

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

Виконав:

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

_____ Ярослав СВІНЦІЦКИЙ

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ Ігор ГАРАСИМЧУК

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«___» _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____

_____ Павло ПОТАПСЬКИЙ

м. Кам'янець-Подільський, 2025р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра має обсяг 76 сторінок основного тексту, містить 32 ілюстрації, 15 таблиць та використано 45 джерел літератури.

Мета роботи полягає у розробці, математичному моделюванні та обґрунтуванні системи автоматичного контролю та регулювання (САКР) для ключових технологічних етапів процесу виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи з метою оптимізації роботи, забезпечення стабільної якості продукту та мінімізації енергетичних витрат.

Для досягнення мети були використані методи системного аналізу технологічного процесу, теорії автоматичного керування для синтезу регуляторів, а також математичне та імітаційне моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Як апаратура вимірювання та керування в САКР передбачається використання промислового програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1500 та інтелектуальних датчиків температури, тиску, рівня і витрати від Endress+Hauser.

Результати досліджень включають створення адекватних математичних моделей об'єктів керування (реактор ферментації, ректифікаційна колона) та синтез оптимально налаштованих ПД-регуляторів, що забезпечують високу стійкість та якість перехідних процесів. Новизна полягає в інтегральному підході до автоматизації, що дозволяє досягти синергетичного ефекту від точного керування всіма стадіями процесу. Цінність для виробництва виражається у скороченні енерговитрат до 15% та підвищенні виходу біоетанолу на 3-5%, а для науки — у розширенні бази математичних моделей біотехнологічних процесів для задач автоматизації.

Рекомендації щодо використання результатів роботи стосуються впровадження розробленої САКР на діючих або новостворених вітчизняних підприємствах з виробництва біоетанолу. Можливі напрями розвитку досліджень включають впровадження методів адаптивного та предиктивного керування (MPC) для подальшої оптимізації динамічних режимів, а також розробку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень на основі Big Data.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: САКР, БІОЕТАНОЛ, КУКУРУДЗА, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ПІДРЕГУЛЯТОР, ФЕРМЕНТАЦІЯ, РЕКТИФІКАЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, SIMATIC S7-1500.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТІВ БІОЕТАНОЛУ.....	8
1.1 Етанол із біомаси: історичні віхи, поточний статус та перспективи виробництва в Українській державі.....	8
1.2 Етап виробництва зерна кукурудзи із залученням біоетанолу	15
РОЗДІЛ 2 ОПИС ТА ПРИЗНАЧЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ	20
2.1. Завдання керування технологічним циклом.....	20
2.2 Регулюючі контури технологічного тракту	22
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	27
3.1. Формалізація математичного опису.....	27
3.2. Математичні моделі передачі	31
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	34
4.1 Основи теорії	34
4.2 Параметричне відтворення роботи системи.....	37
РОЗДІЛ 5 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ДОБІР АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ АСУ	49
5.1 Вибір платформного рішення для керування.....	49
5.2 Визначення вимірювальних перетворювачів	53
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	56
6.1 Загальні положення.....	56
6.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	57
6.3 Заходи та засоби забезпечення електробезпеки (ЕБ).....	61
6.4 Пожежо- та вибухобезпека.....	64
6.5. Охорона праці при експлуатації САК.....	68
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74

ВСТУП

В умовах шаленого розвитку індустрії, особливо секторів, пов'язаних із генеруванням енергії, спостерігається відчутне зростання попиту на ресурси відновлюваного походження. У такому контексті, біоетанол висувається як один із реалістичніших шляхів заміщення конвенційного пального, сприяючи ослабленню нашої прив'язки до карбонових покладів та скороченню викидів парникових газів. Синтез цього біопродукту з джерел, що поновлюються, на зразок зерна кукурудзи, демонструє значний потенціал для нарощування обсягів виробництва, враховуючи його екологічну привабливість та легкість отримання вихідної сировини.

Процес трансформації кукурудзи у біоетанол являє собою каскад етапів: починаючи з попередньої обробки зерен, далі йде розщеплення крохмалистих сполук (гідроліз), далі слідує процес бродіння (ферментація), потім етап дистиляції, і насамкінець доведення готового продукту до необхідного рівня чистоти. Ефективність виконання цих операцій життєво залежить від ювелірної точності та константності заданих параметрів функціонування. Основною рушійною силою для досягнення таких високих стандартів є інтеграція систем автоматичного контролю й регулювання (САКР), які дозволяють оптимізувати роботу всього апаратно-технологічного ланцюга, зберігати незмінними параметри процесу та мінімізувати вплив людського фактору.

Актуальність теми дослідження зумовлена низкою глобальних та національних факторів:

1. Глобальний енергетичний перехід та екологічний аспект: У контексті зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії та міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів, біоетанол виступає як один із найбільш реалістичних шляхів заміщення конвенційного моторного пального. Виробництво біоетанолу з кукурудзи має майже "нейтральний вуглецевий" життєвий цикл та сприяє покращенню

якості атмосфери.

2. Технологічна необхідність автоматизації: Процес трансформації кукурудзи у біоетанол є багатоетапним (гідроліз, ферментація, дистиляція). Ефективність та стабільна якість кінцевого продукту (етанолу) життєво залежать від ювелірної точності та константності заданих технологічних параметрів. Інтеграція систем автоматичного контролю та регулювання (САКР) є основною рушійною силою для оптимізації всього апаратно-технологічного ланцюга, мінімізації впливу людського фактору та зниження енерговитрат.

3. Стратегічний потенціал України: Україна має потужний аграрний сектор та велику сировинну базу (кукурудза, пшениця), що надає їй серйозний потенціал стати вагомим гравцем на європейському ринку біоетанолу. Розвиток власного виробництва є стратегічним пріоритетом для зміцнення енергетичної незалежності та стимулювання економічного зростання. Впровадження сучасних автоматизованих рішень (САКР) є ключовим для підвищення конкурентоспроможності вітчизняного виробництва.

Мета досліджень:

Розробка, математичне моделювання та обґрунтування системи автоматичного контролю та регулювання (САКР) для ключових технологічних етапів процесу виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи з метою оптимізації роботи, забезпечення стабільної якості продукту та мінімізації енергетичних витрат.

Завдання досліджень:

1. Провести системний аналіз технологічного процесу виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи, виявити основні технологічні етапи та параметри, що підлягають керуванню

2. Визначити та класифікувати ключові завдання керування технологічним циклом, включаючи контроль сировини, процесів ферментації та дистиляції.

3. Створити математичні моделі та формалізувати опис основних керуючих контурів, зокрема процесів ферментації, дистиляції та дегідратації.

4. Здійснити синтез та налаштування регуляторів (наприклад, ПІД-регуляторів) для забезпечення стабільності та оптимальної динаміки керування.

5. Обґрунтувати та підібрати необхідні засоби автоматизації (програмований контролер, датчики, виконавчі механізми) для реалізації розробленої САКР.

6. Проаналізувати потенційні небезпечні виробничі фактори (електробезпека, вибухонебезпека) та розробити заходи безпеки при експлуатації САКР.

Об'єкт досліджень:

Технологічний процес виробництва біоетанолу (етилового спирту) із зерна кукурудзи

Предмет досліджень:

Система автоматичного контролю та регулювання (САКР) технологічних параметрів (температури, тиску, рівня, витрати, концентрації) на основних етапах виробництва біоетанолу, а також її математичне та програмне забезпечення.

Методи досліджень

Для досягнення поставленої мети були використані такі методи:

1. Системний аналіз: для детального вивчення технологічного процесу, його структури та взаємозв'язку між окремими етапами виробництва.

2. Теорія автоматичного керування (ТАК): для розробки структури керуючих контурів, вибору та синтезу законів регулювання (зокрема, ПІД-регулювання).

3. Математичне моделювання: для формалізації фізико-хімічних процесів (ферментація, дистиляція, дегідратація) у вигляді диференціальних рівнянь та передатних функцій.

4. Імітаційне (комп'ютерне) моделювання: з використанням програмного середовища Matlab/Simulink для аналізу динамічних характеристик об'єктів керування, перехідних процесів та налаштування параметрів регуляторів.

5. Метод порівняльного аналізу: для вибору оптимальних технічних засобів автоматизації (контролера, датчиків, виконавчих механізмів).

6. Нормативно-правовий аналіз: для вивчення вимог охорони праці та промислової безпеки, зокрема у вибухонебезпечних зонах (АТЕХ).

РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВІВ БІОЕТАНОЛУ

1.1 Етанол із біомаси: історичні віхи, поточний статус та перспективи виробництва в Українській державі

Застосування біоетанолу як пального сягає глибини XIX століття. Його зародження та подальше інтегрування нерозривно пов'язані як із розвитком ферментаційних процесів, так і з бажанням замінити звичні нафтові похідні [1].



Рисунок 1 – загальний вигляд виробництва біоетанолу

Історія та еволюція біоетанолу як пального

Історія використання біоетанолу як моторного пального пройшла шлях від перших ідей до статусу ключового компонента сучасної енергетики.

Започаткування (XIX століття)

- У 1826 році Сам'юель Морі вперше запропонував етанол як пальне для двигунів внутрішнього згорання.
- Ніколаус Отто, винахідник чотиритактного двигуна, у 1876 році експериментував з агрегатами, що могли працювати на етанолі.
- Етанол був привабливим через простоту отримання та

відновлюваність, але його популярність знизилася з розвитком нафтовидобутку.

Перша половина минулого століття (XX)

- У 1908 році Генрі Форд представив "Ford Model T", який міг використовувати як бензин, так і етанол. Форд бачив у біоетанолі можливість підтримати аграрний сектор США.

- Незважаючи на це, низька вартість нафтового бензину не дозволила етанолу стати домінуючим видом пального.

Період Другої світової війни

- В умовах воєнних дій, коли доступ до нафти був обмежений, біоетанол часто використовувався як замітник бензину в багатьох країнах.

- Німеччина, Бразилія та Японія активно виробляли етанол із цукрової тростини, картоплі та зернових.

Енергетична криза 1970-х років

- Нафтове ембарго 1973 року різко посилювало інтерес до альтернативних джерел енергії, включаючи біоетанол.

- Бразилія запустила масштабну програму Proálcool, зосередившись на промисловому виробництві етанолу з цукрової тростини для транспортних потреб.

Кінець XX – початок XXI століття

- Виробництво біоетанолу стало частиною державної політики, спрямованої на скорочення викидів CO_2 та протидію змінам клімату.

- США розпочали масове виробництво біоетанолу з кукурудзи, а ЄС — з пшениці, жита та інших зернових.

- З'явилися автомобілі з гнучким паливним модулем (flex-fuel), що можуть працювати на бензиново-етанольних сумішах (E10, E85).

Сучасний етап

- Біоетанол широко використовується як добавка до пального для зменшення парникового ефекту та підвищення екологічності.

- Тривають дослідження нових методів отримання, особливо целюлозного біоетанолу (з відходів деревини та сільського господарства).

Основні сировинні матеріали для виробництва

Покоління	Сировинні Матеріали	Приклади
Традиційні (Перше покоління)	Культури, багаті на цукор та крохмаль	Цукрова тростина, кукурудза, пшениця
Друге покоління	Аграрні та лісові відходи	Залишки сільгоспкультур, лісоматеріали, солома
Третє покоління	Водорості	Морські водорості

Значення біоетанолу в сучасній енергетиці

Біоетанол є важливим елементом сучасної енергетичної системи завдяки позитивному впливу на екологію, економіку та енергетичну незалежність.

Екологічний аспект

- Скорочення викидів парникових газів: Життєвий цикл біоетанолу вважається майже "вуглецево-нейтральним", оскільки CO_2 , що виділяється при його згорянні, значною мірою компенсується поглинанням CO_2 рослинами-сировиною під час фотосинтезу.

- Покращення якості атмосфери:

Додавання біоетанолу до паливних сумішей (як-от E10, E85) сприяє зниженню обсягів токсичних речовин, зокрема оксидів азоту (NO_x) та сажі.

- Схильність до біологічного розкладу:

У випадку потрапляння в природне середовище, біоетанол розкладається значно швидше, ніж продукти нафтопереробки, що мінімізує потенційну шкоду.



Рисунок 2 – «Зелений» біоетанол

Енергетична самодостатність

- Послаблення залежності від нафтопродуктів:

Використання етанолу з біомаси сприяє диверсифікації енергетичних джерел, зменшуючи нашу вразливість через необхідність імпорту нафти [5]. Це особливо важливо для держав, які не мають значних власних запасів "чорного золота".

- Місцеве виробництво:

Оскільки біоетанол може бути отриманий із різноманітної первинної сировини (наприклад, кукурудзи, тростинного цукру, картоплі чи навіть вторинних ресурсів), це стимулює розвиток місцевих господарств.

Ключовий вектор для агросектору

- Підтримка аграрної галузі:

Попит на ресурси, необхідні для виробництва біоетанолу, стимулює роботу фермерських господарств, надаючи їм додаткові збутові канали.

- Раціональне використання побічних продуктів:

Залучення біомаси другого покоління, як-от соломи чи деревини, а також органічних залишків, дає змогу зменшити обсяги невикористаних відходів та підтримує засади сталого розвитку.

Економічний імпульс

- Створення нових робочих місць:

Виробничі комплекси, орієнтовані на біоетанол, формують попит на кадри у агросекторі, промисловості та наукових установах [6].

- Скорочення фінансових відтоків на імпорт пального:

Впровадження біоетанолу дозволяє утримати фінансові потоки всередині країни, оскільки зменшується потреба у закупівлі імпортного викопного палива.

Використання у транспортній галузі

- Паливо для автомобільного транспорту:

Біоетанол використовують для покращення бензину, оскільки він підвищує октанове число та сприяє чистішому згорянню. На ринку поширені

бензинові суміші з вмістом етанолу: E10 (10% етанолу) та E85 (85% етанолу).

Сумісність із сучасними автомобілями:

Переважна більшість нових автомобілів може ефективно функціонувати на паливі з домішками біоетанолу, що робить його зручним варіантом.

Інноваційний розвиток

- Біоетанол другого та третього покоління:

Технологічні рішення, що дозволяють отримувати етанол із відходів чи водоростей, допомагають уникнути конкуренції з продовольчими культурами та мінімізувати екологічний тиск.

- Новітні розробки у сфері біопалива:

Біоетанол стає важливим елементом для розвитку інноваційних транспортних рішень, включаючи гібридні та електрифіковані системи.

Посилення екологічних ініціатив [7]

• Біоетанол сприяє виконанню країнами міжнародних кліматичних зобов'язань, зокрема Паризької угоди, завдяки зменшенню викидів парникових газів.

• Його застосування відповідає Цілям сталого розвитку ООН, а саме: забезпечення доступу до чистої енергії (Ціль 7) та боротьба зі змінами клімату (Ціль 13).

Виклики та майбутні перспективи біоетанолу

Незважаючи на значні переваги біоетанолу, його широке впровадження стикається з низкою викликів:

- Конкуренція за землю: Існує конфлікт між використанням земельних ресурсів для вирощування сировини для біоетанолу та для продовольчих культур.

- Технологічна потреба: Необхідно вдосконалювати та здешевлювати технології виробництва біоетанолу другого та третього покоління (з нехарчової сировини).

Зростаюча роль та потенціал для України

Проте, завдяки науково-технічному прогресу, значення біоетанолу у світовій енергетиці та транспорті постійно зростає, що закріплює за ним статус ключового елемента у побудові екологічно стійкого майбутнього.

Україна має великий потенціал, щоб стати важливим гравцем на ринку біоетанолу. Це зумовлено:

- Потужним аграрним сектором.
- Сприятливими кліматичними умовами.
- Значними обсягами доступної сировини.

В контексті переходу до відновлюваних джерел енергії та зменшення залежності від імпортованих нафтопродуктів, розвиток виробництва біоетанолу може стати стратегічним пріоритетом в енергетичній політиці держави.

Сировинна база

Наша країна володіє одними з найбільших у світі сільськогосподарських площ, що забезпечує широкий вибір вихідної сировини для біоетанолу: кукурудза, пшениця, жито, бурякова меляса та інші культури. Використання агропромислових залишків, таких як солома чи пожнивні рештки, відкриває додаткові шляхи для зниження кінцевої вартості продукції.

