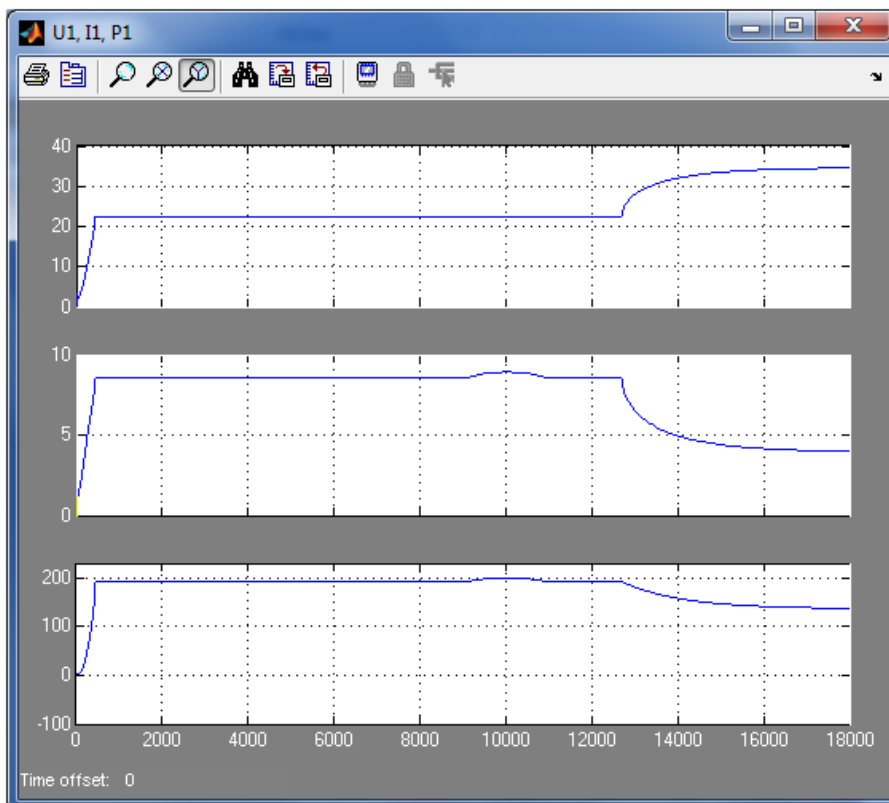


Рис. 3.25 Графіки перехідних процесів енергетичних параметрів на виході ТЕГ ( $U$ ,  $I$ ,  $P$ ) з увімкненим алгоритмом задання максимальної потужності

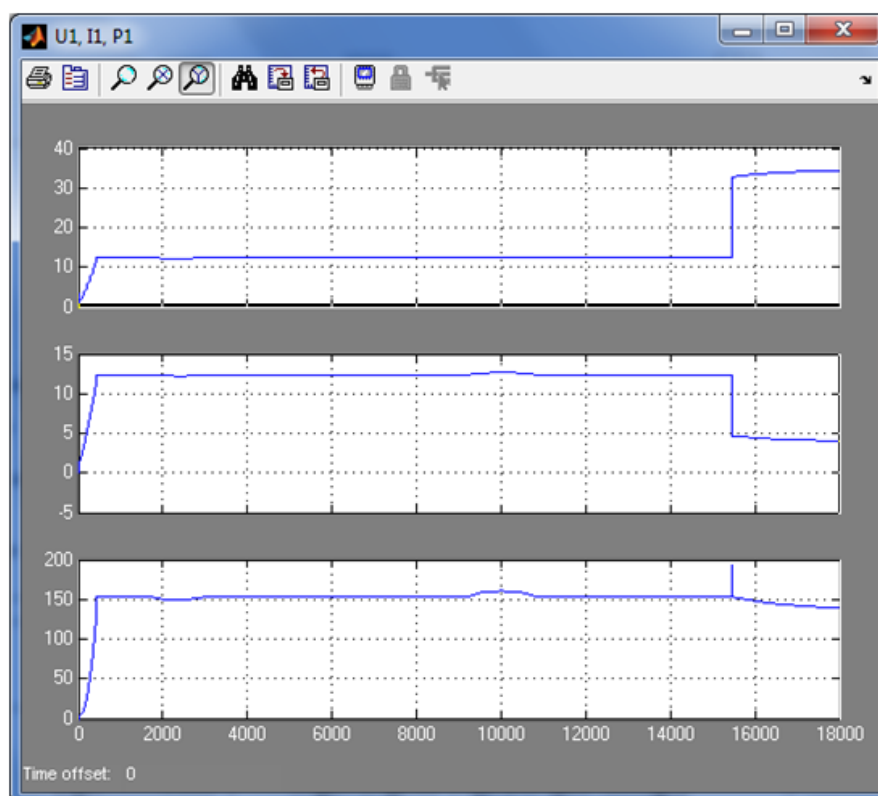


Рис. 3.26 Графіки перехідних процесів енергетичних параметрів на виході ТЕГ ( $U$ ,  $I$ ,  $P$ ) з вимкненим алгоритмом задання максимальної потужності

Порівняння результатів моделювання дозволяє стверджувати про доцільність застосування розробленого нами алгоритму, що дасть змогу забезпечити збільшення вихідної потужності на 25 %.

### **3.4 Особливості технічної реалізації когенераційної установки**

Відтворення необхідних режимів роботи термоелектричного модуля потребує багаторазового повторення експериментів із оперативною цілеспрямованою зміною досліджуваних режимів. Такі дослідження слід проводити на фізичній моделі, що забезпечить не тільки економію часу, енергетичних та матеріальних ресурсів, а також гарантуватиме достовірність отриманих результатів при моделюванні реальних процесів та впливу збурюючих факторів.

Проведений аналіз дозволив висунути припущення про залежність генерованої напруги і ККД термоелемента від опору навантаження та температурних режимів роботи, а саме, що у нижчих температурних режимах ККД – вищий.

З метою підтвердження чи спростування нашої гіпотези та отримання даних для порівняння з результатами імітаційного моделювання нами проведені експериментальні дослідження. Для цього розроблено фізичну модель, схема якої та загальний вигляд дослідної установки зображено на рис. 3.27 і 3.28 відповідно [22].

Методика проведення експерименту була наступною:

- вимірювання підведеної потужності для нагрівання;
- фіксування значень температури на гарячій і холодній стороні термоелемента при активному і пасивному охолодженні;
- вимірювання значень згенерованої напруги ТЕГ при холостому ході, навантаженні у 4,5 Ом та короткому замиканні.

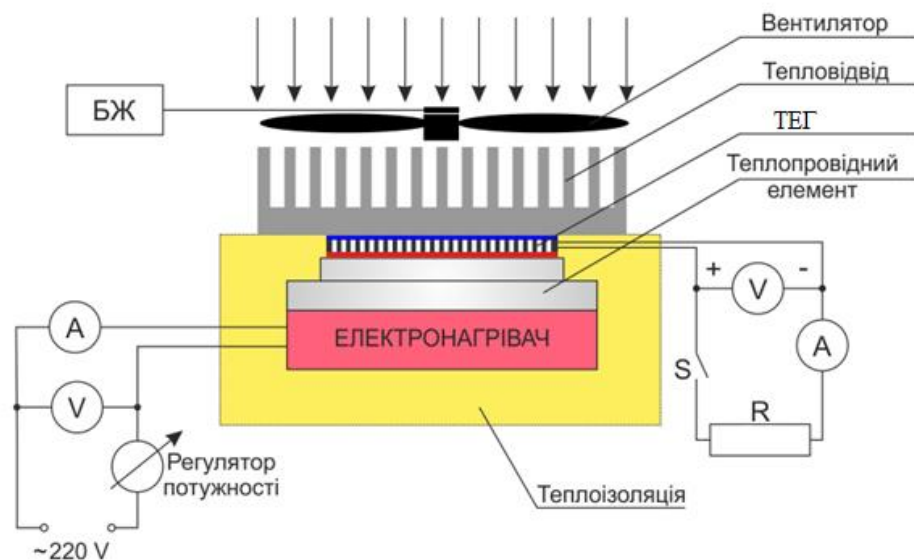


Рис. 3.27 Схема фізичної моделі дослідної установки

З метою перевірки отриманих у результаті імітаційного моделювання даних проведені експериментальні дослідження термоелектричного елемента. Для цього розроблено дослідну установку, елементами якої є: термоелектричний елемент TEG241-1,4-1,2, нагрівач, радіатор, вентилятор, контрольно-вимірювальні прилади, терморегулятор, блок живлення вентилятора [16].

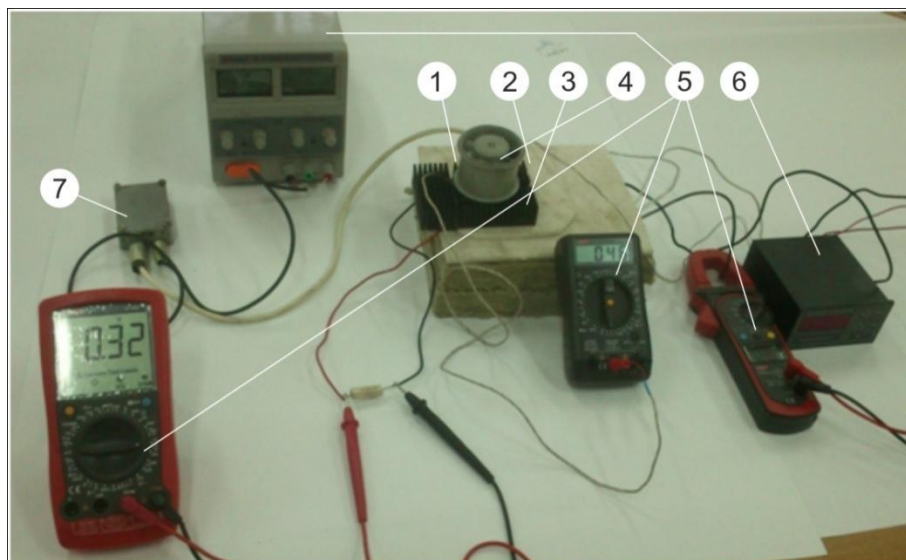


Рис. 3.28 Загальний вигляд дослідної установки термоелектричного модуля:  
1 – термоелектричний елемент, 2 – нагрівач, 3 – радіатор, 4 – вентилятор, 5 –  
контрольно-вимірювальні прилади, 6 – терморегулятор, 7 – блок живлення  
вентилятора

Експериментальні дослідження проводились таким чином. Гарячою стороною ТЕГ 1 встановлювався на електричний нагрівач 2, який розміщений у теплоізоляційному матеріалі, щоб не було розсіювання теплоти у навколишнє середовище і максимальна його кількість підводилась на елемент. Кількість підведеної потужності визначалася за показами цифрових мультиметрів. На холодній стороні елемента встановлений ребристий радіатор 3, поверхню якого обдував вентилятор 4, що під'єднаний до блоку живлення 7. До обох сторін термоелемента підведені термопари для фіксування температурних режимів.

За допомогою нагрівача нагрівалась гаряча сторона до температур: 150 °С, 140 °С, 130 °С, 120 °С, 110 °С, 100 °С. Відповідно фіксувалось значення підведеної потужності. У цей час холодна сторона охолоджувалась для забезпечення  $\Delta T=100$  °С. Фіксувались показники генерованої напруги (сила струму і напруга, щоб визначити потужність). Таким чином, маючи підведену і згенеровану потужність, визначали ККД елемента. Також у всіх зазначених випадках змінювали розмір навантаження і фіксували отримані параметри [1; 22].

За результатами проведених експериментів побудовані графіки, які відтворюють залежності ККД ТЕГ від опору навантаження ( $R_H$ ) та температури на гарячій стороні ( $T_H$ ) при сталій  $\Delta T=100$  °С (рис. 3.29) а також залежності вихідної потужності ТЕГ від опору навантаження ( $R_H$ ) при різних  $\Delta T$  (рис. 3.30).

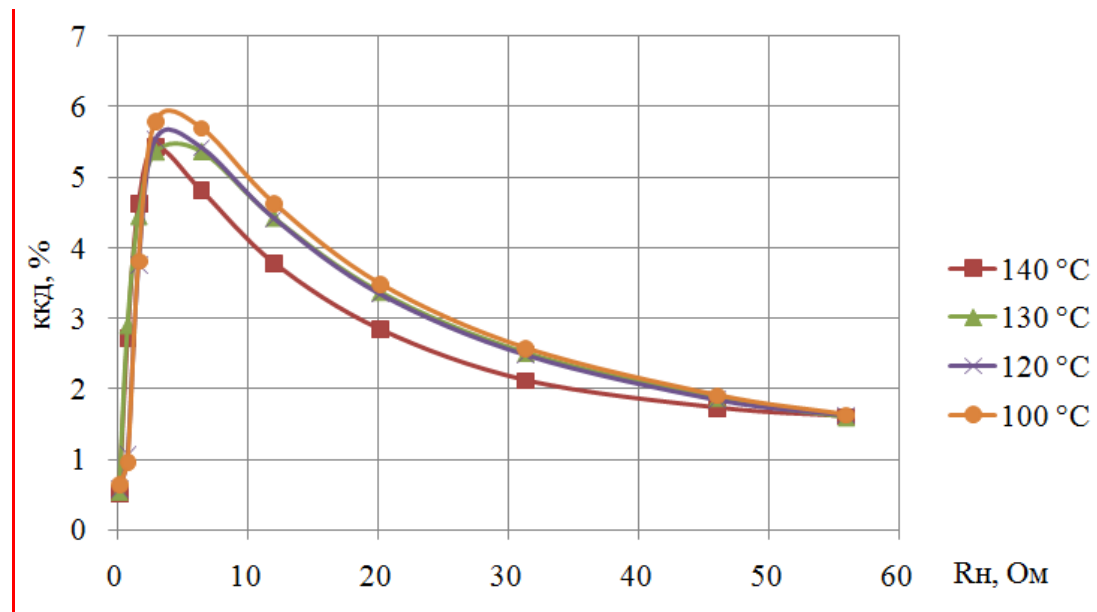


Рис. 3.29 Результати досліджень залежностей ККД ТЕГ від опору навантаження ( $R_H$ ) та температури на гарячій стороні ( $T_H$ ) при  $\Delta T=100$  °С

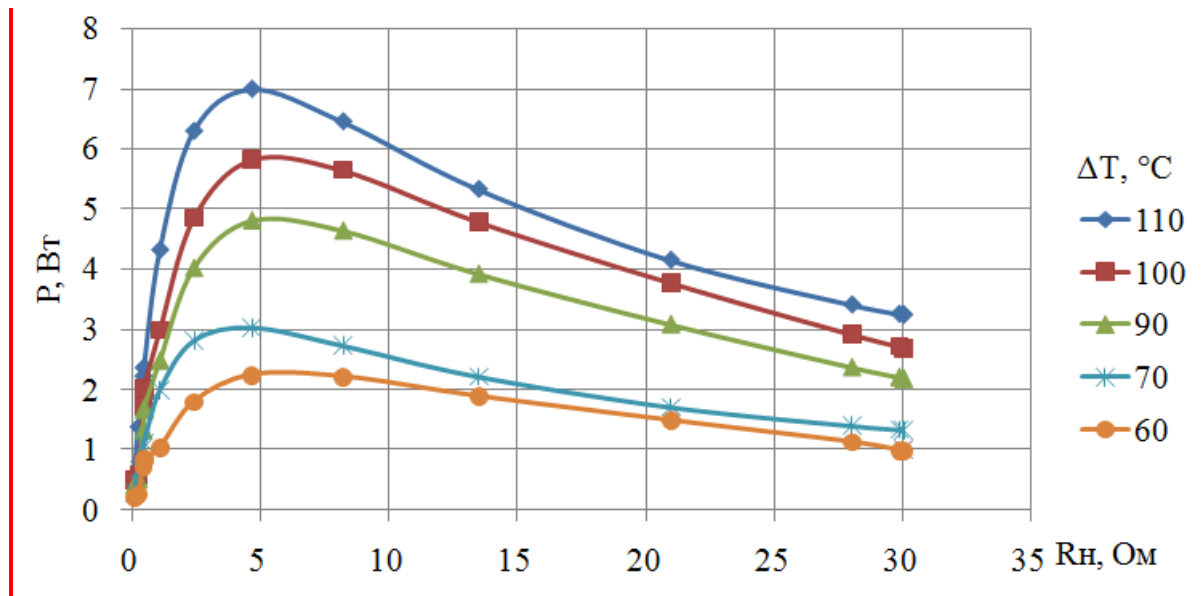


Рис. 3.30 Результати експериментальних досліджень залежностей вихідної потужності ТЕГ від опору навантаження ( $R_n$ ) для різних значень  $\Delta T$

Отримані параметри термоелектричного елемента дозволяють оцінити можливості їх застосування у когенераційних установках на базі теплогенераторів, що працюють на альтернативних видах біопалива, а також теплогенераторах-утилізаторах. Результати досліджень дозволяють стверджувати, що для генерування електричної енергії потужністю до 200 Вт, яка дозволяє повністю забезпечити автономне функціонування теплогенератора потужністю 20 кВт, необхідно встановити 28 термоелементів із вищевказаними параметрами.

Одним з шляхів реалізації когенерації є установка на базі біотеплогенератора, схема якої наведена на рис. 3.31 [16].

Автономна теплогенеруюча когенераційна установка працює наступним чином. Процес горіння технологічної біомаси у камері 1 відбувається з одночасним нагнітанням повітря в теплообміннику 2 за допомогою вентилятора 4. У момент виходу теплогенератора на номінальну потужність, електрогенеруючий блок 10 генерує енергію, що використовується на заряджання акумулятора 11 та подається на інвертор 12, який видає напругу для живлення вентилятора 4 і на вихід для споживача 14. На стінці димовивідної труби у зоні встановлення електрогенеруючого блоку 10 закріплений термодавач 13, який разом із АСК 8

контролює температуру холодної сторони термоелементів і, за встановленим алгоритмом, не допускає перевищення температури гарячої сторони понад 150 °С. Процес регулювання здійснюється шляхом зміни положення дросельної заслінки 7 [1; 4; 20; 22].

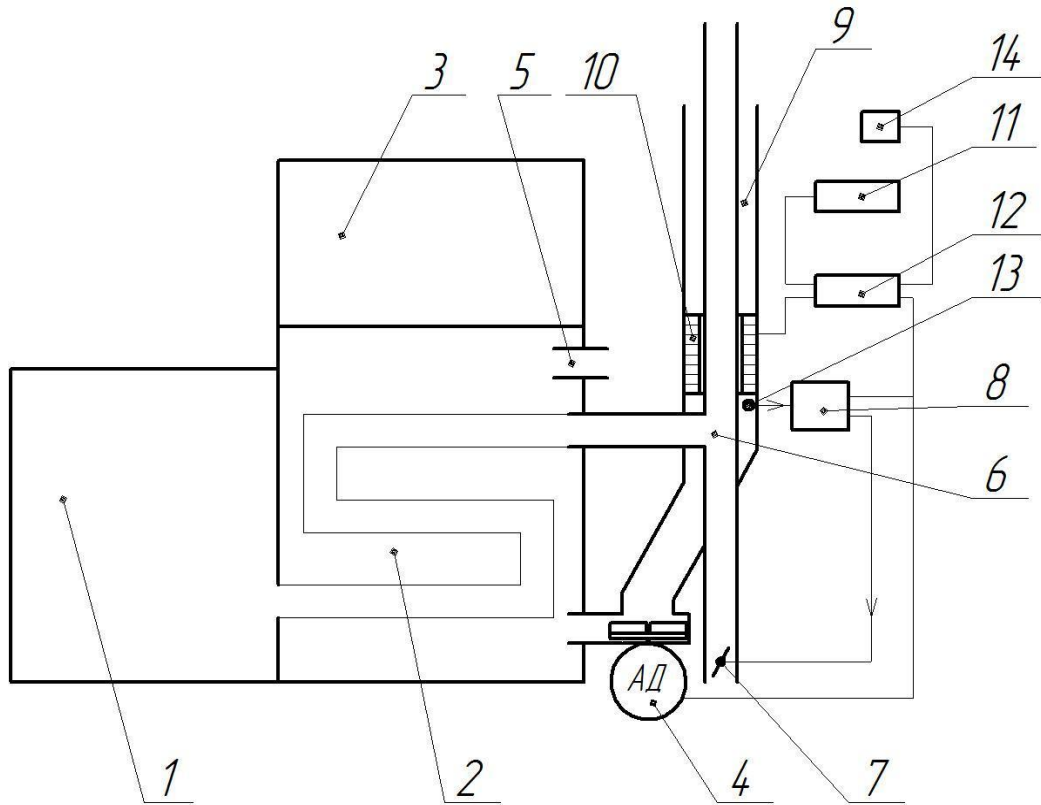


Рис. 3.31 Схема когенераційної системи на основі твердопаливного біотеплогенератора:

1 – камера горіння, 2 – теплообмінник, 3 – теплогідроакумулятор, 4 – вентилятор подачі повітря в теплообмінник, 5 – вихід теплоносія, 6 – димовивідна труба, 7 – дросельна заслінка, 8 – система керування (АСК), 9 – контур охолодження, 10 – електрогенеруючий блок, 11 – акумуляторна батарея, 12 – інвертор, 13 – датчик температури, 14 – вихід на споживача

Термоелектричний модуль виготовлений у вигляді квадратної труби (рис. 3.32, 3.33) розмірами 0,12×0,12×2 м із закріпленими 28 термоелементами максимальною потужністю 9 Вт. Труба виготовлена з алюмінію, для ефективного підведення теплової потужності до ТЕГ, а також для забезпечення рівномірного температурного діапазону по всій довжині модуля. Між ТЕГ та стінкою труби

використана термопровідна паста КПТ-12, для заповнення мікропор між поверхнями та покращення контакту. Забезпечення необхідної електричної потужності (200 Вт) здійснювалось із урахуванням отримання величини напруги живлення, стандартної для уніфікованих інверторів (24–48 В).

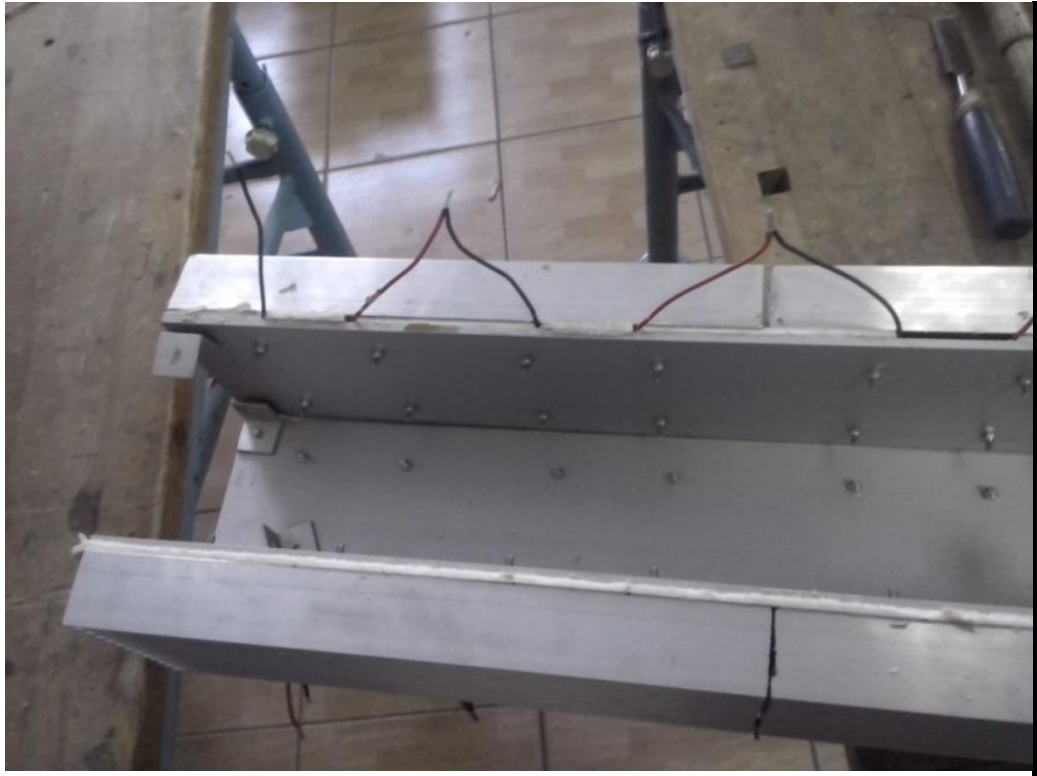


Рис. 3.32 Термоелектрогенеруючий модуль в розрізі

Це дало можливість здійснювати процес заряджання акумуляторної батареї, що використовувалася для початкового старту системи. Комплектування термоелектричної панелі здійснювалось шляхом поєднання 7 паралельних груп, кожна з яких містила 4 послідовно з'єднаних термоелементи. На кожному боці модуля прикріплювалися алюмінієві радіатори (рис. 3.33).



Рис. 3.33 Загальний вигляд термоелектрогенеруючого модуля

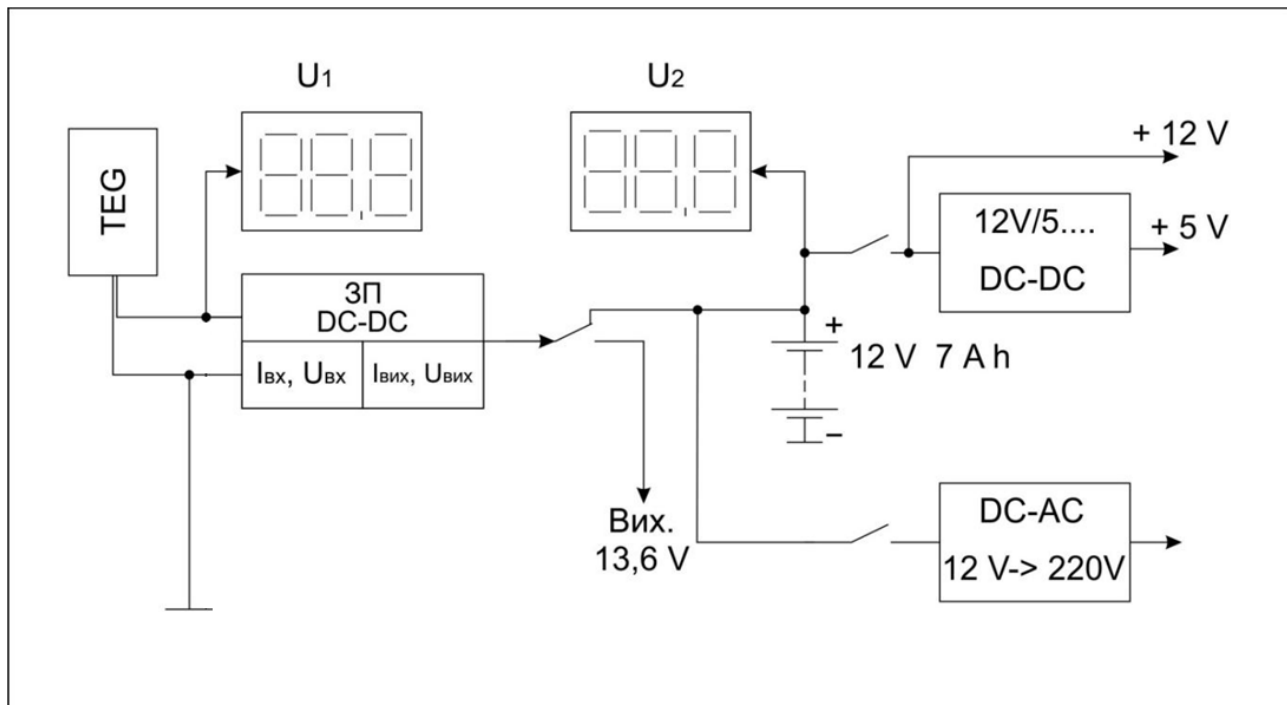


Рис. 3.34 Функціональна схема когенераційного електрогенераторного модуля дослідної установки



Розроблено функціональну схему когенераційного електрогенераторного модуля дослідної установки (рис. 3.34). До складу дослідної установки входять: термоелектричний модуль (ТЕГ); перетворювач напруги із розробленим алгоритмом задання максимальної потужності (модуль заряджання батареї); батарея; перетворювач напруги з 12 В на 5 В; інвертор з 12 В на 220 В; цифрові індикатори напруги  $U_1$  і  $U_2$ . Цифровий індикатор  $U_1$  призначений для інформування і відслідковування згенерованої напруги термоелектричним модулем. А для контролю за рівнем заряду акумуляторної батареї встановлений цифровий індикатор  $U_2$  [1].

Електрична схема модуля перетворювача напруги із розробленим алгоритмом задання максимальної потужності представлена на рисунку 3.35. Схема перетворення реалізована стандартним схемним рішенням на базі польового транзистора, за заданим у контролері алгоритмом і виконує функції підвищення або пониження напруги залежно від величини вхідної напруги, яка поступає з ТЕГ модуля.

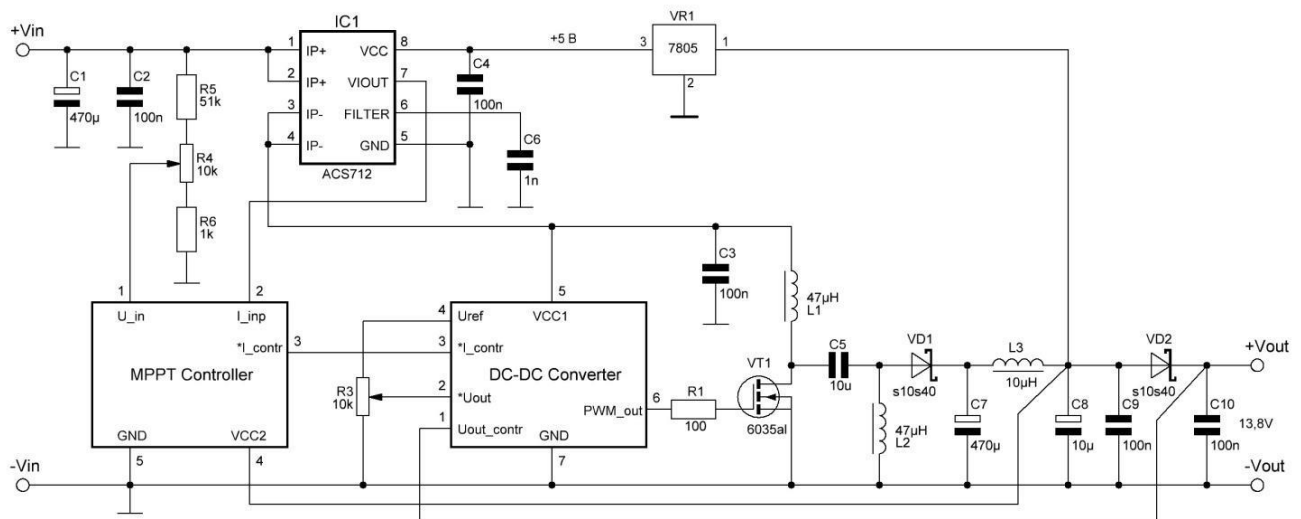


Рис. 3.35 Електрична схема модуля перетворювача напруги із розробленим алгоритмом задання максимальної потужності

На виході з ТЕГ модуля отримали напругу в діапазоні 3–45 В, струм до 8,5 А. На виході з перетворювача напруги (модуля заряджання батареї) зафіксували вихідну напругу при навантаженні 14 В і струм до 15 А (рис. 3.36, 3.37) [1].