Енергетична незалежність

Виробництво біоетанолу здатне мінімізувати потребу України в імпорті нафти та нафтохімічної продукції, стимулюючи розвиток вітчизняного ринку альтернативних паливних рішень [10]. Застосування біоетанолу як добавки до автомобільного палива дозволить скоротити витрати на імпортні нафтопродукти та зміцнити національну енергетичну безпеку.

Переваги розвитку виробництва біоетанолу в Україні

Екологічні вигоди

Використання біоетанолу як палива вважається екологічно чистішим рішенням, оскільки воно суттєво знижує викиди парникових газів. Перехід на біоетанол допоможе Україні не лише досягти Цілей сталого розвитку, а й виконати свої міжнародні зобов'язання зі скорочення викидів CO₂.

Інтеграція та економічне зростання

Україна має потенціал стати ключовим експортером біоетанолу до Європейського Союзу. Це обумовлено високим попитом на біопаливо в ЄС, що стимулюється вимогами Директиви про відновлювану енергію (RED). Така інтеграція сприятиме прискоренню економічного зростання та зміцненню позицій України на міжнародній енергетичній арені.

Стимулювання розвитку сільських територій

Запуск комплексів з виробництва біоетанолу створить нові робочі місця, насамперед у сільській місцевості. Це безпосередньо призведе до покращення рівня життя місцевих жителів та розвитку інфраструктури громад.

Розкриття інноваційного потенціалу

Впровадження автоматизованих та сучасних рішень у виробництво біоетанолу дозволить оптимізувати процеси, зменшити енергоспоживання і, як наслідок, підвищити конкурентоспроможність продукції. Особливі перспективи відкривають біотехнологічні методи, зокрема для розщеплення целюлозних субстратів, що може значно розширити сировинну базу галузі.

Україна має всі передумови, щоб зайняти лідерські позиції у виробництві біоетанолу в Європі. Для повної реалізації цього потенціалу необхідна комплексна державна підтримка, інвестиції у сучасне обладнання та розробка нормативно-правової бази, яка мотивуватиме до виробництва та споживання біоетанолу [12]. У довгостроковій перспективі це забезпечить економічне піднесення, надійну енергетичну самодостатність та екологічну стабільність для держави.

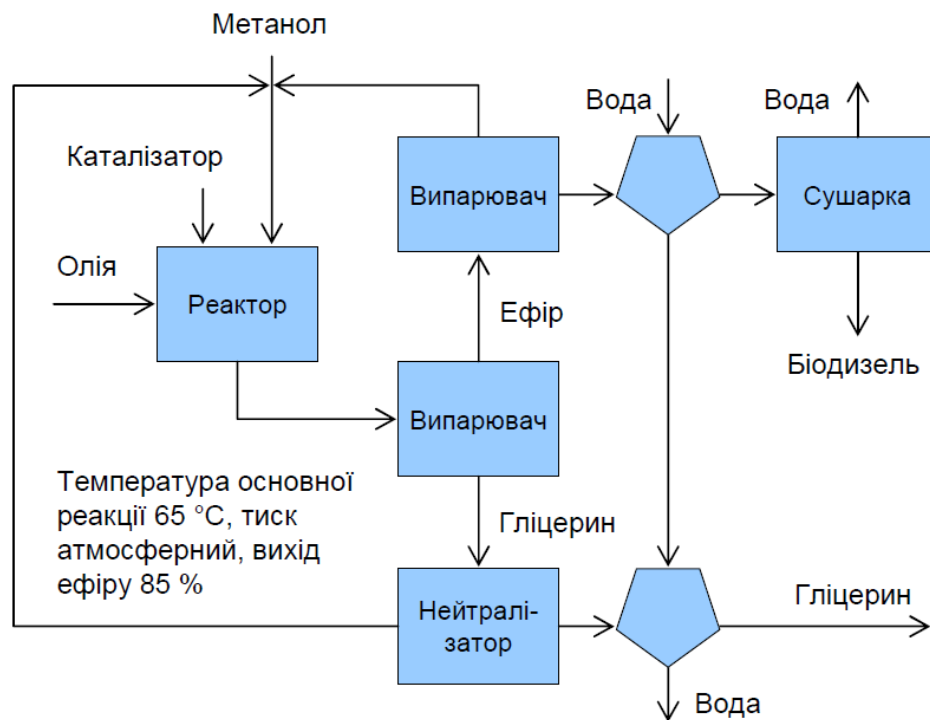


Рисунок 3 – Циклічна каталітична схема виробництва біоетанолу

1.2 Етап виробництва зерна кукурудзи із залученням біоетанолу

Схема отримання біоетанолу, що використовує кукурудзу як вихідну сировину, складається з кількох основних кроків [13]. Далі наведено опис цього технологічного ланцюжка:

Початкова підготовка матеріалу

Розділення (фракціонування): Кукурудзяне зерно (круп) очищують від домішок, які є небажаними.



Рисунок 4 – підготовка зерна кукурудзи

Змолювання: Кукурудзяне зерно пропускають через млин для збільшення площі його поверхні, що полегшує контакт із ферментами. Кінцевим продуктом цього етапу є кукурудзяне борошно.

Трансформація крохмалю

Желатинування: Під дією тепла крохмальна структура кукурудзи зазнає змін, роблячи її доступною для дії ферментів.

Зволоження рідким середовищем: До подрібненого зерна додають воду та ферменти — альфа-амілазу й бета-амілазу. Це викликає розщеплення крохмалю до декстринів (ланцюги вуглеводів стають коротшими).

Оцукрювання

Фермент глюкоамілаза стимулює руйнування цих декстринів до глюкози. Отриманий розчин називають глюкозним сиропом.

Ферментація

Етапи спиртового бродіння

Процес виробництва етанолу з глюкозного сиропу за допомогою дріжджів (зазвичай *Saccharomyces cerevisiae*) можна стисло описати так:

Ініціація: До глюкозного сиропу додають дріжджі (наприклад, культуру *Saccharomyces cerevisiae*).

Реакція (Ферментація): Дріжджі каталізують перетворення глюкози на етиловий спирт (C_2H_5OH) і діоксид вуглецю (CO_2).

Умови процесу:

Температура: Підтримується в діапазоні $30 - 35^{\circ}C$.

Тривалість: Зазвичай займає від 48 до 72 годин.



Рисунок 5 – ферментація біоетанолу

Дистиляція

Рідина після ферментації (брага) містить спирт у межах 8-12 відсотків за об'ємом. Для екстракції етанолу цю рідину піддають дистиляції.

У результаті цього процесу отримують етанол, насичений водою (водний етанол), з концентрацією близько дев'яносто шість відсотків.

Дегідратація

Для отримання ж чистого, абсолютного спирту (дев'яносто дев'ять цілих п'ять десятих відсотка), використовуються методи зневоднення із застосуванням адсорбентів, як-от цеоліти (молекулярні решета), або інші подібні технології.



Рисунок 6 – дегідратація біоетанолу

Побічні товари

Барда: Рідина, що залишається після дистиляції. Цю рідину можна використовувати як корми для худоби або для утворення біогазу (метану).



Рисунок 7 – Барда (відходи)

Олія з кукурудзяного зерна: Отримується із зародка зерна у процесі первинного оброблення.

Діоксид вуглецю: Це продукт бродіння, що збирається і знаходить застосування у харчовій галузі.

Зберігання та логістика

Отриманий біоетаноль перекачують у сховища, звідки він далі прямує до споживачів (наприклад, для домішування до моторного палива).



Рисунок 8 - транспортування біоетанолу

Ця методика типово застосовується для отримання біоетанолу найвищого гатунку [13]. Кукурудзяне зерно використовується як вихідний матеріал через високий вміст крохмалю, що зумовлює його ідеальну придатність для послідовності ферментації.

РОЗДІЛ 2 ОПИС ТА ПРИЗНАЧЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

2.1. Завдання керування технологічним циклом

Автоматизований комплекс, створений задля нагляду за переробкою кукурудзяного зерна на олію (АСК ТП), має на меті здійснювати моніторинг, точне калібрування та збільшення продуктивності на кожному окремому етапі виробничого ланцюжка [14]. Ключові завдання, покладені на цю систему, можна класифікувати так:

Обробка початкової сировини та оцінка якості зерна

З'ясування властивостей зерна: автоматичне визначення його хімічного складу, а саме вмісту вологи, жирів, білків, крохмалю, а також наявності небажаних домішок.

Керування процесом очищення: автоматичне узгодження темпу подачі сировини та оптимізація видалення сторонніх часток [15].

Етап подрібнення: гарантування потрібної гранулометричної структури шляхом безперервного контролю робочих показників дробильної машини.

Вилучення олії

Використання методу механічного пресування:

Регулювання теплового режиму та сили тиску у гвинтових віджимних апаратах задля досягнення максимального виходу олійного продукту [16].

Постійний контроль рівня гідратації подрібненої маси безпосередньо перед пресуванням. Екстракція за допомогою хімічних реагентів (розчинників):

Контроль температурних значень та точного дозування рідкого екстрагенту (наприклад, гексану). Нагляд за ефективністю вилучення оливи (залишковий вміст у макусі).

Управління стадією випаровування відпрацьованого розчинника з метою його подальшого рециклінгу.

Рафінація отриманої олії

Процес гідратації: автоматизоване введення води та моніторинг змішування для ефективного відділення фосфоліпідних фракцій.

Процес нейтралізації: коригування показника рН під час додавання лужних субстанцій, необхідних для зв'язування вільних жирних кислот.

Процес відбілювання: контроль дозування сорбційних наповнювачів (як-от глини) для усунення кольорових домішок.

Дезодорування: автоматизований нагляд за вакуумними умовами та температурними графіками для успішного видалення летких сполук.

Енергоефективність

Нагляд за споживанням електроенергії, теплоносія (пари) та води на кожній етапі технології.

Автоматичне калібрування процесів теплообміну (як нагрівальних, так і охолоджувальних) для мінімізації витрат ресурсів.

Управління побічними продуктами

Моніторинг вологості та стадії гранулювання вторинного продукту (макухи, що йде на корми).

Екологічний контроль: автоматизована обробка зливних вод та моніторинг газових викидів у межах виробничого майданчика.

Загальний нагляд та аналітичне забезпечення

Система сенсорів: збір експлуатаційних даних у режимі реального часу щодо тиску, температури, рівнів рідин, газового середовища та кінцевої якості продукції.

Інтеграція з SCADA: візуалізація всіх виробничих процесів, система активації аварійних сигналів, архівування накопичених даних.

Оптимізація виходу продукту: застосування методів машинного навчання для динамічної підгонки робочих параметрів з метою збільшення обсягу отриманої олії.

Забезпечення безпеки та захист

Автоматичне припинення функціонування обладнання у разі

виникнення нештатних ситуацій (критичне зростання температури, надмірний тиск, витік розчинника).

Контроль доступу персоналу до керуючих елементів станції.

Технічне супроводження

Прогнозування потенційних відмов вузлів обладнання на основі даних, отриманих від сенсорів та діагностичних моделей.

Система своєчасних нагадувань про необхідність проведення планово-превентивних ремонтних заходів.

Дана система не тільки сприяє впровадженню автоматизованих рішень та збільшенню загальної виробничої пропускної здатності, але й підвищує якість кінцевого товару, знижує витрати ресурсів та мінімізує негативний вплив на довкілля.

2.2 Регулюючі контури технологічного тракту

У рамках системи автоматизованої конверсії кукурудзяної сировини у біоетанол, вбудовані механізми контролю гарантують узгодженість роботи на кожному етапі виробництва [17]. Ці контури охоплюють критичні пункти моніторингу ключових параметрів, управління функціоналом устаткування та дистанційний нагляд за виконанням операцій. Нижче подано основні контури регулювання:

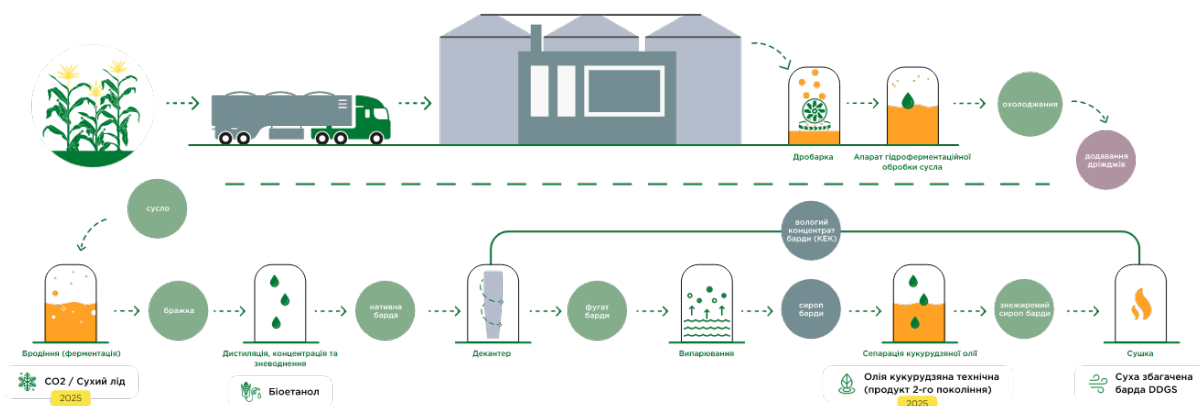


Рисунок 9 – загальна схема переробки зерна в біоетанол

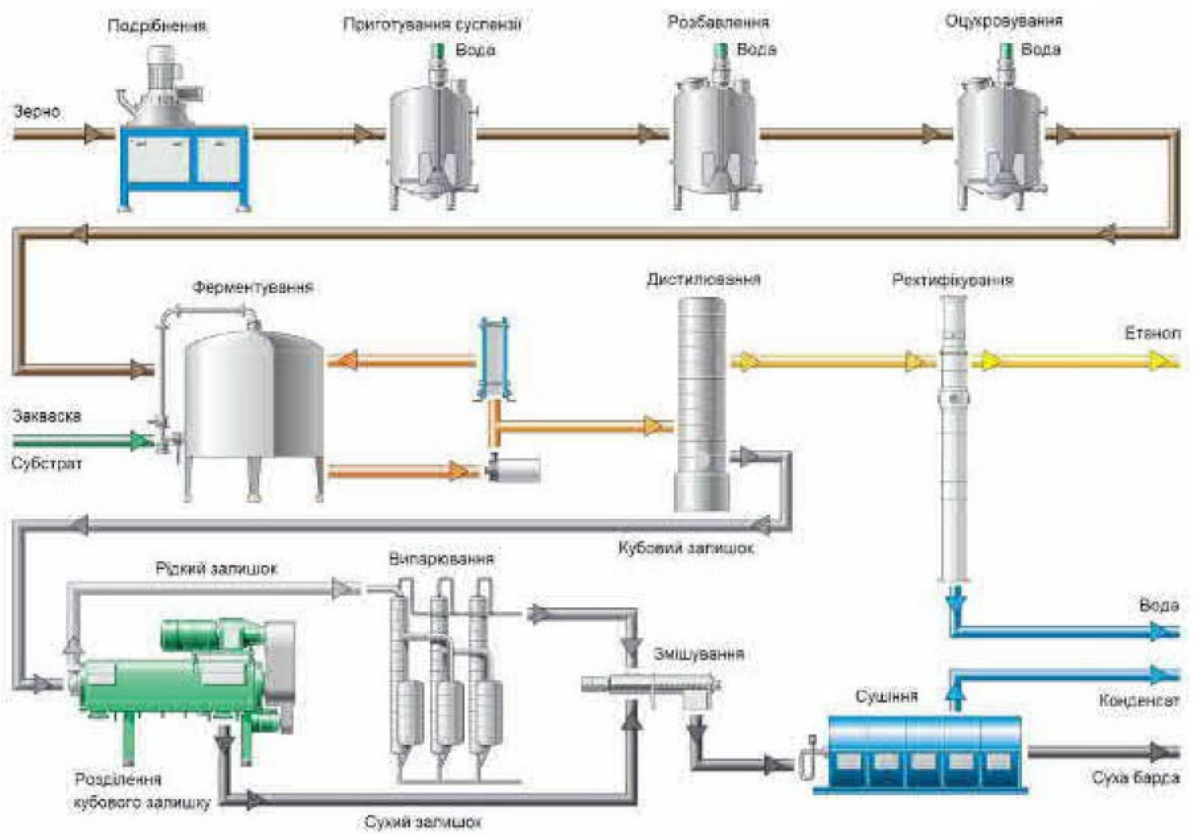


Рисунок 10 – “Сухий” спосіб одержання біоетанолу

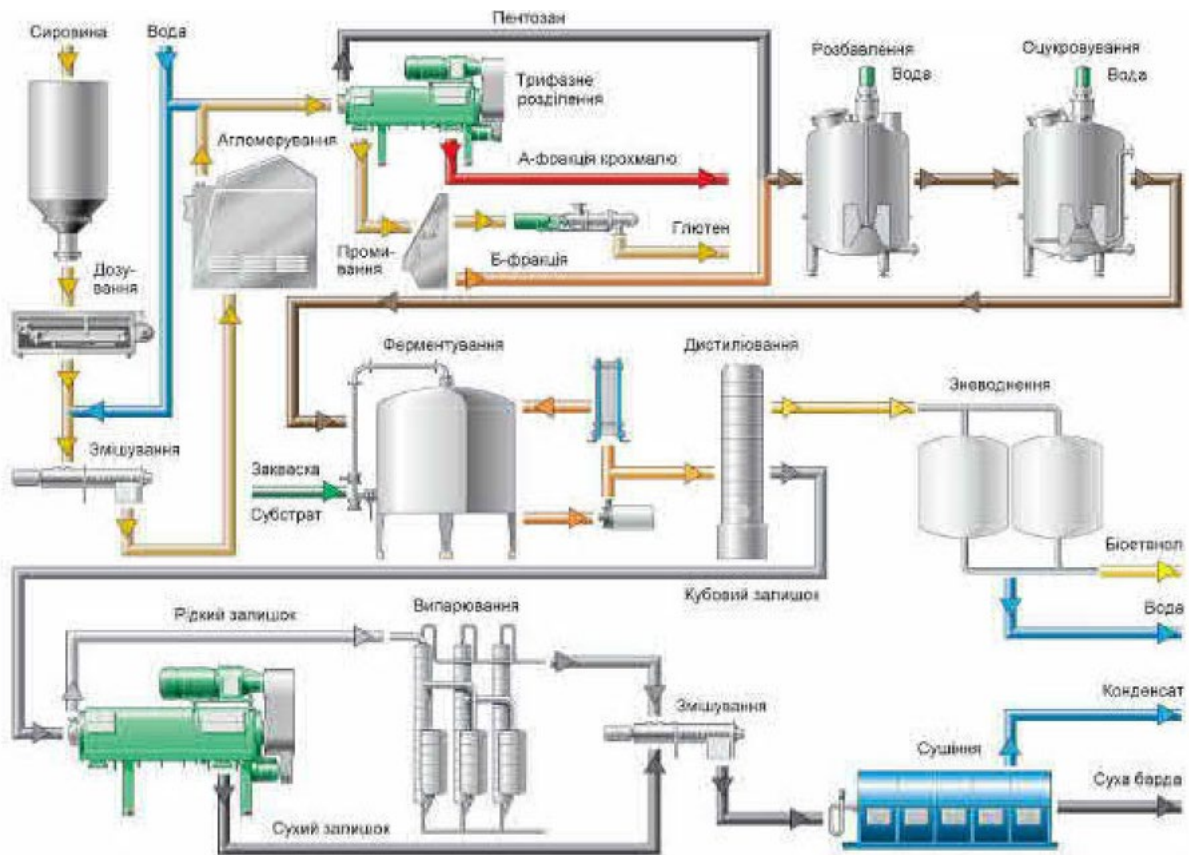


Рисунок 11 – “Мокрий” спосіб одержання біоетанолу

Контур приймання та попередня обробка матеріалу

Керування потоком зерна: Застосування ваговимірювальних комплексів та витратомірів для точної реєстрації обсягу необробленої сировини, що надходить до подрібнювачів [18].

Корекція очищення: Зміна швидкості роботи сепараційних модулів та контроль за видаленням неприпустимих домішок (за допомогою відповідних приладів контролю чистоти).

Управління подрібненням: Наявність датчиків для визначення розміру фракцій та моніторингу продуктивності дробильної установки [19].

Моніторинг вологості вхідної сировини: Використання гігromетричних пристроїв для забезпечення необхідного рівня вологості.

Дозування каталізаторів: Автоматизоване введення α -амілази відповідно до розрахункового обсягу подрібненої маси.

Змішування: Керування швидкістю обертання змішувачів для забезпечення гомогенності отриманого складу.

Контур сахарифікації

Подача Ферментів: Автоматизоване введення глюкоамілази з огляду на поточну концентрацію декстринів.

Стеження за глюкозою: Монтаж аналітичного обладнання для безперервного вимірювання вуглеводного складу [20].

Термічний режим: Підтримка потрібної температури, що є вирішальною для активізації ферментних комплексів.

Контур бродіння

Введення дріжджів: Автоматизоване порційне дозування, враховуючи загальний об'єм цукрового суслу.

Температурний нагляд: Використання термічних сенсорів для підтримання оптимальних умов (у межах 30–35°C).

Регулювання кислотності (pH): Відстеження та корекція показника pH для забезпечення життєздатності мікроорганізмів.

Виведення вуглекислого Газу: Контроль тиску та організований відвід

CO₂ через вентиляційні системи.

Контур ректифікації

Тепловий режим: Застосування температурних перетворювачів у ректифікаційній колоні для ефективного відокремлення етанолу від бродильної рідини.

Нагляд за рівнем рідини: Використання датчиків рівня у колоні для оптимізації процесу дистиляції.

Визначення спиртуозності: Автоматизований аналізатор для фіксації вмісту етанолу у кінцевому продукті.

Теплозабезпечення: Регулювання потужності нагрівального елемента у випарному апараті.

Контур зневоднення

Контроль температури та тиску: Датчики температури та тиску для забезпечення ефективної роботи адсорбційних колон (молекулярних сит).

Вимірювання залишкової вологості: Аналізатори вмісту вологи для досягнення високої чистоти продукту (>99,5% абсолютного етанолу).

Контур управління супутніми продуктами

Утилізація побічних продуктів

- Барда (Послід): Контроль об'єму та рівня барди для подальшої переробки (виробництво кормових добавок або використання в біогазових установках).

- Діоксид Вуглецю (CO₂): Автоматизований збір і зберігання виділеного CO₂ для подальшого застосування.

Контур енергоефективності та моніторинг ресурсів

- Контроль Витрат Пари: Моніторинг споживання пари на основних виробничих етапах (наприклад, термообробка та дистиляція) для оптимізації.

- Енергоспоживання (Електрика): Мережа сенсорів для аналізу та контролю споживання електроенергії промисловим обладнанням.

Тепловідновлення: Автоматизація процесів теплообміну з метою

мінімізації втрат тепла.

Загальний контур нагляду та системної оптимізації

SCADA-Система: Централізований керуючий вузол із графічною візуалізацією усіх процесів на єдиному інтерфейсі взаємодії.

Алгоритми оптимізації: Впровадження математичних моделей для точного налаштування робочих параметрів.

Система аварійного захисту: Автоматична реакція на вихід за встановлені межі безпеки (перегрів, надмірний тиск, витоки).

Завдяки впровадженню цих регулюючих контурів забезпечується стабільність технологічного циклу, знижується потреба у ресурсах та підвищується якість виготовленого біоетанолу [21].

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1. Формалізація математичного опису

Для розробки математичної моделі системи автоматизованого керування процесом перетворення кукурудзяної крупи на біоетанол необхідно скрупульозно зафіксувати ключові фізико-хімічні зміни, які є рушійними силами цього процесу [22]. Цей опис охоплює усі критичні стадії технологічного ланцюга — від обробки початкової сировини, через бродіння, поділ сумішей на фракції, до стадії осушення — і формалізується через систему диференціальних рівнянь, рівняння балансу маси та енергії, відповідні кінетичні залежності, а також принципи оптимального регулювання [23].

Моделювання стадії підготовки початкового матеріалу

Даний етап передбачає виконання подрібнення, внесення необхідної кількості вологи та теплової обробки, що критично важливо для забезпечення розчинності крохмалю.

- Рівняння балансу матерії для вхідної сировини:

$$\frac{dM}{dt} = -F_{out}$$

M — маса матерії у структурі, F_{out} - швидкість винесення матерії (зерна) зерна

- Тепловий баланс під час нагрівання:

$$C_p \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

де C_p — теплоємність зерна, T — температура, Q_{in} —затрачена теплота, Q_{out} — витрати теплоти.

- Кінематичний аналіз розкладання крохмалю:

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 S$$

де S — вміст крохмалізованої матерії, k_1 — швидкість розкладання Ферментативний процес

Швидкість, з якою дріжджі діють, спричиняючи хімічне перетворення глюкози в етиловий спирт та вуглекислий газ, є суттю ферментації.

Рівняння, яке ілюструє відповідність речовин для глюкози:

$$\frac{dG}{dt} = -\mu X \frac{G}{K_8 + G}$$

S — це концентрація глюкози,

X — концентрація дріжджових клітин,

μ — найвища швидкість, з якою можуть розмножуватися дріжджі,

K_8 — показник насичення.

$$\frac{dX}{dt} = Y_x \mu X \frac{G}{K_8 + G} - k_d X$$

Рівняння балансу для дріжджів:

де:

Y_x — це вихід етанолу із глюкози,

k_d — це швидкість вибуття клітин дріжджів.

Рівняння матеріального балансу для етанолу:

$$\frac{dE}{dt} = Y_p \mu X \frac{G}{K_8 + G}$$

де E — концентрація етанолу,

Y_p — вихід етанолу на глюкозу

Процес ректифікації можна зобразити за допомогою рівнянь теплового та масового балансу в ректифікаційній колоні.

$$\frac{dC_E}{dt} = F_{in}C_{in} - F_{out}C_E$$

де:

C_E — Кінцева концентрація етанолу (або вміст етанолу на виході/в кінцевому продукті).

F_{in} — Вхідний потік (масова або мольна швидкість подачі продукту/сировини на початку процесу).

F_{out} — Вихідний потік (масова або мольна швидкість відведення продукту/суміші наприкінці процесу).

C_{in} — Початкова концентрація етанолу (або вміст етанолу у сировині/на вході).

$$Q_{in} = \lambda F_{in} - Q_{loss}$$

де λ — теплота (ентальпія) випаровування речовини (етанолу), що виступає ключовим параметром у рівнянні балансу вологості/енергії..

У моделі дегідратації на молекулярних ситах, коли говорять про Баланс вологості (або, що точніше, Баланс маси/енергії), теплота випаровування (λ) є критично важливою, оскільки випаровування етанолу (або іншого адсорбату) вимагає енергії, і це безпосередньо впливає на температурний режим та кількість видаленої вологи/етанолу з сита. Це тепло λ часто входить до енергетичного балансу (а не просто "балансу вологості").

Баланс вологості:

$$\frac{dW}{dt} = -k_2 W$$

W позначає концентрацію води в етанолі.

k_2 — це коефіцієнт швидкості адсорбції.

Критерії Оптимізації

Головна мета керування полягає у максимізації виходу етанолу (кінцевого продукту) при одночасному мінімізації енерговитрат і забезпеченні

необхідної якості продукту [24].

Функція оптимізації (цільова функція) може бути сформульована на основі цих критеріїв.

$$J = \max(E_{out} - \alpha Q - \beta F_{loss})$$

де:

E_{out} - Вихід етанолу: Це кількість (або об'єм/маса) кінцевого продукту — етанолу, отримана в результаті процесу.

Q - Енергетичні витрати: Це загальна енергія (теплова, електрична), що споживається для здійснення процесу виробництва.

F_{loss} - Втрати сировини: Це частина (або маса/об'єм) початкової сировини, яка була безповоротно втрачена (не перетворилася на цільовий продукт чи побічні продукти) під час процесу.

α, β - Вагові коефіцієнти: Це числові параметри, які визначають відносну важливість (або вплив/внесок) відповідних змінних у загальному розрахунку.

Керуючий контур:

Вхідна інформація:

- о Задана норма завантаження зерна, порційне введення ферментних препаратів, рівень теплового впливу, показник тиску, концентрація глюкози.

Вихідна інформація:

- о Ступінь насиченості етанолом, об'єми супутніх продуктів (діоксид вуглецю, вичерпаної сировини), необхідна кількість енергоносіїв.

Управляючі компоненти:

- о ПД-регулятори, які підтримують усталені значення температури, тиску та рівня кислотності (рН).

- о Блок оптимізації, призначений для внесення коректив у швидкість подачі початкових матеріалів та потужність термічного впливу.

3.2. Математичні моделі передачі

Математичні моделі передачі є основним інструментом аналізу та проектування систем автоматичного керування технологічними етапами [25]. Щодо контуру авторегулювання процесу синтезу біоетанолу з кукурудзи, ці моделі можуть бути отримані для ключових керуючих вузлів. Нижче наведено приклади таких моделей для основних етапів виробничого циклу [26].

Модель передачі для контролю температури (Стадія клейстеризації крохмалю)

Процес клейстеризації стартує при зростанні температури. Модель керованого об'єкта цілком доцільно представити у вигляді моделі початкового порядку:

$$W_T(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{K_T}{\tau_T s + 1}$$

де:

$T(s)$ — температура на виході (Лапласове перетворення),

$Q(s)$ — вхідна теплова енергія (управляючий сигнал),

K_T — коефіцієнт підсилення системи (залежить від теплоємності),

τ_T — стала часу нагріву.

Передаточні моделі технологічних етапів виробництва біоетанолу

Дистиляційний апарат

Динаміку процесу дистиляції можна описати моделлю першого порядку з урахуванням часової затримки [27]. Це пояснюється тим, що концентрація етанолу у вихідному потоці прямо залежить від швидкості надходження браги у систему [32].

Передаточна функція має вигляд:

$$W_D(s) = \frac{C_E(s)}{F_{in}(s)} = \frac{K_D e^{-s\theta}}{\tau_D s + 1}$$

- $C_E(s)$ — вихідна концентрація етанолу;

- $F_{in}(s)$ — вхідний потік браги;
 - K_D — коефіцієнт підсилення, що характеризує ефективність дистиляції;
 - τ_D — стала часу, яка визначає інерційність процесу;
 - θ — час запізнення, що відображає фізичну затримку реакції системи.
- Дегідратація (видалення води на молекулярних ситах)
- Етап дегідратації можна представити як інерційну систему першого порядку.

$$W_W(s) = \frac{W_{out}(s)}{W_{in}(s)} = \frac{K_W}{\tau_W s + 1}$$

- W_{out} — концентрація води на виході;
- W_{in} — концентрація води на вході;
- K_W — коефіцієнт ефективності процесу адсорбції;
- τ_W — стала часу, яка визначає швидкість реакції системи.

Подача зерна (сировинний контур)

Механізм транспортування зерна до системи характеризується інерційною ланкою першого порядку.

$$W_M(s) = \frac{M(s)}{F_{in}(s)} = \frac{K_M}{\tau_M s + 1}$$

- $M(s)$ — маса зерна у системі;
- $F_{in}(s)$ — швидкість подачі;
- K_M — коефіцієнт підсилення, що показує ефективність транспортування;
- τ_M — стала часу, яка визначає інерційність процесу подачі.

Узагальнена структурна схема

Загальний технологічний процес можна подати як послідовне з'єднання передатних функцій для кожного етапу:

$$W_{\text{система}}(s) = W_T(s) \cdot W_F(s) \cdot W_D(s) \cdot W_W(s)$$

У такій моделі враховується взаємний вплив усіх підсистем: підготовки сировини, ферментації, дистиляції та дегідратації. Це дозволяє комплексно оцінити інерційність, часові затримки та взаємозалежність між окремими етапами [29].

Контур керування

Для стабілізації процесів і підтримання оптимальних параметрів застосовуються ПІД-регулятори або інші алгоритми автоматичного керування [28].

Передаточна функція ПІД-регулятора:

- Kp — пропорційний коефіцієнт;
- Ki — інтегральний коефіцієнт;
- Kd — диференціальний коефіцієнт.

Замкнена система з ПІД-регулятором і об'єктом керування описується передатною функцією:

$$W_{\text{замкнена}}(s) = \frac{W_{\text{об}}(s) \cdot W_{\text{PID}}(s)}{1 + W_{\text{об}}(s) \cdot W_{\text{PID}}(s)}$$

де $W_{\text{об}}(s)$ — передатна функція об'єкта керування.