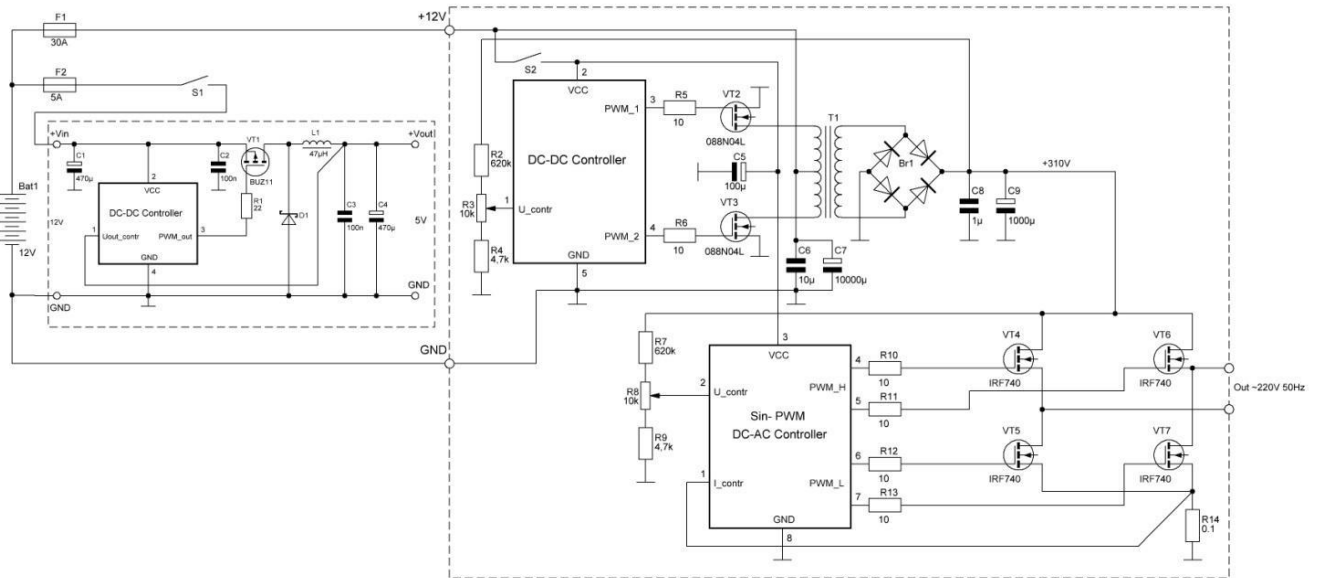


Рис. 3.36 Електрична схема перетворювача напруги 12/5 В та інвертора 12/220 В

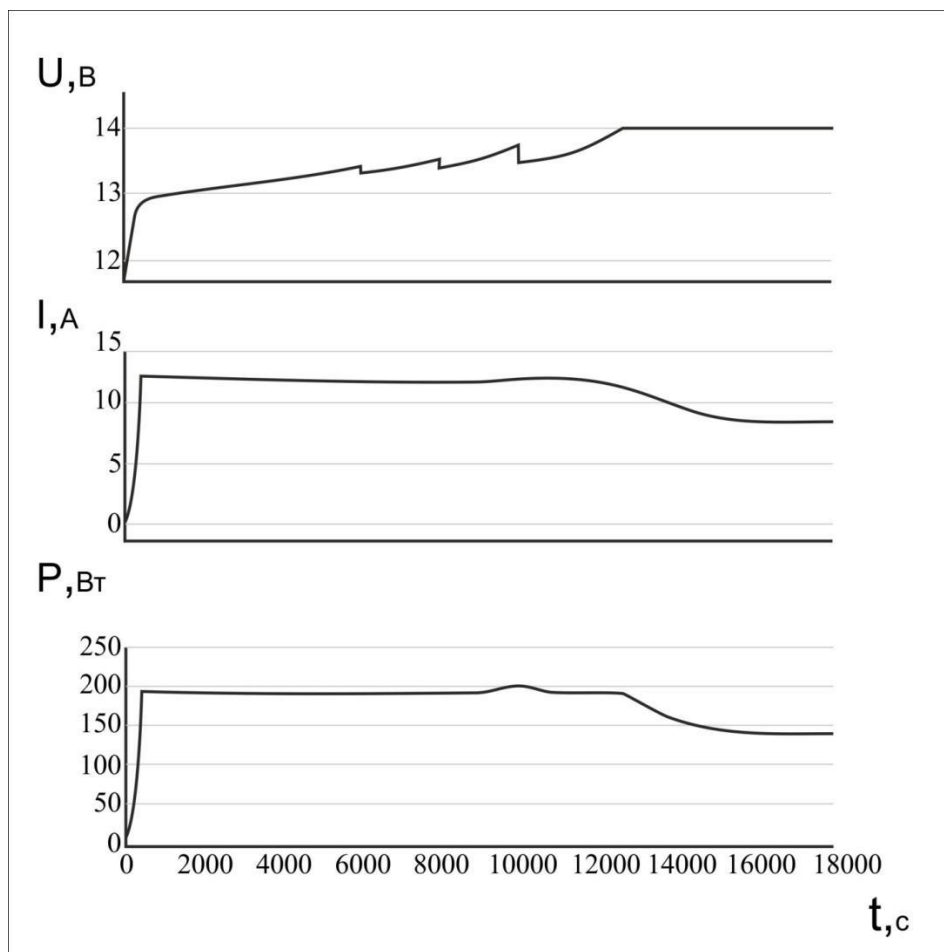


Рис. 3.37 Діаграма зміни енергетичних параметрів на виході перетворювача напруги ( $U_2$ ,  $I_2$ ,  $P_2$ ) в режимі заряджання батареї та споживання енергії

Створена установка з електрогенеруючим блоком ТЕГ, із розробленим алгоритмом задання максимальної потужності, у результаті експериментальних досліджень згенерувала електричну енергію потужністю 198 Вт · год [1; 22].

На основі розробленої нами функціональної схеми когенераційного електрогенераторного модуля дослідної установки (рис. 3.34) реалізована фізична модель модуля акумулювання електроенергії та перетворення напруги (рис. 3.38). Даний модуль з перетворювачем напруги ТЕГ та інвертором пройшов лабораторні випробування у режимі генерації напруги 220 В [22].

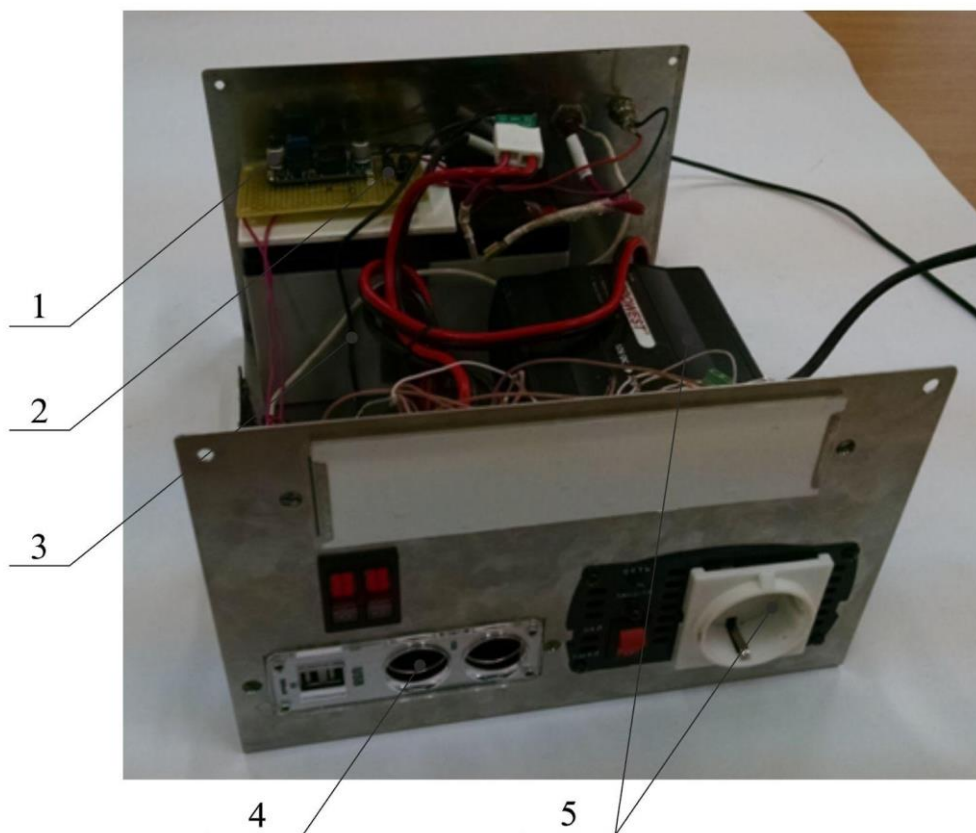


Рис. 3.38 Загальний вигляд модуля акумулювання електроенергії та перетворення напруги дослідної установки: 1 – DC-DC конвертор 4...50В/14В; 2 – MPPT Controller; 3 – акумуляторна батарея; 4 – AC-DC конвертор 12В/220В; 5 – DC-DC конвертор 12В/5В

Дослідний зразок термоелектричного модуля було встановлено на теплогенераторі потужністю 20 кВт, що працює на твердому біопаливі (рис. 3.39).



Рис. 3.39 Дослідний зразок автономної когенераційної системи електроживлення на базі біотеплогенератора

Апробація запропонованого способу когенерації проводилась науково-дослідною лабораторією «Енергетичний менеджмент» при Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка, що здійснювалась на виробничих потужностях НВО «Енергоощадні технології», підтвердила доцільність його використання для забезпечення автономного електроживлення біотеплогенератора (рис. 3.40) [1; 22; 23].



Рис. 3.40 Твердопаливний теплогенератор з когенераційною системою

В якості компонентів біопалива використовувались подрібнена солома вологістю 25–37 % та тирса різних порід деревини вологістю 15–35 %. У ході експериментальних випробувань розроблено когенераційну систему, яка продемонструвала задовільну роботу на технологічному обладнанні підприємства.

Під час регулювання процесу горіння відслідковувались режими роботи когенераційного модуля, який працював на різних теплових режимах роботи теплогенератора. Розроблений електрогенеруючий модуль на основі термоелектричних перетворювачів продемонстрував задовільну роботу. Заряд батареї відбувався навіть при мінімальній тепловій потужності теплогенератора.

Отримані результати є доказом, що застосування запропонованої технології дозволяє забезпечити електричну автономність роботи біотеплогенератора та підвищити його енергоефективність на 3,5–4 %.

Даний спосіб, що реалізовується на основі використання інтелектуальної системи керування, може застосовуватися на переробних підприємствах великої і малої потужності, які націлені на використання альтернативних джерел енергії.

Проведені експериментальні дослідження автономної когенераційної системи електроживлення на базі біотеплогенератора потужністю 20 кВт з розробленим алгоритмом задання максимальної потужності. Максимальна вихідна електрична потужність становила 198 Вт.

Дана розробка також була представлена військовим для використання її в польових умовах в зоні АТО (потім ОСС). Представлений комплекс на рис. 3.40 виконує кілька функцій:

- обігрів приміщення, казарми, плащ-палатки, бліндажу;
- приготування їжі;
- гаряча вода для побутових потреб;
- електрична енергія для заряджання засобів комунікації та освітлення. Для накопичення електричної енергії адаптований автомобільний акумулятор.

Автономна когенераційна система електроживлення на базі біотеплогенератора була представлена на міжнародному інвестиційному форумі «Тернопільщина INVEST – 2016» у Тернопільській області який проходив 19-20 травня 2016 року. Форум відбувався за участю керівництва держави, керівництва Уряду та центральних органів виконавчої влади України, обласних державних адміністрацій та органів місцевого самоврядування України, іноземних дипломатичних установ та міжнародних організацій, акредитованих в Україні та представників бізнесу.

Також, автономна когенераційна система електроживлення на базі біотеплогенератора була представлена на ХХVІІІ Міжнародній агропромисловій виставці «АГРО – 2016», яка відбулася з 8 по 11 червня 2016 року, на території Національного Комплексу «Експоцентр Україна» (м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 1). Когенераційна установка пройшла польові випробування: кожного дня виставки вона працювала по 9 годин на добу. Під час експлуатації показала відмінні результати, усі функції працювали справно.

### Висновки до розділу 3

Аналіз існуючих когенераційних систем дає змогу стверджувати про ефективність їх використання на базі біотеплогенераторів. Встановлено, що для живлення засобів телекомунікацій об'єктів господарювання достатньо 150 Вт, для генерування яких доцільно використовувати термоелектричні генератори.

Визначено, що у димових викидах біотеплогенератора міститься 15 % теплової енергії, якої достатньо для генерування електричної енергії за допомогою ТЕГ, що забезпечить автономну роботу установки потужністю до 50 кВт.

Отримано електричної потужності 5–13 Вт від одного термоелемента у робочих температурних режимах залежно від вибраної модифікації ТЕГ. Обґрунтовано, що максимальне значення ККД термоелектричного модуля досягається шляхом забезпечення максимально допустимої різниці температур 100–120 °С на його поверхнях та величиною електричного опору навантаження, наближеного до величини внутрішнього опору генераторного модуля 2,5–5,5 Ом.

Створено комплексну імітаційну модель когенераційної установки, яка дає змогу дослідити функціонування системи для різних режимів навантаження ТЕГ з похибкою моделювання не вище 5 %. Також розроблено алгоритм відбору максимальної потужності ТЕГ, що дає змогу забезпечити максимальне значення потужності – 200 Вт та ККД – 7 %, шляхом розрахунку необхідного вихідного струму термомодуля та підтримання мінімально можливої середньої температури на його поверхнях.

Запропонований метод використання термоелектричних модулів у когенераційних установках на базі твердопаливних біотеплогенераторів дозволяє генерувати електроенергію із теплових викидів у кількості, достатній для реалізації автономної роботи твердопаливного біотеплогенератора та підвищує енергоефективність усієї установки на 3,5–4 %.

Виготовлено діючий твердопаливний теплогенератор з когенераційною системою для автономних систем енергоживлення об'єктів господарювання, в тому числі для підрозділів ЗСУ.

### Список використаних джерел

1. Загородній Р. І. Автонномна когенераційна система електроживлення на базі біотеплогенератора : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03. Київ, 2016. 154 с.
2. Загородній Р. І. Автоматизована система керування когенераційними установками для військових. *Диверсифікація джерел енергії на базі використання альтернативних видів палива* : мат. Міжнар. Науково-технічної онлайн конференції. Тернопіль : ТНПУ. 2021. С. 39–42.
3. Загородній Р. І. Використання біомаси для виробництва теплогенераторного палива. *Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи* : мат. VI Міжн. наук.-техн. конф. Тернопіль : ТНТУ. 2012. С. 92–94.
4. Загородній Р. І. Дослідження когенераційної установки біотеплогенератора засобами імітаційного моделювання. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України. 2015. Вип. 211, Ч. 2. С. 186–188.
5. Загородній Р. І. Дослідження параметрів радіаторів охолодження когенераційної установки біотеплогенератора. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України. 2016. Вип. 256. С. 234–240.
6. Загородній Р. І. Дослідження процесу горіння твердого біопалива засобами моделювання. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України. 2013. Вип. 184, Ч. 2. С. 261–265.
7. Загородній Р. І., Луцик І. Б., Рутило М. І. Застосування термоелектричних модулів у когенераційних системах на базі теплогенераторів. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конф. : Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи, 23-27 лютого 2015 р.* Тернопіль-Яремче. С. 11–12.
8. Загородній Р. І. Особливості експлуатації твердопаливних теплогенераторів. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України. 2010. Вип. 166, Ч. 4.



С. 239–248.

9. Загородній Р. І. Підвищення ефективності спалювання твердої біомаси у теплогенераторах. *Енергетика і автоматика*. Київ : НУБіП України, 2013. № 2. С. 37–42.

10. Загородній Р. І. Передумови визначення раціональних режимів регулювання процесу горіння у твердопаливних теплогенераторах. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування* : мат. міжн. наук.-техн. конф. Київ : НУБіП України. 2013. С. 85–86.

11. Загородній Р. І., Луцик І. Б. Термоелектричні когенераційні системи. *Відновлювальна енергетика, нові автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК* : II міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК». Київ : НУБіП України. 2014. С. 43–44.

12. Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу». *Відомості Верховної Ради*. 2005. № 20. С. 278–285.

13. Закон України. Закон України про енергозбереження : офіц. текст. : за станом на 1 липня 1994 р./ Верховна Рада України. Київ : Парлам. вид-во, 1994. 56 с.

14. Закон України «Про внесення змін до Закону України про енергозбереження» : офіц. текст. : за станом на 16 жовтня 2012 р. / Верховна Рада України. Київ : Парлам. вид-во, 2012. 36 с.

15. Луцик І. Б. Моделювання системи керування біотеплогенератором з використанням адаптивних FUZZY-РЕГУЛЯТОРІВ. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені П. Василенка. Технічні науки*. Вип. 154. Харків : ХНТУСГ, 2014. С. 46–48.

16. Федорейко В. С., Загородній І. Р., Рутило М. І., Луцик І. Б. Використання термоелектричних модулів у теплогенераторних когенераційних системах. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2014. Дніпропетровськ : НГУ. № 6. С. 111–116.

17. Федорейко В. С., Іскерський І. С., Загородній І. Р. Дослідження теплових викидів біотеплогенератора зернової сушарки. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України. 2017. Вип. 268. С. 22–28.

18. Федорейко В. С., Загородній І. Р., Луцик І. С., Іскерський І. С. Підвищення енергоефективності біотеплогенератора шляхом раціонального дозування компонентів горінням. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпропетровськ : НГУ, 2014. № 4. С. 27–32.

19. Федорейко В. С., Загородній Р. І., Шульга В. М., Павх І. І. Пат. 83633 Україна МПК F23N 5/18 (2006.01). Спосіб ефективного згорання твердого біопалива в атмосферних котлах ; Заявник і патентовласник : Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Тернопіль ; заявл. 18.02.2013 ; опубл. 25.09. 2013 ; Бюл. № 18. 4 с.

20. Федорейко В. С., Загородній Р. І., Іскерський І. С., Рутило М. І., Луцик І. Б., Бурега Н. В. Пат. 130694 Україна МПК H01L 35/00 (2018.01), F24H 3/12 (2006.01), F01N 5/02 (2006.01). Спосіб термоелектричного відбору енергії у біотеплогенераторах ; Заявник і патентовласник : Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Тернопіль ; заявл. 17.05.2018 ; опубл. 26.12. 2018 ; Бюл. № 24. 4 с.

21. Федорейко В. С., Загородній Р. І. та ін. Енергоощадні інтелектуальні системи керування процесом приготування твердобіопаливної суміші для теплогенераторів ; Міністерство освіти і науки України. Київ, 2015. 124 с. Деп. в УкрІНТЕІ, №0113U000123.

22. Федорейко В. С., Загородній Р. І., Іскерський І. С., Луцик І. Б. та ін. Когенераційна термоелектрична автонномна система на базі біогенератора. Звіт про науково-дослідну роботу. Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка. Тернопіль, 2018. 147 с. Деп. в УкрІНТЕІ, № 0115U000192.

23. Федорейко В. С., Рутило М. І., Луцик І. Б., Загородній Р. І. Modeling of block of electricity generation of cogeneration system for heat generator. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпропетровськ : НГУ, 2017. № 2.

С. 87–92.

23. Федорейко В. С., Іскерський І. С., Шульга В. М. Біоресурсна диверсифікація джерел енергії в Україні. *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ : НУБіП України. 2016. Вип. 256. С. 7–13.

24. Fedoreiko V. S., Rutylo M. I., Lutsyk I. B., Zagorodnii R. I. Modeling of block of electricity generation of cogeneration system for heat generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro. 2017. No 2, pp. 87–92.

25. Fedoreiko V. S., Rutylo M. I., Iskersky I. S., Zagorodnii R. I. Optimization of heat production processes in the biofuel vortex combustion systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro. 2020. No 6, pp. 83–88.

## РОЗДІЛ 4

### ВИСОКОПРОДУКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ГЕНЕРАЦІЇ НОВОЇ БІОМАСИ НА ОСНОВІ ФОТОБІОРЕАКТОРІВ

Рівень споживання та вартість енергії у світі зростає, ресурси надр біосфери постійно зменшуються, а згубний екологічний стан спричинений викидом великої кількості парникових газів під час генерації електричної, механічної або теплової енергії породив в суспільстві XXI століття три основні кризи: енергетичну, екологічну, економічну.

Суттєвий негативний антропогенний вплив дедалі більше загострює згадані проблеми у зв'язку з властивістю техногенезу впливати на екосистему через постійні викиди значної кількості вуглекислоти під час генерації електричної, механічної або теплової енергії. Невідворотність процесу кліматичних змін та вичерпності викопних вуглеводнів змусив світових та вітчизняних лідерів ухвалити ряд законодавчих ініціатив, спрямованих на зменшення частки викидів парникових газів у атмосферу.

Вирішення цього завдання, над яким нині сконцентровано значний науковий потенціал планети, є комплексним і полягає у підвищенні енергоефективності даних систем, збільшенні відсоткової частки поновлюваних джерел та розробленні раціональних методів генерації енергії під час утилізації викидів парникових газів у атмосферу [3].

Великою перспективою є використання біологічних фотосинтезуючих культур та технологічних рішень на їх основі, що забезпечуватимуть абсорбцію вуглекислого газу, продукування додаткової сировини, а також генерацію кисню. Дослідження біоенергетичних культур демонструє високі показники серед одноклітинних водоростей, а саме генерацію корисної біомаси із одиниці площі із високим вмістом ліпідів, (майбутнього джерела для створення біодизелю) (рис. 4.1) та швидкість росту (в ідеальних умовах для деяких штамів можливе подвоювання біомаси кожні 3-4 годин) [3].

Для забезпечення функціонування системи генерації нової біомаси необхідно гарантувати постійну подачу діоксиду вуглецю, так як суміш атмосферних газів має домішки різного роду. Це зумовлює необхідність

використання постійного та відносно чистого джерела подачі діоксиду вуглецю, яким може бути твердооксидний паливний елемент, чи системи на базі піролізного горіння.

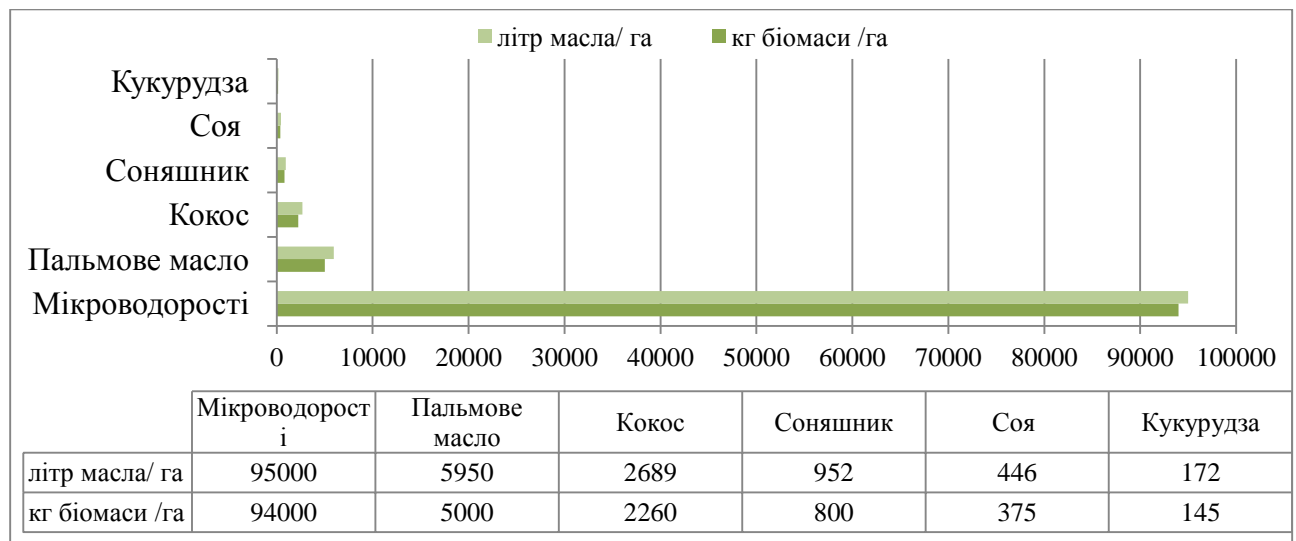


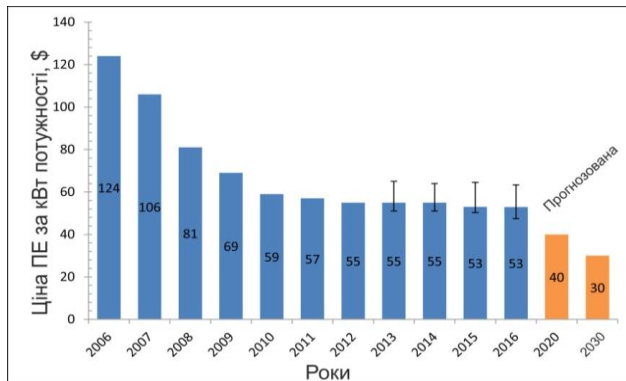
Рис. 4 1 Виробництво мастила з різної сировини з одного гектара землі

Модернізація електротехнологічних комплексів (ЕТК) генерації електроенергії, що використовують метан чи очищений біогаз, на системи, які реалізовані технологіями електрохімічних джерел живлення (твердооксидні паливні елементами), дадуть змогу відчутно підвищити продукування електричного струму, оскільки перетворює в ту ж саму кількість палива із вищим ККД 75–85 %. Такий підхід, разом із технологіями генерації біогазу, обумовлює побудову самодостатньої децентралізованої системи із можливістю утилізації біологічних відходів та мінімізованим викидом парникових газів.

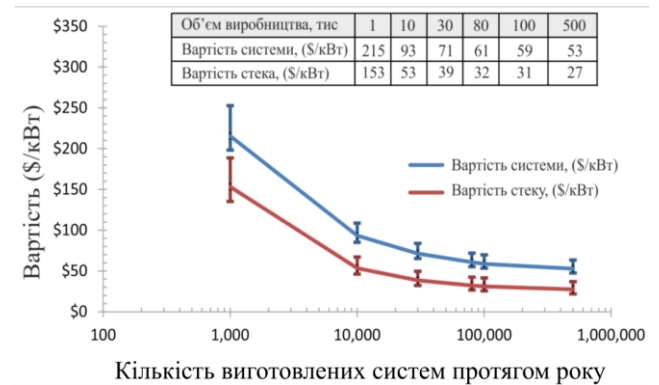
Аналіз основних технічних характеристик ТОПЕ дають підстави стверджувати, що використання даних хімічних генераторів електроенергії значно підвищують робочі параметри і готові до широкого комерційного застосування, про що свідчить і щорічний звіт до конгресу США від Directed Technologies, Inc. (DTI USA) та Department of Energy (DOE USA) демонструє відчутне зниження їх вартості (рис. 4.2, а). Проте реальна ціна даних технологій на роздрібному ринку поки що висока. Це зумовлено тим, що вплив на ціну формує невелика кількість виробничих потужностей, а вартість кіловата потужності впливає на сам стек та

його серійне виробництво, необхідність вкладання коштів в маркетингову стратегію.

Аналіз виробництва твердооксидних паливних комірок при робочих потужностях в обсязі 500 тисяч одиниць на рік, що дало змогу провести прогнозовані розрахунки ціни ПЕ за умови їх широкомасштабної реалізації на ринку та крупносерійного виробництва (станом на 2016 рік) (рис. 4.2, б).



а)



б)

Рис. 4.2 Аналіз розвитку технологій ТОПЕ: а) звіт до конгресу США від Directed Technologies, Inc. (DTI USA) та Department of Energy (DOE USA) на 2016 рік відносно вартості потужності ПЕ; б) залежність вартості кіловата потужності 80 кВт ПЕ при різному серійному виробництві

Це дозволяє зробити висновки про те, що динаміка росту потужностей ТОПЕ підпорядковується закону геометричної прогресії, що свідчить про перспективу даної технології та можливість заміни традиційних методів генерування енергії (ДВЗ) на електрохімічні генератори із системами рекуперації теплової енергії із загальним ККД близько 70–85 %, а в умовах широкого розповсюдження на ринку, їх вартість буде відчутно зменшуватись та дозволить даній технології зайняти повноправне місце в різних галузях промисловості, аграрного сектора та дозволить побудувати децентралізовану енергосистему [3].

#### **4.1 Фотобіореактор, як система регенерації енергії викидів у нову біомасу**

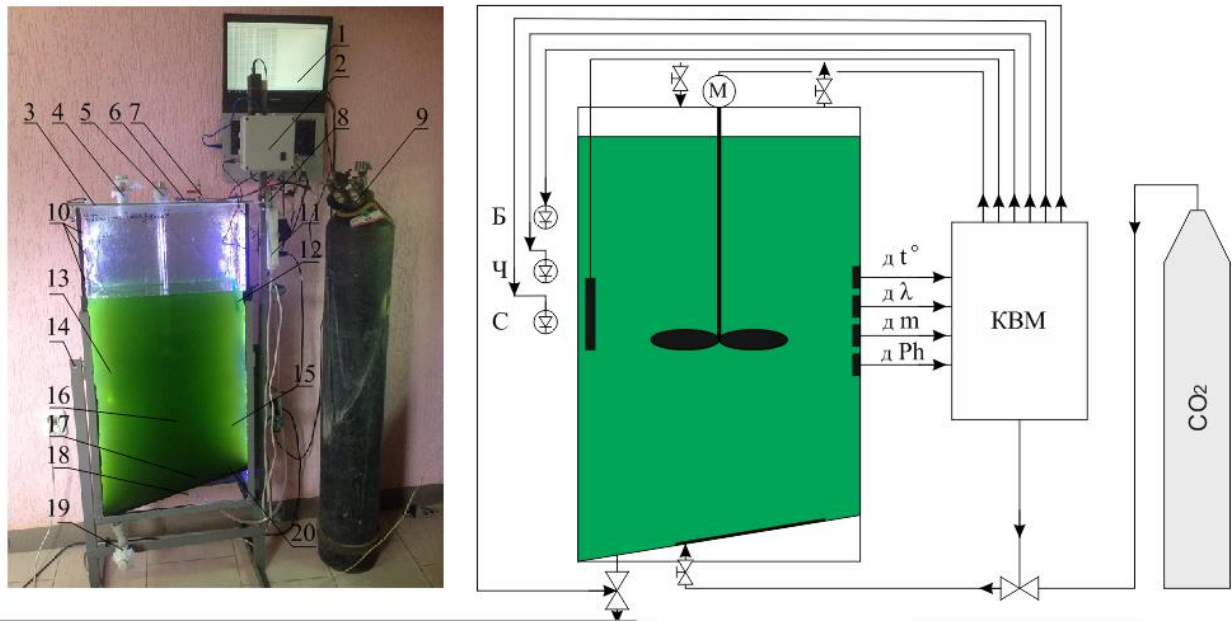
Період кінця ХХ та початку ХХІ століття дав новий погляд сучасним енергетичним технологіям, а світова наукова спільнота все більше звертає увагу на біологічні процеси та системи, які володіють найвищою інформаційною ємністю та продуктивністю перетворення різних речовин та енергії, що дозволяє використовувати їх в енергетиці, промисловості, сільському господарстві тощо. Особливу увагу сьогодні приділяють організмам, зокрема мікрободоростям, яким для існування достатньо простих речовин й енергії сонячного світла.

Дослідивши зацікавленість світових лідерів і технологічні рішення (відкриті та закриті системи, плоскі та трубчасті проточні комплекси) провідних компаній у галузі реалізації пілотних проектів щодо генерації нової біомаси, визначивши потенційні енергетично-корисні вмісти мікроелементів [9], основні технологічні вимоги щодо забезпечення процесу культивування мікрокультури дали змогу реалізувати фотобіореактор (ФТБР), що дав змогу дослідити та відпрацювати режими роботи під час вирощування одноклітинних мікрободоростей *Chlorella Vulgaris* Beijer, що характеризується відносно простою технологією отримання великих (промислових) кількостей біомаси та стійкістю до високих концентрацій вуглекислоти [8].

Конструкція системи виконує функції вимірювання та контролю температури (підтримка за допомогою теплообміну між поживним середовищем та підведеним теплоносієм), освітленості (штучної та зовнішньої), концентрації кислотності середовища (рівень рН, який регулюється шляхом введення відповідної кількості  $\text{CO}_2$  або розчином необхідних солей) та його перемішування. ФТБР являє собою симбіоз технологічної системи та біологічного об'єкту, а отже його успішна реалізація цілком залежатиме від інженерних рішень по інтелектуальному контролю середовища.

Технологічний процес генерації біомаси вимагає дотримання умов стерильності середовища під час досліджень та методики культивування

мікроводоростей [13]. Слід зазначити, що під час перенесення технології вирощування у широкомасштабне виробництво, основну функцію контролю виконує контрольно-вимірювальний модуль (КВМ), який, користуючись інформацією з датчиків, забезпечує необхідний режим роботи ФТБР (рис. 4.3) [10].