Узагальнення

Використання передатних функцій для кожного етапу технологічного процесу дає змогу дослідити його динамічні характеристики та розробити ефективну систему автоматичного регулювання. Це дозволяє досягти стабільності, зменшити вплив інерційності та затримок, а також оптимізувати виробництво біоетанолу [32].

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Контрольний апарат (регулятор) є ключовим елементом для забезпечення стабільності, максимальної ефективності та оптимального функціонування технологічного процесу [30]. Його головна функція — підтримувати необхідні параметри системи у заданих межах, одночасно мінімізуючи похибки та компенсуючи впливи ззовні.

4.1 Основи теорії

Динаміка технологічних процесів у виробництві біоетанолу

Завантаження зерна кукурудзи чи іншої первинної сировини у виробничу систему з автоматичним регулюванням не відбувається миттєво — завжди існує певне запізнення, що зумовлене інерційністю обладнання [31]. До таких механізмів належать транспортери, дозатори та шнекові системи. Їхня поведінка може бути описана моделлю першого порядку, яка враховує фізичну затримку реакції на зміну керуючого сигналу.

Передавальна функція, що відображає динаміку подачі матеріалу, має вигляд [32]:

$$W_M(s) = \frac{K_M}{\tau_M s + 1}$$

Коефіцієнт підсилення K_M : показує, наскільки зміна швидкості обертання транспортера чи дозатора впливає на кількість поданої сировини. Вимірюється у кг/с або об/хв. Для стрічкових конвеєрів і шнекових живильників типовий діапазон становить 0.5–2 кг/с/об/хв.

Стала часу τ_M : визначає, за який проміжок часу подача досягає 63% нового рівня після зміни сигналу. Для механізмів подачі характерні значення 5–20 секунд.

Комплексна змінна s : оператор Лапласа, що застосовується для аналізу систем у часовій та частотній областях.

Приклад: для шнекового транспортера $K_M=1.5$ кг/с/об/хв, а $\tau_M=10$ с. Це означає, що збільшення швидкості на 1 об/хв підвищує подачу на 1.5 кг/с, а система потребує близько 10 секунд, щоб досягти стабільного режиму.

$$W_M(s) = \frac{K_M}{\tau_M s + 1}$$

Температурний контроль (желатинізація крохмалю)

На етапі нагрівання зерна до необхідної температури запускається процес руйнування структури крохмалю, що є критично важливим для подальшої ферментації [33]. Динаміка цього процесу описується інерційною ланкою першого порядку.

$$W_T(s) = \frac{K_T}{\tau_T s + 1}$$

Коефіцієнт K_T : показує, наскільки зміна потужності нагріву впливає на температуру системи. Одиниці виміру — °C/Вт.

Стала часу τ_T : визначає інерційність нагрівального процесу. Для емностей чи трубчастих апаратів значення коливається від 30 до 120 секунд.

Комплексна змінна s : використовується для аналізу у часовій та частотній області.

Наприклад, при $K_T=0.1$ °C/Вт і $\tau_T=60$ с система реагує помірно швидко:

$$W_T(s) = \frac{0.1}{60s + 1}$$

температура досягає 63% нового рівня приблизно за хвилину.

Ферментація є біохімічним процесом, де глюкоза, отримана після гідролізу крохмалю, перетворюється на етанол і CO_2 під дією дріжджів. Динаміка цього етапу часто описується моделлю другого порядку, яка враховує інерційність та часові затримки.

$$W_F(s) = \frac{E(s)}{G(s)} = \frac{K_F}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1}$$

Коефіцієнт KF: відображає вихід етанолу на одиницю зміни концентрації цукрів. Типові значення — 0.8–0.95.

Стала часу τ : характеризує інерційність процесу, може вимірюватися у секундах або годинах.

Коефіцієнт демпфування ξ : показує ступінь згладження коливань. Для ферментації характерні значення 0.6–0.8.

Приклад: $KF=0.9$, $\tau \approx 6$ год, $\xi \approx 0.7$. Це означає, що близько 90% цукрів перетворюється на етанол, а процес є стабільним із мінімальними коливаннями.

$$\tau = \sqrt{\tau_1 * \tau_2} = \sqrt{(2 - 5) * (10 - 15)} \text{ год.}$$

Дистиляційна стадія характеризується тепловою інерційністю та масообмінними процесами, що створюють часові затримки. Модель описується інерційною ланкою з чистим запізненням.

$$W_F(s) = \frac{0.9}{36s^2 + 8.4s + 1}$$

Коефіцієнт KD: показує ефективність реакції системи на зміну теплового потоку. Типові значення — 0.8–1.2.

Стала часу τ_D : визначає інерційність колони, зазвичай 5–20 хв.

Час запізнення θ : відображає фізичну затримку реакції, типовий діапазон — 1–5 хв.

Наприклад, $KD=1$, $\tau_D=10$ хв, $\theta=3$ хв. Це означає, що система реагує ефективно, але з помітною затримкою.

На завершальному етапі відбувається видалення залишкової вологи шляхом адсорбції. Процес можна описати моделлю першого порядку.

$$W_W(s) = \frac{K_W}{\tau_W s + 1}$$

Коефіцієнт K_W : показує ефективність досягнення необхідного рівня вологості, типовий приклад — 0.9.

Стала часу τW : визначає швидкість реакції системи, зазвичай близько 5 хв.

$$W_W(s) = \frac{0.9}{5s+1}$$

При ступінчастій зміні параметрів система досягає 63% нового рівня за час τW , а остаточне значення визначається коефіцієнтом KW . Зменшення τW прискорює процес, збільшення — робить його більш інерційним.

Кожен етап виробництва біоетанолу — від подачі зерна до дегідратації — має власну динаміку, яку можна описати математичними моделями різного порядку. Використання передавальних функцій дозволяє не лише зрозуміти фізичну природу процесів, а й створити ефективні системи автоматичного регулювання, що забезпечують стабільність і високу якість кінцевого продукту.

4.2 Параметричне відтворення роботи системи

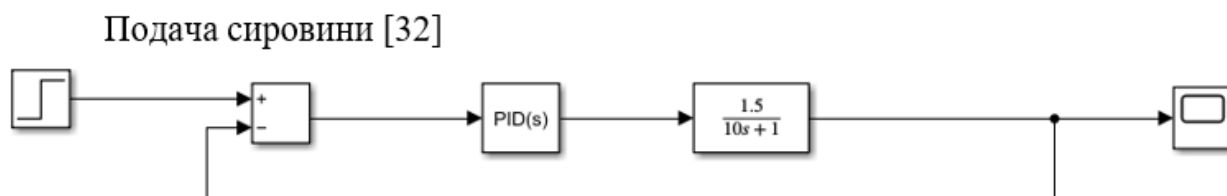


Рисунок 9 – модель подачі сировини в Matlab Simulink

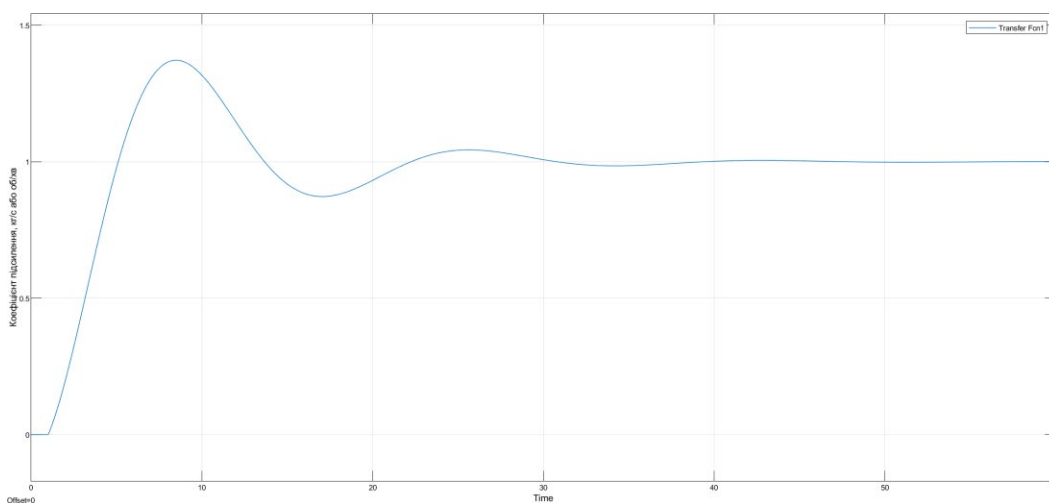


Рисунок 10 – графік перехідного процесу подачі сировини в блоці Step

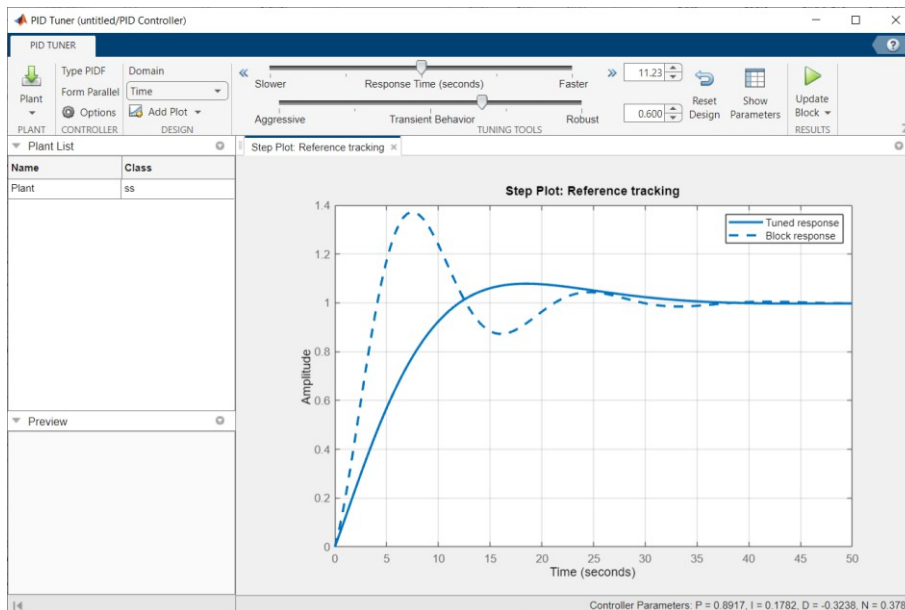


Рисунок 11 – налаштування перехідного процесу в блоці PID за допомогою функції Tune

Block Parameters: PID Controller

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings
 Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 0.891720209196735

Integral (I): 0.17823683109595 Use I*Ts (optimal for codegen)

Derivative (D): -0.323839277397867

Filter coefficient (N): 0.378094165182863 Use filtered derivative

Automated tuning
 Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

Рисунок 12 – параметри налаштованого блоку PID

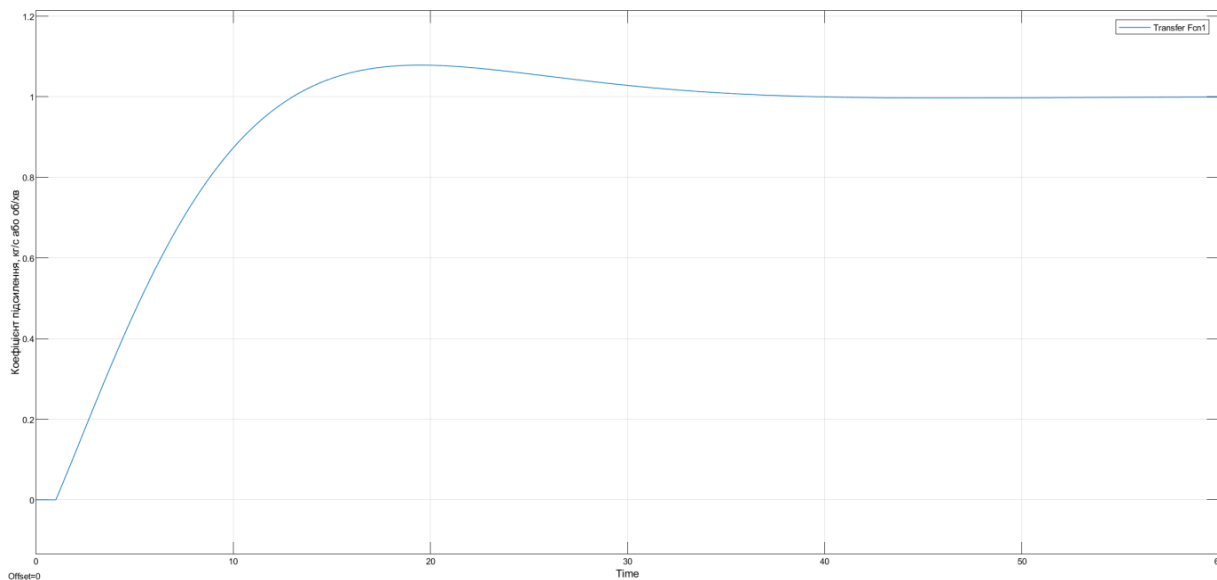


Рисунок 13 – графік перехідного процесу подачі сировини після налаштування PID регулятора

Температурний контроль(желатинізація крохмалю)

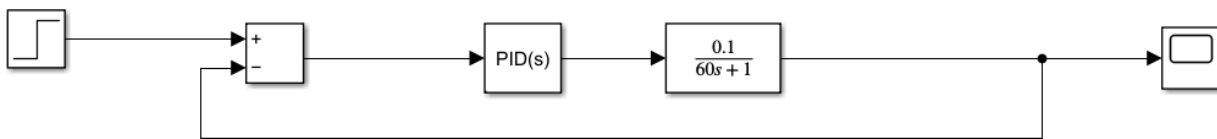


Рисунок 14 – модель желатинізацію крохмалю в Matlab Simulink

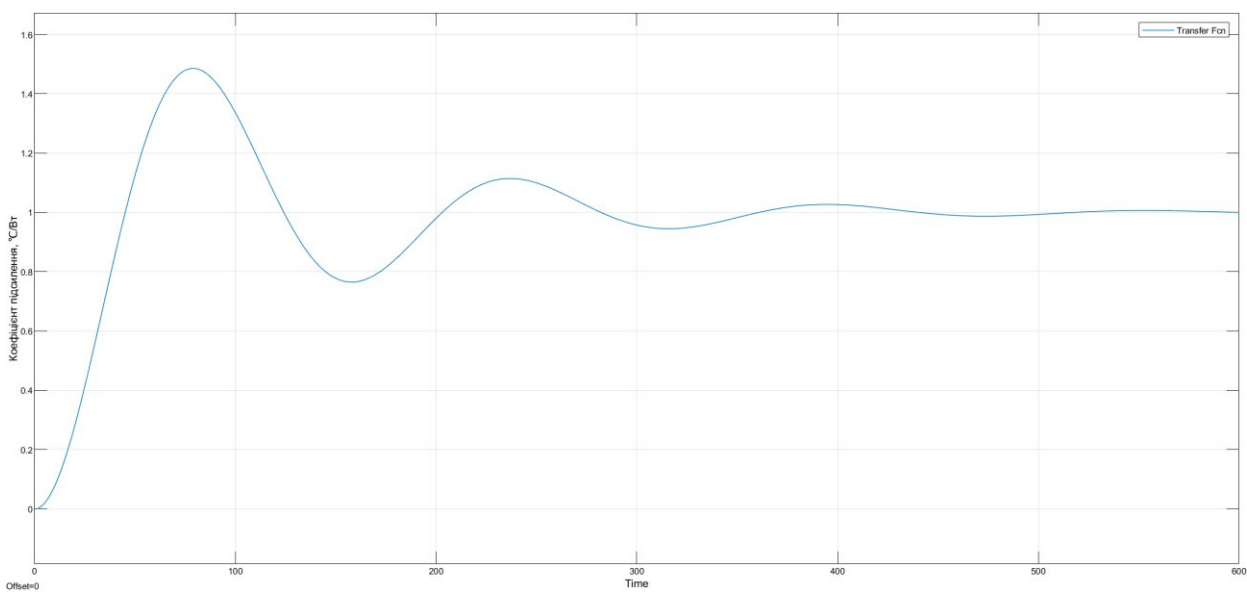


Рисунок 15 – графік перехідного процесу до налаштування регулятора

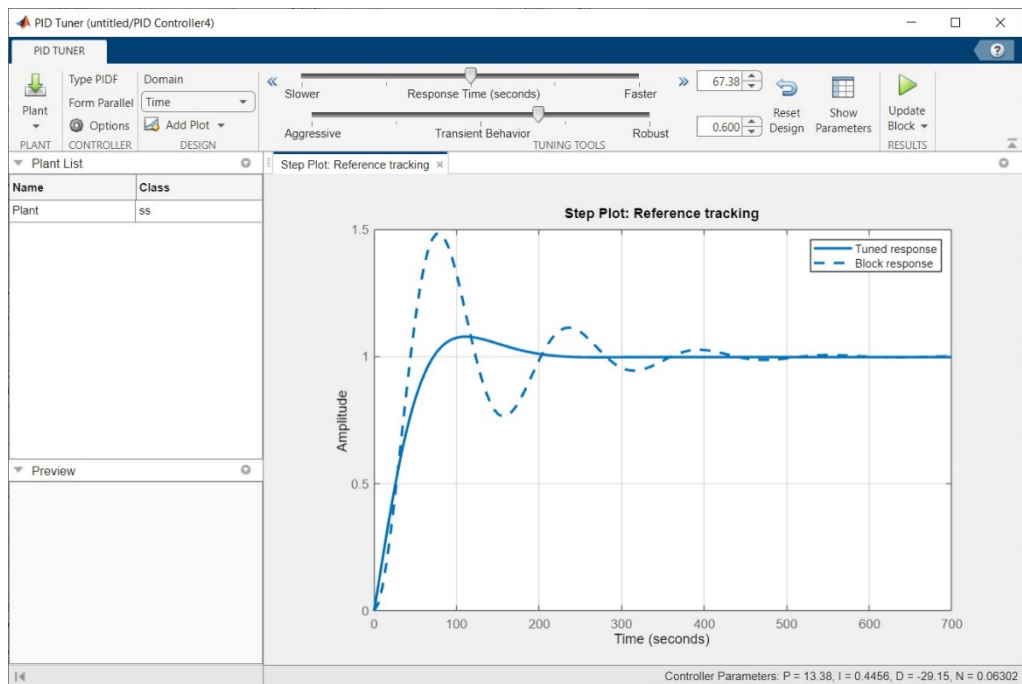


Рисунок 16 – налаштування PID регулятора для процесу желатинізації

Block Parameters: PID Controller4

Time domain:

Continuous-time

Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 13.375803137951

Integral (I): 0.445592077739876 Use I*Ts (optimal for codegen)

Derivative (D): -29.145534965808 Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 0.0630156941971438 Use filtered derivative

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App)

Enable zero-crossing detection

Рисунок 17 – параметри налаштованого регулятора

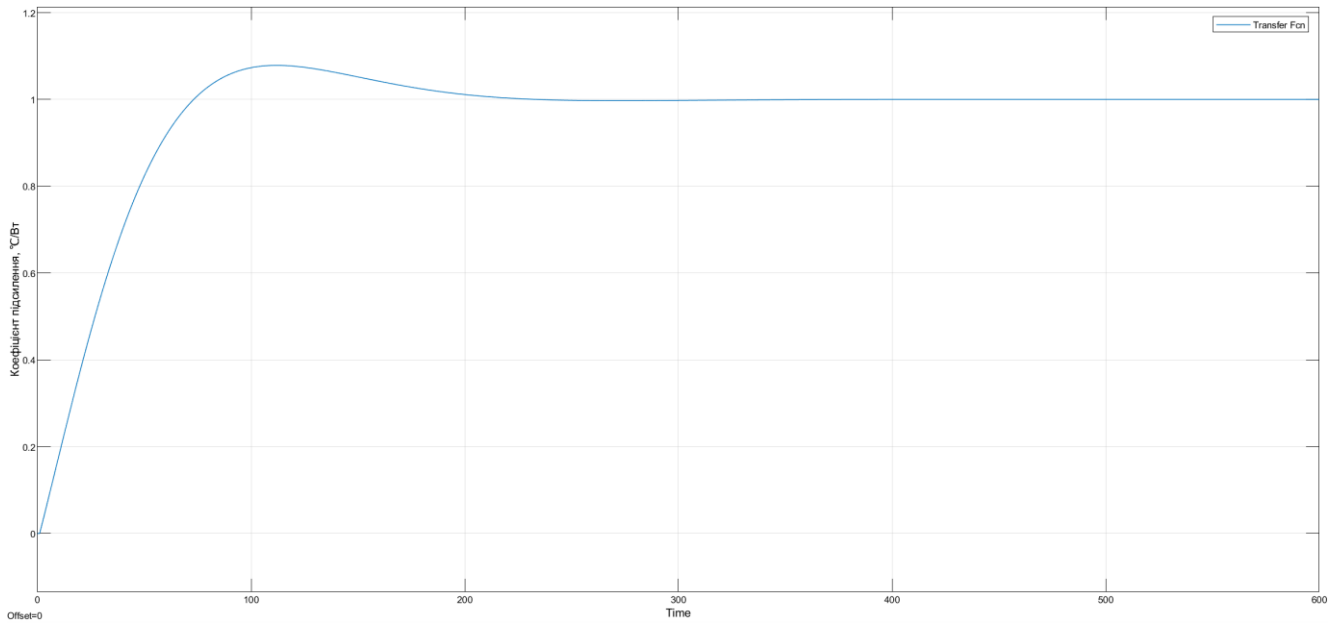


Рисунок 18 – графік перехідного процесу желатинізації крохмалю після налаштування регулятора

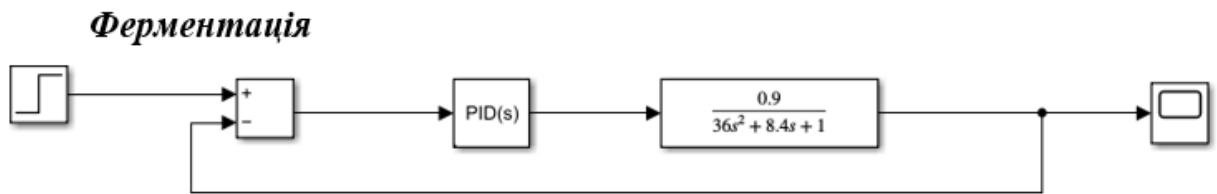


Рисунок 19 – модель процесу ферментації в Matlab Simulink

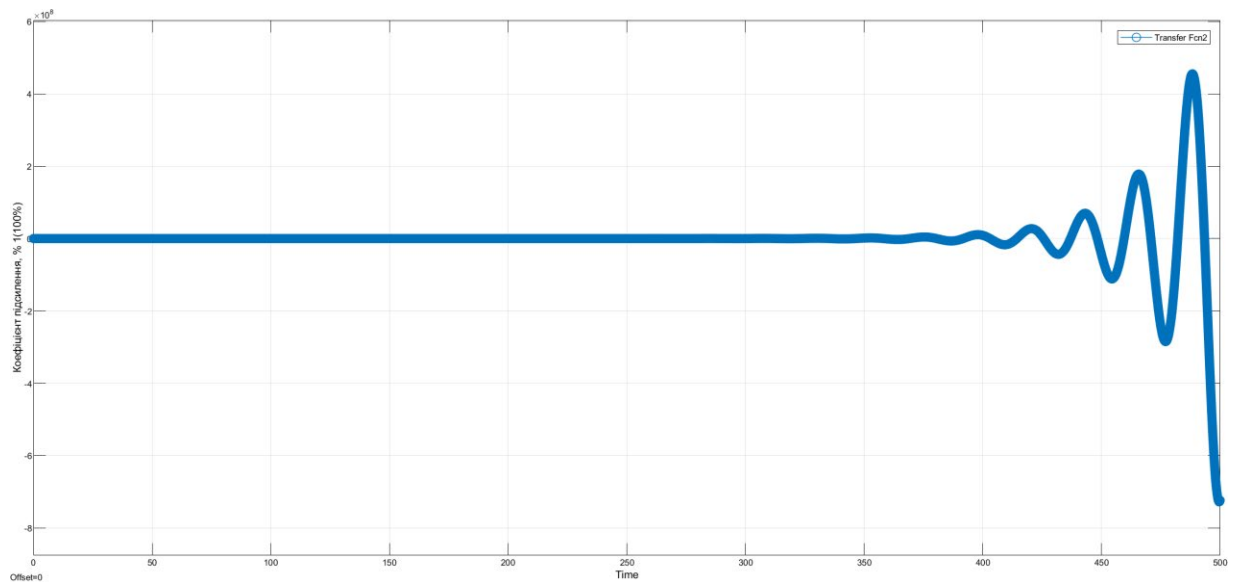


Рисунок 20 – графік перехідного процесу до налаштування регулятора

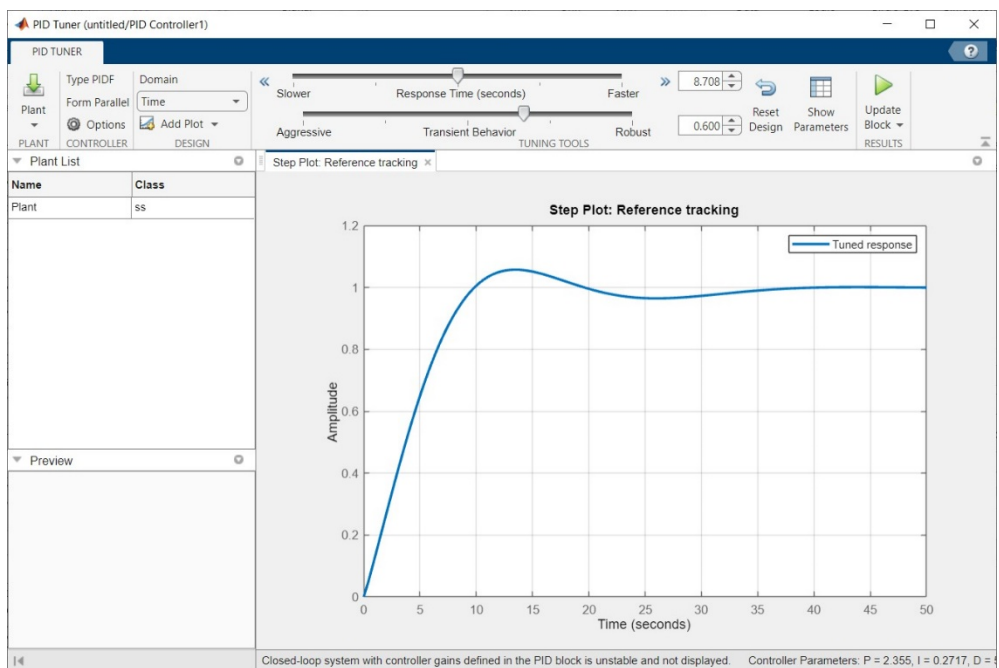


Рисунок 21 – налаштування регулятора

The screenshot shows the "Block Parameters: PID Controller1" dialog box. It is configured for a "Continuous-time" system. The "Compensator formula" is displayed as
$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$
. The "Controller parameters" section includes: Source: internal; Proportional (P): 2.35464679564074; Integral (I): 0.271666284964239; Derivative (D): 5.0574239708352; Filter coefficient (N): 26.2475909499521. The "Automated tuning" section shows the method set to "Transfer Function Based (PID Tuner App)". The "Enable zero-crossing detection" checkbox is checked. The dialog has "OK", "Cancel", "Help", and "Apply" buttons at the bottom.

Рисунок 22 – параметри налаштованого регулятора

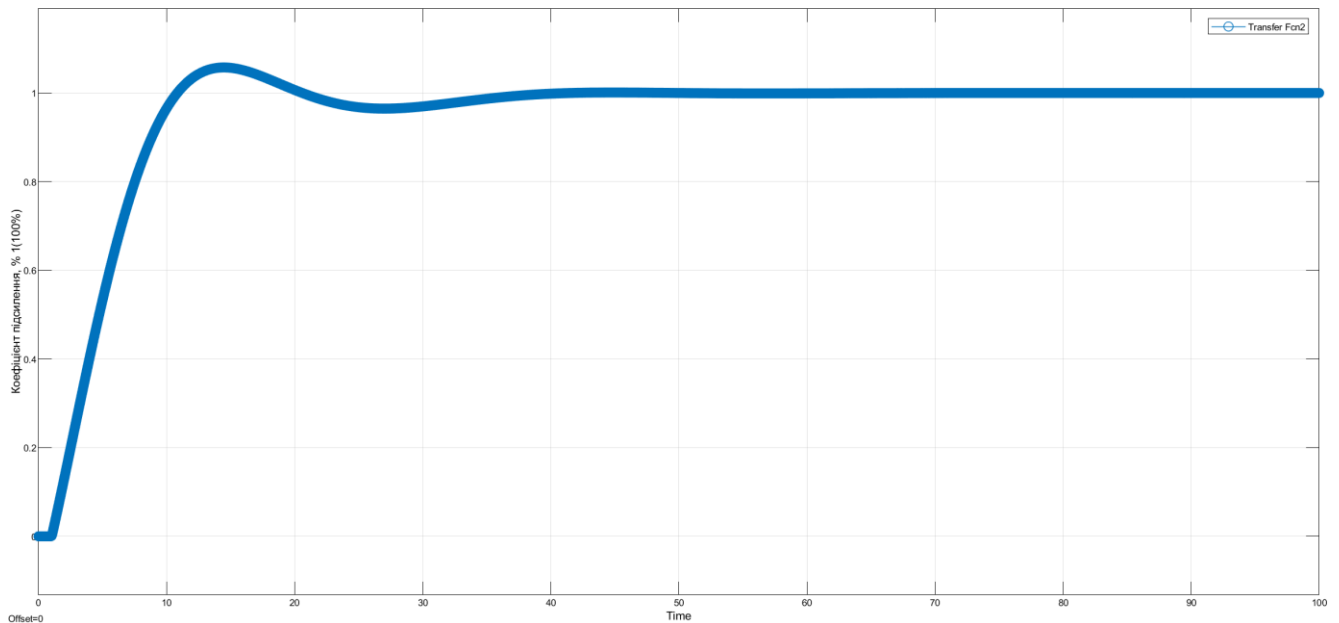


Рисунок 23 – графік перехідного процесу ферментації після налаштування PID регулятора