а)

б)

Рис. 4.3 Система регенерації енергії викидів на базі ФТБР: а) загальний вигляд плоского вертикального ФТБР із робочим об'ємом 50 л: 1 – ноутбук; 2 – КВМ; 3 – скляна кришка; 4 – кран подачі харчового середовища; 5 – система перемішування; 6 – датчик освітленості; 7 – кран відведення газів; 8 – електромагнітний клапан 220 V; 9 – вуглекислотний балон; 10 – система додаткового освітлення LED стрічками; 11 – живлення системи; 12 – датчик рН; 13 – електропідігрівач; 14 – рухомий залізний корпус ФТР; 15 – датчик температури; 16 – датчик концентрації мікроводоростей; 17 – аераційна трубка; 18 – кран подачі CO<sub>2</sub> в ФТБР; 19 – кран зливу субстрату; 20 – корпус ФТБР виготовлений зі скла; б) схема плоского вертикального фотореактора: Б, Ч, С – світлодіодні стрічки білого, червоного та синього кольорів; д t° – датчик температури середовища культивування; д λ – датчик рівня освітленості ФТБР; д m – датчик концентрації мікроводоростей; д рН – датчик рівня рН



Система ФТБР передбачає можливість нагнітання вуглекислого газу із балона (9) із тиском до 150 атм в діапазоні швидкостей 200–400 л/год через патрубок до електромагнітного клапана (8), котрий відкривається при стані датчика рН – 6,00 і не перекривається до стану 6,5 з інертністю  $\pm 0,1$  рН. Подача у середовище культивування здійснюється через закріплену на дні аераційну трубку (17), яка подрібнює бульбашки газу, що, у свою чергу, покращує газомасообмін і не пошкоджує культуру. Кріплення та корпус (14) ФТБР виконано з передбаченням можливості зміни кута нахилу світосприймальної частини до сонця, що дасть можливість захоплювати більше світлової та теплової енергії. КВМ (2) система відслідковує рівень освітленості за допомогою датчика (6) та, у разі необхідності, вмикає досвідку із LED стрічок (10), котрі розташовані на бокових стінках культиватора. Світлодіодні стрічки необхідного спектру розташовані вздовж системи в порядку білий – червоний – синій – білий із обох боків загальною потужністю  $P_o = 80$  Вт (0,8А при 12В). Перемішування культури відбувається кожних чотири години (починаючи від 6.00 години ранку) по 240 секунд за допомогою електродвигуна (5) потужністю 10 Вт. Контроль температури здійснюється датчиком (15) (автоматичне вимірювання здійснюється в діапазоні від  $-10$  °С до  $+85$  °С з точністю  $\pm 0,1$  °С) в температурному режимі  $20-25$  °С ( $\pm 0,2$  °С), у разі необхідності система вмикає електропідігрівач (13) потужністю 50 Вт. За кількістю росту клітин (біомаси) відносно об'єму слідкує датчик (16). Кран зливу (19) дозволяє відбирати необхідну частину культури для визначення хімічного складу біомаси та підрахунку клітин на камері Горяєва. Після виходу системи культивації на стаціонарний режим злив суспензії здійснюється через кран (19). Дані системи (час, рівень освітленості та рН температура, тривалість роботи електропідігрівача, досвідки та відкритого режиму клапана подачі  $CO_2$ ), котрі вимірюються кожної секунди, записується у зовнішню пам'ять та візуально відображаються на дисплеї комп'ютера (1).

Для реалізації зазначених функцій було створено відповідний контрольно-вимірювальний модуль на базі мікроконтролера ATmega 2560 із вбудованим годинником реального часу та підключенням до ПК через USB інтерфейс до 3 м та 10/100 Base-t інтерфейс до 100 м, розроблено алгоритм його керування, на

основі якого написано відповідне програмне забезпечення із можливістю збереження даних вимірювань реактора кожної секунди роботи впродовж року в журналі роботи; можливість регуляції досвітки та перемішування з пульта керування

Лабораторні дослідження дали змогу визначати енергетичні показники роботи вузлів освітлення, підтримку температурного режиму (основні затрати були спрямовані для їх забезпечення) та перемішування суспензії. Освітлення проводилось в період  $t_O$  – з 06.00 до 22.00 (16 годин) і відключалось на 8 годин (із 22.00 до 06.00) в «час спокою», у результаті чого добове споживання для підтримки світлового режиму становило:

$$Q_{DO} = t_O \cdot P_O \quad (4.1)$$

$Q_{DO} = 16 \text{ год} \cdot 80 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 1280 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  і, відповідно, за 56 діб досліду –  $71680 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ .

Визначено один із необхідних енергетичних параметрів системи освітлення на рівні  $1,06 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{л}$  для максимального приросту нової біомаси із погодинним споживанням енергії:  $71680 \text{ Вт} \cdot \text{год} / 56 \text{ діб} / 75 \text{ л} / 16 \text{ год} = 1,06 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{л}$ .

Перемішування суспензії здійснювалось кожні чотири години по 240 секунд у період освітлення електродвигуном потужністю  $P_{II}$  –  $10 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ , що відповідно склало  $t_{II}$  – 1200 секунд роботи (0,3 години) і становило:

$$Q_{DII} = t_{II} \cdot P_{II} \quad (4.2)$$

$Q_{DII} = (1200 / 3600) \cdot 10 \text{ Вт} = 3 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  за добу та  $168 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  – за час проведення досліду, та визначено енергетичні параметри для системи перемішування із погодинним споживанням енергії:  $168 \text{ Вт} \cdot \text{год} / 17 \text{ діб} / 24 \text{ год} / 50 \text{ л} = 0,028 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  із урахуванням додаткового перемішування під час збору культури загальною тривалістю 360 с.

Температура підтримувалась електропідігрівачем потужністю  $P_{EII}$  –  $50 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ . Коливання температури зовнішнього середовища не мали лінійної залежності, адже підігрівач спрацьовував лише при опусканні температури у ФТБР нижче  $+22 \text{ }^\circ\text{C}$ . За час проведення досліду електропідігрівач працював 908 годин або ж в середньому  $t_{EII}$  – 16,2 години в добу і відповідно було спожито:

$$Q_{DEII} = t_{EII} \cdot P_{EII} \quad (4.3)$$

$Q_{ДЕП} = 16,2 \text{ год} \cdot 50 \text{ Вт} = 810 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  в добу та відповідно  $45360 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  за час періоду проведення досліду.

Відповідно загальна спожита енергія  $Q_{ЗД}$  під час дослідження становить:

$$Q_{ЗД} = Q_{ДЕП} + Q_{ДП} + Q_{ДО} \quad (4.4)$$

$$Q_{ЗД} = 45360 \text{ Вт} \cdot \text{год} + 190 \text{ Вт} \cdot \text{год} + 71680 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 117\,230 \text{ Вт} \cdot \text{год} [1].$$

Біологічні показники роботи ФТБР дали змогу відпрацювати режими роботи та визначити доцільність промислової генерації біомаси під час утилізації вуглекислоти. Стабільність функціонування культиватора підтверджена динамікою основних показників культивування водоростей (рис. 4.4).

З'ясовано, що для *Chlorella Sp* штам Т-4 з різних природних біотопів найбільш оптимальним середовищем для культивування є середовище Фітцджеральда, порівняно з середовищами Тамія, ЧУ-10 чи Єленкіна, при барботації і без неї протягом 30 діб у люменостаті (23–25 °С, освітлення 2500 лк).

На 15-ту добу культивування у цьому досліді було отримано  $5,9 \cdot 10^9$  клітин/л. При подальшому збільшенні термінів культивування до 25 діб концентрація клітин збільшилася в 2,5 рази, досягнувши величини  $14,7 \cdot 10^9$  клітин/л.

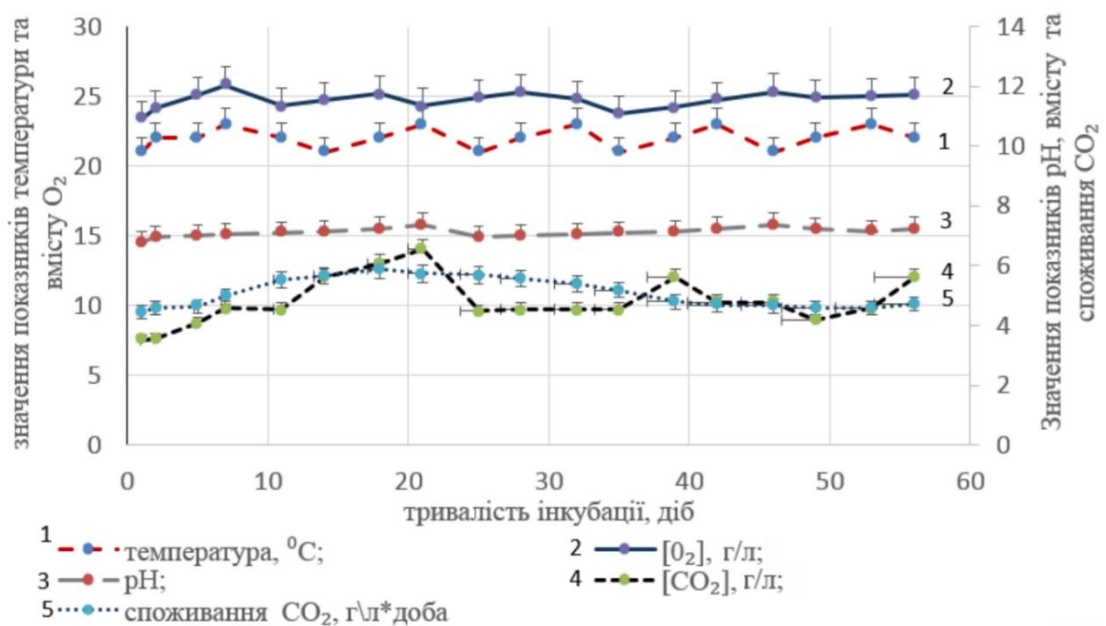


Рис. 4.4 Динаміка показників температури, кислотності культурального середовища та вміст у ньому розчинених O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> і його споживання

Запропонована система дала можливість здійснити безперервне культивування хлорели у стаціонарному режимі, про що свідчить динаміка вмісту клітин у культуральному середовищі (рис. 4.5).

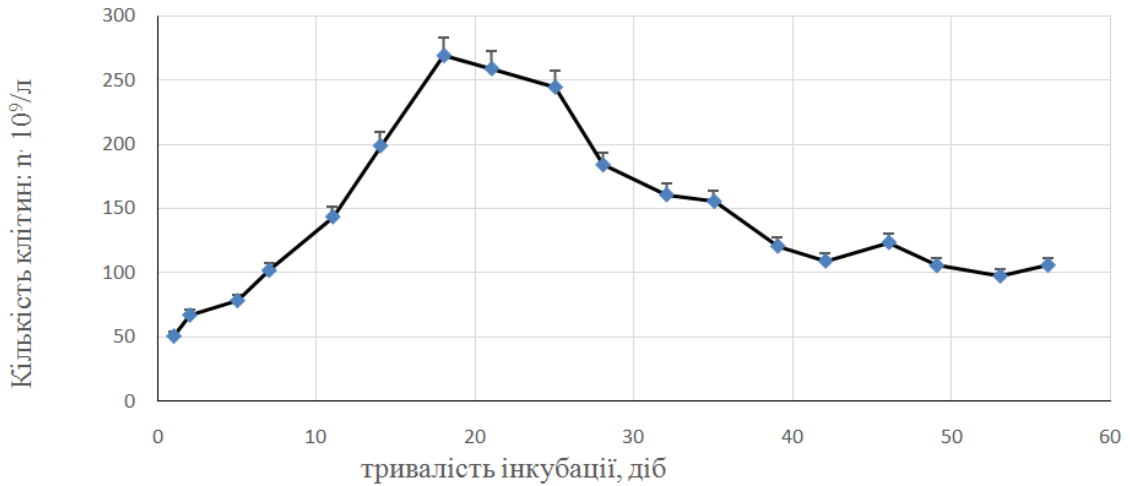


Рис. 4.5 Динаміка росту популяції мікроорганізмів

Аналогічно динаміці клітин спостерігалася динаміка їх загальної біомаси та біомаси основних органічних компонентів (рис. 4.6).

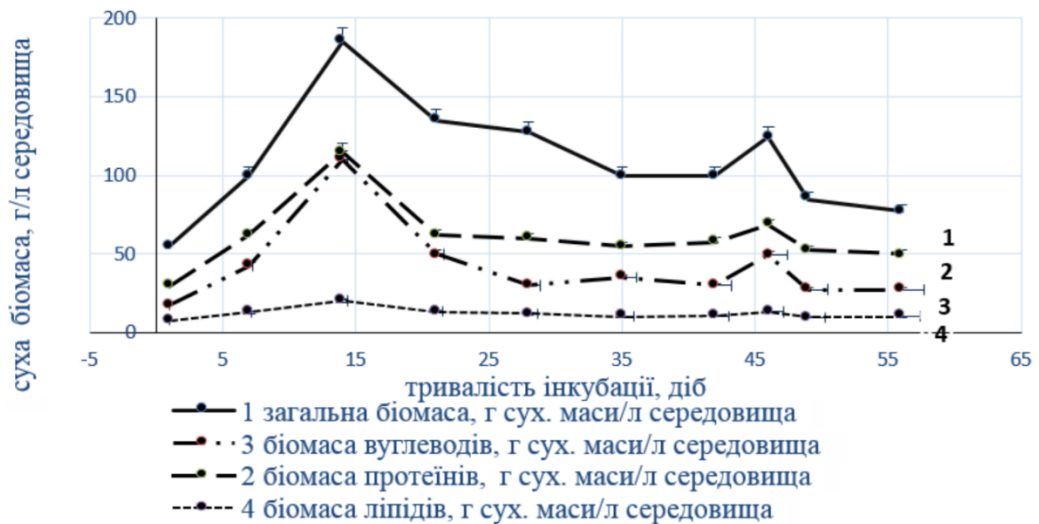


Рис. 4.6 Динаміка біомаси основних компонентів клітин

Отримані експериментальні дані дали змогу визначити середньодобові показники приросту сухої біомаси на рівні 3,46 г/л, утилізації вуглекислоти на рівні 5,07 г/л та генерації кисню, який відводиться із реактора – 3,7 г/л [13].

З метою перевірки достовірності отриманих результатів, було проведено ще чотири експериментальних дослідження згідно з вищеописаною методикою. Згідно з проведеним аналізом росту мікроорганізмів при широкомасштабному виробництві мікроорганізмів ФТБР будують у вигляді проточної системи, у якій культивування і постачання живильного середовища відбувається постійно (рис. 4.7, а) або циклічної із обмеженим часом росту та повною перезарядкою як мікрокультури, так і харчового середовища (рис. 4.7, б) криву росту мікроорганізмів можна поділити на 5 фаз [14].

На основі експериментальних даних можна визначити середню криву росту (рис. 4.8) мікрокультури ( $\bar{n}$ ) на основі формули:

$$\bar{n}(t) = \sum_{i=1}^N n_i(t), \quad (4.4)$$

де:  $N$  – кількість проведених експериментів,  $n_i$  – кількість мікроорганізмів в  $i$ -му експерименті.

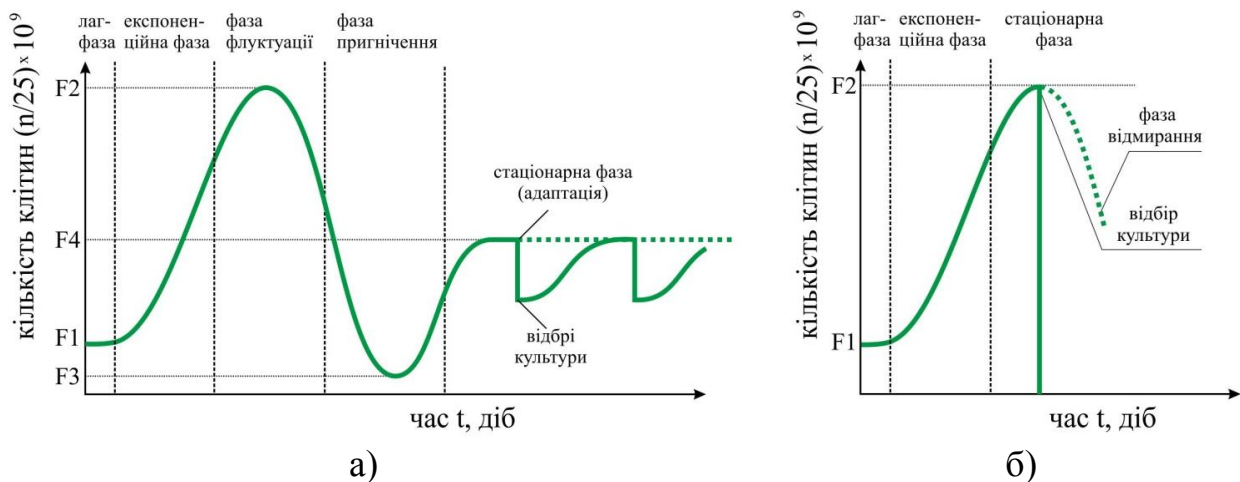


Рис. 4.7 Динаміка росту клітин: а) зміна кількості клітин у режимі неперервного культивування, де: F1 – період звикання; F2 – різке збільшення кількості концентрації клітин (10-100 разів) за рахунок енергетичних ресурсів; F3 – зниження функціональної активності нижче початкового рівня; F4 – перебудова пластичного та енергетичного забезпечення і вихід на стаціонарну фазу; б) ріст клітин у реакторі із режимом накопичення (один виробничий цикл)

Адекватність проведення експерименту визначимо на основі середньоквадратичного  $\delta = \sqrt{\frac{\sum |n(t) - \bar{n}|}{N}}$  та середнього відносного  $\Delta = \sum \frac{|\bar{n}_i - n_i|}{\bar{n}_i}$  відхилення.

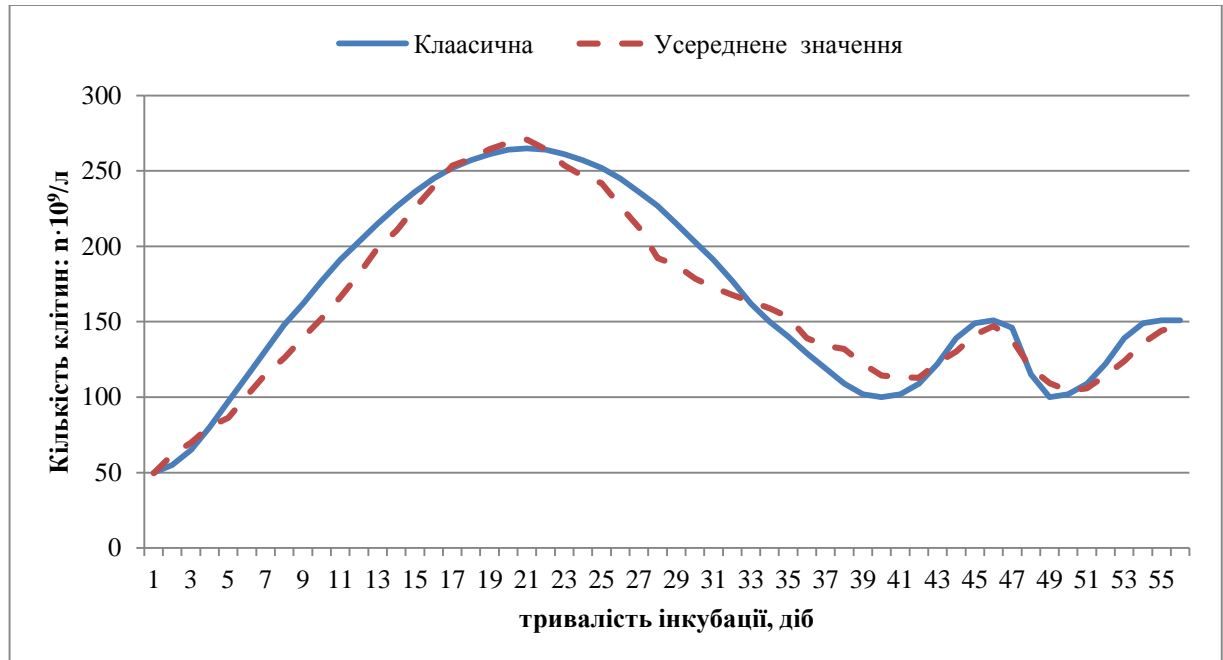


Рис. 4.8 Усереднена і класична крива росту мікроорганізмів

Таким чином у відповідності до експериментальних даних отримуємо наступні середньоквадратичні відхилення табл. 4.1.

Таблиця 4.1

**Середньоквадратична та відносна похибки проведених експериментальних даних**

№ з/п	Середньоквадратичне відхилення	Відносне відхилення
Дослід I	$\delta_1 = 9,0909;$	$\Delta_1 = 3\%$
Дослід II	$\delta_2 = 5,5234;$	$\Delta_2 = 1.09\%$
Дослід III	$\delta_3 = 14,4806;$	$\Delta_3 = 6.2\%$
Дослід IV	$\delta_4 = 8.5735;$	$\Delta_4 = 3.02\%$
Дослід V	$\delta_5 = 16.9869;$	$\Delta_5 = 7,56\%$

Відповідно, середньоквадратичне відхилення становить у межах від  $\delta_2 = 5,5234$ ; до  $\delta_5 = 16.9869$ , а середнє відносне: від  $\Delta_2 = 1.09\%$  до  $\Delta_5 = 7.56\%$ .

Крива росту мікроорганізмів (рис 4.7, а) можна поділити на 6 фаз (лаг-фаза, експоненційна фаза, фаза флуктуації, фаза пригнічення, фаза виходу на стаціонарний режим, фаза стаціонарного режиму). Як видно із рисунка 4.8, кожен етап росту можна виділяти локальним екстремумом. Таким чином, функція росту мікроорганізмів  $n_a(t)$  матиме наступний вигляд:

$$n_a(t) = \left\{ \begin{array}{l} n_1(t), t \in (0; t_{a1}) \\ n_2(t), t \in (t_{a1}; t_{a2}) \\ \dots \\ n_m(t), t \in (t_{am-1}; t_{am}) \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

Для знаходження  $t_{ai}$  скористаємось умовою існування екстремуму:

якщо  $n_a(t)$  неперервна в точці  $t_{ai}$  та 1)  $n'_a(t) > 0$  на інтервалі  $(t_{ai-1}; t_{ai})$  та  $n'_a(t) < 0$  на інтервалі  $(t_{ai}; t_{ai+1})$ ; 2)  $n'_a(t) < 0$  на інтервалі  $(t_{ai-1}; t_{ai})$  та  $n'_a(t) > 0$  на інтервалі  $(t_{ai}; t_{ai+1})$ , то  $t_{ai}$  – точка екстремуму.

У результаті експерименту отримана система середньозважених точок  $\{(n_0, t_0), (n_1, t_1) \dots (n_n, t_n)\}$ . Необхідно знайти степеневий поліном виду:  $n_a(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots + \alpha_m t^m$ , такий, щоб сума квадратів відхилень полінома  $n_a(t)$  від заданої системи експериментальних точок була б мінімальною. Така задача зводиться до визначення коефіцієнтів поліному  $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$ , а її розв'язок називається методом найменших квадратів. Критерій середньоквадратичного відхилення в даному випадку має вигляд:

$$\sum_{i=0}^n (n_a(t_i) - \bar{n}_{(i)})^2 = \sum_{i=0}^n (\alpha_0 + \alpha_1 t_i + \alpha_2 t_i^2 + \dots + \alpha_m t_i^m - \bar{n}_{(i)})^2 \rightarrow \min \quad (4.6)$$

Апроксимована функція на основі отриманих експериментальних даних має вигляд (рис. 4.9):

$$n_{\alpha}(t) = \begin{cases} -0.0378t^3 + 1.1863t^2 + 2.3111t + 51.0098, & \text{при } t \in (0; 21) \\ 0.0175t^3 - 1.4147t^2 + 27.8718t + 148.326, & \text{при } t \in (22; 46) \\ 49t^2 + 2596t + 4.5863, & \text{при } t \in (47; 56) \end{cases} \quad (4.7)$$

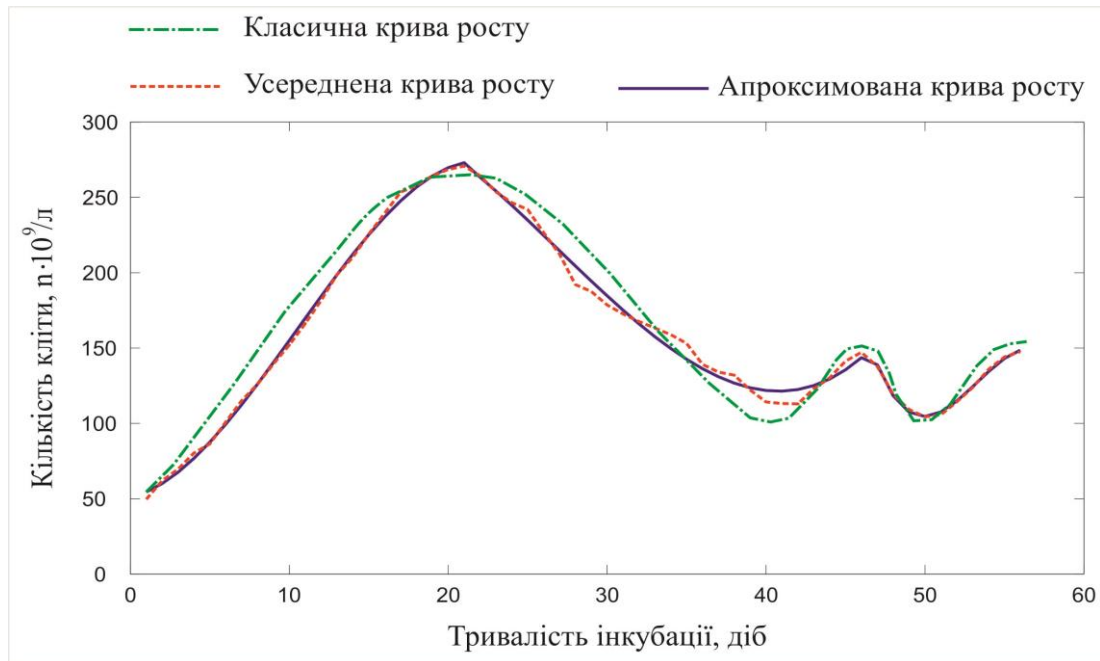


Рис. 4.9 Апроксимована функція росту

Середньоквадратичне відхилення апроксимованої функції від усередненої  $\delta_{\alpha} = 4.2234$ , відносна середня похибка апроксимації становить  $\Delta_1 = 2,23\%$ . Таким чином, можна говорити, що апроксимована функція є достовірною, оскільки знаходиться в межах похибки експериментальних даних [3].

Важливим та невід’ємним етапом освоєння технології вирощування мікроводоростей є розробка ФТБР, які не лише можуть підтримувати оптимальні параметри середовища, але й автоматично здійснювати підрахунок та контроль кількості і стану клітин. Для цього розроблено відповідний математичний та програмний апарат, який базується на обробці та сегментації зображень, отриманих під час автоматичного мікроскопування системи.

На реальних зображеннях, отриманих з мікроскопа, крім клітин та їх фрагментів, існує багато шумів, неоднорідностей, забруднень та можлива присутність сторонніх об’єктів, які необхідно ідентифікувати. Для розпізнання контурів клітин сфотографовану картинку із мікроскопа (рис. 4.10, а) алгоритм переводить у напівтонове зображення, перетворюючи кольорові складові в



відповідні для них значення яскравості чорно-білого зображення (рис. 4.10, б), після чого підвищується контраст зображення при допомозі розтягнення значень інтенсивностей динамічного діапазону (рис. 4.10, в).

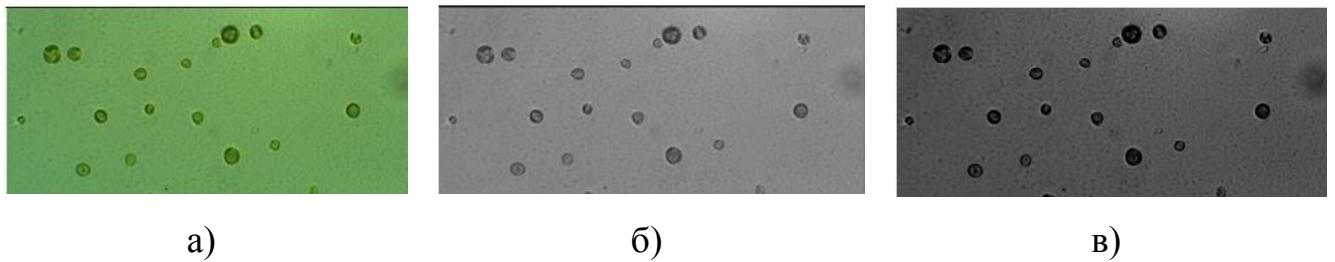


Рис. 4.10 Обробка зображення клітин мікродоростей: а) початкове зображення; б) напівтоннове зображення; в) зображення із підвищеним контрастом X1000

Сегментація відбувається із застосуванням оператора виділення границь до зображення для зменшення кількості оброблюваних даних. Відфільтрована частина даних є менш значимою, але найбільш важливі структурні деталі зберігаються. У результаті виділення границь формується набір зв'язаних кривих, котрі позначають границі об'єктів.

Для підрахунку кількості клітин було досліджено методи сегментації зображень, які представлені у вигляді масок. Принцип роботи даних методів базується на різниці яскравості елементів і фону зображення як розрахунок похідних, котрі представляються у вигляді цифрового наближення градієнта. Градієнтні оператори представляють собою матричні маски Робертса, Превітта, Собеля, Лапласіана-Гаусса.

Перехресний оператор Робертса має високу швидкодію, простий у використанні, але дуже чутливий до завад та шумів (рис. 4.11, а). Цей оператор використовує чотири значення яскравості із зображення.

$$G_{i,j} = \sqrt{(E_{(i+1),(j+1)} - E_{i,j})^2 + (E_{(i+1),j} - E_{i,(j+1)})^2} \text{ або} \quad (4.8)$$

$$G_{i,j} = |E_{(i+1),(j+1)} - E_{i,j}| + |E_{(i+1),j} - E_{i,(j+1)}| \quad (4.9)$$

де:  $E$  – матриця початкового зображення;  $i, j$  – значення координат елемента зображення (пікселя).

Оператор Собеля використовує вдвічі більше значень яскравості із оброблюваного зображення (рис. 4.11, б).

$$G_{i,j} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4.10)$$

де:  $G_x$  та  $G_y$  – це два зображення, де кожна точка містить часткові похідні по  $x$  та по  $y$  відповідно.

Матриці цього оператора мають наступний вигляд:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \cdot E \text{ и } G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \cdot E \quad (4.11)$$

де:  $E$  – матриця початкового зображення

Програмно зображення представляються наступним чином:

$$G_{i,j} = \sqrt{G_{i,j}^2(x) + G_{i,j}^2(y)} \text{ або } G_{i,j} = |G_{i,j}(x) + G_{i,j}(y)|, \quad (4.12)$$

$$\text{де: } G_{i,j}(x) = [E_{(i-1),(j-1)} + E_{(i-1),j} + E_{(i-1),(j+1)}] \quad (4.13)$$

$$G_{i,j}(y) = [E_{(i-1),(j-1)} + E_{i,(j-1)} + E_{(i+1),(j-1)}] - [E_{(i-1),(j+1)} + E_{i,(j+1)} + E_{(i+1),(j+1)}] \quad (4.14)$$

Оператор Лапласіана базується на похідних другого порядку, завданням якого є пошук границі в місцях зміни знаку похідної функції яскравості, проте він дуже чутливий до шуму, а також може спровокувати подвоєння контурів. Для того, щоб зменшити вплив шумів, цей оператор використовують у поєднанні зі згладжуванням по методу Гаусса, і саме дане поєднання називають Лапласіана-Гаусса (Laplacian Of Gaussian) (рис. 4.11, в).

Маска оператора представлена формулою:

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi \cdot \sigma^4} \cdot \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.15)$$

де:  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення розподілу Гауса.

Маска фільтра має наступний вигляд:

$$LoG(x, y) = \frac{1}{1+a} \begin{bmatrix} -a & a-1 & -a \\ a-1 & a+5 & a-1 \\ -a & a-1 & -a \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$a$  – параметр в діапазоні  $[0, 1]$ .

Оператор Canny зарекомендував себе в якості підвищеного співвідношення сигнал/шум, хорошої локалізації та єдиного відклику на одну границю (рис. 4.11, г).

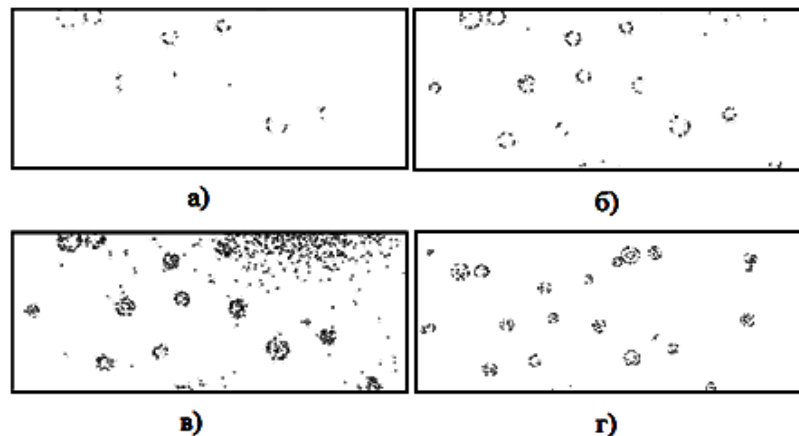


Рис. 4.11 Робота операторів виділення границь: а) Робертса; б) Собеля; в) Лапласіана-Гаусса; д) Canny

Такі показники роботи оператора досягаються завдяки тому, що він являє собою близьке наближення до першої похідної Гаусса і має вигляд:

$$f(x) = -x^* \exp\left[-\frac{x^2}{2s^2}\right] \quad (4.17)$$

Для дослідження алгоритму сегментації зображень було співставлено результати роботи алгоритмів у порівнянні із підрахунком клітин стандартною

методикою та визначено, що саме від роботи операторів виділення границь залежить якість сегментації. Визначено, що оператор Canny задовольняє необхідну точність підрахунку клітин, яка складає 97,3 % до кількості клітин, підрахованих у камері Горяєва за стандартною методикою (рис. 4.12).

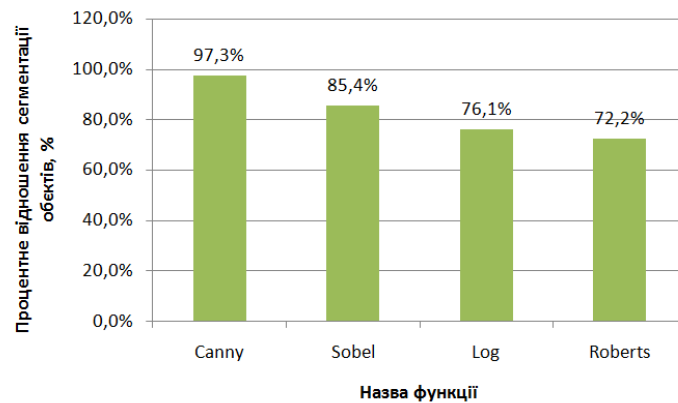


Рис. 4.12 Точність підрахунку клітин відносно операторів виділення границь

Оскільки зображення інколи мають недоліки фрагментації (криві границі не з'єднані між собою, відсутність у деяких місцях границь взагалі або наявність хибних границь). З метою їх усунення використовується функція нарощування (рис. 4.13).

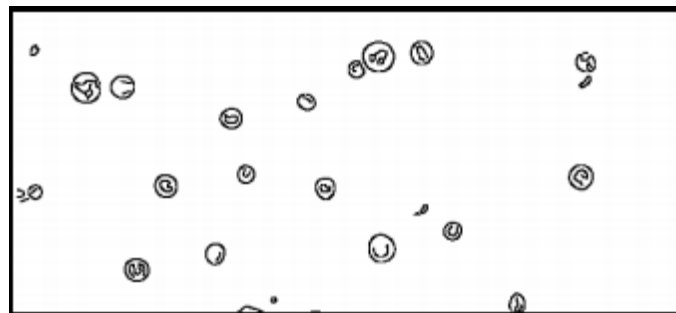


Рис. 4.13 Результат застосування функції нарощування

Для подальшої обробки зображення алгоритм заповнює отвори на бінарному зображенні. За допомогою даного підходу ми отримуємо масив із дископодібною структурою з двійкового досліджуваного поля (зображення) та опрацьовуємо, обводячи при цьому контур та вираховуючи радіус об'єктів (рис. 4.14).

За вказаним алгоритмом ідентифікації біологічних параметрів мікроводоростей було досліджено проби культури, взяті із ФТБР у камері Горяєва. Дослідження проводилось у 7 зорових областях, після чого оброблялось комп'ютерною програмою.

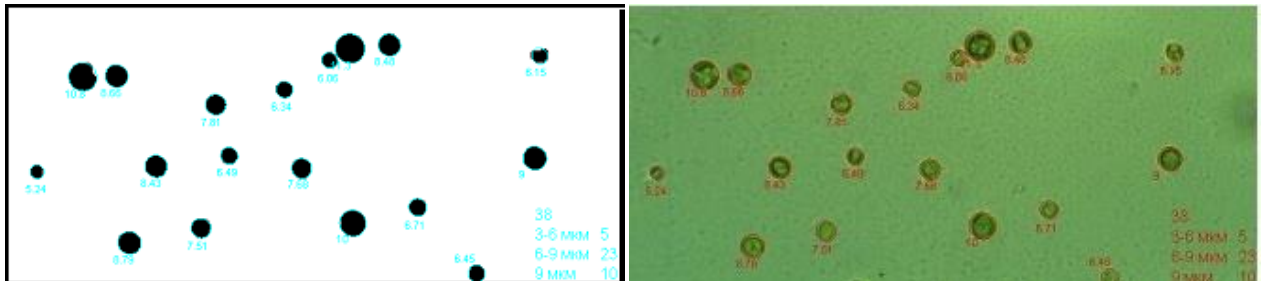


Рис. 4.14 Результат підрахунку клітин

Таким чином, використання ідентифікації та сегментації зображень мікроскопії дали змогу здійснювати аналіз стану біологічної системи та визначати моменти раціонального відбору біомаси, базуючись на показниках кількості та розмірності клітин. Достовірність цифрового розпізнання зображень та підрахунку мікроорганізмів, у порівнянні з існуючою методикою ручного підрахунку на базі камери Горяєва, показала достовірність на рівні 97 % [12; 17].

Дослідження в закритих умовах продемонстрували подальші шляхи оптимізації енерговитрат, які полягають у використанні сонячного випромінювання та імплементації системи терморегуляції на базі теплообмінників, що дало змогу скоротити витрати споживання енергії та збільшити масштаби системи генерації нової біомаси.

Випробування із використанням зовнішнього освітлення продемонстрували необхідність зміни режиму перемішування, оскільки на зовнішню поверхню ФТБР попадає значно більше сонячного світла та прискорює процес росту культури. На відміну від культивування водорості *Chlorella Vulgaris* Beij в закритій системі при штучному освітленні в приміщенні, де головним завданням була підтримка температури нижнього порогу, при проведенні дослідження на природному освітленні, головним завданням було не перегрівати культуру.

Оскільки даний штам водорості знаходиться в умовах мезофільного температурного режиму, то, у випадку зниження температури на  $+3-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  від мінімально допустимої ( $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), процес росту сповільнюється; у випадку з перегрівом середовища на  $+5-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  вище максимальної –  $+27-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  – культура зникає. Саме тому основним завданням даного дослідження було згладити добові перепади зовнішньої температури відповідно у самому реакторі.

В експериментальних умовах культивували водорості у ФТБР об'ємом  $50\text{ дм}^3$  упродовж 17 діб при температурі  $+21-27\text{ }^{\circ}\text{C}$  та природному освітленні інтенсивністю 9000 лк із 6.00 год до 22.00 год. При цьому використовували додаткове освітлення з використанням Led стрічок від 6.00 до 7.00 год та від 21.00 до 22.00 год з додаванням у культуральне середовище водних розчинів солей. Живлення  $\text{CO}_2$  забезпечували автоматично балонним газом з чистотою 99,5 % (ДСТУ 4817:2007, Сорт 1).

Відбір зразків біомаси водоростей проводили кожних 3-4 доби, а кожних 7 діб доливали поживне середовище (по  $2\text{ дм}^3$ ). Показники температури середовища, рН,  $\text{CO}_2$  контролювали автоматично за допомогою вбудованих у корпус ФТБР електродів [7].

У разі підвищення температури в культиваторі вище  $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$  КВМ вмикає циркуляційний насос і за рахунок теплообмінника, розташованого на задній частині культиватора, знижує її. Якщо температура у культиваторі та ємності підігріву води нижча  $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то КВМ вмикає електропідігрівач та утримує температуру середовища на заданому рівні. Щоб запобігти перегріванню мікроорганізмів (вище  $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), КВМ виводить частину води із ємності для її підігріву та вводить додаткову порцію холодної – із загальної мережі [5].

Для перевірки вище вказаної технологічної схеми було розроблено спрощений лабораторний стенд термоакумулятора (ємність 80 літрів, із водою в якості теплоносія), який дозволив відбирати від ФТБР надлишки теплової енергії вдень і використовувати її вночі.

Виробнича перевірка проводилась науково-дослідною лабораторією «Енергетичний менеджмент» при Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка виробничих потужностях

НВО «Енергоощадні технології» в Тернопільській області (рис. 4.15) та в науково-дослідній лабораторії «Екобіотехнологій та здоров'я людини» при Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка.

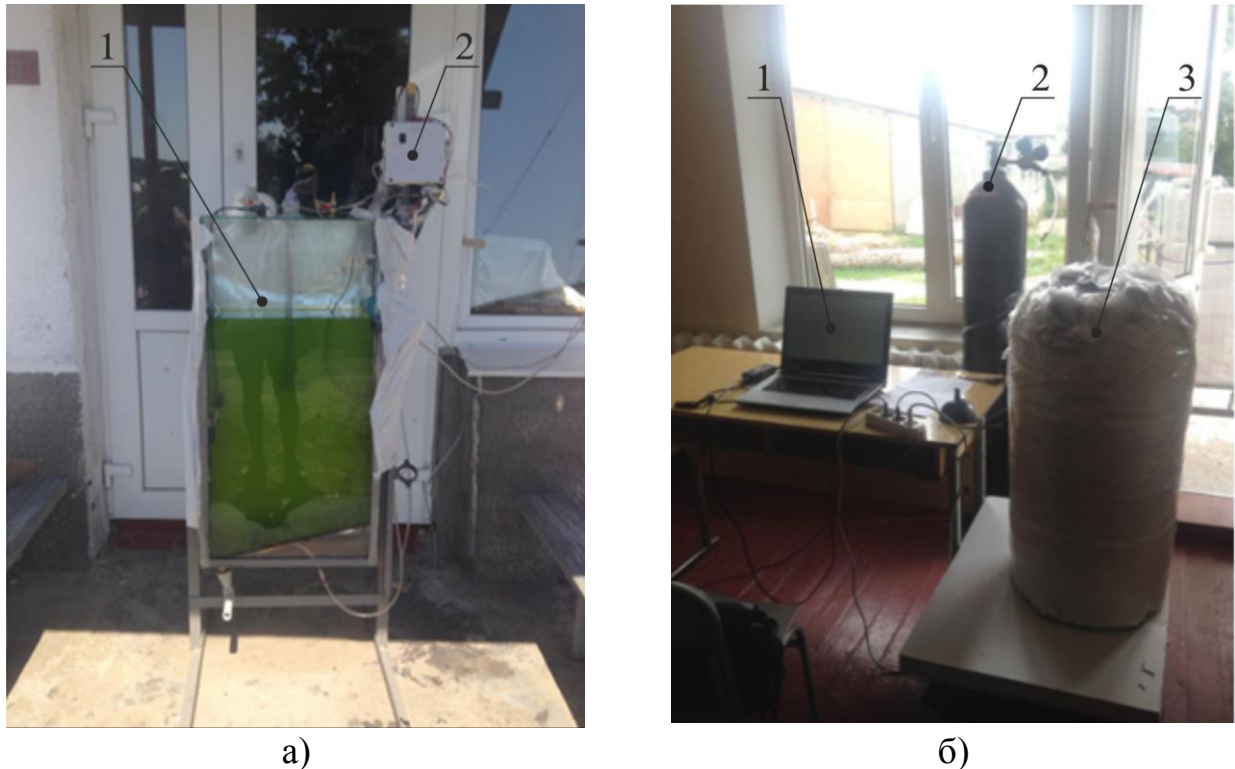


Рис. 4.15 Система утилізації діоксиду вуглецю: а) плоский вертикальний ФТБР (1а) із контрольно-вимірювальною системою (2а); б) вимірювальний сервер (1б), вуглекислотний балон (2б), термоакумулятор (3б)

За рахунок збільшення теплової ємності системи ФТБР вдалося стабілізувати температуру в межах допустимих значень та попередити перегрів мікрокультури (рис. 4.16).

Під час проведення дослідження основні енергозатрати були спрямовані на роботу циркуляційного насосу (потужність 50 Вт) системи термоакумулятора. Проте загальна спожита енергія під час проведення дослідження (дослід І) була меншою на 25 % відносно культивування в закритому приміщенні при штучному освітленні (дослід ІІ).

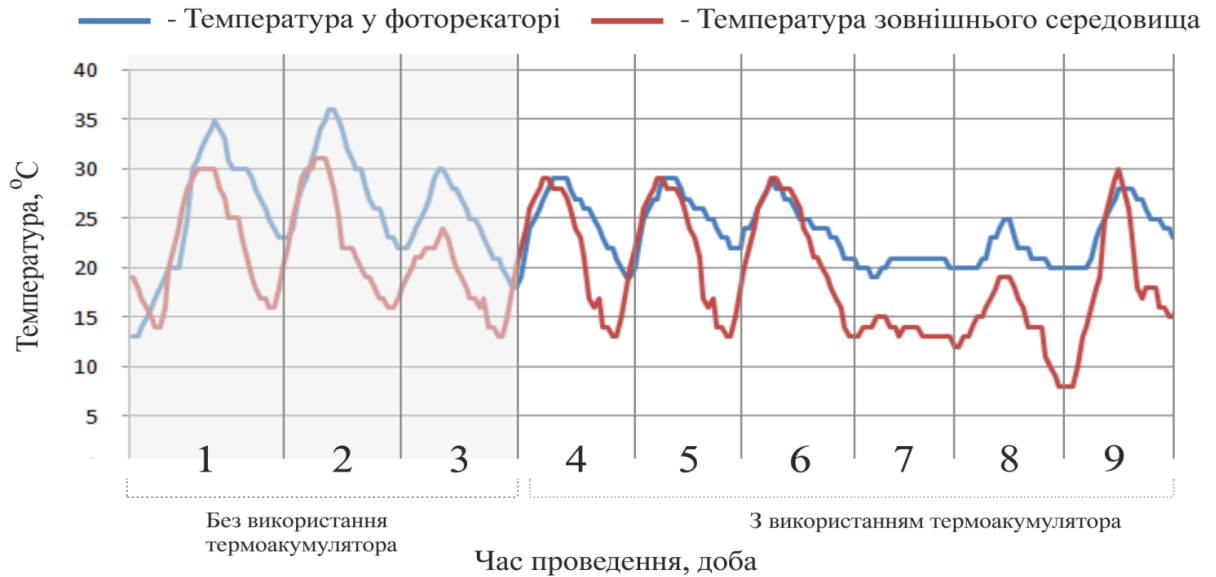


Рис. 4.16 Температурні режими роботи ФТБР без термоакумулятора та з його імплементацією

Для визначення корисних питомих теплових витрат (сумарні показники підігріву та охолодження) за годину, із врахуванням сонячної інсоляції проведено розрахунок за наступним виразом:  $(3,196 \text{ кВт год} + 20,4 \text{ кВт год}) \cdot 0,85/17 \text{ діб}/24 \text{ год}/50 \text{ л} \approx 0,98 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{л}$ , де 0,85 – коефіцієнт корисного об'єму ФТБР, що враховує простір середовища у верхній частині конструкції (рис. 4.17).

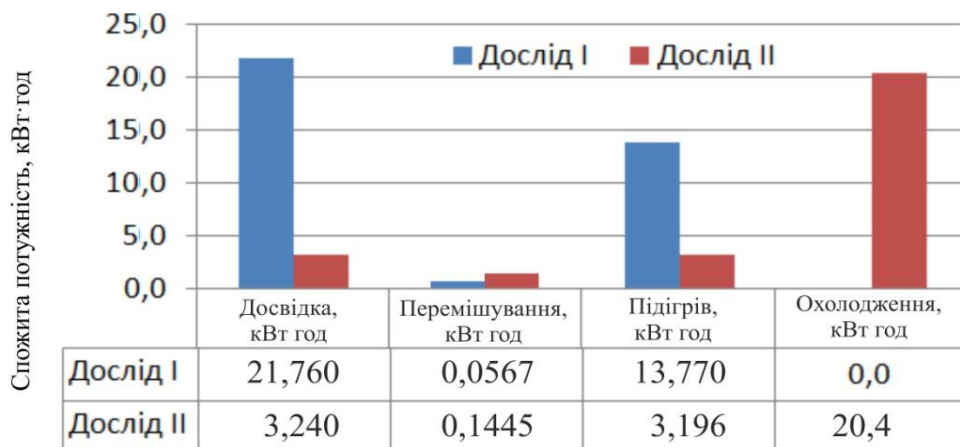


Рис. 4.17 Порівняльна характеристика енергоспоживання протягом 17 діб під час проведення I (інтенсивність 2500 лк) та II досліджень (сонячна радіація  $\approx 9000 \text{ лк}$ ,  $700\text{--}950 \text{ Вт}/\text{м}^2$ )



З графіка видно, що кількість спожитої енергії для освітлення у другому дослідженні стала меншою на 75 % відносно першого, незначними є витрати для перемішування, проте, у порівнянні, вони стали вищими на 60 %. Значно нижчим показником другого дослідження є витрати для підігріву культури – 77 %, проте значна частина енергії була спожита для охолодження – 75 % від загальної кількості у другому дослідженні.

Загальні показники енерговитрат під впливом природного освітлення зменшилися лише на 25 %, так як основна її частина спрямовувалась на циркуляційний насос теплообмінника, оскільки в теплу пору року ФТБР підлягає суттєвому перегріву як від атмосферного повітря (температура часто досягає 30-35 °С), так і від дії прямої сонячної інсоляції, потужність котрої сягає 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

Дані показники є критичними для системи, оскільки у випадку розігріву субстрату із мікроорганізмами до 40 °С відбувається повне відмирання культури, хоча використання природного освітлення дозволяє в значній мірі збільшити приріст біомаси та мінімізувати енерговитрати досвітки, що вказує на безперспективність використання штучного освітлення у максимальний сезонний період її дії. Це дало змогу розробити подальшу стратегію розвитку технології в зоні помірного клімату, яка полягає у зменшенні впливу температурних перепадів за рахунок збільшення теплової інерції ФТБР, інтегруванням термоакумулятора в його структуру та зменшення інтенсивності штучного освітлення шляхом використання сонячного випромінювання.

Слід відзначити позитивну динаміку приросту біомаси мікроводоростей залежно від інтенсивності освітлення (за температури +21...+27 °С) під дією сонячного випромінювання (рівень освітленості 9000 лк) та за штучного освітлення з величинами 2500, 5000 та 7500 лк упродовж 17 діб. Це дало змогу встановити, що використання природного освітлення є ефективнішим на 25 % з енергетичної та біологічної точок зору, оскільки приріст кількості клітин зріс у 2,9 раза (рис. 4.18) [1; 6].

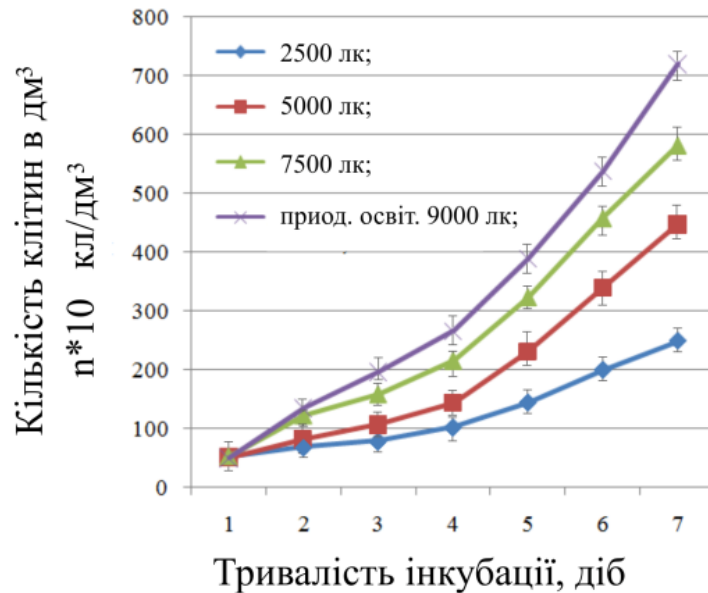


Рис. 4.18 Приріст кількості клітин за різних показників інтенсивності освітлення протягом 17 діб

Запропонована система дозволила здійснити тривале культивування *Ch. vulgaris* у стаціонарному режимі, про що свідчить динаміка вмісту клітин у культуральному середовищі. Кількість клітин водорості збільшувалася впродовж усього періоду дослідження: на 5 добу – у незначних кількостях, на 8 добу – у 5,4 рази, на 12 добу – майже у 9 разів, на 15 добу – у 12,1 рази і на 19 добу – у 18,6 рази порівняно із кількістю клітин на 1 добу.

Показник рН (рис. 4.19) вдень збільшувався з 1 доби (рН – 4,9) до 9 доби (рН – 6,7), після чого спостерігали зменшення рН до 17 доби (рН – 5,8), тоді як вночі рН збільшувався з 1 доби до 10 доби від 5,1 до 6,5, після чого також спостерігали зменшення показника до 17 доби (рН – 5,7) [7].

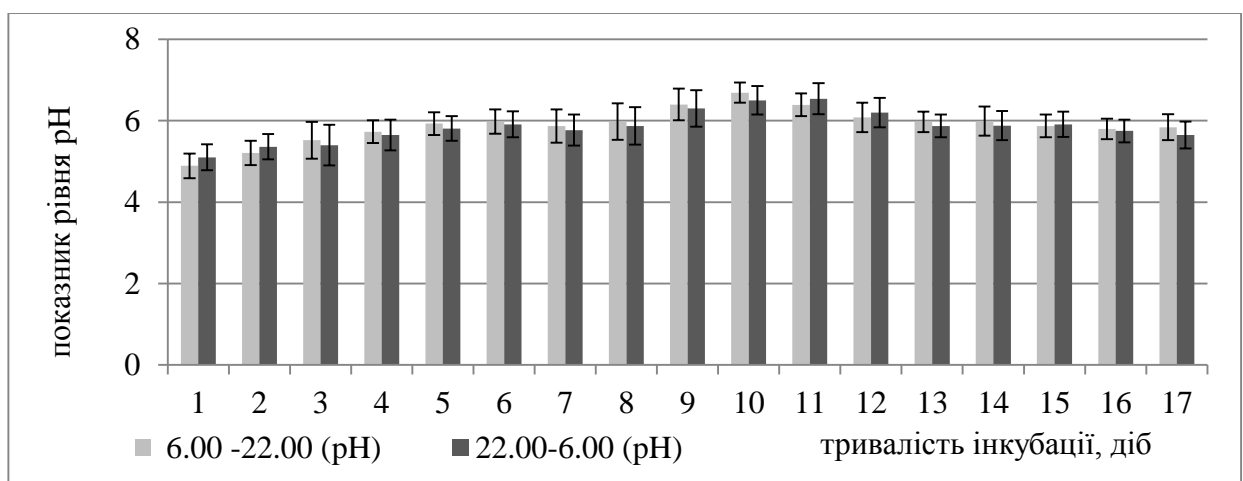


Рис. 4.19 Динаміка рН у фотобіореакторі

Генерації нової біомаси базується на процесі фотосинтезу, що в свою чергу дасть змогу відбирати димові гази енергетичних установок із подальшим нагнітання їх у ФТБР, де відбувається поглинання діоксиду вуглецю мікроводоростями, тобто здійснювати процес регенерації енергії викидів.

Імплементация даної технології в електрохімічні комплекси продукування енергії на базі ТОПЕ (відпрацьовані гази яких володіють відносно високою чистотою вуглекислоти) або ж використовуючи підсистему фільтрації димових газів (від роботи ДВЗ чи піролізних установок), дасть змогу в перспективі реалізувати систему із замкнутим вуглецевим колом, що створюватиме позитивний екологічний ефект.

На прикладі паливних елементів, відпрацьовані гази потрапляють у камеру для вихлопів разом із атмосферним повітрям, яке проходить очищення від пилу та грубих часточок через мокрі фільтри (нейтралізація мікроорганізмів та сірководню за рахунок хімічної взаємодії із  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Відфільтрована газова суміш подається в культиватор і утворює мікроскопічні бульбашки, які, у свою чергу, збагачують мікроорганізми діоксидом вуглецю та перемішують їх за рахунок аерліфту (рис. 4.20).

Задня частина ФТБР виконана у формі теплообмінника із чорним забарвленням, що підвищує поглинання сонячного випромінювання культиватором і дозволяє нагрівати його під дією сонячного випромінювання до  $+ 25\text{ }^\circ\text{C}$ . Розміщені в культиваторі мікроорганізми отримують необхідне сонячне випромінювання через його прозору фронтальну поверхню. За рахунок даних із датчиків освітленості, рН, концентрації солей, КВМ регулює рівень освітленості через додаткове освітлення світлодіодними стрічками (розташовані на бокових стінках культиватора) та коректує живильне середовище, вводячи додаткову його порцію у ємність культивування [11].

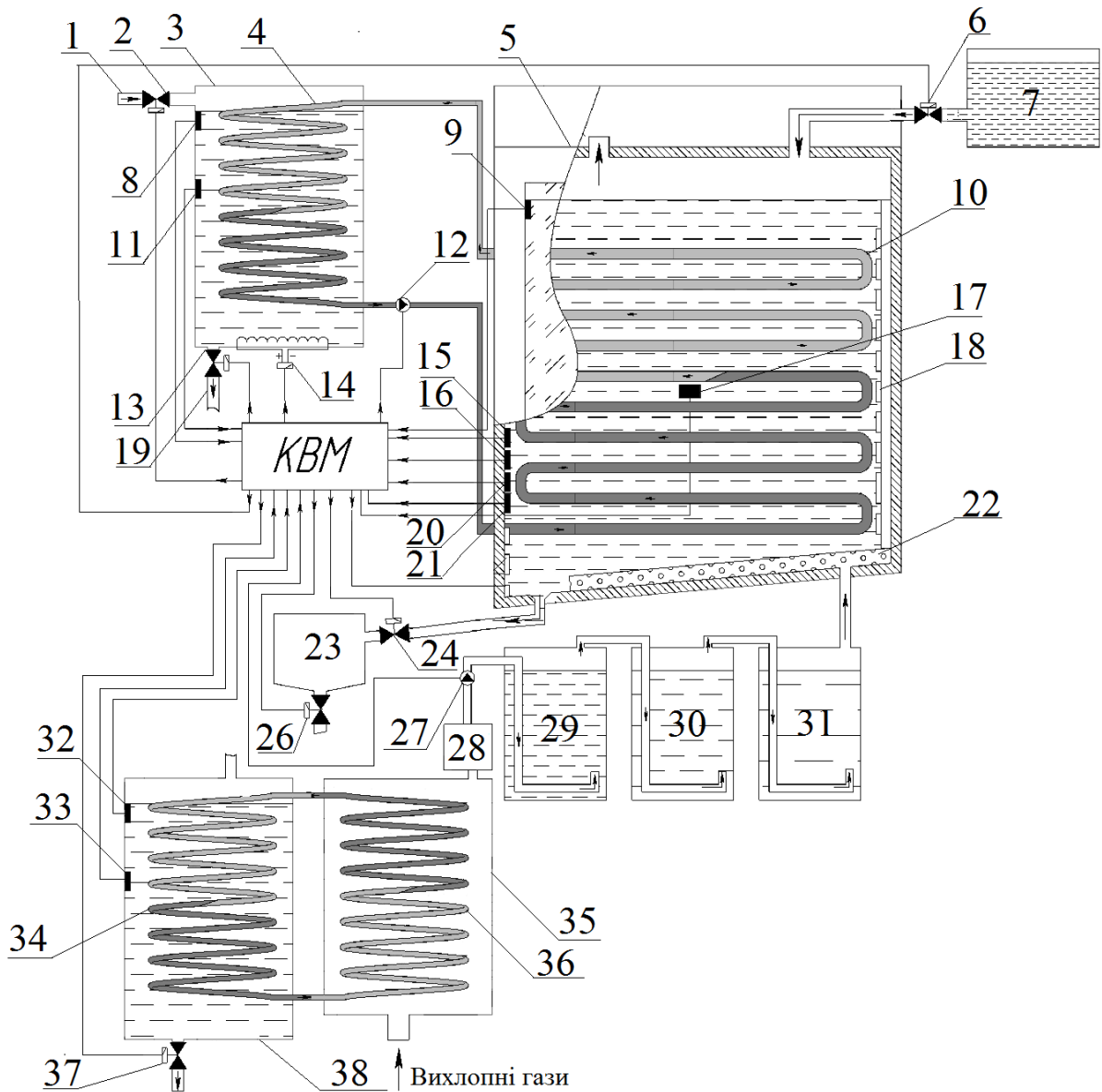


Рис. 4.20 Технологічна система роботи гібридної установки промислового вирощування мікродоростей шляхом утилізації діоксиду вуглецю:

1 – патрубок подачі води; 2, 6, 13, 24, 26, 37 – електромагнітний клапан; 3, 38 – теплоізольована ємність для підігріву води; 4, 10, 34, 36 – теплообмінник; 5 – плоский скляний культиватор, 7 – ємність для живильного середовища; 8, 9, 32 – датчик рівня; 11, 21, 31 – датчик температури; 12 – циркуляційний насос; 14 – електропідігрівач; 15 – датчик рН; 16 – датчик концентрації солей; 17 – датчик освітленості; 18 – світлодіодні стрічки; 19 – трубопровід; 20 – датчик концентрації мікроорганізмів; 22 – аераційна трубка; 23 – ємність збору вирощеної культури; 27 – повітряний насос; 28 – фільтр грубих часток; 29,30 – мокрий фільтр на основі перенасиченого розчину  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 31 – дистильована вода;

35 – камера вихлопних газів

Для зменшення додаткових капітальних затрат на автоматизацію процесу та з метою оптимізації роботи системи культивації мікробіодоростей розроблено схему автоматизації та написано відповідне програмне забезпечення, яка побудована на уніфікованих контрольно-вимірювальних модулях на базі мікроконтролера ATmega 2560 сімейства Arduino (1) (рис. 4.21).

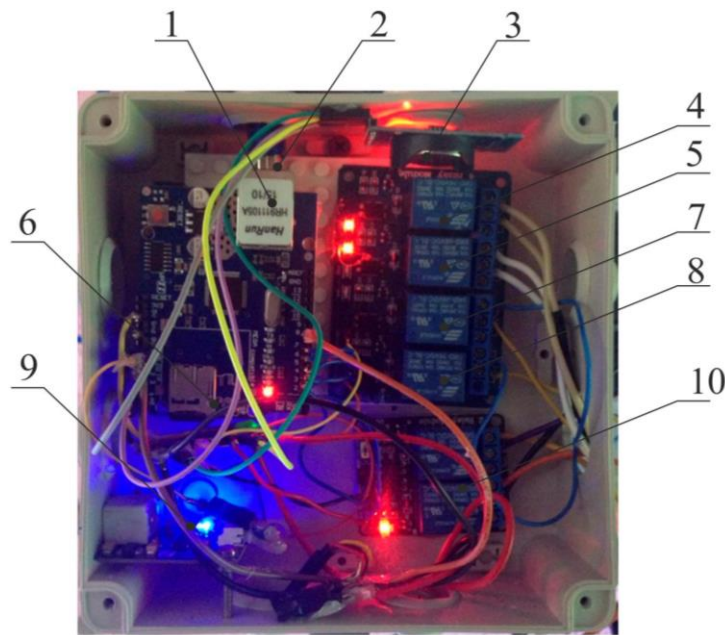


Рис. 4.21 Контрольно-вимірювальний модуль на базі мікроконтролера ATmega 2560: 1 – плата Ethernet w5100; 2 – USB 2.0 тип B; 3 – датчик реального часу Real Time Clock; 4 – реле (220 В) підігрівача; 5 – реле (220 В) електромагнітного клапана; 6 – порт запису даних для SD карти; 7 – реле (12 В) LED підсвітки червоного кольору (2x10 Вт); 8 – реле (12 В) LED підсвітки синього кольору (2x10 Вт); 9 – операційний підсилювач для рН метра; 10 – реле (12 В) LED підсвітки білого кольору (4x10 Вт)

Використання уніфікованих систем контролю дозволяє зекономити на розробку, виготовлення, монтаж та пуско-налагоджувальні роботи спеціалізованих друкованих плат. Такий підхід дозволив передавати інформацію про параметри середовища мікрокультури у вимірювальну мережу через шільд Ethernet контролю w5100 (1) із вшитим на її корпусі SD портом для збереження на зовнішньому носії (6). Під час проведення процесу стабілізації і підтримки кислотності, рівня освітленості, температурного режиму та газонасичення

середовища (9), контроль його параметрів та їх відповідність зазначеним параметрам відбувались через блок релейної комутації (4, 5, 7, 8, 10), а відповідність часовим режимам здійснювалась через блок вимірювання реального часу (3).

Перевірка системи керування ФТБР на точність процесу вимірювання здійснювалась на базі ТзОВ «Інтеграл», де відбулося встановлення надійності, наробітку на відмову та відповідності заявлених проектно-технологічних характеристик приладу до його експлуатаційних параметрів [3].

Такий підхід дозволяє безперервно генерувати біомасу мікроорганізмів, відбирати вуглекислоту із атмосфери та систем, що спалюють метан, а також використовувати низькопотенційну теплову енергію із сонячного випромінювання та вихлопних газів для продукування ліпідів.