Дистиляція



Рисунок 24 – модель процесу дистиляції в Matlab Simulink

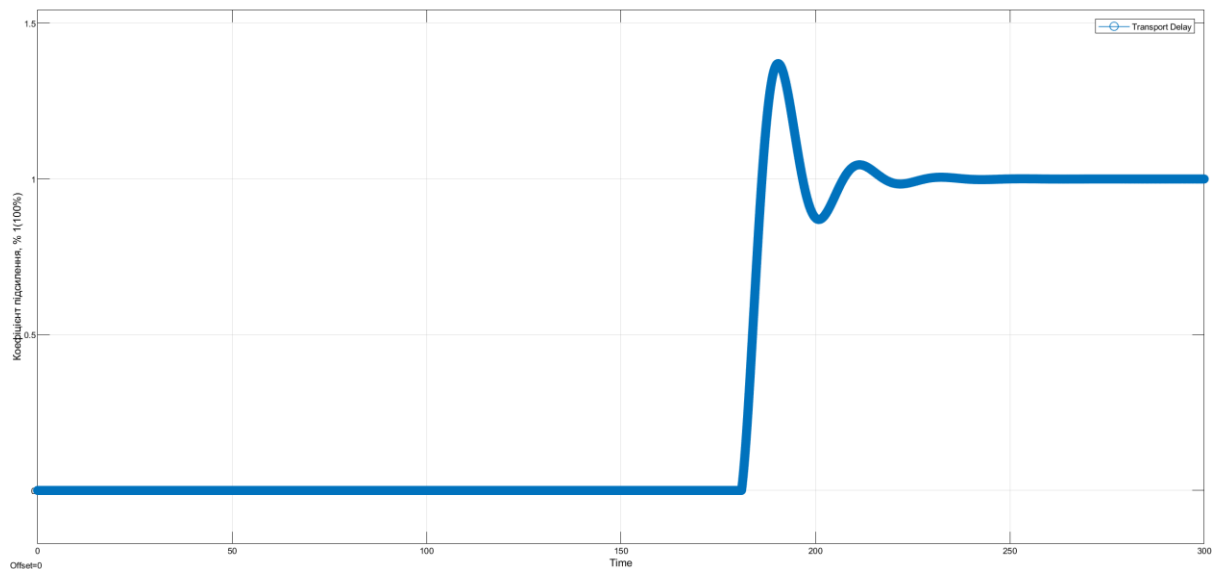


Рисунок 25 – графік перехідного процесу до налаштування регулятора

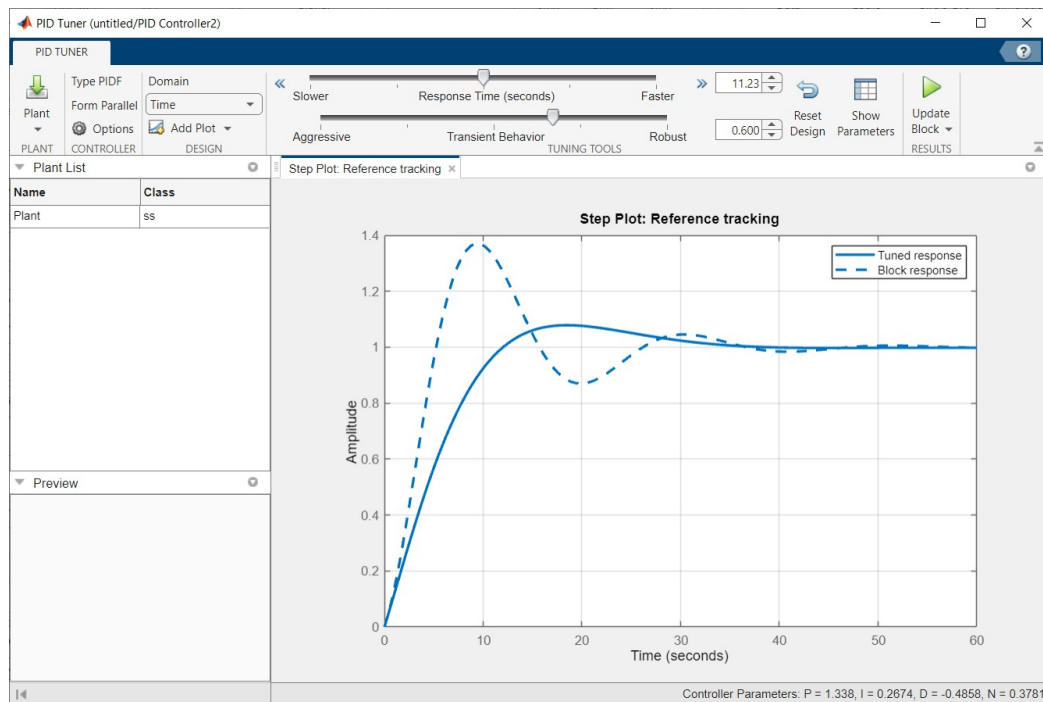


Рисунок 26 – налаштування регулятора

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings
 Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters
 Source: internal
 Proportional (P): 1.3375803137951
 Integral (I): 0.267355246643925 Use I*Ts (optimal for codegen)
 Derivative (D): -0.4857589160968
 Filter coefficient (N): 0.378094165182863 Use filtered derivative

Automated tuning
 Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App)

Enable zero-crossing detection

Рисунок 27 – параметри налаштованого регулятора

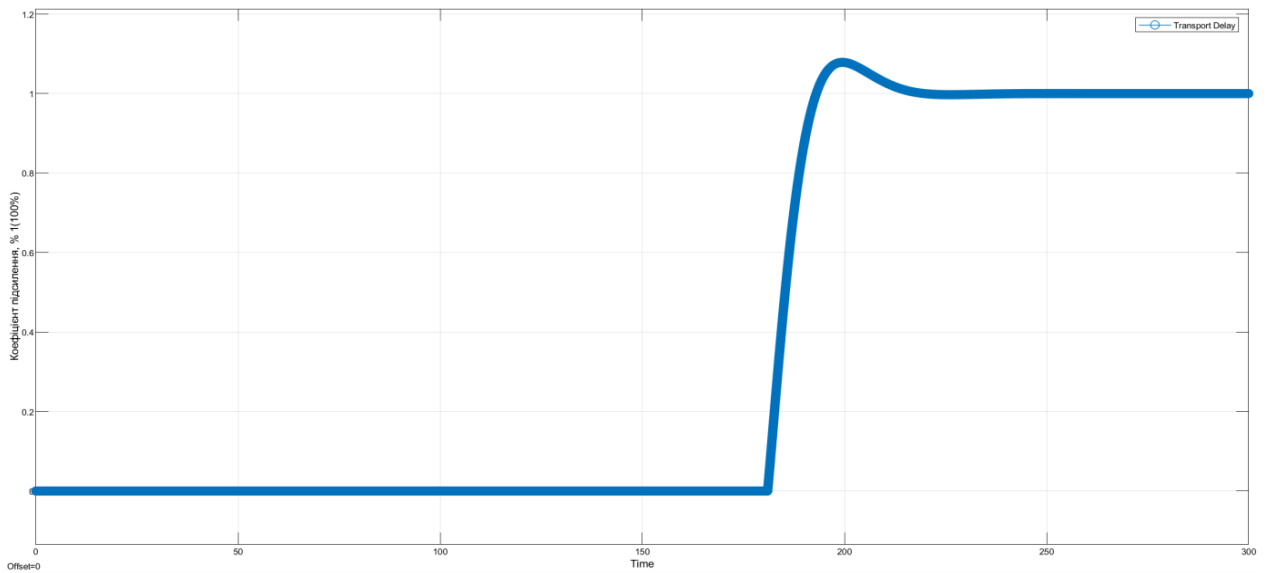


Рисунок 28 – графік перехідного процесу після налаштування регулятора

Дегідратація



Рисунок 29 – модель процесу дегідратації в Matlab Simulink

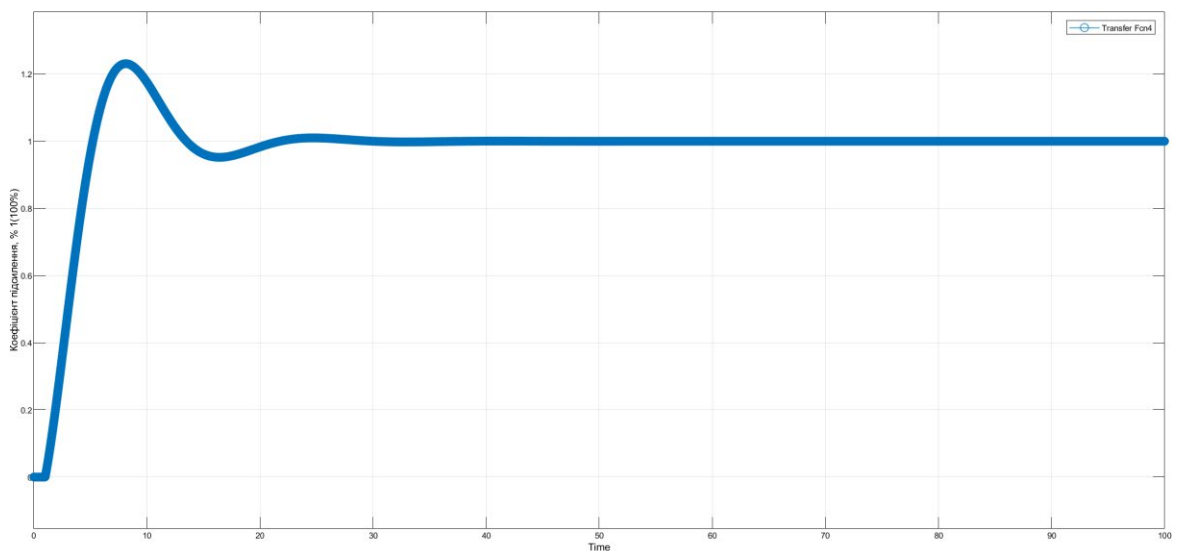


Рисунок 30 – графік перехідного процесу дегідратації до налаштування регулятора

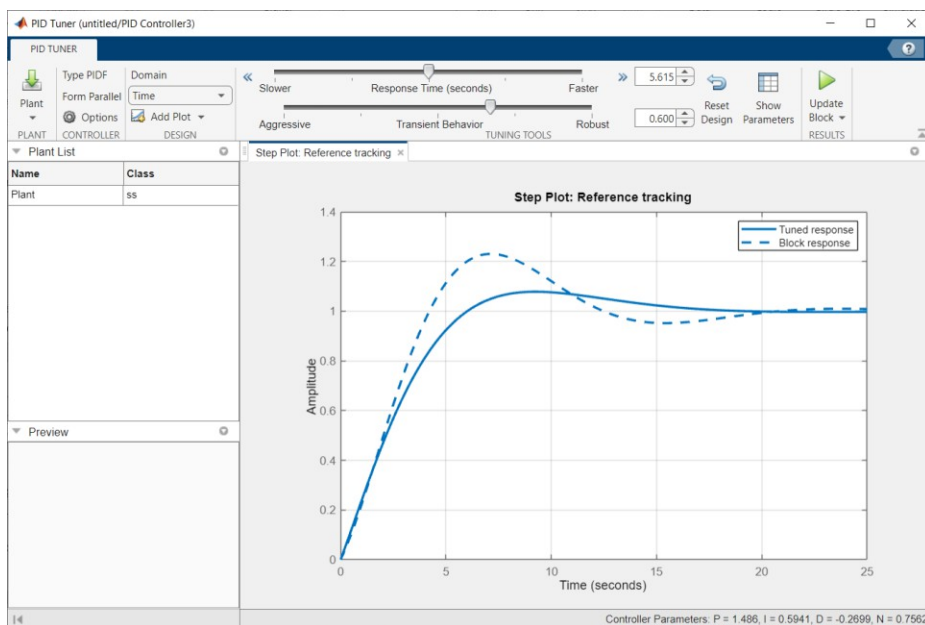


Рисунок 31 – налаштування регулятора

Block Parameters: PID Controller3

Time domain:

Continuous-time

Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 1.48620034866123

Integral (I): 0.594122770319834 Use I*Ts (optimal for codegen)

Derivative (D): -0.269866064498221

Filter coefficient (N): 0.756188330365725 Use filtered derivative

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App)

Enable zero-crossing detection

Рисунок 32 – параметри налаштованого регулятора

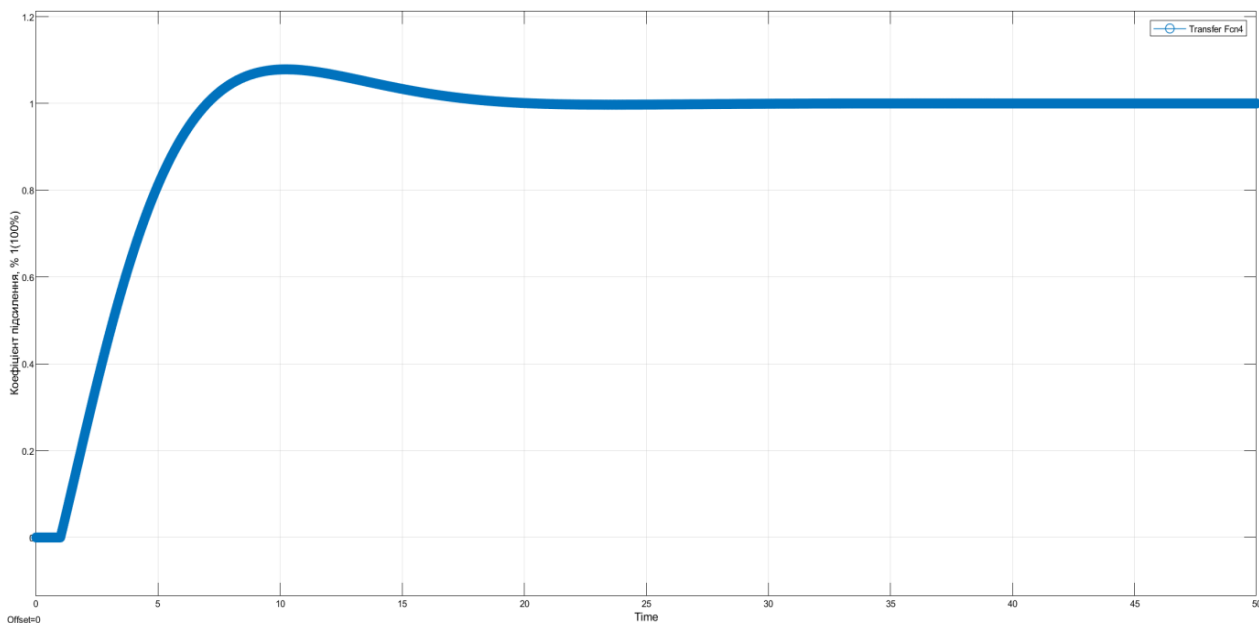


Рисунок 33 – графік перехідного процесу дегідратації після налаштування PID регулятора

Контури керування автоматизованої системи переробки зерна кукурудзи в біоетанол.

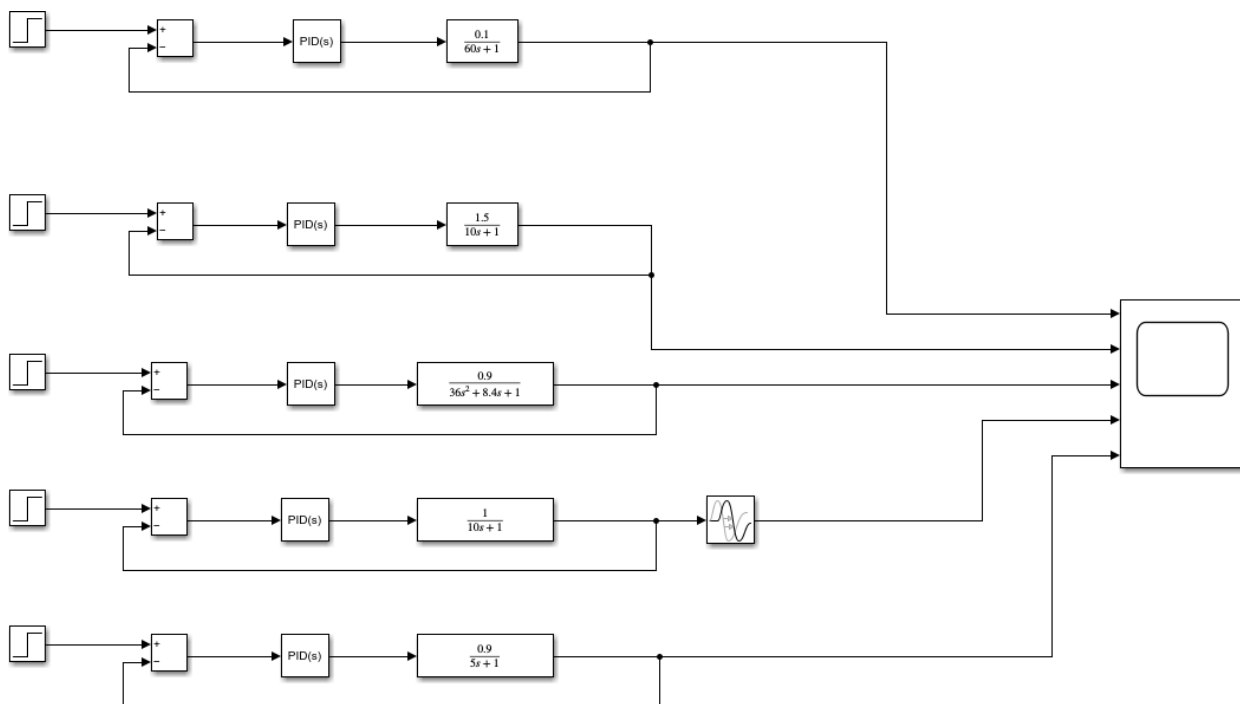


Рисунок 34 – модель контурів керування в Matlab Simulink

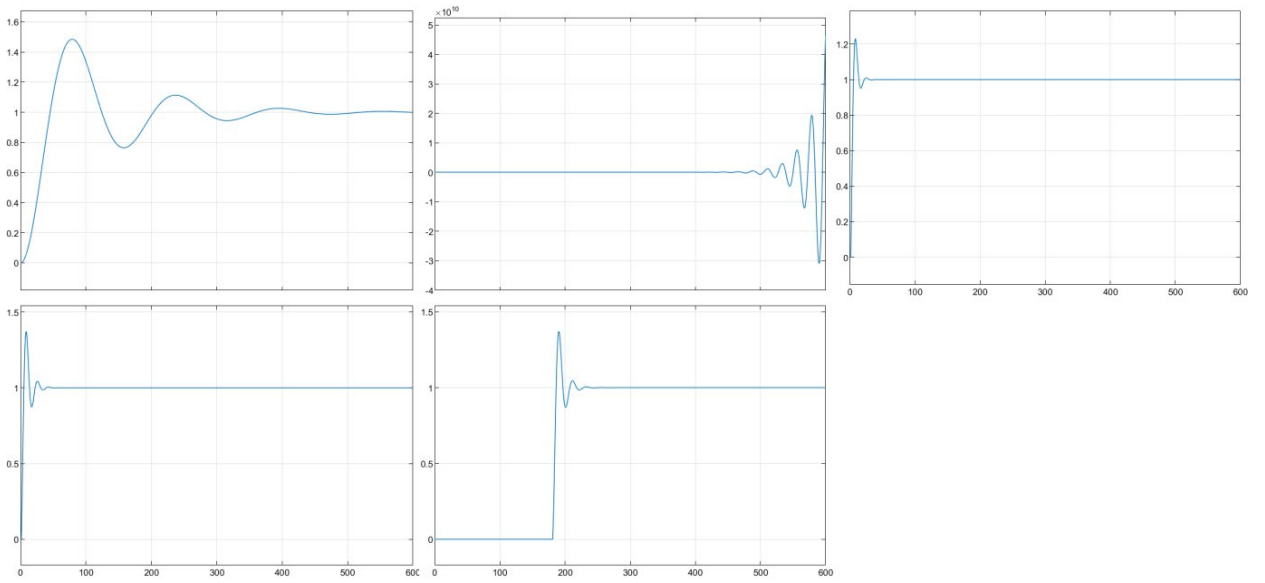


Рисунок 35 – контури керування до налаштування PID регулятора

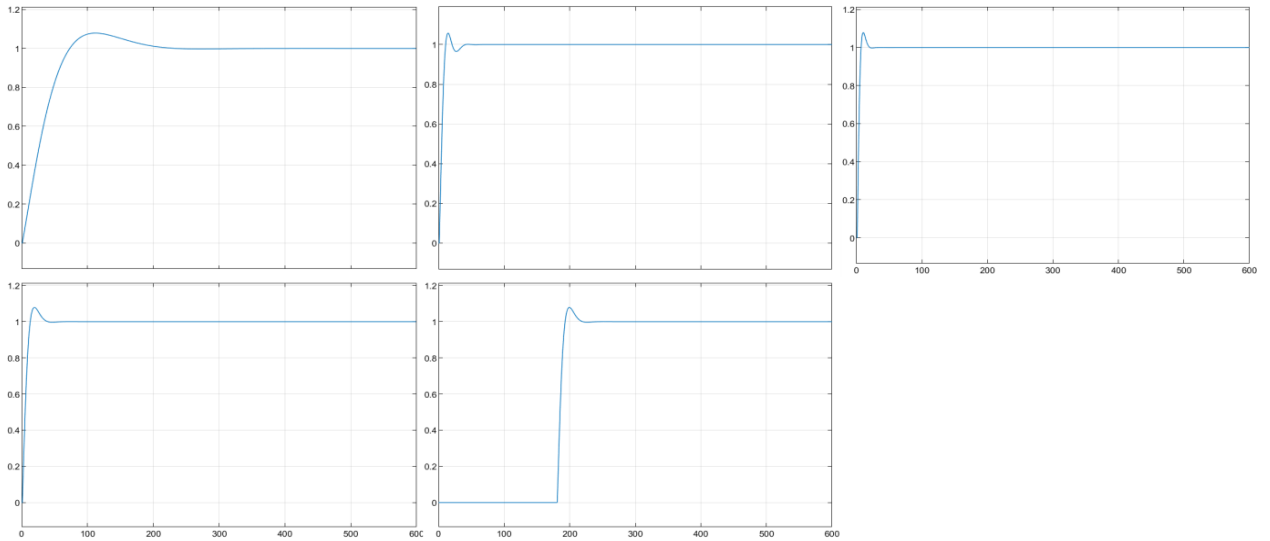


Рисунок 36 – контури керування після налаштування PID регулятора

РОЗДІЛ 5 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ДОБІР АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ АСУ

5.1 Вибір платформного рішення для керування

Контролер у системі автоматизації виробництва біоетанолу

Роль контролера в технологічному процесі

У виробництві біоетанолу з кукурудзи контролер виступає ключовим елементом, що оперує всіма етапами технологічного циклу — від подрібнення зерна до сушіння побічних продуктів. Завдяки йому забезпечується точність, стабільність та безпека роботи обладнання. Автоматизована система на його основі дозволяє мінімізувати людське втручання, підвищити продуктивність і знизити витрати енергії та сировини[33].

Основні функції контролера

Моніторинг та управління процесами

- постійний контроль параметрів (температура, тиск, рівень рідини, витрати, вологість);
- керування насосами, клапанами, мішалками та іншими виконавчими механізмами;
- регулювання режимів ферментації, гідролізу та дистиляції.

Збір та обробка даних

- зчитування показників із датчиків, що відображають стан сировини, готової продукції та енергоспоживання;
- аналіз отриманих даних для оптимізації технологічних процесів;
- збереження інформації для подальшого використання у виробничій аналітиці.

Оптимізація енергоспоживання

- контроль витрат електроенергії та пари;
- автоматичне коригування роботи обладнання для зменшення ресурсних витрат.

Безпека та аварійний захист

- миттєве реагування на перевищення критичних параметрів;
- реалізація систем захисту від несправностей та аварійних ситуацій.

Інтеграція з іншими системами

- підключення до SCADA для візуалізації та диспетчеризації;
- взаємодія з ERP/MES для планування та управління виробництвом.

Технічні характеристики контролера

- Тип: програмований логічний контролер (PLC), приклади — Siemens S7, Allen-Bradley, Schneider Electric.

- Комунікаційні протоколи: Modbus RTU/TCP, OPC UA, Profibus/Profinet, Ethernet/IP[34].

- Датчики та виконавчі механізми:

- температурні сенсори (Pt100, термопари);
- датчики рівня (ультразвукові, ємнісні);
- сенсори тиску та витрати;
- електроприводи, клапани, частотні перетворювачі.

- Інтерфейс користувача: сенсорні панелі HMI для локального керування та можливість віддаленого доступу через SCADA.

Архітектура системи автоматизації

- Польовий рівень — датчики, приводи, контролери.
- Рівень управління — PLC, що координує роботу обладнання.
- Рівень диспетчеризації — SCADA-система для моніторингу та аналізу

даних.

- Рівень управлінських рішень — інтеграція з ERP/MES для планування та оптимізації виробництва.

Переваги автоматизованої системи

- підвищення продуктивності завдяки точному контролю параметрів;
- зменшення витрат на енергію та сировину;
- мінімізація людських помилок;
- швидке реагування на відхилення у процесі.

Оптимальний вибір — Siemens SIMATIC S7-1516-3 PN/DP

Для системи автоматизації виробництва біоетанолу найбільш збалансованим рішенням є CPU 1516-3 PN/DP із серії Siemens S7-1500.

Основні характеристики

- Продуктивність: висока обчислювальна потужність, цикл триває 10 наносекунд на бітову операцію.
- Комунікації:
 - PROFINET (2 порти) для підключення польових пристроїв та HMI;
 - PROFIBUS DP для сумісності зі старим обладнанням;
 - OPC UA для інтеграції з SCADA та ERP;
 - підтримка EtherNet/IP для роботи з обладнанням інших виробників.
- Розширюваність: модульна структура, підтримка до 2048 цифрових та 1024 аналогових I/O.
- Функції безпеки: Safety Integrated, вбудована діагностика.
- Пам'ять: 3 МБ для програм і даних, що дозволяє реалізовувати складні системи.
- Інтеграція: повна сумісність із WinCC для моніторингу та управління.

Висновок

Контролер Siemens SIMATIC S7-1516-3 PN/DP є оптимальним рішенням для автоматизації виробництва біоетанолу з кукурудзи. Він поєднує високу продуктивність, гнучкість, масштабованість та сумісність із сучасними і традиційними системами, забезпечуючи ефективність та надійність технологічного процесу.



Рисунок 37 - CPU 1516-3 PN/DP

Обґрунтування вибору CPU 1516-3 PN/DP для автоматизації виробництва біоетанолу

Складність технологічного процесу

Виробництво біоетанолу складається з кількох взаємопов'язаних етапів:

- подрібнення кукурудзи,
- ферментація сусли,
- дистиляція спирту,
- сушіння побічних продуктів.

Кожна стадія потребує точного контролю технологічних параметрів — температури, тиску, витрат сировини та енергії. Для цього необхідна система керування, здатна одночасно обробляти великий обсяг даних і забезпечувати стабільну роботу всіх підсистем.

Переваги CPU 1516-3 PN/DP

Контролер Siemens SIMATIC S7-1516-3 PN/DP відповідає цим вимогам завдяки:

- високій швидкодії, що дозволяє оперативно реагувати на зміни параметрів;
- гнучкій архітектурі, яка підтримує одночасне керування кількома технологічними ділянками;
- розвиненим мережевими можливостями, що забезпечують інтеграцію обладнання різних виробників у єдину систему;
- підтримці сучасних протоколів комунікації, що робить його сумісним як із новими, так і зі старими системами автоматизації.

Додаткові компоненти для реалізації системи

Для повноцінної роботи контролера застосовуються допоміжні модулі та інтерфейси:

- Модулі вводу/виводу:
- DI/DO — для обробки цифрових сигналів від датчиків та виконавчих механізмів;

- AI/AO — для роботи з аналоговими параметрами (температура, тиск, витрати).

- Комунікаційні модулі — забезпечують інтеграцію з іншими системами автоматизації та зовнішніми пристроями.

- HMI-панелі: Siemens KTP900 Basic або Comfort TP1200, які дозволяють здійснювати локальний моніторинг і налаштування.

- SCADA-система: Siemens WinCC Professional, що забезпечує повну візуалізацію процесів, диспетчеризацію та архівацію даних.

Висновок

Вибір Siemens SIMATIC S7-1516-3 PN/DP для автоматизації виробництва біоетанолу є оптимальним рішенням, оскільки він гарантує:

- швидку та надійну обробку даних у реальному часі;
- можливість масштабування та розширення системи в майбутньому;
- сумісність із широким спектром обладнання, що забезпечує гнучкість інтеграції.

Таким чином, цей контролер виступає центральним елементом інтелектуальної системи керування, здатної забезпечити ефективність, безпеку та стабільність технологічного процесу виробництва біоетанолу.

5.2 Визначення вимірювальних перетворювачів

Використання датчиків у технологічних процесах

Контроль параметрів підготовки сировини

На етапі підготовки зернової сировини ключовим завданням є забезпечення стабільних умов для подальшої переробки. Для цього застосовуються різні типи сенсорів, які відстежують вологість, температуру, рівень заповнення ємностей та швидкість транспортування матеріалу.

- Датчики рівня: використовуються ємнісні та ультразвукові моделі (наприклад, Siemens SITRANS LUT), що дозволяють контролювати кількість зерна у бункерах та силосах.

- Датчики вологості: спеціалізовані вологоміри для сипучих матеріалів (наприклад, PCE-MWM 240) визначають вміст води, що є критично важливим для якісної підготовки зерна до подальших технологічних операцій.

- Датчики температури: термометри опору Pt100 та термопари забезпечують контроль теплового режиму під час зберігання та подрібнення.

- Датчики швидкості обертання: індуктивні або оптичні сенсори відстежують роботу транспортерів, шнеків і млинів, що гарантує стабільність процесу транспортування.

Сенсори для процесу ферментації

Ферментація потребує точного контролю фізико-хімічних параметрів середовища, адже від цього залежить активність дріжджів та якість кінцевого продукту.

- Температурні датчики: Pt100 (наприклад, Endress+Hauser TMR31) підтримують оптимальний тепловий режим.

- рН-електроди: (наприклад, Endress+Hauser CPS11D) забезпечують контроль кислотності, що визначає перебіг реакцій.

- Датчики рівня: ультразвукові та гідростатичні сенсори (VEGA VEGAPULS) відстежують кількість рідини у ферментерах.

- Датчики тиску: абсолютні та відносні моделі (WIKA A-10) гарантують безпечний режим роботи обладнання.

- Газоаналізатори CO₂: (наприклад, Dräger Polytron 8000) контролюють концентрацію вуглекислого газу, який є побічним продуктом ферментації.

Сенсори для дистиляційних процесів

Дистиляція біоетанолу потребує комплексного контролю температури, тиску, рівня рідини та якості кінцевого продукту.

- Температурні сенсори: термопари К-типа та Pt100 (JUMO dTRANS T100) контролюють тепловий режим у різних частинах колони.

- Датчики тиску: мембранні сенсори (Rosemount 3051) забезпечують стабільність процесу.

- Датчики рівня: радарні та гідростатичні (VEGA VEGABAR) відстежують кількість етанолу у накопичувальних ємностях.

- Датчики якості: щільноміри та рефрактометри (KROHNE OPTIMASS 7400, Anton Paar L-Dens 7400) визначають концентрацію спирту у готовому продукті.

Сенсори для сушіння та зберігання відходів

На етапі утилізації та зберігання відходів важливо контролювати їхній стан, щоб забезпечити ефективність процесів сушіння та безпечне накопичення.

- Температурні датчики: Pt100 (Siemens SITRANS T) застосовуються для моніторингу сушарок.

- Вологоміри: інфрачервоні сенсори (PCE-MA 202) визначають рівень вологості сухих відходів.

- Датчики рівня: ємнісні та вібраційні сенсори контролюють заповнення резервуарів сипучими матеріалами.

Додаткові сенсори для енергетичних систем

Для оптимізації енергоспоживання та контролю технологічних потоків застосовуються спеціалізовані сенсори:

- Витратоміри: магнітоіндуктивні та ультразвукові (Siemens SITRANS F M) контролюють подачу води, пари та етанолу.

- Газоаналізатори: відстежують викиди метану, CO₂ та парів спирту.

- Лічильники енергії: вимірюють споживання електроенергії та теплоти, що дозволяє оптимізувати енергетичні витрати.

Узагальнення

Таким чином, сенсори є фундаментальним елементом технологічних процесів у виробництві біоетанолу та суміжних галузях. Вони забезпечують точний контроль параметрів на всіх етапах — від підготовки сировини до утилізації відходів. Використання комплексної системи датчиків дозволяє підвищити ефективність, безпеку та якість кінцевого продукту, а також оптимізувати енергоспоживання.

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні положення

6.1.1 Нормативно-правова база

Проектування, монтаж та експлуатація САК, а також електротехнологічних процесів на виробництві біоетанолу повинні суворо відповідати вимогам чинного законодавства України та міжнародним стандартам [40]. Основними нормативними документами, на які спирається цей розділ, є:

- Закон України "Про охорону праці": Визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на належні, безпечні і здорові умови праці.
- Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): Регламентують вимоги до електробезпеки, заземлення та вибору електрообладнання.
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕП): Визначають порядок обслуговування електроустановок.
- Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП): Зокрема, ті, що стосуються роботи у вибухонебезпечних зонах та електроустановках.
- Технічний регламент на обладнання та захисні системи, призначені для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах (ATEX): Регламентує вимоги до вибухозахищеного обладнання САК (датчики, виконавчі механізми) у зонах з парами етанолу.

6.1.2 Коротка характеристика об'єкта

Об'єктом дослідження є виробництво біоетанолу, що охоплює такі основні електротехнологічні процеси, інтегровані в САК [41]:

- Технологічні процеси: Підготовка сировини, ферментація (бродіння), ректифікація та зневоднення спирту. Ці процеси характеризуються

наявністю ємностей під тиском, високих температур та, найголовніше, вибухонебезпечної пароповітряної суміші (пари етанолу).