Апробовані енергетичні та біологічні показники дали змогу підтвердити необхідність та перспективи збільшення масогабаритних обсягів секції системи ФТБР, що обумовить зниження інертності до добових та сезонних перепадів. Для забезпечення терморегуляції в корпус системи пропонується інтеграція теплообмінника. Для цього буде розроблено ФТБР місткістю 1 тонна, що дозволить утримання в ньому теплової енергії на рівні 4,2 мДж; із корпусом, виготовленим із залізобетону, котрий дозволить утримати додаткову кількість теплоти (близько 3 мДж). Це дасть змогу стабілізувати температурний режим ФТБР, зменшить загальні капіталовкладення та енерговитрати, дозволить масштабувати виробничі потужності, збільшить корисний об'єм установки та дозволить використовувати в якості будівельної конструкції ЕТК (рис. 4.22, а).

Освітлювальна частина ФТБР закривається одинарним склопакетом, вставленим у спеціально виготовлений паз у корпусі із загальною товщиною 46 мм (10 мм – товщина першого скла, повітряний прошарок – 30 мм та 6 мм – зовнішнє скло). Така конструкція дозволить знизити теплопровідність та розширити загальний час проведення культивування мікроорганізмів.

Для підтримки температурного режиму використано змієвиковий трубчастий теплообмінник із нержавіючої сталі січенням 20 мм, із товщиною стінки 2 мм, площа контакту якого становить 0,6 м<sup>2</sup>.

Конструкція секції спроектована таким чином, щоб монтаж міг здійснюватись поступово або нарощувався б для необхідних потужностей та виробничих можливостей електротехнологічного комплексу. Для цього у корпусі кожного із них передбачені отвори для циркуляції суспензії та теплоносія (рис. 4.22, б).

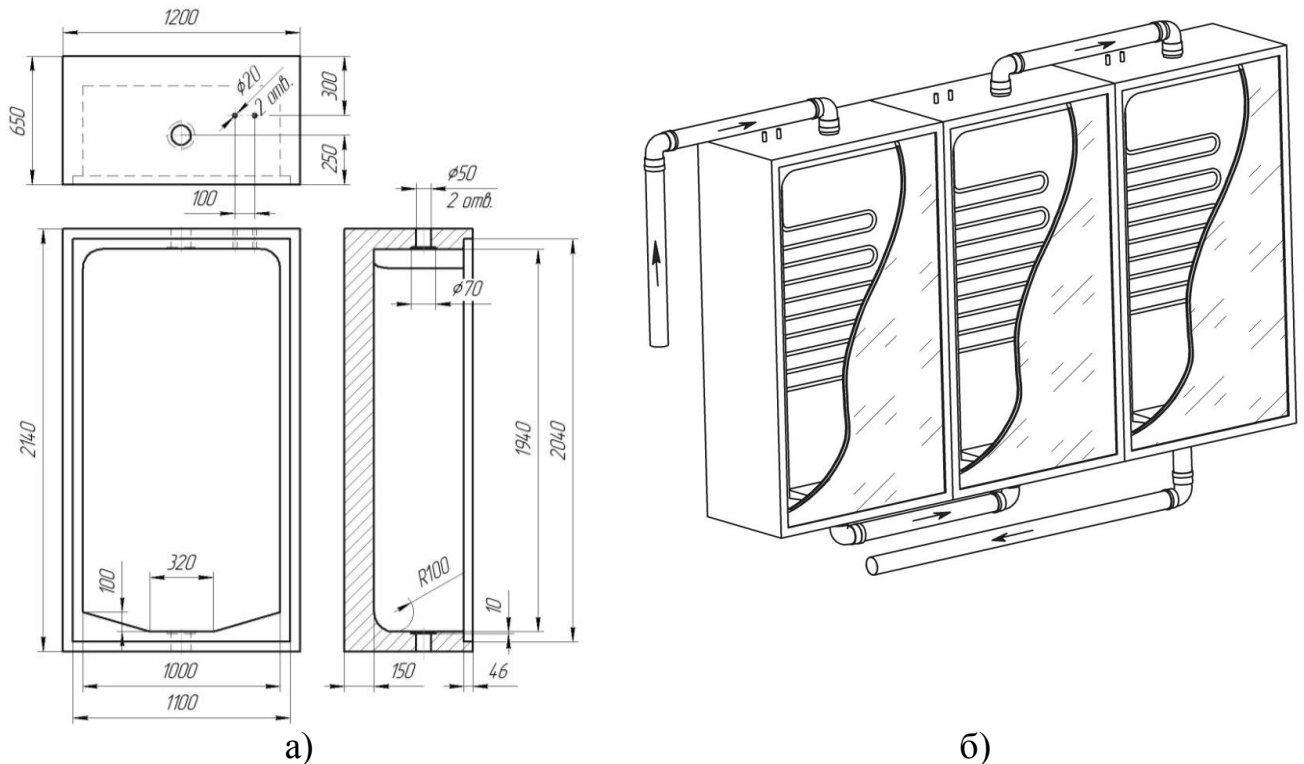


Рис. 4.22 Модель вертикального промислового ФТБР: а) креслення корпусу однієї секції ФТБР об'ємом  $1 \text{ м}^3$ ; б) 3D модель масштабування системи

Старт системи починається із заповнення харчовим середовищем ФТБР (рис. 4.23). Контрольно-вимірювальний модуль здійснює тестування усіх датчиків, електромагнітних клапанів та насосів (теплообміну та перемішування культури). Основним критерієм для запуску системи є мінімально необхідна температура у системі (11) та резервуарі (16) із мікрокультурою (I). Якщо показники є недостатніми, то циркуляційний насос (10) із гарячого теплообмінника (III) нагнітає теплову енергію у ФТБР через вмонтовані в них змішувачі.

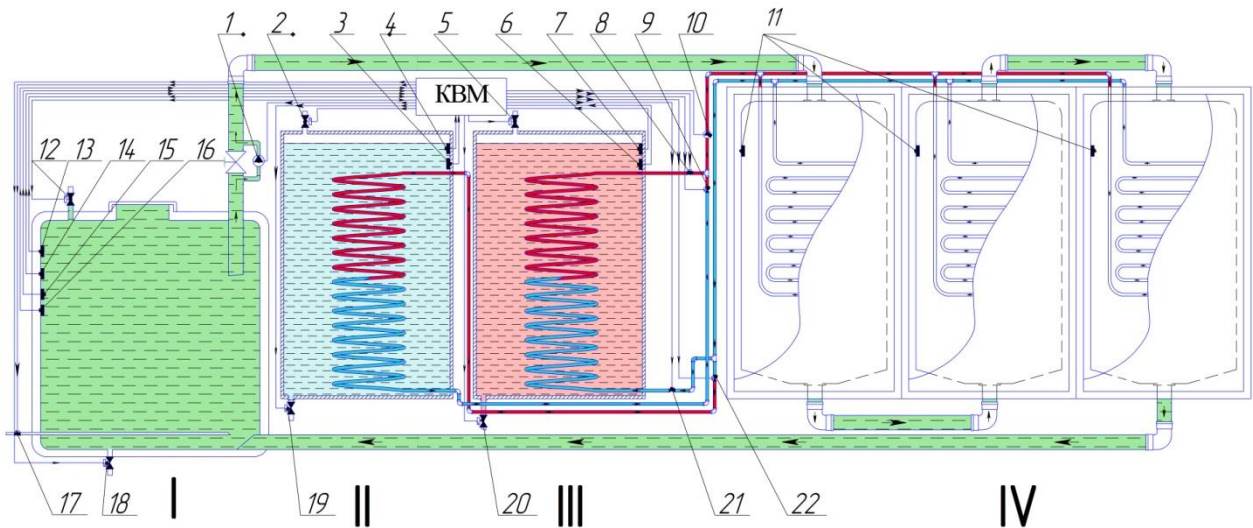


Рис. 4. 23 Структурна схема роботи фотобіореакторів: 1, 10 – циркуляційні насоси; 2, 5 – електромагнітні клапани подачі води; 3, 6, 16, 11 – датчики температури; 4, 7 – датчики рівня; 8, 21 – електромагнітні клапани термоакумулятора із гарячою водою; 9, 22 – електромагнітні клапани термоакумулятора із холодною водою; 12 – електромагнітний клапан для відведення виробленого кисню; 13 – датчик концентрації мікрободоростей; 14 – датчик кисню; 15 – датчик рівня рН; 17 – електромагнітний клапан подачі  $\text{CO}_2$ ; 18 – електромагнітний клапан зливу мікрободоростей; 19, 20 – електромагнітні клапани зливу води із теплообмінника

З метою підтримки температури у необхідному режимі, не перевищуючи максимально допустиму норму, передбачено систему охолодження, котра представлена іншим теплообмінником (II) із холодним носієм. Електромагнітні клапани (8, 21), котрі відповідають за подачу гарячої води, закриваються, у той час система відкриває два інші (9, 22), тим самим змінюючи напрям потоку у холодний теплообмінник. Така система дозволяє використовувати лише один циркуляційний насос для підтримки зазначеного температурного режиму й акумулювати ще частину теплової енергії, отриманої від ФТБР.

За допомогою датчиків (3, 6) у теплообмінниках проводиться контроль за перевищенням температури і, у разі необхідності, відбувається злив води (18, 19) для потреб споживача та наповнення холодною водою (2, 5) термоакумуляторів із мережі до відповідного рівня (4, 7).



Після досягнутої зазначеної мінімальної температури відбувається посів мікрокультури у резервуарі (I) та вмикається циркуляційний насос (1) для перемішування її по всій системі секцій, котрі з'єднані послідовно.

Для зменшення вимірювальних потужностей та затрат на контроль-вимірювальне обладнання, основні датчики знаходяться в розширювальній ємності, де відбуваються основні технологічні процеси підтримки життєдіяльності мікрокультури *Chlorella Vulgaris* Beij. Дана ємність знаходиться у закритому приміщенні й оснащена додатковим шаром термоізоляції. Саме тут відбувається газонасичення вуглекислотою (17) та контроль рівня кислотності (15); вимірювання (14) та відведення утвореного кисню (12); визначається кількість клітин (13) та їх відбір із системи ФТБР (18).

Ще одним суттєвим фактором є можливість використання такої конструкції ФТБР у якості несучих конструкцій будівель ЕТК, котрі володіють високою тепловою інертністю. Це обумовлює не лише зменшити капітальні затрати на конструктивні матеріали, але й розхід теплової енергії протягом експлуатаційного часу. У холодний період року, якщо потужності системи не забезпечують процес культивування мікроорганізмів, із ФТБР відкачується рідина, а корпус секцій слугує у якості повітряної теплоізоляційної подушки.

Для відтворення процесу роботи масштабованої системи регенерації енергії було обрано електрохімічне джерело на базі ТОПЕ із номінальною потужністю 120 кВт та теоретично визначено необхідний об'єм ФТБР для постійної утилізації утвореної вуглекислоти [3].

На основі отримання експериментальних результатів енергетичних витрат та теплових режимів, біологічних показників продуктивності роботи системи, вивчення параметрів розподілу сонячної інсоляції протягом року [1], розроблено модель роботи підсистеми ФТБР (рис. 4.24) із врахуванням коефіцієнтів тепловіддачі ( $1,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ) світлоприймальної частини ФТБР площею  $S = 200 \text{ м}^2$  та елементів конструкції –  $S = 277 \text{ м}^2$  із коефіцієнтом теплопровідності  $k_{EK}=0,05$ . На основі експериментальних результатів розрахований необхідний об'єм для максимальної утилізації вуглекислоти, котрий становить  $180 \text{ м}^3$ .

Імітаційне моделювання системи регенерації проводилось під впливом температури зовнішнього середовища із  $\Delta + 15\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 120 днів із врахуванням середньодобового значення потужність сонячної інсоляції –  $50\text{ Вт/м}^2$ , що дозволило визначити наступні енергетичні витрати та розрахувати кількість згенерованої біомаси та кисню, спожитої вуглекислоти (табл. 4.2).

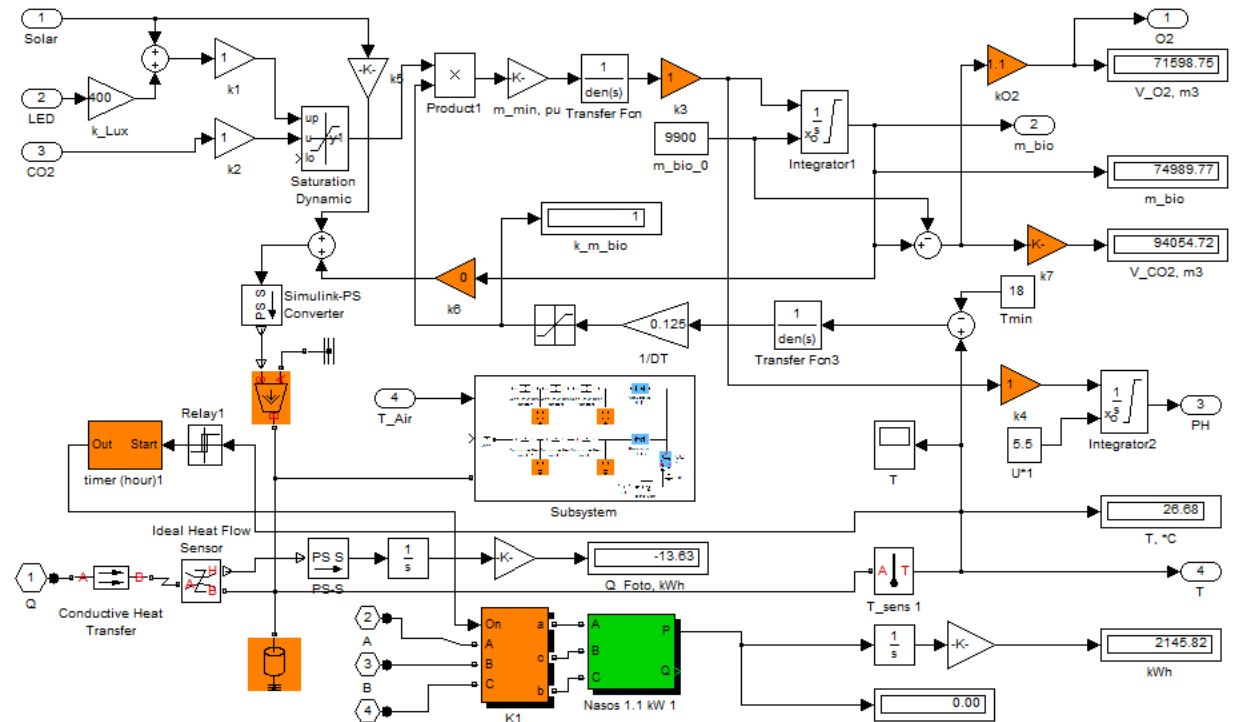


Рис. 4.24 Імітаційна модель ФТБР із системою терморегуляції та перемішування

У наведених результатах враховано енергозатрати відцентрового насоса для циркуляції та перемішування суспензії у ФТБР потужністю 1 кВт із режимом роботи 16 годин перемішування та 8 годин «часу спокою» протягом доби.

З метою запобігання замерзання води та мінімальним споживанням теплової енергії у ФТБР підтримується температурний діапазон  $+ 2\text{--}5\text{ }^\circ\text{C}$ , а запуск системи відбувається після виходу БГУ в номінальний режим роботи або коли температура в середині системи прогріється до мінімально необхідного значення від впливу сонячної радіації. Після того, коли температура середовища досягає  $+ 22\text{ }^\circ\text{C}$ , відбувається внесення культури мікробіодоростей у ФТБР, запуск систем циркулювання та перемішування із вищезазначеним алгоритмом роботи.

**Експериментальні результати роботи ФТБР протягом 120 діб під впливом зовнішньої температури сонячної інсоляції**

Параметри роботи	Зовнішня температура, °С			
	-15	0	+ 15	+ 30
Електричні витрати, кВт · год	1184	1228,8	1277	1316
Теплові витрати, кВт · год	14760	362	-	-
Вихід установки на номінальний режим роботи				
Час (доба)	41	35	6	3,5
Електричні втрати, кВт · год	235,5	347	117	65,83
К-ть згенерованої сухої маси, кг	23872	29642	41661	41562
Спожита кількість CO <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>	26603	34885	52210	55350
Згенерована кількість O <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>	20209	26556	39777	39668

З метою запобігання замерзання води та мінімальним споживанням теплової енергії у ФТБР підтримується температурний діапазон + 2–5 °С, а запуск системи відбувається після виходу БГУ в номінальний режим роботи або коли температура в середині системи прогріється до мінімально необхідного значення від впливу сонячної радіації. Після того, коли температура середовища досягає + 22 °С, відбувається внесення культури мікроводоростей у ФТБР, запуск систем циркуляції та перемішування із вищезазначеним алгоритмом роботи.

Кількість приросту біомаси в заданому температурному режимі, утилізація вуглекислоти, генерація кисню, рівень контролю кислотності рН та режим перемішування задавалися у відповідності до отриманих результатів із експериментальних досліджень (рис. 4.25).

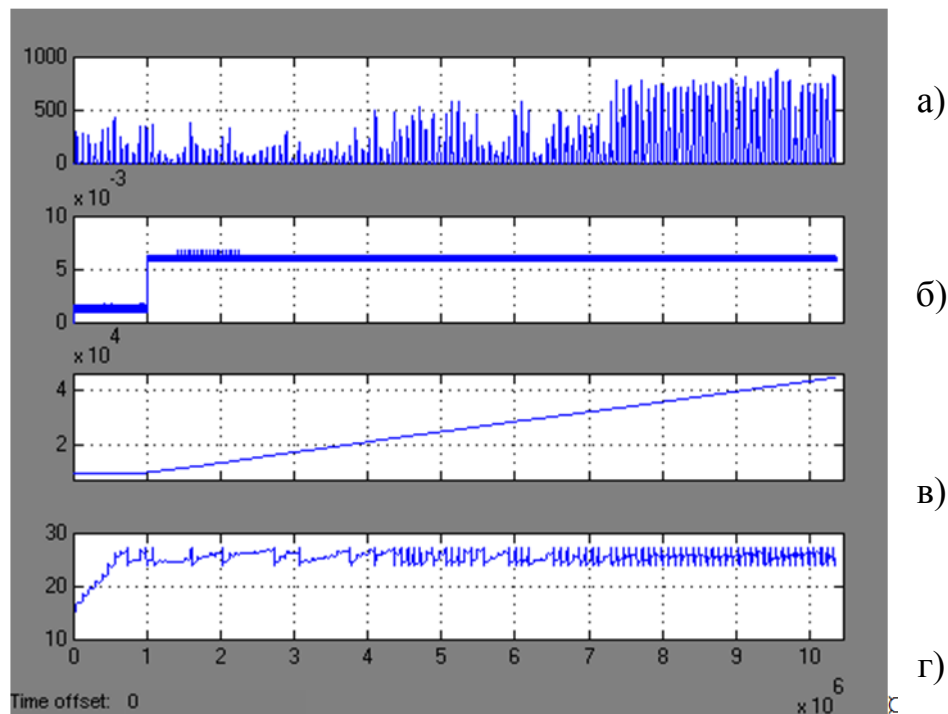


Рис. 4.25 Результати роботи імітаційної моделі підсистеми ФТБР при середньорічній температурі зовнішнього середовища  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ : а) розподіл сонячної радіації ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ); б) поточне надходження  $\text{CO}_2$  з паливних елементів ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); в) приріст біомаси ( $\text{кг}$ ); г) температурний режим у культиваційному середовищі ( $^{\circ}\text{C}$ )

Результати моделювання в різних теплових режимах демонструють, що запуск системи при від'ємній температурі відбувається значно пізніше, проте при зовнішній температурі старт системи регенерації відбувається за 2,5 доби після виходу БГУ в номінальний режим. Відповідно, при додатній температурі зовнішнього середовища система ФТБР фактично не використовує тепловий потік із ТОПЕ, а її старт відбувається значно швидше, на 6 день після запуску всієї системи. Слід зазначити, що спостерігалось збільшення температури у культиваційному середовищі вище допустимої межі –  $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$  за рахунок впливу сонячної радіації, і, відповідно до алгоритму роботи, дозволило додатково закумуляовати теплову енергію в резервуарі охолодження ФТБР. Таким чином, система регенерації не тільки утилізувала вуглекислоту, генерувала кисень та нарощувала високоякісну біосировину, але й дозволила додатково

використовувати отриману теплову енергію для потреб господарства, що дозволило підвищити загальний ККД термоакумуляції на 7,5 %.

#### **4.2 Високоєфективні електрохімічні системи генерації енергії із біогазу на базі твердооксидних паливних елементів**

Одним із найбільш ефективним методом генерації електричної енергії, який вже володіє цілою низкою новітніх технологій є використання твердооксидних (ТОПЕ або SOFC) або протоннообмінних (PEMFC – Proton exchange membrane fuel cells) паливних елементів. Паливний елемент (рис. 4.26) в один технологічний етап перетворює хімічне паливо ( $H_2$ ,  $CH_4$ ) на електричний струм. Використання паливного елемента обумовлене високою ефективністю, оскільки його принцип роботи полягає в окисненні водню або метану за рахунок іонної провідності полімерних або керамічних мембран. У випадку використання ТОПЕ, метан проходить конверсію у водень, який потім фільтрується і подається у стек.

В якості електроліту використовують твердий керамічний матеріал (стабілізований ітрієм оксид цирконію), який проводить атоми кисню від катода до анода при температурі понад + 1000 °С. Особливий інтерес у даних технологіях зумовлений можливістю створення систем потужністю від 1 кВт до 10–25 МВт.

Напруга ТОПЕ залежить від щільності струму, тиску і температури. Високі температури стеку дозволяють використовувати забруднені види палива та споживати метан. Електролітом для них є  $ZrO_2$ , стабілізований 8 % моль оксид ітрію  $Y_2O_3$  товщиною 30–40 нм. Контакти електродів виконані на основі лантану, легованого хромідом, які з'єднують між собою електрохімічні комірки у стеці паливних елементів.

Електроди для твердооксидних паливних елементів будують: аноди на основі металокераміки  $Ni$ ,  $Y_2O_3$  і  $ZrO_2$  товщиною 150 нм, пористістю 20–40 %; катоди складаються з легованого лантану товщиною 2 мм і пористістю 30–40 %.

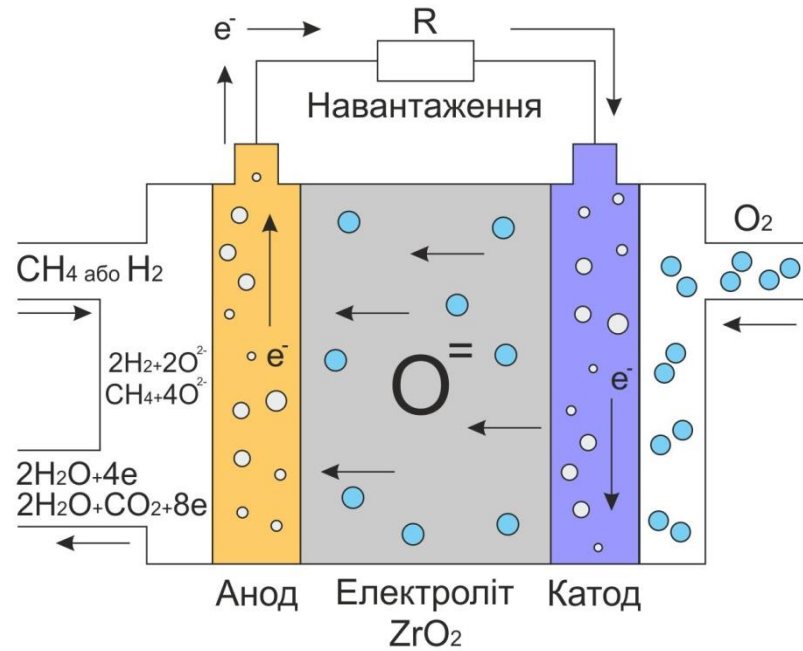


Рис. 4.26 Принцип роботи твердооксидного паливного елемента

Напруга в паливному елементі залежить від потенціалу Нернста поляризації катоду, аноду та внутрішнього опору електроліту.

$$V_{ПЕ} = E^0 - iR_w - \eta_{cathode} - \eta_{anode} \quad (4.19)$$

де:  $E^0$  – потенціал Нернста;  $i$  – щільність струму обміну між електродами;  $R_w$  – еквівалент омичного опору комірки;  $\eta_{cathode}$  – поляризація катода;  $\eta_{anode}$  – поляризація анода.

Рівняння Нернста залежить від типу хімічної реакції. Для водню рівняння має вигляд:

$$E = E^0 + \left(\frac{RT_{ПЕ}}{2F}\right) \ln\left[\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}}\right] + \left(\frac{RT_{ПЕ}}{2F}\right) \ln\left[P_{O_2}^{\frac{1}{2}}\right] \quad (4.20)$$

де:  $F$  – число Фарадея,  $R$  – газова стала,  $P_{H_2}$  – тиск водню,  $P_{O_2}^{\frac{1}{2}}$  – тиск кисню,  $P_{H_2O}$  – тиск води;  $T_{ПЕ}$  – температура ТОПЕ.

Під час використання метану в якості палива, рівняння матимуть вигляд:



$$E = E^0 + \left(\frac{RT_{\text{ПЕ}}}{8F}\right) \ln\left[\frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{H}_2\text{O}}P_{\text{CO}_2}}\right] + \left(\frac{RT_{\text{ПЕ}}}{8F}\right) \ln[P_{\text{O}_2}^2] \quad (4.22)$$

де:  $P_{\text{CH}_4}$  – тиск метану,  $P_{\text{O}_2}^2$  – тиск кисню,  $P_{\text{CO}_2}$  – тиск вуглекислого газу.

Реальний потенціал паливного елемента відрізняється від теоретичного, оскільки існує низка незворотніх втрат, пов'язаних із поляризацією або перенапруженням ( $\eta_{\text{П}}$ ), що включає в себе поляризацію активації ( $\eta_{\text{АКТ}}$ ), омичну поляризацію ( $\eta_{\text{ОМ}}$ ) та поляризацію концентрації ( $\eta_{\text{КОН}}$ ) (рис. 4.27). Тому потенціал паливного елемента можна розглядати як різницю між ідеальним значенням напруги та втратами через поляризацію. З рисунку 4.27 видно, що втрати в ефективності паливної комірки залежать від щільності струму.

Поляризація активації присутня, коли щільність іонів, які долають активаційний бар'єр, є низькою. Поляризація активації безпосередньо пов'язана з темпами електрохімічних реакцій, тому вона є більш вираженою у низькотемпературних паливних елементах.

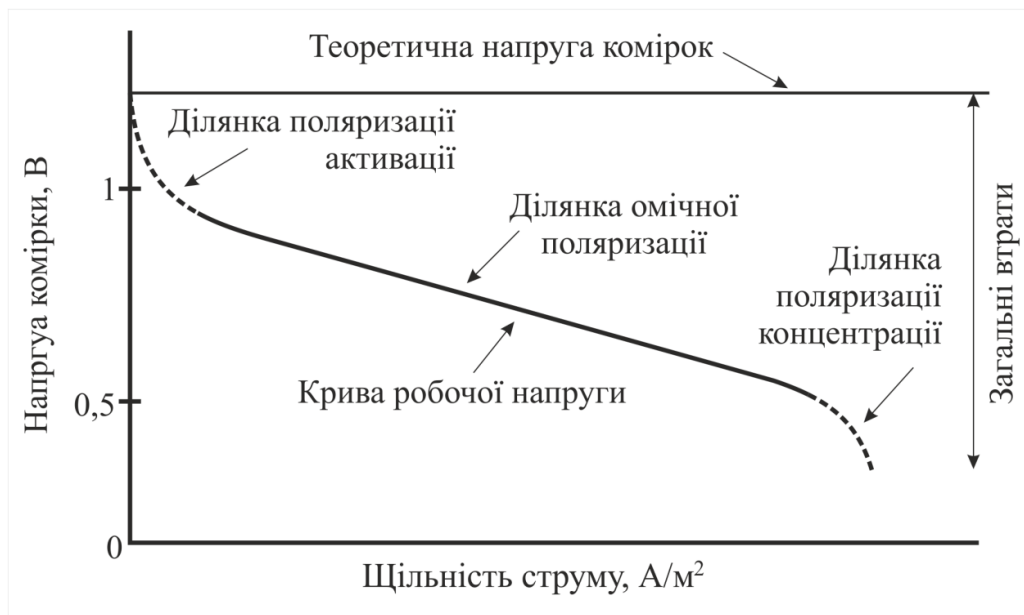


Рис. 4.27 Залежність напруги паливної комірки від щільності струму

Поляризація концентрації проявляється при високій щільності струму через нездатність електроліту підтримувати необхідну концентрацію іонів для переносу заряду, повільну дифузію в порах електрода, повільне виведення продуктів реакції зі стеку [3].

У ТОПЕ часто важливо зосередитися на омічній поляризації та поляризації концентрації, оскільки при високих робочих температурах спостерігається незначна поляризація активації. Однак при наближенні до нижньої межі робочої температури ТОПЕ ( $\sim +600$  °C) її дія значно підсилюється.

Один із методів досліджень для оптимізації та чутливості при моделюванні різних систем ТОПЕ побудований на базі використання рівняння Нав'є-Стокса, за допомогою котрого можна врахувати різні властивості, які впливають на умови роботи (товщина електроліту, температура електролізера, склад газу на вході і виході, кількість анодів та катодів).

$$E_{SOFC} = \frac{E_{max} - i_{max} \cdot \eta_f \cdot r_1}{\frac{r_1}{r_2} (1 - \eta_f) + 1} \quad (4.23)$$

де:  $E_{SOFC}$  – напруга паливної комірки;  $E_{max}$  – максимальна напруга паливної комірки, виходячи із рівняння Нернста;  $\eta_f$  – коефіцієнт утилізації палива;  $r_1$  – іонний опір електроліту;  $r_2$  – омічний опір електроліту;  $i_{max}$  – щільність струму.

На роботу стеку впливає тиск, температура, рівень утилізації палива. Оскільки робочий режим ТОПЕ є високотемпературним, це дає змогу рекуперувати частину теплової енергії для підтримки власного режиму та використовувати значну частку для додаткових потреб. Саме за таким принципом була побудована система BlueGEN, енергетичний баланс котрої вказаний на рисунку 4.28. На схемі наведено тепловий та електричний розподіл енергії, побудований на прикладі твердооксидного паливного стека, котрий вже присутній на ринку із загальним ККД 85 %. Опис робочих потужностей та особливостей наведені в [3].

Важливими є і екологічний аспект використання таких технологій, оскільки теплота згоряння  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$  становить  $31,8 \text{ МДж/м}^3$  (ГОСТ 554287) до  $50,03 \text{ МДж/м}^3$  (еталонний показник). Ступінь систем очистки біогазу дає змогу отримувати калорійність газу із теплотою згорання на рівні  $39,6 \text{ МДж/м}^3$ . Оскільки,  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  рівна  $3,6 \text{ МДж}$ , то з  $1 \text{ м}^3$  можна отримати близько  $11,02 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  теплової енергії.





Рис. 4.28 Енергетичний розподіл твердооксидного паливного стека BlueGEN

Згідно паспортних даних комерційної установки BlueGEN споживана потужність теплової енергії, при спаленні в ній метану, становить 2,51 кВт · год, генеруючи при цьому 1,5 кВт · год корисної електричної енергії. Відповідно з 1 м³ CH<sub>4</sub> можна отримати близько 6,57 кВт · год електричної енергії. Оскільки, при згорянні 1 моль метану утворюється 1 моль CO<sub>2</sub>, вагою 44,01 г, що займає простір об'ємом 22,4 л, тобто 1 м³ кубічний CO<sub>2</sub>. Отже, при роботі 6,57 кВт · год електричної енергії установка продукує 1964,7 г або 297 г/кВт · год.

Порівнюючи дану установку із ДВЗ можна розрахувати аналогічним способом кількість утвореної вуглекислоти при генерації 1 кВт год електроенергії. Середнє значення показника утворення CO<sub>2</sub> буде становити 505 г/кВт · год, що доводить ефективність використання ТОПЕ для зменшення викидів вуглекислоти [3].

Для відтворення та оптимізації алгоритму функціонування ЕТК в часі, при різних поєднаннях значень параметрів системи і впливу зовнішнього середовища, проведено імітаційне моделювання, що дозволило визначити та відтворити повноту моделі об'єкта господарювання, її продуктивність, надійність, послідовно та алгоритмічно визначати особливості їх поведінки

Головним завданням електрохімічного генератора є забезпечення режимів роботи ЕТК. Проаналізувавши ряд комерційно-діючих біогазових установок, як джерела генерації палива (метану), обрано одноступінчасту установку БГУ – 05 з

об'ємом реактора  $903 \text{ м}^3$  із використанням блокової ТЕЦ потужністю  $180 \text{ кВт}$  на базі газорідинного двигуна із добовою генерацією електричної –  $3679 \text{ кВт}\cdot\text{год}$  та теплової –  $3781 \text{ кВт}\cdot\text{год}$  енергії. Добовий вихід біогазу –  $2,23 \text{ нм}^3$  з одного  $1 \text{ м}^3$  сировини із вмістом  $54 \%$  або  $1,18 \text{ нм}^3 \text{ CH}_4$  (рис. 4.29) [3].

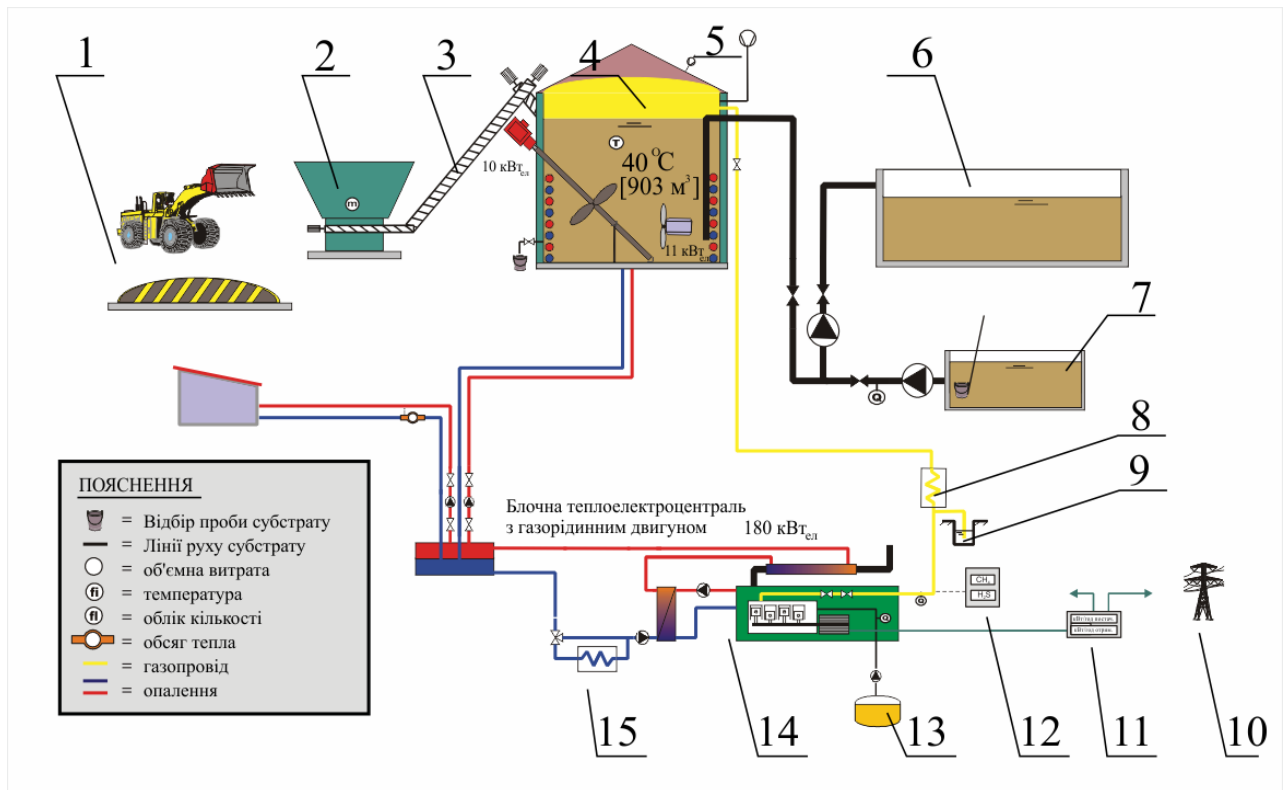


Рис. 4.29 Технологічна схема роботи БГУ – 05: 1 – кукурудзяний силос або силос з качанів і стебел кукурудзи, житній шрот; 2 – дозатор; 3 – шнек подачі; 4 – купол для збереження біогазу ( $290 \text{ м}^3$ ); 5 – отвір подачі повітря; 6 – сховище залишків ферментуючих мас (2 по  $2700 \text{ м}^3$ ); 7 – приймальний бункер для свинячого гною; 8 – охолоджувач газу; 9 – водовідділювач; 10 – електромережа; 11 – електролічильник; 12 – газоаналізатор; 13 – резервуар для рідкого палива; 14 – блочна теплоелектроцентрально з газорідинним двигуном; 15 – резервний охолоджувач

Визначено основні енергетичні витрати для забезпечення оптимальних режимів роботи, визначено мінімально необхідну потужність теплової енергії для забезпечення температурного режиму анаеробного процесу.

Відповідно до алгоритму функціонування БГУ енергетичні затрати (рис. 4.30) для забезпечення необхідних режимів її роботи можна розділити на електричні –  $P_E$  та теплові –  $P_T$ :

$$\sum P = P_E + P_T \quad (4.24)$$

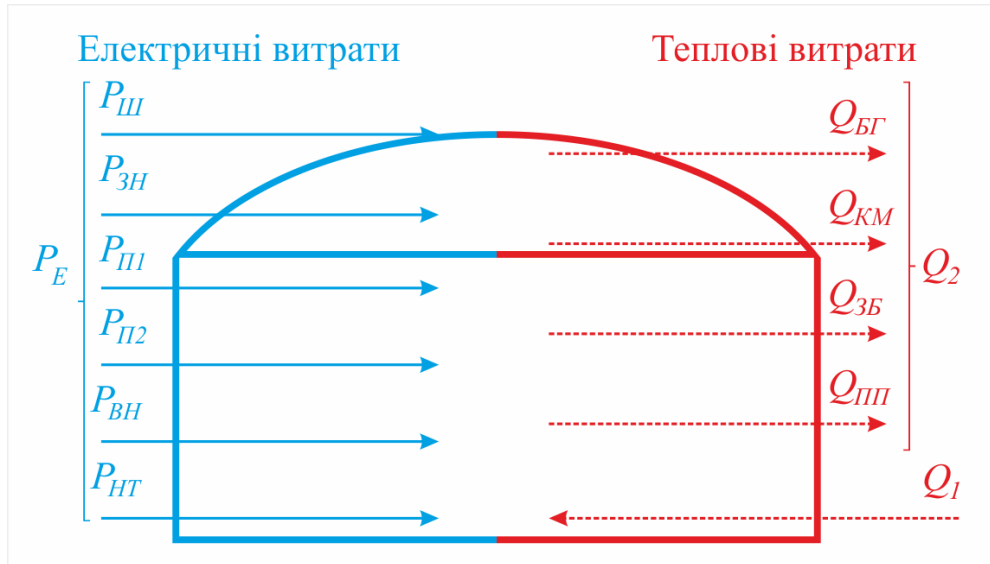


Рис. 4.30 Енергетичний баланс анаеробного реактора

Баланс електричних витрат включає:  $P_{Ш}$  – енергетичні витрати шнека;  $P_{ЗН}$  – завантажувального відцентрового насоса;  $P_{П1}$  та  $P_{П2}$  – перемішувальних пристроїв;  $P_{ВН}$  – вивантажувального відцентрового насоса;  $P_{НТ}$  – відцентровий насос для прокачування теплоносія, і матиме наступний вигляд:

$$P_E = P_{Ш} + P_{ЗН} + P_{П1} + P_{П2} + P_{ВН} + P_{НТ} \quad (4.25)$$

Загальна споживана електроенергія за відповідний період роботи:

$$W_E = \frac{P_{Ш}t_{ш}}{\eta_{Ш}\eta_{ДШ}} + \frac{P_{ЗН}t_{ЗН}}{\eta_{ЗН}\eta_{ДЗН}} + \frac{P_{П1}t_{П1}}{\eta_{П1}\eta_{ДП1}} + \frac{P_{П2}t_{П2}}{\eta_{П2}\eta_{ДП2}} + \frac{P_{ВН}t_{ВН}}{\eta_{ВН}\eta_{ДВН}} + \frac{P_{НТ}t_{НТ}}{\eta_{НТ}\eta_{ДНТ}} \text{ або } W_E = \sum_{i=1}^6 \frac{P_i t_i}{\eta_i \eta_{Дi}} \quad (4.26)$$

де:  $i = 1 \div 6$  – елемент пристрою (відповідно, шнек, відцентровий насос, пристрій перемішування),  $P_i$  – потужність пристрою;  $t_i$  – час роботи пристрою;  $\eta_i$  – ККД технологічного елемента;  $\eta_{Дi}$  – ККД двигуна.

Процес генерації біометану проходить в мезофільному режимі при температурі в реакторі – +39,5 °С. Тепловий баланс біореактора можна представити як загальну споживану теплову енергію:

$$W_T = (Q_1 + Q_2) \cdot t \quad (4.27)$$

де:  $Q_1$  – добова тепла енергія для нагрівання біомаси до температури бродіння, кВт·год;  $Q_2$  – добова тепла енергія для компенсації всіх тепловтрат, кВт·год;  $t$  – час виходу системи до вказаної температури бродіння, діб.

До середньодобових тепловтрат ( $Q_2$ ) включають втрати енергії із зброженою біомасою ( $Q_{ЗБ}$ ), що видаляється; втрати енергії в навколишнє середовище ( $Q_{КМ}$ ) через стінки конструкції; втрати енергії з біогазом ( $Q_{БГ}$ ).

$$Q_2 = Q_{ЗБ} + Q_{КМ} + Q_{БГ} \quad (4.28)$$

Найбільш суттєвими є втрати теплової енергії через стінки метанника ( $Q_{КМ}$ ) в навколишнє середовище, добову величину яких можна виразити:

$$Q_{КМ} = 24 \cdot k \cdot S \cdot (T_{ЗС} - T_B) \quad (4.29)$$

де:  $k$  – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні метанника, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $S$  – площа зовнішньої поверхні, м<sup>2</sup>;  $T_{ЗС}$  – температура зовнішнього середовища, К;  $T_B$  – температура біомаси в метаннику, К.

Метанник розглядуваної нами системи (БГУ–05) виконаний у формі циліндра із площею бічної поверхні ( $S_B$ ) 360 м<sup>2</sup> та площею основи ( $S_{OC}$ ) 150 м<sup>2</sup>. Його корпус виконаний із нержавіючої сталі товщиною 10 мм та теплоізолюваний мінеральною ватою товщиною 100 мм. Верхня частина реактора анаеробного бродіння теплоізолювана прошарком утвореного біогазу, середньою висотою 1200 мм. Відбір газу відбувається поступово, протягом доби, що супроводжується відповідними тепловими втратами ( $Q_{БГ}$ ), які можна виразити наступним чином:

$$Q_{БГ} = V_{ДБГ} \cdot C_{VБГ} \cdot (T_{БГ} - T_{ЗС}) \quad (4.30)$$

де:  $V_{Дбг}$  – добовий об’єм утвореного біогазу, м<sup>3</sup>/добу;  $C_{Vбг}$  – об’ємна теплоємність біогазу, кДж/м<sup>3</sup>·К;  $T_{БГ}$  – температура біогазу на виході з метанника, К;  $T_{ЗС}$  – температура зовнішнього середовища, К.

Оскільки під час завантаження біосировини із температурою  $T_{ЗБ} = 15$  °С та її вивантаження відбувається лише 4 % заміщення біомаси від загального обсягу протягом доби, тому втрати теплової енергії, що виникають при цьому, будуть незначні і визначатимуться за формулою:

$$Q_{ЗБ} = V_{ДБ} \cdot C_{Vб} \cdot (T_{БМ} - T_{ЗБ}) \quad (4.31)$$

де:  $V_{ДБ}$  – обсяг біомаси, що видаляється з метанника протягом доби, м<sup>3</sup>;  $C_{Vб}$  – об’ємна теплоємність біомаси, кДж/м<sup>3</sup>·К;  $T_{БМ}$  – температура біомаси на виході з метанника, К.

Втрати теплоти під час перемішування біомаси становлять не більше 1,5 %, а тому можуть не враховуватися.

Система підігріву метанника виконана у вигляді спірального теплообмінника із нержавіючої сталі, розташованого у нижній частині реактора із площею контакту 98 м<sup>2</sup>.

На основі технічних характеристик обладнання та алгоритму його функціонування було розроблено імітаційну модель комплексу БГУ програмними засобами Matlab/Simulink (рис. 4.31, а) для визначення середньодобового споживання електроенергії під час генерації біогазу в номінальному режимі. Відповідно до теплового балансу було побудовано модель підсистеми реактора із врахуванням втрат у зовнішнє середовище в залежності від його температури, термоізоляції корпусу, температури сировини (рис. 4.31, б) [3].

В якості заміни існуючого джерела генерації енергії (180 кВт газорідного ДВЗ із добовою генерацією електроенергії 3679 кВт·год, а отримана тепла енергія (3781 кВт·год/добу) пропонується високотемпературний ТОПЕ, у процесі роботи якого утвориться значна кількість теплової енергії, що частково використовуватиметься для власного розігріву та підтримки раціонального режиму роботи, а частина, за рахунок системи рекуперації, дозволить використати її для потреб біологічних складових комплексу.

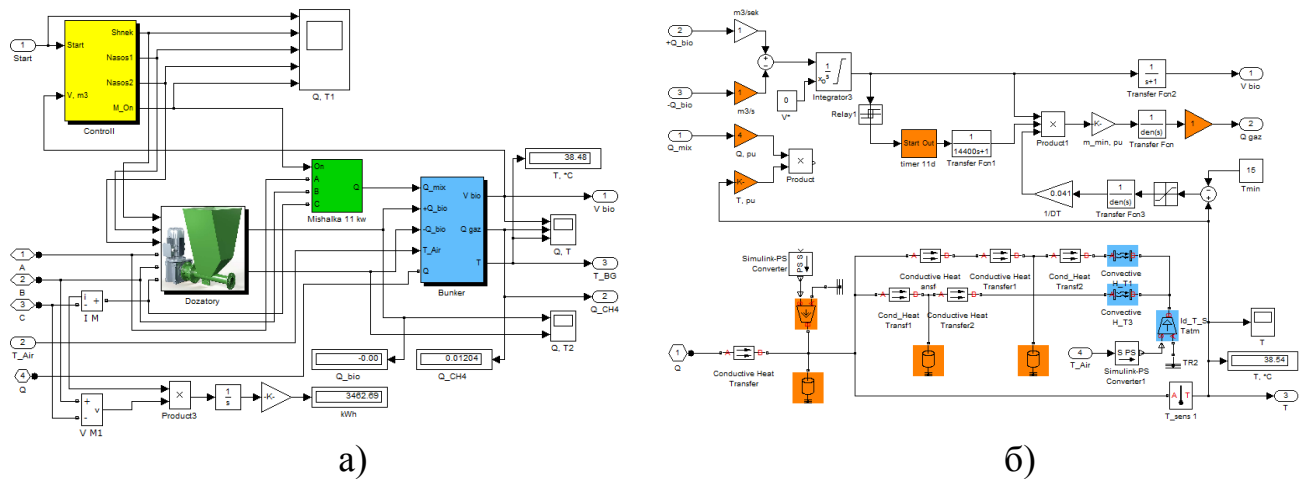


Рис. 4.31 Імітаційна модель комплексу БГУ – 05: а) підсистема керування дозувальними пристроями сировини; б) підсистема теплової моделі із розрахунком теплових втрат в реакторі

Проведений аналіз літературних джерел та комерційних пропозицій таких установок дозволив модернізувати модель ТОПЕ (на основі імітаційної моделі із бібліотеки Matlab/Simulink) за рахунок використання теплообмінника. ТОПЕ генерує постійний струм із щільністю –  $460 \text{ A/m}^2$  та напругою на одну комірку  $1\text{В}$  у стеці який складається із 935 комірок (рис. 4.32).

Відповідно, було встановлено, що система потужністю  $120 \text{ кВт}$  (два стеки по  $60 \text{ кВт}$ ) дозволяє генерувати в середньому за добу близько  $2866 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  електричної та  $1121 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  теплової енергії, споживаючи при цьому  $446,6 \text{ м}^3$  біометану із врахуванням температури зовнішнього середовища  $+15 \text{ °C}$ . Це дозволяє використати її в якості основного джерела генерування енергії, оскільки вона володіє в  $1,7$  разів вищим показником від ДВЗ [5].

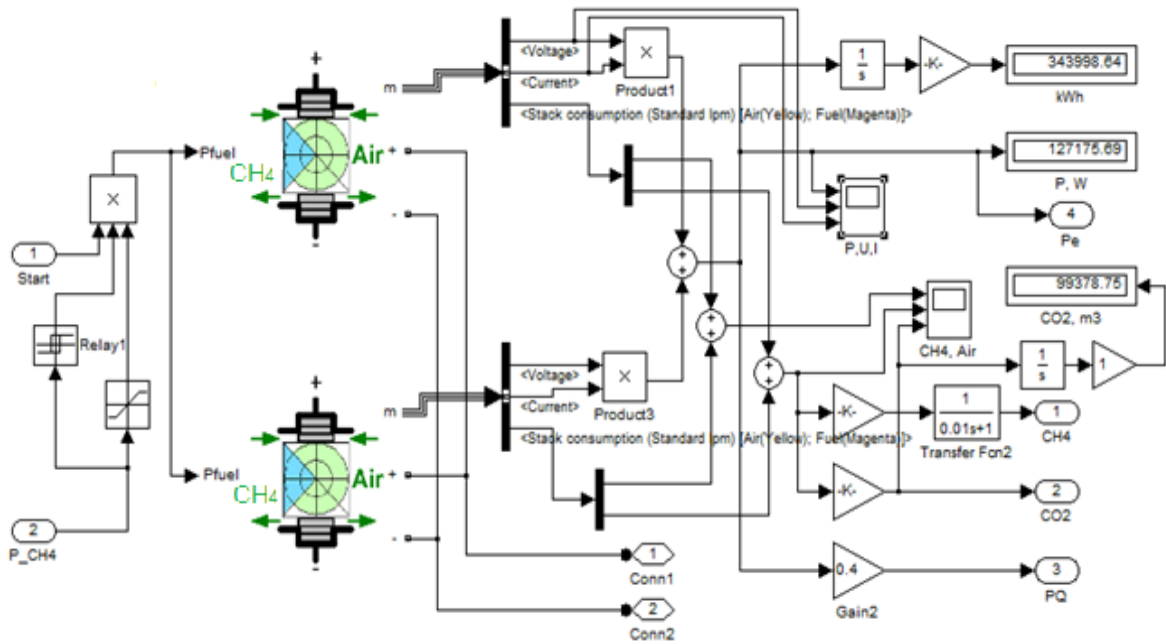


Рис. 4.32 Модель електрохімічного генератора на базі ТОПЕ потужністю 120 кВт із системою рекуперації теплової енергії

Тестування моделі генератора із врахуванням зміни температури зовнішнього середовища дозволило встановити раціональну потужність ТОПЕ для забезпечення виходу БГУ на номінальний режим при низьких температурах зовнішнього середовища протягом 120 діб. Встановлено, що кількість утвореного  $\text{CO}_2$  є еквівалентною до кількості спожитого палива (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

### Експериментальні результати роботи ТОПЕ протягом 120 діб під впливом зовнішньої температури

Параметри роботи	Зовнішня температура, °C			
	-15	0	+15	+30
Споживання біометану, $\text{m}^3$	53400	54455	55210	55545
Вироблена загальна електрична енергія, кВт · год	33376	339594	343999	344834
Вироблена загальна теплова енергія, кВт · год	133350	135838	137599	139340
Викиди $\text{CO}_2$ , $\text{m}^3$	53400	54455	55210	55350

З початку запуску системи використовується лише один стек ТОПЕ для забезпечення основних енергетичних затрат, спрямованих на керування дозувальними пристроями сировини. З моменту утворення біогазу запускається другий стек та система очистки, котра використовує більшість електричного ресурсу другого елемента (рис. 4.33), що в свою чергу збільшує кількість теплової енергії, котра розподіляється між підсистемами ЕТК.

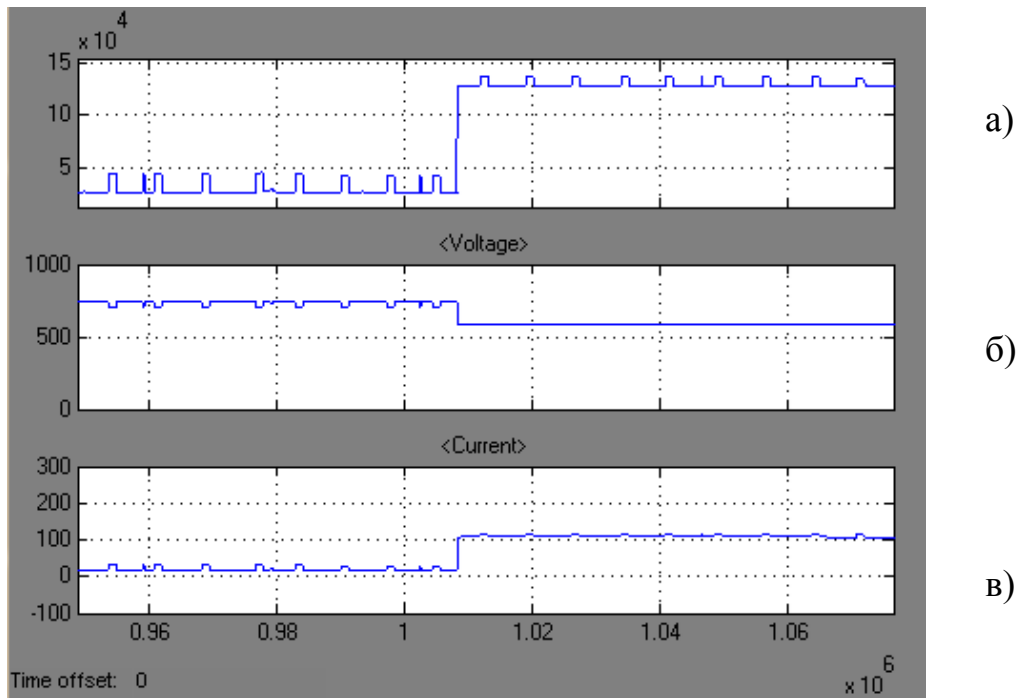


Рис. 4.33 Енергетичні параметри ТОПЕ протягом 120 діб: а – потужність; б – напруга; в – сила струму

Визначено, що основні витрати теплової енергії спрямовані на вихід БГУ в номінальний режим роботи та в подальшому використовуватимуться лише для підтримки теплового режиму, що дозволить використовувати її надлишок між системою регенерації на базі ФТБР, споживачем та термоакумулятором.

Система розподілу теплових потоків працює наступним чином (рис. 4.34): згенерована тепла енергія із ТОПЕ (1) використовується для забезпечення температурних режимів біологічних процесів БГУ (6) та ФТБР (12). Першочерговим завданням системи є нагнітання та підтримка теплового режиму в метаннику, оскільки дана підсистема є основним джерелом палива для електрохімічного генератора. Відповідно, система керування вмикає



циркуляційний насос (1) та відкриває ЕМК (5 та 11), прокачуючи теплоносії у БГУ.

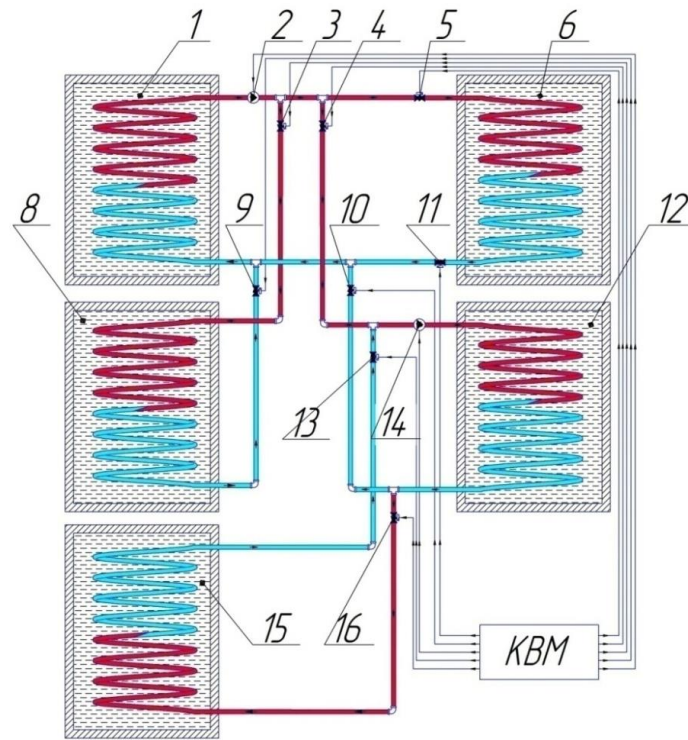


Рис. 4.34 Структурна схема розподілу теплової енергії комплексу:

- 1 – теплообмінник паливної комірки; 2, 14 – циркуляційні насоси;  
 3, 4, 5, 9, 10, 11, 13, 16 – електромагнітні клапани (ЕМК); 8 – термоакумулятор  
 комплексу; 12 – теплообмінник ФТБР;  
 15 – термоакумулятор для охолодження ФТБР

Оскільки в метаннику відбувається тривале перемішування субстрату, то теплообмінник розташований у нижній частині корпусу реактора та виготовлений у формі спіралі, що забезпечує підігрів культури в вертикальній проекції. Зважаючи на агресивне середовище та необхідність ефективної передачі тепла, теплообмінник доцільно виготовляти з нержавіючої сталі.

У випадку, коли температура у метаннику досягла зазначеного показника, в залежності від потреби, тепла енергія розподіляється між ФТБР (6) та термоакумулятором ЕТК (8). Якщо температура зовнішнього середовища та надходження енергії від сонячної інсоляції будуть перегрівати ФТБР, здійснюватиметься охолодження культивацийного середовища, змінюючи коло

циркуляції теплоносія, перекривши клапани циркуляції (4, 10) та відкривши ЕМК охолодження (13, 16). Таким чином, використовуючи один циркуляційний насос (14), можна добитися роботи терморегуляції ФТБР (нагрівання та охолодження (15) без імплементції додаткових електромеханічних елементів. Даний підхід (при температурі зовнішнього середовища 22–26 °С) дозволить додаткового акумулювати отриману теплову енергію в термоакумуляторі охолодження для забезпечення потреб об'єкту.

Якщо біологічні системи, перебуваючи в оптимальному робочому діапазоні ФТБР та БГУ, не потребують додаткового підігріву чи охолодження, система електромагнітних клапанів (4, 5, 10, 11, 13, 16) перекриває потоки теплоносія та вимикає циркуляційний насос (14), спрямовуючи надлишкову теплову енергію, отриману від ТОПЕ в тепловий акумулятор комплексу (8), відкривши ЕМК (3, 9). Термоакумулятор комплексу (8) представлений у вигляді теплоізовованого мінеральною ватою (товщина 200 мм) резервуару об'ємом 1800 м<sup>3</sup>, котрий розташований у землі із сталюю температурою 10 °С зовні та початковою температурою води 15 °С.

На основі алгоритму керування тепловими потоками розроблено модель підсистеми розподілу теплових потоків ЕТК на базі рекуперації вихлопів ТОПЕ (рис. 4.35).

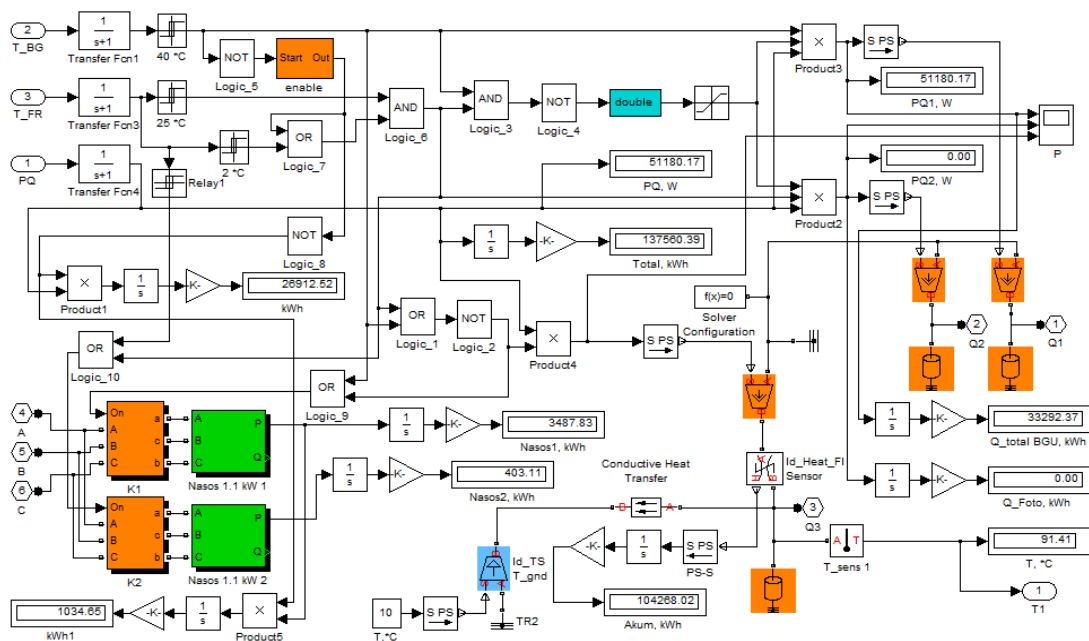


Рис. 4.35 Модель системи розподілу теплових потоків ЕТК

Проведене тестування системи рекуперації теплової енергії при середньорічній температурі зовнішнього середовища  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  дозволило проаналізувати споживання теплового ресурсу анаеробним реактором (рис. 4.36, а), ФТБР (рис. 4.36, б) надходження теплової енергії у термоакумулятор комплексу (рис. 4.36 в), зміну температури у ФТБР (рис. 4.36, г).

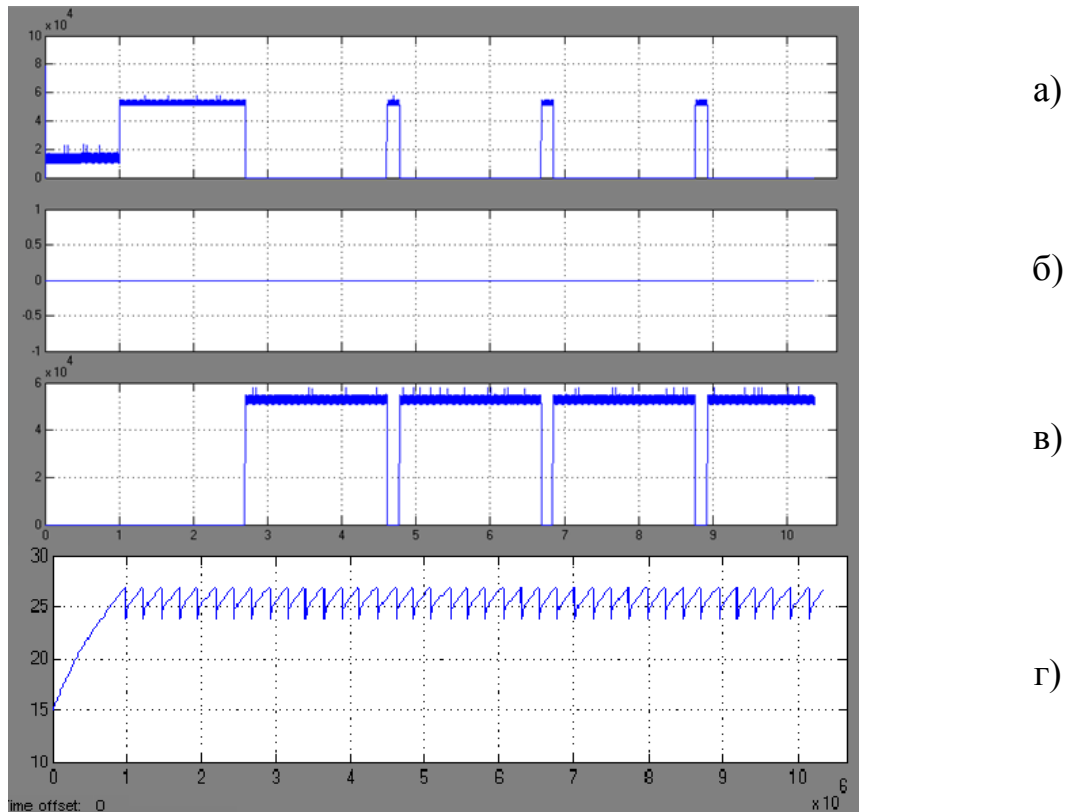


Рис. 4.36 Розподіл споживання теплової енергії підсистемами ЕТК протягом 120 діб ( $T_3 = +15\text{ }^{\circ}\text{C}$ : а) реактор анаеробної ферментації; б) надходження теплової енергії у ФТБР; в) надходження теплової енергії у термоакумулятор; г) зміна температури у ФТБР під впливом сонячної радіації

Отримані графічні результати моделювання підтвердили значні споживання БГУ до моменту його повного заповнення. Під дією сонячної радіації температура у ФТБР поступово прогрівалась без використання рекуперованої теплової енергії ТОПЕ, що, у свою чергу, дозволило скоріше розпочати процес регенерації енергії викидів.

Оскільки під дією сонячної інсоляції прогрівання середовища у ФТБР наближалось до критичної температури, алгоритм системи вмикав систему охолодження, що дало змогу закумуляовати додатково 14023 кВт · год теплової енергії для потреб комплексу (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

**Експериментальні результати роботи системи когенерації ТОПЕ протягом 120 діб під впливом зовнішньої температури**

Термоакумулятор ЕТК	Зовнішня температура, °С			
	-15	0	15	30
Закумуляована теплота, кВт · год	104697	168224	185740	198025,2
Початкова температура, T1 (°С)	15	15	15	15
Кінцева температура, T2 (°С)	58	83	90,8	95,7
Об'єм термоакумулятора, м <sup>3</sup>	1800	1800	1800	1800
<b>Термоакумулятор охолодження ФТБР</b>				
Закумуляована теплота, кВт · год	-	-	14023	32371

Результати імітаційного моделювання системи теплового розподілу дозволили визначити час виходу роботи на номінальний режим біологічних систем у залежності від впливу зовнішньої температури, що дає підставу стверджувати про те, що зрекуперована кількість теплової енергії від роботи ТОПЕ є достатньою та дозволяє забезпечувати споживача значною частиною теплової енергії за рахунок системи термоакумуляції при від'ємній температурі.

#### **4.3 Електротехнологічний комплекс генерації енергії та нової біомаси із замкнутим вуглецевим циклом**

Можливість використання водню в якості енергоносія дозволяє відбирати та зберігати протягом річного циклу надлишкову енергію поновлювальних джерел. Дослідження імітаційної моделі джерела автономного енергопостачання на основі паливних елементів та поновлювальних джерел живлення для житла 1-го типу

продемонструвало можливість створення абсолютно автонномних комплексів (рис. 4.37) [2].

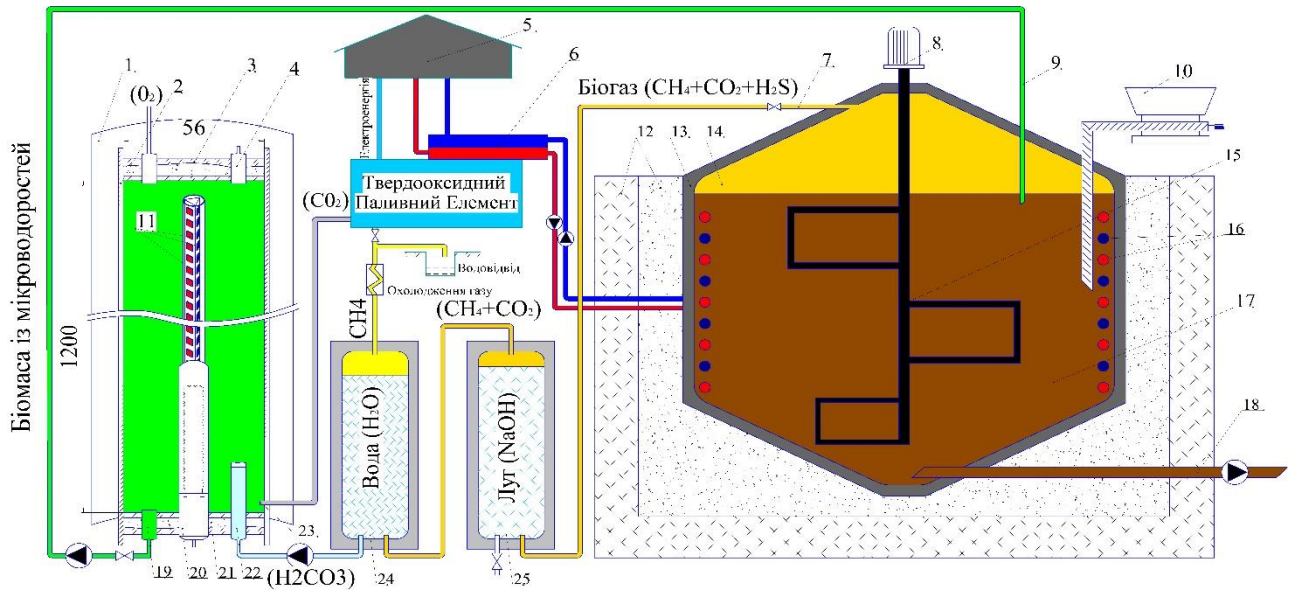


Рис. 4.37 Технологічна система використання фотоанаеробного біореактора на базі твердооксидного паливного елемента: 1 – параболічний рефlector, 2 – полікарбонатна труба товщиною 4,5 мм, 3, 21 – полікарбонатні кришки, 4 – отвір для введення харчового середовища, 5 – об'єкт господарювання, 6 – теплообмінник, 7 – відведення біогазу із ферментатора, 8 – електродвигун, 9 – злив біомаси мікродоростей із фотореактора, 10 – завантажувальний шнек біомаси, 11 – світлодіодні стрічки, 12 – теплоізоляція (бетонні блоки та пісок), 13 – корпус метанника, 14 – сховище біогазу, 15 – перемішувач, 16 – трубки теплообміну, 17 – органічна біомаса, 18 – вивантажувальний отвір органічних залишків, 19 – отвір зливу біомаси, 20 – підігрівач із регулятором температури, 22 – отвір для подачі води із діоксидом вуглецю, 23 – отвір для подачі CO<sub>2</sub>, 24 – резервуар для очищення вуглекислоти, 25 – резервуар для очищення від сірководню

Дослідивши модель системи із надходженням та споживанням енергії, отриманої від сонячного випромінювання та вітрового потоку з умовою її акумуляції протягом річного циклу в акумуляторних батареях і у вигляді водню, виявили необхідність створення достатньо об'ємних, багаторівневих

електрохімічних акумуляторів електричної енергії. Для забезпечення автономного постачання житла 1-го виду використовувалось сховище для водню 300 м<sup>3</sup> та акумуляторна батарея ємністю 400 А/год [15].

Варіантом розв'язання зазначеної проблеми може бути поновлювальне джерело енергії з менш стохастичним характером розподілу її надходження. Використання енергії біомаси в системах автономного енергопостачання дає можливість зменшити потужності вітрогенератора, фотопанелей та обсягів сховища енергоносія, що відповідно знизить навантаження на акумуляторну батарею.

Проведений аналіз систем анаеробної ферментації, ФТБР та ТОПЕ дозволив побудувати схему ЕТК для розробки математичних та імітаційних моделей. На рисунку 4.38 представлено структурно-технологічну схему розподілу енергетичних балансів вищезгаданого об'єкта із його підсистемами.

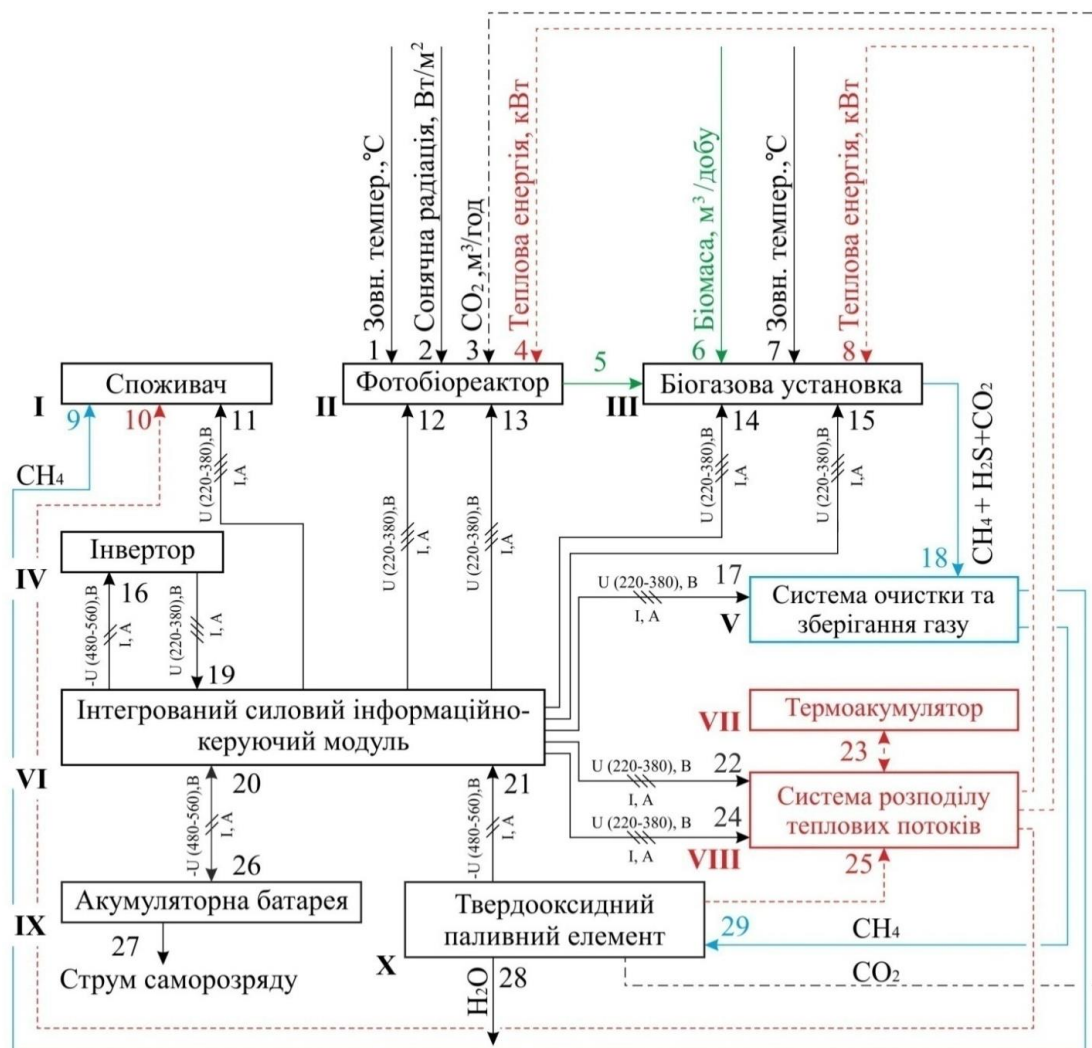


Рис. 4.38 Узагальнена структурно-технологічна схема комплексу на базі твердооксидних паливних елементів, БГУ та ФТБР: I – споживач; II – фотобіореактор (утилізатор  $\text{CO}_2$  та джерело сировини БГУ); III – біогазова установка (перетворює біомасу в біогаз); IV – інвертор (перетворює постійний струм у змінний); V – система очистки та збереження газу (система відбору домішок  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ); VI – інтегрований силовий інформаційно-керуючий модуль (використовується для розподілу передачі електроенергії між компонентами системи); VII – термоакумулятор (використовується для накопичення та передачі теплової енергії в разі необхідності); VIII – система розподілу теплових потоків (направляє теплоносій до підсистем БГУ, ФТБР, споживача, термоакумулятора); IX – акумуляторна батарея (згладження перепадів напруги); X – паливний елемент (перетворює хімічне паливо в електричну енергію);

Назви каналів «входів», а також «виходів» представлені нижче:

- 1, 7 – зовнішня температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- 2 – густина потоку сонячної радіації,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
- 3 – хімічна енергія (вуглекислота),  $\text{м}^3/\text{год}$ ;
- 4, 8, 10 – рекуперована теплова енергія із ТОПЕ,  $\text{кВт}\cdot\text{год}$ ;
- 5 – нова біомаса на базі мікроводоростей,  $\text{м}^3$ ;
- 9, 18, 29 – інтенсивність подачі газу,  $\text{м}^3$ ;
- 11 – подача змінного струму споживачу, U (220-380) В;
- 12 – подача змінного струму для відцентрового насосу перемішування біомаси ФТБР, U (220-380) В;
- 13 – подача змінного струму для додаткового освітлення ФТБР, U (220-380) В;
- 14 – подача змінного струму для відцентрового насоса перемішування біомаси БГУ, U (220-380) В;
- 15 – подача змінного струму для двигуна системи перемішування біомаси БГУ, U (220-380) В;
- 16 – подача постійного струму на інвертор із ТОПЕ U (480-560) В;
- 17 – подача змінного струму для системи очистки біогазу, U (220-380) В;

19 – подача змінного струму із інвертора на керуючий модуль для забезпечення силових компонентів енергетичного комплексу, U (220-380) В;

20 – подача постійного струму із акумуляторної батареї для забезпечення резервного живлення електротехнічних складових комплексу потреб, U (220-380) В;

21 – подача постійного струму із ТОПЕ на керуючий модуль, U (480-560)В;

22, 23, 24, 25 – подача змінного струму для відцентрового насоса прокачування теплоносія між підсистемами комплексу, U (220-380) В;

26 – подача постійного струму для заряду акумуляторної батареї, U (480-560) В;

27 – струм саморозряду акумуляторної батареї;

28 – вода, утворена у процесі генерації енергії електрохімічним генератором.

Така система дозволяє за рахунок біомаси, утвореної із органічних речовин та побутових відходів, генерувати біогаз, котрий після очищення попадає в систему збереження та подачі палива до електрохімічного генератора – твердооксидної паливної комірки. Отримана електрична енергія потрапляє на інтегрований силовий інформаційно-керуючий модуль, в той час, коли значна кількість теплової енергії, утвореної під час її генерації, рекуперується та розподіляється системою між біологічними складовими комплексу.

Частина згенерованої електроенергії використовується для підтримки необхідних технологічних процесів (завантаження, перемішування, очистки біогазу тощо) та потреб споживача. На основі структурно-технологічної схеми нами розроблено математичну модель, яка подана у вигляді сукупності кусково-лінійних систем.

Модулі системи представлені так:  $N$  – номер елемента;  $K$  – номер входу або виходу елемента;  $X_E$  – системний вхід;  $Y_N^K$  – системний вихід елемента;  $F_N$  – передаточна функція;  $C_N$  – конструктивні параметри;  $Z_N$  – стан елемента.

Складові елементи системи *електроживлення* можна представити у формі кортежів із відповідними входами та виходами кожного елемента:

$\langle 11, I \rangle$  системний «вхід» (11) елемента I;

$\langle 1,2,3,4,12,13, II, 5 \rangle$  системний «вхід» (1, 2, 3,4, 12, 13) та «вихід» (5) елемента II;

$\langle 5, 6, 7, 8, 14, 15 III, 18 \rangle$  системний «вхід» (5, 6, 7, 8, 14, 15) та «вихід» (18) елемента III;



< 16, IV, 19 > системний «вхід» (16) та «вихід» (19) елемента IV;  
 < 17,18, V, 9, 29 > системний «вхід» (17, 18) та «вихід» (9, 29) елемента V;  
 < 19, 20, 21 VI, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 24, 26 > системний «вхід» (19, 20, 21) та «вихід» (12, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 24, 26) елемента VI;  
 < 23, VII, 23 > системний «вхід» (23) та «вихід» (23) елемента VII;  
 < 22, 23, 24, 25 VIII, 4, 8, 10, 23 > системний «вхід» (22, 23, 24, 25) та «вихід» (4,8,10,23) елемента VIII;  
 < 26, IX, 20, 27 > системний «вхід» (26) та «вихід» (20, 27) елемента IX;  
 < 29, X, 3, 21, 25, 28 > системний «вхід» (29) та «вихід» (3, 21, 25, 28) елемента X;  
 Залежності системних виходів компонента описуються відносно його системного входу передаточної функції і конструктивних параметрів:

$$Y_I = F_I(X_I C_I) \quad (4.32)$$

В елементі IV (рис. 4.38) відбувається перетворення електричної енергії та її стабілізація. Конструктивні параметри даного модуля не змінюються відносно часу, тому їх вплив на джерело живлення можна представити через коефіцієнти корисної дії,  $k_{IV}$ . Потужність, яку забезпечує інвертор (IV), розглядається як передаточна функція  $F_{IV}(4)$  з врахуванням коефіцієнта корисної дії інвертора  $k_{IV}$  з системним входом інформаційно-керуючого модуля (VI)

$$Y_I = F_{IV}(X_{IV} C_{IV}) k_{IV} \quad (4.33)$$

$Z_{(G)}$  – стан біометану в системі;  $Z_{(IX)}$  – стан заряду акумуляторної батареї;  $Y_{II}^1$  – вхідний параметр рівня освітленості ФТБР;  $Z_{(T1)} \leq Z_{(T\partial)} \leq Z_{(T2)}$  – часовий період спокою культивування мікроорганізмів;  $Z_{(t^oC,II)}$  – тепловий стан ФТБР;  $Z_{(t^oC,III)}$  – тепловий стан БГУ;  $Y_{VI}^7$  – перемішування мікроводоростей.

Передаточна функція шини живлення є енергетичним балансом системи, яка працює в зазначених режимах:

– якщо рівень газу в сховищі (V) не є нижчим мінімального значення  $Z_{(G)} \geq Z_{(Gmin)}$ , рівень заряду акумуляторної батареї близький до максимального  $Z_{(IX)} \leq Z_{(IXmax)}$ , рівень надходження сонячної радіації є мінімально допустимим для фотобіореактора  $Y_{II}^2 \geq Y_{IImin}^2$  та знаходиться в часі культивування  $Z_{(T1)} \leq Z_{(T\partial)} \leq Z_{(T2)}$ , а теплові баланси біосистем анаеробного бродіння  $Z_{(t^oC,III)min} \leq Z_{(t^oC,III)} \leq Z_{(t^oC,III)max}$  та ФТБР  $Z_{(t^oC,II)min} \leq Z_{(t^oC,II)} \leq Z_{(t^oC,II)max}$  в межах

потрібної норми, то енергетичний баланс споживання електричної енергії комплексу рівний сумі:

$$Y_{VI}^{12} + Y_{VI}^{14} + Y_{VI}^{15} + Y_{VI}^{17} + Y_{VI}^{22} = Y_X^{21} \quad (4.34)$$

– якщо  $Z_{(G)} \geq Z_{(Gmin)}$ , рівень заряду акумуляторної батареї наближений до мінімально допустимого значення  $Z_{(IX)} \leq Z_{(IXmin)}$ , рівень надходження сонячної енергії є нижчим допустимого  $Y_{II}^2 \leq Y_{IImin}^2$  в період культивування  $Z_{(T1)} \leq Z_{(T\delta)} \leq Z_{(T2)}$ , теплові баланси біосистем  $Z_{(t^oC,III)min} \leq Z_{(t^oC,III)} \leq Z_{(t^oC,III)max}$  та  $Z_{(t^oC,II)min} \leq Z_{(t^oC,II)} \leq Z_{(t^oC,II)max}$  в нормі, то енергетичний баланс споживання електричної енергії системи матиме наступний вигляд:

$$Y_{VI}^{12} + Y_{VI}^{13} + Y_{VI}^{14} + Y_{VI}^{15} + Y_{VI}^{17} + Y_{VI}^{22} + Y_{VI}^{26} = Y_X^{21} \quad (4.35)$$

– якщо  $Z_{(G)} \geq Z_{(Gmin)}$  та  $Z_{(IX)} \leq Z_{(IXmin)}$ ,  $Y_{II}^2 \leq Y_{IImin}^2$ , «час спокою» ФТБР  $Z_{(T1)} \geq Z_{(T\delta)} \geq Z_{(T2)}$  та теплові баланси біосистем  $Z_{(t^oC,III)min} \leq Z_{(t^oC,III)} \leq Z_{(t^oC,III)max}$  та  $Z_{(t^oC,II)min} \leq Z_{(t^oC,II)} \leq Z_{(t^oC,II)max}$  у вказаному діапазоні, то баланс матиме наступний вигляд:

$$Y_{VI}^{14} + Y_{VI}^{15} + Y_{VI}^{17} + Y_{VI}^{22} + Y_{VI}^{26} = Y_X^{21} \quad (4.36)$$

– якщо  $Z_{(G)} \geq Z_{(Gmin)}$  та  $Z_{(IX)} \leq Z_{(IXmax)}$  та  $Y_{II}^2 \leq Y_{IImin}^2$  та  $Z_{(T1)} \leq Z_{(T)} \leq Z_{(T2)}$ , а теплові баланси систем БГУ  $Z_{(t^oC,III)} \leq Z_{(t^oC,III)min}$  та ФТБР  $Z_{(t^oC,II)} \leq Z_{(t^oC,II)min}$  нижче мінімального, то енергетичний баланс споживання електричної енергії системи рівний сумі:

$$Y_{VI}^{13} + Y_{VI}^{12} + Y_{VI}^{14} + Y_{VI}^{15} + Y_{VI}^{17} + Y_{VI}^{22} + Y_{VI}^{24} = Y_X^{21} \quad (4.37)$$

Енергетичний баланс споживання теплової енергії комплексу рівний сумі споживання ФТБР та БГУ, а у випадку її надлишку вона спрямовується на потреби споживача або в систему термоакумулятора комплексу:

$$T_I^{10} + T_{II}^4 + T_{III}^8 + T_{VII}^{23} = T_{VIII} \quad (4.38)$$

– якщо  $Z_{(G)} \geq Z_{(Gmin)}$  та  $Z_{(IX)} \leq Z_{(IXmax)}$  та  $Y_{II}^2 \geq Y_{IImin}^2$  та  $Z_{(T1)} \geq Z_{(T)} \geq Z_{(T2)}$ , а тепловий баланс систем БГУ  $Z_{(t^oC,III)} \leq Z_{(t^oC,III)min}$  та ФТБР  $Z_{(t^oC,II)} \leq Z_{(t^oC,II)min}$  підтримується в межах норми, то рекуперована теплова енергія спрямовуватиметься у термоакумулятор комплексу або споживачу, тоді енергетичний баланс матиме наступний вигляд:

$$Y_{VI}^{12} + Y_{VI}^{14} + Y_{VI}^{15} + Y_{VI}^{17} + Y_{VI}^{24} = Y_X^{21} \quad (4.39)$$

– якщо  $Z_{(G)} \geq Z_{(Gmin)}$  та  $Z_{(IX)} \leq Z_{(IXmax)}$  та  $Y_{II}^2 \geq Y_{IImin}^2$  та  $Z_{(T1)} \geq Z_{(T)} \geq Z_{(T2)}$ , тепловий баланс систем БГУ в нормі  $Z_{(t^oC,III)} \leq Z_{(t^oC,III)min}$ , а температура у ФТБР  $Z_{(t^oC,II)} \geq Z_{(t^oC,II)max}$ , то вмикається відцентровий насос, що відводить теплову енергію у теплообмінник охолодження ФТБР. У цьому випадку енергетичний баланс матиме наступний вигляд:

$$Y_{VI}^{12} + Y_{VI}^{14} + Y_{VI}^{15} + Y_{VI}^{17} + Y_{VI}^{22} + Y_{VI}^{24} = Y_X^{21} \quad (4.40)$$

– якщо рівень газу в системі нижчий мінімуму  $Z_{(G)} \leq Z_{(Gmin)}$ , рівень заряду батареї повний  $Z_{(IX)} \leq Z_{(IXmax)}$ , рівень освітленості достатній  $Y_{II}^2 \geq Y_{IImin}^2$  в періоді культивування  $Z_{(T1)} \leq Z_{(T)} \leq Z_{(T2)}$ , а тепловий баланс систем ФТБР  $Z_{(t^oC,III)} \leq Z_{(t^oC,III)min}$  та БГУ  $Z_{(t^oC,II)} \leq Z_{(t^oC,II)min}$  є нижчим мінімального, кількість теплової енергії термоакумулятора менша потрібної  $T_{II}^4 + T_{III}^{10} > T_{VII} + T_{VIII}$ , то електрична енергія акумуляторної батареї використовується для підтримки режимів роботи біологічних підсистем і матиме наступний вигляд:

$$Y_{VI}^{12} + Y_{VI}^{14} + Y_{VI}^{15} + Y_{VI}^{17} + Y_{VI}^{22} + Y_{VI}^{24} = Y_{IX}^{20} \quad (4.41)$$

Основним завданням роботи алгоритму системи на базі ТОПЕ (рис. 4.39) є забезпечення енергетичних процесів для БГУ та ФТБР, очистка біогазу, підтримка необхідної потужності споживача та рівня зарядки акумуляторної батареї.

Під час генерації електричної енергії утворюється значна частина теплової енергії, рекуперація котрої дозволить забезпечити необхідні функціональні та температурні параметри біологічних систем та споживача. У разі її надлишку в комплексі передбачено термоакумулятор. Дана підсистема включається в загальний алгоритм роботи на входах 3 і 4.

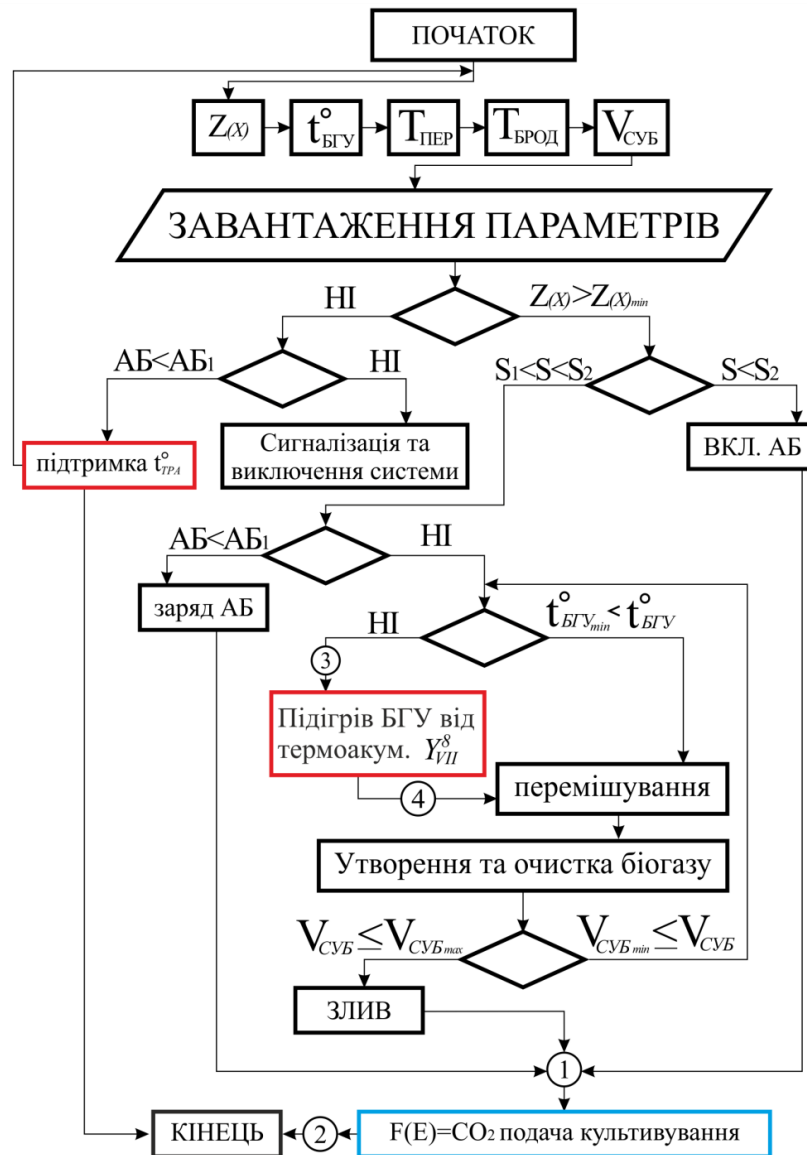


Рис. 4.39 Загальний алгоритм роботи ЕТК на базі ТОПЕ

Під час генерації енергії паливною коміркою виділяється діоксид вуглецю, котрий подається у ФТБР із мікрководоростями, для його утилізації (входи 1 і 2). Основним завданням алгоритму системи регенерації є підтримка оптимальних умов культивування [3]. Для початку роботи визначається: пора року ( $T_p$ ); час доби ( $T_d$ ) – час «стану спокою» (у заданому робочому діапазоні зупиняється

перемішування культури, додаткове освітлення та подача  $\text{CO}_2$ ); рівень освітленості ( $Y^I_{II}$ ); внутрішня температура фотобіореактора ( $t_{ФТР}$ ); рівень кислотності ( $pH$ ), котрий підтримує оптимальний режим середовища мікроорганізмів за рахунок подачі вуглекислоти із паливного стеку; кількість біомаси ( $m$ ) – показник дозволяє визначати час зливу біосировини в анаеробну установку.

ЕТК, енергопостачання яких спроектовані на базі біогазу не відчують таких гострих проблем акумуляції енергії, оскільки паливна сировина у метаннику виділяється практично в сталому режимі. Тому використання акумуляторних батарей необхідне в основному лише для забезпечення функціонування системи автоматичного керування (САК) та аварійних режимів роботи, з метою тимчасової підтримки.

До системи входить (рис. 4.40): *ДСН1* та *ДСН2* – блоки вимірювання (датчики) вихідних параметрів ( $U$ ,  $I$ ,  $f$ ) електромережі та генерованої електроенергії, що надходить споживачу. *K1* – силовий контактор підключення зовнішньої мережі та *K2* – силовий контактор підключення комплексу до мережі та споживача; (САК) – здійснює контроль та керування всіма параметрами підсистем ЕТК; БГУ – біогазова установка забезпечує комплекс хімічним паливом (біогазом), котрий після системи очистки (СО) зі сховища подається в електрохімічний генератор, виконаний на базі твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ), що генерує електричну енергію постійного струму напругою 560 В, яка подається на зарядний пристрій акумуляторної батареї та 3-фазний силовий інвертор змінного струму ( $\sim 3\Phi$  ІНВ). Вказана величина напруги вибрана у зв'язку із значною вихідною потужністю інвертора (150 кВт), це дає змогу конструктивно виконати його з одинарним циклом перетворення постійної напруги у змінну, що забезпечує менші втрати потужності, спрощення та здешевлення системи. Рекуперована теплова енергія із ТОПЕ розподіляється між біологічними підсистемами комплексу та частково акумулюється у термоакумуляторі (ТА); утворений діоксид вуглецю подається у систему регенерації енергії на базі ФТБР для його утилізації із подальшим утворенням біомаси для потреб БГУ.

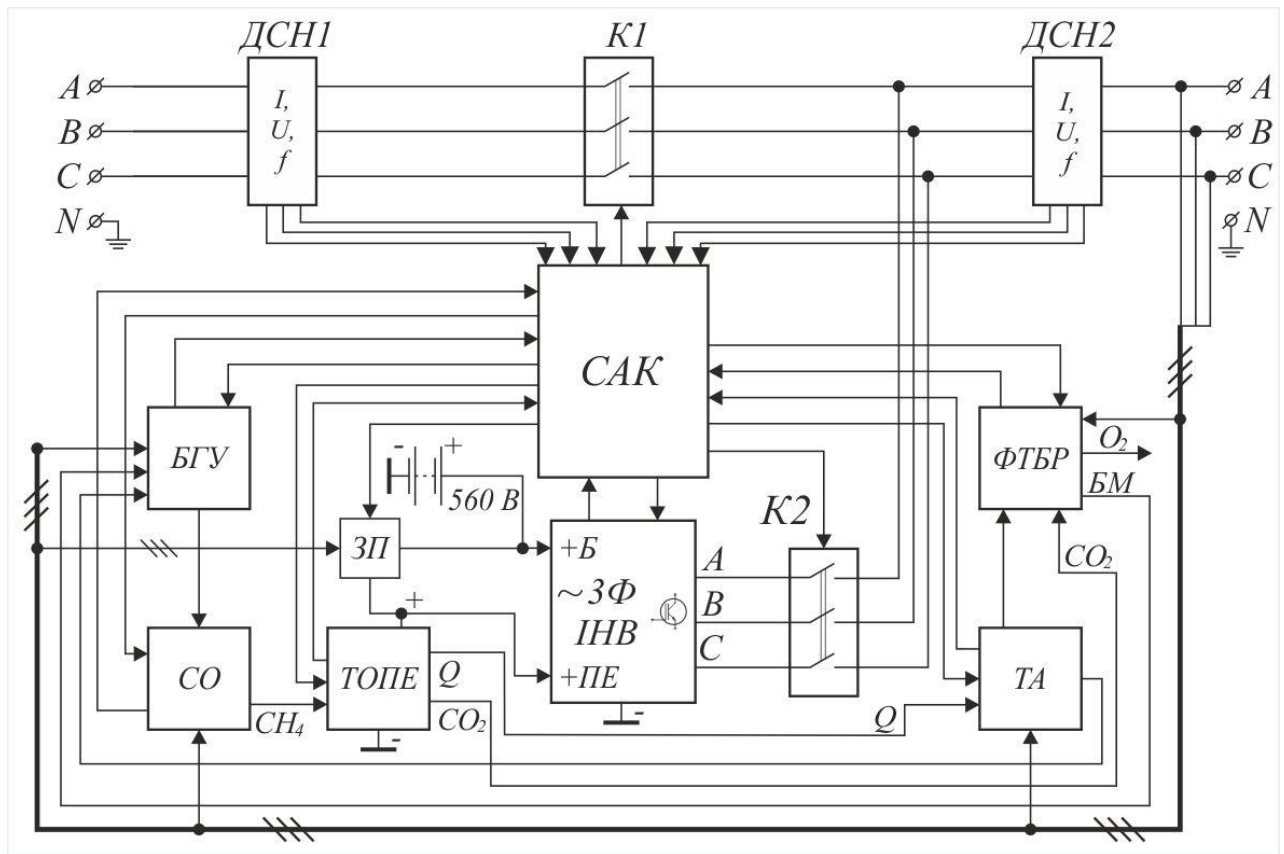


Рис. 4.40 Структурно-функціональна схема ЕТК: ДСН1 та ДСН2 – блоки вимірювання (датчики) вихідних параметрів ( $U$ ,  $I$ ,  $f$ ) електромережі та генерованої електроенергії, що надходить споживачу; К1 – силовий контактор підключення зовнішньої мережі та К2 – силовий контактор підключення комплексу до мережі та споживача; БГУ - біогазова установка; ЗП – зарядний пристрій; СО – система очистки; ТОПЕ – твердооксидний паливний елемент;  $\sim 3\Phi$  ИНФ – трифазний інвертор; САК – система автоматичного керування; ФТБР – фотобіореактор; ТА – система теплового розподілу із термоакумулятором

Шляхом використання модулів Ethernet-контролю САК ЕТК з'єднується у вимірювальну мережу із підсистемами контролю біологічних процесів ФТБР та БГУ. Передача інформації відбувається за допомогою стандартного протоколу TCP/IP для гарантованого обміну інформацією. У разі відсутності зв'язку із вимірювальними модулями підсистем відбувається локальне інформування оператора про виникнення критичної помилки, а додатково – за допомогою текстових повідомлень засобами GSM.

Структурні схеми роботи підсистем ФТБР, БГУ та контрольно-вимірювальної мережі системи живлення більш детально описані в джерелі [1].

Слід відзначити, що архівування інформації у всіх підсистемах відіграє важливу роль, оскільки дозволить при виникненні помилок різного характеру із апаратним або програмним комплексом швидко їх виявляти та в подальшому не допускати.

Використання вимірювального сервера значно розширює методи представлення інформації для інженерних працівників: sms-повідомлення, електронні листи, повідомлення в соцмережі та представлення результатів вимірювання у форматі \*.html. Для уніфікації контрольно-вимірювальних модулів, а також зменшення капітальних затрат на побудову системи, пропонується використовувати на усіх вузлах управління та вимірювання спільну апаратну платформу на базі мікроконтролера ATmega 2560. Даний мікроконтролер володіє широкими можливостями, а саме: тактовою частотою 16 МГц, внутрішньою флеш-пам'яттю обсягом 256 Kbit, ОЗП 8Kbit та EEPROM обсягом 4Kbit, що дозволяє реалізовувати на ньому достатньо складні проекти керування установками.

Апробацію ефективності роботи розроблених алгоритмів керування підсистемами, узгодження їх енергетичних параметрів проведено за розробленою імітаційною моделлю ЕТК генерації електричної енергії із біометану на базі ТОПЕ із використанням системи регенерації викидів.

У якості базових даних для моделювання використовувались річні журнали метеоспостережень за 2014, 2015 роки із визначеними середньорічною потужністю сонячної інсоляції  $50 \text{ Вт/м}^2$  та температурою зовнішнього середовища  $+15 \text{ }^\circ\text{C}$  [3], що дозволило провести річне моделювання функціонування ЕТК (рис. 4.41).

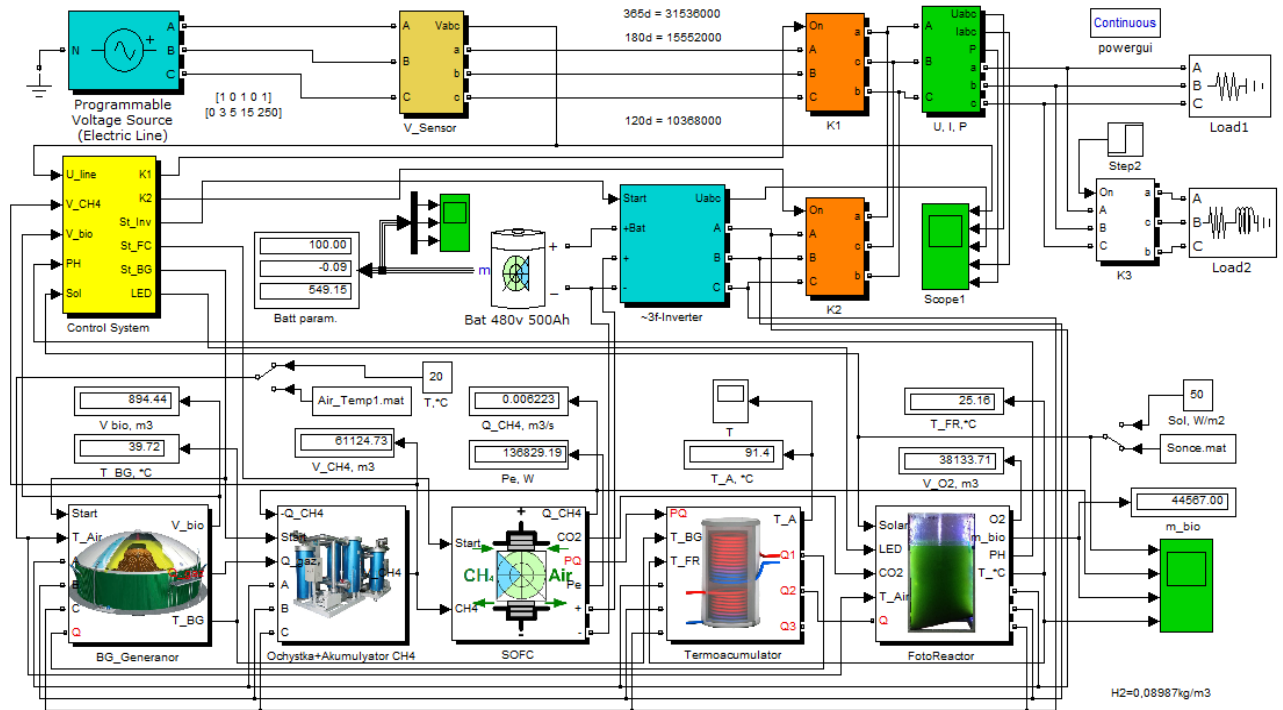


Рис. 4.41 Імітаційна модель ЕМК на базі ТОПЕ із системою регенерації енергії  
вихлопів

До моделі належить: програмне джерело живлення; два контактори для аналізу показників в мережі із можливістю регулювання навантаження за рахунок споживачів та подачею струму із інвертора потужністю 150 кВт; блоки вимірювання вихідних параметрів генерованої електричної енергії; акумуляторна батарея ємністю 500 А·год для частково резервного живлення системи та згладження перепадів напруги; підсистема генерації газу (об'єм біореактора 903 м<sup>3</sup> із добовим виходом очищеного метану 1065 м<sup>3</sup>); система очистки (45 м<sup>3</sup>/год із споживанням 45 кВт·год) та збереження газу (сховище об'ємом 14000 м<sup>3</sup>); електрохімічний генератор потужністю 120 кВт; система розподілу теплових потоків з термоакумулятором із теплоємністю 7592400 кДж/К; ФТБР для регенерації енергії викидів (об'ємом 180 м<sup>3</sup>).

Дана імітаційна модель дозволила дослідити перехідні процеси в ЕТК, визначити основні енергетичні втрати та надходження енергії в залежності від зовнішніх погодних умов (рис. 4.42).

Оскільки вихід біогазу відбувається лише на 11 день після запуску комплексу і є в недостатній кількості для підтримки енергетичних режимів БГУ, у



системі очистки передбачене сховище хімічного палива (природного газу) об'ємом 14000 н м<sup>3</sup>, котре заповнюється перед запуском.

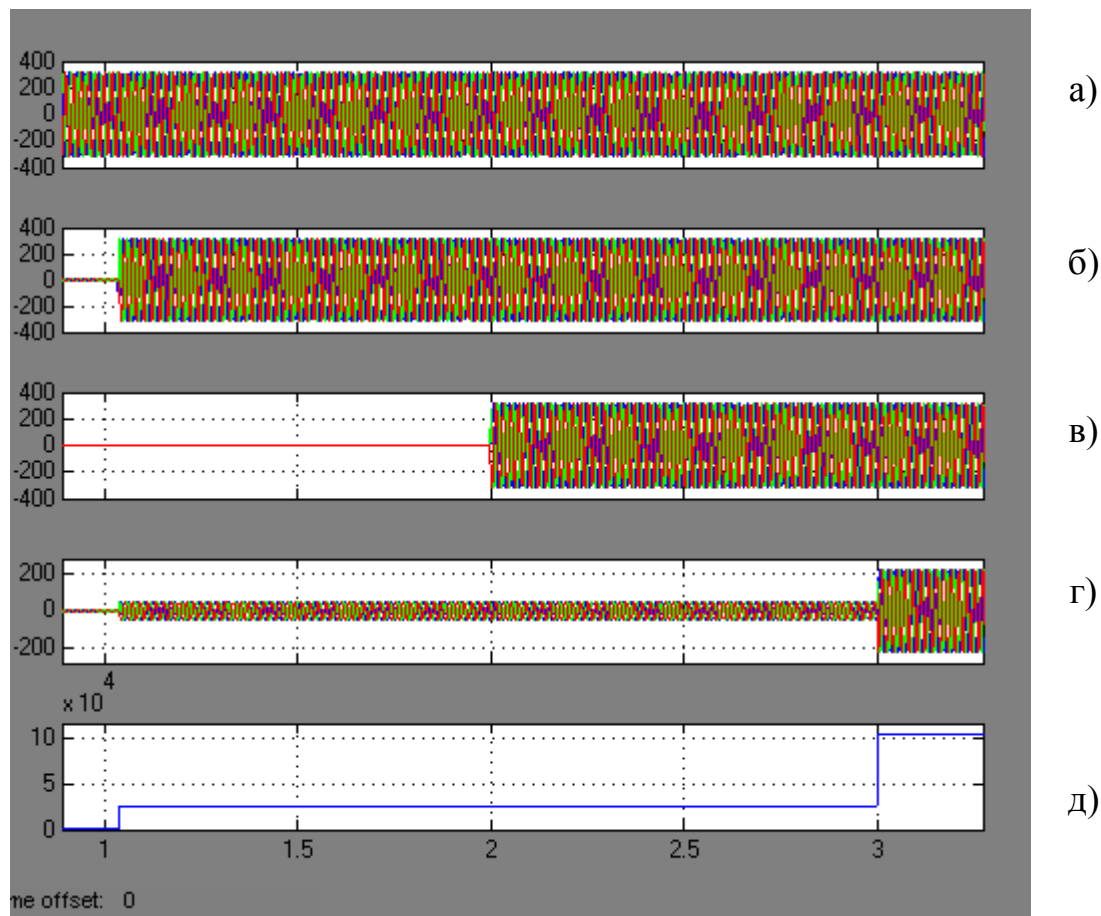


Рис. 4.42 Результати моделювання електроенергетичних параметрів: а) трифазні напруги мережі; б) трифазні напруги на споживачах після контактора К2; в) трифазні напруги на виході інвертора; г, д) струми та потужності споживачів при переході від мінімального до номінального режиму роботи паливних елементів

З метою економії енергетичного ресурсу спершу використовується один паливний стек потужністю 60 кВт, і лише після утворення біогазу відбувається старт системи очистки та другого стеку з такою ж потужністю. Для повного очищення максимального добового виходу біометану обрана потужність системи очистки на рівні 45 кВт год, котра споживає 42 % добової генерованої електричної енергії.

Старт підсистеми регенерації енергії на базі ФТБР відбувається на шостий день після запуску комплексу, що свідчить про те, що температура в ньому

підноситься за рахунок сонячної радіації і практично не потребує додаткового підігріву від ТОПЕ. Після запуску мікродоростей в культивацийну систему відбувається подача вуглекислоти. У момент, коли температура ФТБР досягає визначеного рівня +22-25 °С, надлишок теплової енергії спрямовується в термоакумулятор ЕТК або ж для потреб споживача.

У процесі проведеного імітаційного моделювання встановлено основні витрати електричної та теплової енергії, кількість генерованого та спожитого біометану, а також утвореного органічного добрива в електротехнологічному комплексі. Система регенерації енергії вихлопів на базі ФТБР протягом доби дозволила генерувати 347 кг сухої біомаси, 331 кг кисню та утилізувати при цьому 435 вуглекислоти (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

**Показники роботи ЕТК генерації енергії на базі ТОПЕ потужністю 120 кВт**

	За 120 днів			За рік	
	Вироблено	Спожито	Залишок	Залишок	Всього
Кількість біометану, м <sup>3</sup>	102 376	55 210	47 166	141498	307128
Електрична енергія, кВт · год	343 999	151 980	192 019	576 057	1 031 997
Теплова енергія, кВт · год	137 599	34 400	103 199	352 489	412 797
К-ть згенерованої сухої маси, кг			41661	-	124983
Спожита кількість CO <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>			52252	-	156756
Згенерована кількість, O <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>			39777	-	119331
К-сть органічного добрива, утвореного у БГУ,					7776

ТОНН		
------	--	--

Отримано також показники потужностей теплової та електричної енергії під час роботи системи комплексу як для власних потреб, так і згенерованої для комерційної реалізації. Перевагою даного підходу є можливість додаткової генерації органічних біодобрив та кисню в якості суміжних продуктів генерації біометану та електроенергії, що може принести додатковий прибуток від реалізації зазначеної схеми енергопостачання.

Побудований ЕТК на базі ТОПЕ та БГУ дозволяє створити гнучку систему реалізації надлишкового енергоносія у відповідності до потреб споживача за рахунок збільшення потужностей електрохімічних генераторів для перетворення біометану в електричну та теплову енергію.

На основі встановлених залежностей між потужностями ТОПЕ, системами регенерації енергії викидів на базі ФТБР проведено масштабування системи для ефективного перетворення діоксиду вуглецю у нову біомасу та здійснено розрахунки потужностей підсистем ЕТК на річний період при середній температурі зовнішнього середовища +15 °С та потужністю сонячної інсоляції 50 Вт/м<sup>2</sup> із (табл 4.6).

Таблиця 4.6

**Зведені енергетичні показники системи із врахуванням реалізації надлишкових ресурсів при зміні потужностей ТОПЕ упродовж року**

Потужність ТОПЕ, кВт	Об'єм ФТБР, м <sup>3</sup>	Види згенерованої енергії комплексом					
		Загальна згенерована кількість енергоносія			Власні потреби		
		Електрична енергія, кВт год	Теплова енергія, кВт год	Біометан, м <sup>3</sup>	Електро-енергія, кВт год	Теплова енергія, кВт год	Біометан, м <sup>3</sup>
80	120	639730	297341	36390	361685	58127	92169
120	180	994696	491586	365495	361751	59904	155401
160	240	1406911	694698	366373	361687	58699	216695
200	300	1746285	822028	366813	361702	58699	265365

На основі розробленої імітаційної моделі проведено дослідження для визначення залежності коефіцієнта ефективності роботи системи регенерації енергії викидів ( $k_{EC}$ ) від об'єму ФТБР ( $V_{ФТБР}$ ) для різних потужностей електрохімічного генератора ( $P_{ПК}$ ). На основі отриманих експериментальних даних встановлено залежності (рис. 4.43) [1].

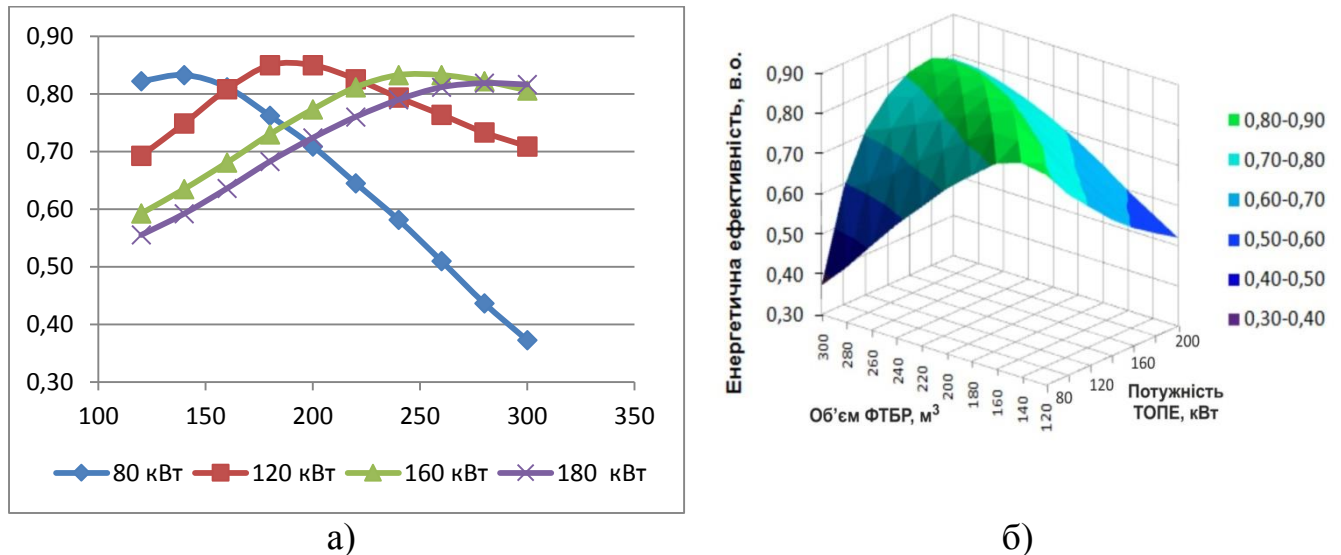


Рис. 4.43 Залежність ефективності регенерації енергії викидів від потужності ТОПЕ та об'єму ФТБР

Для встановлення залежності коефіцієнта ефективності  $k_{EC}$  від об'єму фотобіореактора  $V_{ФТБР}$  для різних потужностей паливної комірки  $P_{ПК}$  здійснено апроксимацію функцій на основі отриманих експериментальних даних. З достовірністю апроксимації  $R^2 > 0.9$  дані залежності описуються поліномами другого ступеня:

– для  $P_{ПК}=80\text{кВт}$  ( $R^2 = 0,9935$ )

$$k_{EC} = -1\text{E-}05 V_{ФТБР}^2 + 0,0015 V_{ФТБР} + 0,8068 \quad (4.42)$$

– для  $P_{ПК}=120\text{кВт}$  ( $R^2 = 0,9048$ )

$$k_{EC} = -2\text{E-}05 V_{ФТБР}^2 + 0,007 V_{ФТБР} + 0,093 \quad (4.43)$$

– для  $P_{ПК}=160\text{кВт}$  ( $R^2 = 0,9862$ )

$$k_{EC} = -1\text{E-}05 V_{ФТБР}^2 + 0,0062 V_{ФТБР} - 0,0018 \quad (4.44)$$

– для  $P_{ПК}=180\text{кВт}$  ( $R^2 = 0,9972$ )

$$k_{EC} = -7\text{E-}06 V_{ФТБР}^2 + 0,0046 V_{ФТБР} + 0,0992 \quad (4.45)$$

Оскільки раціональні режими регенерації енергії викидів забезпечуються при коефіцієнті ефективності роботи системи ( $k_{EC}$ ) від 0.8, то для знайдених поліномів (4.1–4.4) накладаються відповідні умови :

– для  $P_{нк}=80\text{кВт}$

$$-1\text{E-}05 V_{\text{ФТБР}}^2 + 0,0015 V_{\text{ФТБР}} + 0,8068 \geq 0,8 \quad (4.46)$$

– для  $P_{нк}=120\text{кВт}$

$$-2\text{E-}05 V_{\text{ФТБР}}^2 + 0,0072 V_{\text{ФТБР}} + 0,0934 \geq 0,8 \quad (4.47)$$

– для  $P_{нк}=160\text{кВт}$

$$-1\text{E-}05 V_{\text{ФТБР}}^2 + 0,0062 V_{\text{ФТБР}} - 0,0018 \geq 0,8 \quad (4.48)$$

– для  $P_{нк}=180\text{кВт}$

$$-7\text{E-}06 V_{\text{ФТБР}}^2 + 0,0046 V_{\text{ФТБР}} + 0,0992 \geq 0,8 \quad (4.49)$$

$$V_{\text{ФТБР}} \in (100; 300) \quad (4.50)$$

Розв'язок отриманих нерівностей дозволив визначити взаємозв'язок об'єму ФТБР та потужності паливної комірки  $P_{ТОПЕ}$ . для забезпечення максимального коефіцієнта ефективності системи регенерації викидів  $k_{EC}$ .

Таким чином, для паливної комірки потужністю 80 кВт раціональним є використання ФТБР об'ємом від 100 м<sup>3</sup> до 155 м<sup>3</sup>; для  $P_{ТОПЕ} = 120\text{кВт}$  –  $V_{\text{ФТБР}}$  від 158 м<sup>3</sup> до 235 м<sup>3</sup>; для  $P_{ТОПЕ} = 160\text{кВт}$  –  $V_{\text{ФТБР}}$  від 220 м<sup>3</sup> до 300 м<sup>3</sup>; для  $P_{ТОПЕ} = 180\text{кВт}$  –  $V_{\text{ФТБР}}$  від 250 м<sup>3</sup> до 300 м<sup>3</sup> [1].

## Висновки до розділу 4

Досліджені процеси регенерації енергії викидів в нову біомасу дають змогу стверджувати про велику перспективу використання фотобіореакторів із мікроводоростями, як джерела продукування нової біомаси. Розроблена фізична модель ФТБР (об'ємом 50 л) дала змогу утилізувати вуглекислоту на рівні 5,07 г/л  $\text{CO}_2$  і згенерувати  $\text{O}_2$  – 3,7 г/л протягом доби із середньодобовим приростом сухої біомаси мікроводоростей – 3,46 г/л. Максимальний приріст кількості клітин в залежності від інтенсивності світлового потоку (для величин освітлення 2500–9000 лк) становив 248,4–720,36·млрд/л відповідно. Підхід із використанням сонячної інсоляції (700–950 Вт/м<sup>2</sup>) та систем термоакумуляторів продемонстрував скорочення загальних енерговитрат на 25 %, що дало можливість обґрунтувати необхідність імплементації системи терморегуляції у фотобіореактори для забезпечення відповідних температурних режимів роботи культиваційного середовища в допустимих межах (+20...+28 °С). Імітаційні та трьохвимірні моделі обумовили доцільність масштабування систем регенерації енергії викидів для промислової утилізації  $\text{CO}_2$  із продукуванням нової біомаси.

Розвиток ринку сучасних технологій генерації енергії демонструє перспективи використання електрохімічних джерел генерації енергії на базі твердооксидних паливних елементів. Діючі ринкові моделі вже демонструють можливість отримання електричної енергії з біогазу, з ефективністю до 60 %, та близько 85 % (із системами рекуперації теплової енергії), що дає змогу зменшити викиди вуглекислоти в 1,7 раза (297 г/кВт·год), порівняно з генеруючими пристроями на базі двигунів внутрішнього згоряння (505 г/кВт·год).

Реалізована комп'ютерна модель електротехнологічного комплексу генерації енергії з біогазу на базі твердооксидних паливних елементів та системи регенерації енергії викидів, дала змогу визначити раціональні параметри та встановити взаємозв'язки між об'ємом біогазового реактора (903 м<sup>3</sup> із середньодобовим споживанням електричної – 60 кВт·год і теплової енергії – 320 кВт·год та генерацією 1065 м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$ ), електричною потужністю твердооксидних паливних елементів (120 кВт зі струмом навантаження – 200 А, тепловою потужністю – 50 кВт) та об'ємом

фотобіореактора (180 м<sup>3</sup>) із максимальним коефіцієнтом ефективності утилізації вуглекислоти.

### Список використаних джерел

1. Бешта О. С., Рутило М. І., Пальчик А. О., Бурега Н. В., Добровольський Ю. А. Дослідження енергетичних характеристик фотобіореактора в процесі генерації нової біомаси. *Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми, перспективи*: Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, м. Яремче, 30 січня – 2 лютого 2018 року: тези доповіді. Тернопіль, 2018. С. 75–76.
2. Бешта О. С., Федорейко В. С., Пальчик А. О., Бурега Н. В. Автонномне енергозабезпечення об'єктів господарювання на основі біотвертооксидних паливних систем. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 2. С. 67–73.
3. Бурега Н. В. Електротехнологічний комплекс регенерації енергії викидів на основі фотобіореактора: дис. канд. тех. наук : 05.09.03. Київ, 2018. 210 с.
4. Бурега Н. В. Дослідження режимів роботи електротехнологічного комплексу під час генерації електроенергії із біогазу. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 209. Ч. 2. С. 237–241.
5. Бурега Н. В. Методика вирощування мікроводоростей у фотореакторі при утилізації газів твердооксидних паливних елементів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природовикористання України*. Київ, 2015. № 224. С. 213–218.
6. Бурега Н. В., Рутило М. І., Пальчик А. О. Дослідження енергетичних параметрів утилізації вуглекислоти у плоскому фотореакторі під впливом штучного та природного освітлення. *Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: IV Міжнародна науково-практична конференція*, м. Київ, 20–21 листопада 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 32–33.
7. Вінярська Г. Б., Боднар О. І., Бурега Н. В., Пальчик А. О., Кантицька О. О., Онуфрійчук Л. А. Культивування *Chlorella vulgaris* у фотобіореакторі неперервної дії під впливом сонячної інсоляції. *Наукові записки Терн. нац. пед. ун-ту ім. В. Гнатюка. Серія: Біологія*. 2017. № 1 (68). С. 67–73.



8. Замора Я. П., Бурега Н. В., Пальчик А. О. Проблеми використання мікробіологічних систем у процесі ремісії вуглекислого газу із атмосферного повітря. *Національний університет біоресурсів і природокористування України. Енергетика і автоматика*. 2021. № 4. С. 88–98.

9. Пальчик А. О., Бурега Н. В. Використання фотобіореактора в альтернативних системах енергозабезпечення. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Вип. 13. Т. 5. С. 116–123.

10. Пальчик А. О., Фендьо О. М., Бурега Н. В. Утилізація діоксиду вуглецю шляхом промислового вирощування мікроводоростей в енергосистемі на базі паливного елемента. *Енергетика і автоматика*. 2014. № 4. С. 80–89. URL : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/viewFile/3543/3465>.

11. Федорейко В. С., Бурега Н.В., Пальчик А. О., Іскерський І. С., Балябас В. Т. Патент 115229 UA, МПК (2017.01) A01G 33/00, C12N 1/02. Спосіб промислового вирощування мікроводоростей шляхом утилізації діоксиду вуглецю. № u201610396 : заявлено. 12.10.2016; опубліковано 10.04.2017. Бюл. № 7/2017.

12. Федорейко В. С., Пальчик А. І., Боднар О. І., Бурега Н. В., Сіправський Р. Б. Комп'ютерний аналіз біологічних процесів вирощування мікроводоростей в енергетичних цілях. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: теорія, практика, історія, освіта: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 10–14 травня 2016 року: тези доповіді*. м. Київ, 2016. С. 39–41.

13. Bodnar O. I., Burega N. V., Palchyk A. O., Viniarska H. B., Grubinko V. V. *Optimization of chlorella vulgaris beij. cultivation in a bioreactor of continuous action. Biotechnologia acta*. 2016. № 4. С. 42–49.

14. O. Beshta, V. Fedoreyko, A. Palchyk, N. Burega, R. Sipravskyu. Computer analysis of photobiological utilizer parameters of solid oxide fuel cells emissions. *Power Engineering, control & information technologies in Technical Objects Control*. CRC Press / Balkema, 2016 Taylor & Francis Group, London, UK. PP. 11–17.

15. Beshta O. S., Fedoreyko V. S., Palchyk A. O., Burega N. V. Independent power supply of menage object based on biosolid oxide fuel. *Power Engineering,*

*Control and Information Technologies in Geotechnical Systems.* Taylor & Francis Group. London, UK, 2015. C. 33–39.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У монографії фактологічно доведена необхідність широкого впровадження біоресурсної диверсифікації джерел теплової енергії в енергоємних технологіях сушіння зерна, виробництва будівельних матеріалів, тепличного господарства тощо. Обґрунтовано доцільність використання в якості джерела енергії несертифікованого біопалива місцевого походження з однорічним циклом відновлення (солома, відходи насінневих та елеваторних виробництв) енергетичний еквівалент якого в Україні складає понад 10 млрд м<sup>3</sup> природного газу. Проаналізовано існуючі технології приготування двокомпонентного біопалива, визначено їх раціональні структури з метою зменшення затрат електроенергії на виробництво і доставку до його місця використання.

2. Розроблено, виготовлено і комерціалізовано автоматизовані вихрові генератори-утилізатори потужністю від 1 до 3 МВт для технології сушіння зерна. На основі імітаційних та виробничих досліджень технологічних параметрів зерносушарок та властивостей несертифікованого біопалива розроблено й адаптовано в зерносушильний комплекс інтелектуальну систему керування, яка підвищила його енергоефективність на 11 %. Отримана під час реалізації проєкту «зелена» енергія в 7 ... 10 разів дешевша від традиційної вуглеводневої (природний газ, дизельне та пічне паливо). Досвід 5-ти річної експлуатації розробленої технології дозволив одночасно вирішити економічні, енергетичні, екологічні та соціальні проблеми України.

3. Запропоновано метод використання термоелектричних модулів у когенераційних установках на базі біотеплогенераторів, який дозволяє генерувати електроенергію з теплових викидів у достатній кількості для функціонування автономних багатофункціональних систем енергогенерації, в тому числі, для підрозділів Збройних Сил України.

4. Запропонована технологія регенерації енергії викидів CO<sub>2</sub> твердооксидних паливних комірок в «нову біомасу», на основі фотобіореактора, що дає можливість отримання електроенергії з ефективністю до 85 % при зменшенні викидів вуглекислоти в 1,7 раза. Це сегмент «зеленої енергії», який в

майбутньому замінить архаїчні вуглеводні і значно зменшить навантаження на довкілля.

Повноцінна реалізація запропонованих біоресурсних технологій диверсифікації джерел енергії дозволить Україні значно покращити енергетичний баланс за рахунок «зеленої» енергії і перестати бути світовим лідером з енергомарнотратства.

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

Федорейко Валерій Степанович	доктор технічних наук, професор, директор Центру енергоефективних технологій Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка
Горбатюк Роман Михайлович	кандидат технічних наук, доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри машинознавства і транспорту Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка
Іскерський Іван Станіславович	кандидат технічних наук, директор Науково- виробничого об'єднання «Енергоощадні технології»
Рутило Микола Іванович	кандидат технічних наук, доцент кафедри машинознавства і транспорту Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка
Загородній Роман Іванович	кандидат технічних наук, викладач кафедри машинознавства і транспорту Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка
Бурега Назар Васильович	кандидат технічних наук, викладач кафедри машинознавства і транспорту Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ФЕДОРЕЙКО Валерій Степанович**  
**ГОРБАТЮК Роман Михайлович**  
**ІСКЕРСЬКИЙ Іван Станіславович**  
**РУТИЛО Микола Іванович**  
**ЗАГОРОДНІЙ Роман Іванович**  
**БУРЕГА Назар Васильович**

**ТЕХНОЛОГІЇ БІОРЕСУРСНОЇ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА  
БАЗІ ГЕНЕРАТОРІВ-УТИЛІЗАТОРІВ**

*Комп'ютерна верстка*

*Обкладинка*

*Коректор*

*Технічний редактор*

*Т. Брездень*

*Н. Бурега*

*Л. Мельник*

*Л. Мельник*

Підписано до друку 14.10.22. Формат 60×84/16. Папір офсетний.

Гарнітура Times. 24,07 ум. др. арк., 26,24 обл.-вид. арк.

Наклад 500 прим. Замовлення 09-023.

Редакція газети «Підручники і посібники». Свідоцтво ТР № 189 від 10.01.96.

46020, м. Тернопіль, вул. Поліська, ба. Тел. (0352)-43-15-15, 43-10-31.

Е-mail: [pp@pp.utel.net.ua](mailto:pp@pp.utel.net.ua)

[www.pp.utel.net.ua](http://www.pp.utel.net.ua)

Книга поштою: 46011 Тернопіль, а/с 376