- Система енергопостачання: Включає роботу потужних електродвигунів насосів, мішалок, вентиляторів та загального розподілу електроенергії, що вимагає впровадження ефективних систем захисту від коротких замикань та перевантажень.

- САК: Система складається з польового обладнання (датчики, виконавчі механізми) та апаратного забезпечення керування (контролери, шафи керування, АРМ оператора). Вибухонебезпечні зони вимагають застосування іскробезпечних кіл та вибухозахищених корпусів, що є ключовим аспектом електробезпеки.

6.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Виробництво біоетанолу, що автоматизується, характеризується наявністю цілого комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які вимагають обов'язкового врахування при проектуванні САК та організації робочих місць [42].

6.2.1. Фізичні фактори

Фізичні фактори створюють ризики травматизму та професійних захворювань, пов'язаних з роботою електротехнічного, теплового та механічного обладнання.

6.2.1.1. Ураження електричним струмом

Електротехнологічні процеси та енергопостачання використовують напруги до 1000 В і вище (для потужних насосів та розподільних пристроїв), а також низькі напруги (до 24 В постійного струму) для живлення САК [43].

- Аналіз напруг:
 - Небезпечні напруги (понад 42 В перем. струму): Мережі живлення електродвигунів, освітлення, силові ланцюги шаф керування. Прямий дотик до струмоведучих частин або непрямий дотик до корпусів при пошкодженні ізоляції є смертельно небезпечним.
 - Безпечні напруги (БНН): Використовуються у польових ланцюгах САК (сигнали датчиків), але навіть вони можуть становити ризик у вибухонебезпечних зонах, спричиняючи іскріння.
- Можливі шляхи протікання струму: Струм може проходити через тіло людини (рука-рука, рука-ноги) унаслідок порушення ізоляції, несправності заземлення або помилкових дій під час обслуговування.

6.2.1.2. Підвищена температура

Технологічний процес вимагає нагріву сировини та бражки, а також використання високих температур у ректифікаційних колонах та теплообмінниках.

- Ризики: Контакт персоналу з гарячими поверхнями обладнання, паропроводами або перегрітими рідинами призводить до термічних опіків.
- Контроль: САК повинна забезпечувати постійний контроль температури та її відображення на АРМ оператора, а також автоматичне відключення джерел нагріву при аварійних відхиленнях.

6.2.1.3. Шум та вібрація

Значний рівень шуму та вібрації генерується потужним механічним обладнанням, необхідним для виробництва.

- Джерела: Насосне обладнання для перекачування бражки та спирту, компресори, вентиляційні системи, мішалки у бродильних ємностях.
- Шкідливий вплив: Тривалий вплив шуму понад 80 дБ може

призвести до професійної приглухуватості, а вібрація — до порушення функцій нервової та опорно-рухової систем.

6.2.2. Хімічні фактори

Хімічні фактори є найбільш специфічними та небезпечними для виробництва біоетанолу, оскільки вони обумовлюють його вибухонебезпечний статус.

6.2.2.1. Вибухонебезпека (Пари етанолу)

Пари етанолу є легкозаймистими та утворюють вибухонебезпечні суміші з повітрям.

- НКМП та ВКМП: Вибух можливий лише в певному діапазоні концентрацій. Для етанолу (C_2H_5OH) ці межі є критичними:
 - Нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМП): Близько 3.3 – 3.5\% об. (при цій концентрації вже можливий вибух).
 - Верхня концентраційна межа поширення полум'я (ВКМП): Близько 19\% об. (при концентрації вище цієї, суміш занадто насичена і не горить).
- Джерела небезпеки: Випаровування при перекачуванні, зберігання спирту, аварійні викиди. Накопичення пари етанолу в закритих або погано вентильованих приміщеннях створює вибухонебезпечну зону.

6.2.2.2. Пожежонебезпека (Легкозаймисті рідини)

Етанол та спиртовмісні рідини класифікуються як легкозаймисті рідини (ЛЗР).

- Температура спалаху: Етанол має низьку температуру спалаху (близько 13°C), що означає, що він може легко займатися навіть при кімнатній

температурі від невеликого джерела запалювання (іскра, нагріта поверхня).

6.2.2.3. Токсичні речовини

- Вуглекислий газ (CO_2): Утворюється у великих кількостях в процесі бродіння. Хоча сам по собі він не є високотоксичним, він є асфіксіантом (витісняє кисень) і, як важкий газ, може накопичуватися в низьких точках приміщень, спричиняючи задуху.
- Технологічні реагенти: Можливе застосування кислот (сірчана, соляна) або лугів для регулювання рН або санітарної обробки. Вони становлять ризик хімічних опіків або отруєнь.

6.2.3. Психофізіологічні фактори

Впровадження САК зміщує акцент з фізичної праці на інтелектуальну, пов'язану з керуванням та моніторингом.

6.2.3.1. Навантаження на зір та увагу

- Робота з інтерфейсом САК (АРМ): Оператор постійно працює з моніторами, пультами керування, аналізуючи великі обсяги інформації (графіки, тренди, діаграми). Це призводить до напруження зору та можливого розвитку комп'ютерного зорового синдрому.
- Монотонність та гіподинамія: Тривале перебування в статичній позі та монотонне спостереження за стабільним процесом можуть викликати втому, зниження концентрації уваги та уповільнення реакції, що критично небезпечно при виникненні аварійних ситуацій.

6.3 Заходи та засоби забезпечення електробезпеки (ЕБ)

Оскільки розроблена САК керує електротехнологічними процесами та енергопостачанням, забезпечення електробезпеки є критично важливим для запобігання ураженню персоналу електричним струмом, а також для виключення виникнення джерел займання (іскріння, дуга, перегрів).

6.3.1. Захист від ураження електричним струмом

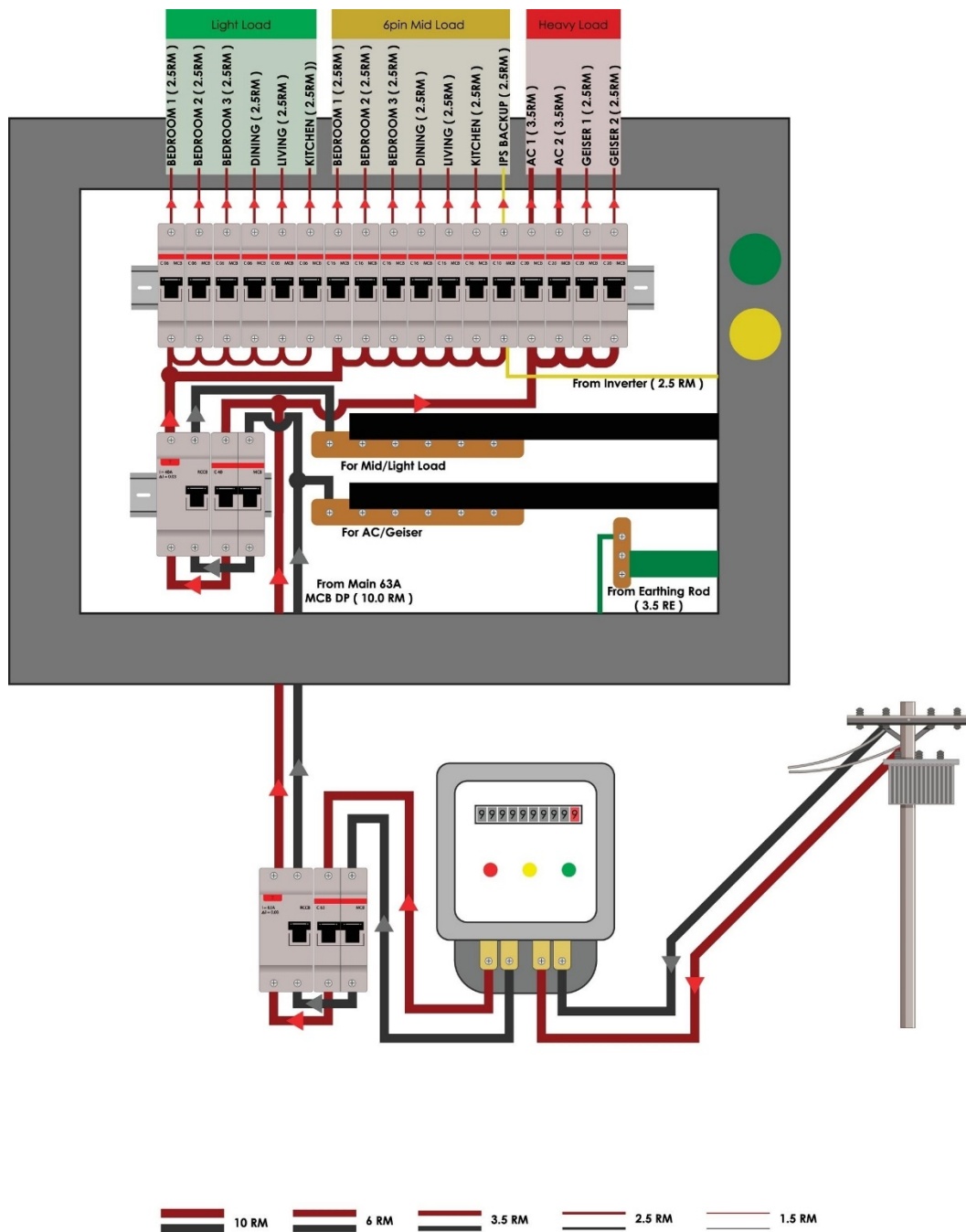
6.3.1.1. Захисне заземлення та занулення

На виробництві біоетанолу, як правило, застосовується система заземлення TN-S або TN-C-S (залежно від місця розділення нейтрального та захисного провідників).

- Призначення: Усі металеві частини електрообладнання САК (корпуси шаф керування, металеві оболонки кабелів, корпуси датчиків та електродвигунів), які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, повинні бути надійно приєднані до захисного провідника (PE).

- Контроль опору: Опір заземлювального пристрою повинен регулярно перевірятися та підтримуватися на рівні, що відповідає вимогам ПУЕ та галузевим нормам (зазвичай не більше 4 Ом для електроустановок до 1 кВ).

- Захисний потенціал: При використанні системи TN (занулення) швидке відключення пошкодженої ділянки від мережі забезпечується спрацюванням автоматичних вимикачів, викликаним струмом короткого замикання між фазним та захисним провідниками.



6.3.1.2. Використання малих та розділених напруг

- Безпечна наднизька напруга (БНН): Для живлення кіл керування, сигналізації та контролю, особливо в місцях підвищеної небезпеки або у вибухонебезпечних зонах, слід застосовувати напругу, що не перевищує 42 В (перемінний струм) або 110 В (постійний струм).
- Розділювальні трансформатори: Для створення БНН та для електричного відділення вторинних кіл керування від мережі живлення

використовуються розділювальні трансформатори. Вони підвищують безпеку, оскільки унеможливають пряме ураження струмом при однополюсному дотику до вторинної обмотки.

6.3.1.3. Пристрої захисного вимкнення (ПЗВ)

- У ланцюгах живлення освітлення, розеток для переносного інструменту та інших допоміжних систем необхідно встановлювати ПЗВ (диференційні автоматичні вимикачі), які забезпечують миттєве відключення пристрою при виникненні струму витоку на землю (зазвичай 30 мА), що є небезпечним для людини.

6.3.2. Захист від надструмів та перенапруг

6.3.2.1. Захист від перевантажень та коротких замикань

- Автоматичні Вимикачі: Усі ланцюги живлення виконавчих механізмів, контролерів, блоків живлення САК повинні бути захищені автоматичними вимикачами, які мають тепловий (від перевантажень) та електромагнітний (від коротких замикань) розчеплювачі. Вибір номіналів вимикачів здійснюється згідно з характеристиками навантаження та перетином кабелів.

- Селективність: Забезпечення селективності захисту, що гарантує відключення лише пошкодженої ділянки мережі, не впливаючи на роботу САК в цілому.

6.3.2.2. Обмежувачі імпульсних перенапруг (ОІП)

- Захист САК: Мікропроцесорна техніка САК (контролери, комунікаційні модулі, блоки живлення) є чутливою до імпульсних перенапруг,

спричинених атмосферними розрядами (блискавкою) або комутаційними процесами.

- Застосування ОІП: На вводах живлення та на лініях зв'язку, що виходять за межі будівлі, встановлюються ОІП (SPD) відповідних класів (І, ІІ, ІІІ) для обмеження амплітуди перенапруг та відведення їх до контуру заземлення.

6.3.3. Вибір та розміщення електрообладнання САК

6.3.3.1. Клас ізоляції та ступінь захисту оболонки (ІР)

- Ступінь ІР: Шафи керування, контролери та інше обладнання, що встановлюється у виробничих приміщеннях, повинні мати ступінь захисту оболонки не менше ІР54 (захист від пилу та бризок води), а у вологих зонах – ІР65 (повний захист від пилу та струменів води). Це запобігає проникненню вологи та пилу, які можуть спричинити коротке замикання або погіршення ізоляції.

- Тепловий режим: Конструкція шаф керування повинна забезпечувати ефективне тепловідведення (вентиляція або кондиціонування) для запобігання перегріву компонентів САК, що може призвести до їх виходу з ладу та пожежі.

Згідно з вашою структурою, ось детальний опис підрозділу "4. Пожежо- та Вибухобезпека", що є критично важливим для виробництва біоетанолу.

6.4 Пожежо- та вибухобезпека

Виробництво біоетанолу пов'язане з обігом великої кількості легкозаймистих рідин та парів, що вимагає жорсткого дотримання вимог пожежної та вибухової безпеки, особливо при інтеграції системи автоматизованого керування (САК).

6.4.1. Визначення та класифікація вибухонебезпечних зон

Класифікація приміщень та зовнішніх установок є основою для вибору безпечного електрообладнання та компонентів САК. Класифікація проводиться відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та НПАОП 40.1-1.32-01 (Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок).

- Обґрунтування класифікації: Пари етанолу утворюють вибухонебезпечні суміші з повітрям при концентрації від НКМП (близько 3.3\%) до ВКМП (близько 19\%).

Клас Вибухонебезпечної Зони Ймовірність утворення вибухонебезпечної суміші Обладнання САК, що тут знаходиться

Зона 1 Утворення вибухонебезпечної суміші є ймовірним (нормальний режим роботи) або можливе при аваріях. Місця відбору проб, насосні станції спирту, ректифікаційні колони.

Зона 2 Утворення вибухонебезпечної суміші малоймовірне і можливе лише внаслідок аварії або порушення технологічного процесу, та існує нетривалий час. Периметр ємностей, зони навколо технологічного обладнання у вентильованих приміщеннях.

6.4.2. Вимоги до вибухозахищеного електрообладнання (ATEX)

Усі електричні пристрої, що встановлюються у Зонах 1 та 2, повинні мати відповідний вид вибухозахисту згідно з Технічним регламентом АТЕХ та ДСТУ EN 60079.

6.4.2.1. Маркування та види захисту

Електрообладнання САК (датчики, виконавчі механізми, освітлення)

повинно мати маркування Ex (Explosion-protected) та відповідати категорії обладнання 2G (для Зони 1) або 3G (для Зони 2).

- **Вибудонепроникна оболонка:** Корпус електрообладнання (наприклад, потужних електродвигунів, комутаційних коробок) спроектований таким чином, щоб витримати внутрішній вибух і запобігти поширенню полум'я через щілини на зовнішнє вибухонебезпечне середовище.
- **Захист від іскри:** Для Зони 2 застосовується обладнання, що не містить частин, здатних викликати займання (наприклад, герметичні пристрої).

6.4.2.2. Іскробезпечні електричні кола

Вид захисту "Іскробезпечне електричне коло" є пріоритетним для низьковольтних кіл САК, що передають інформацію (датчики).

- **Принцип роботи:** Іскробезпечне коло обмежує електричну енергію, що подається у вибухонебезпечну зону, до рівня, недостатнього для запалювання пароповітряної суміші. Це досягається незалежно від того, чи є в колі коротке замикання або обрив.

- **Бар'єри Іскрозахисту:** Для підключення іскробезпечних датчиків (витратомірів, датчиків рівня та температури) у Зонах 1/2 до контролерів САК, які розташовані у безпечній зоні, використовуються:

- **Гальванічні бар'єри:** Забезпечують повну електричну розв'язку між небезпечним і безпечним колами за допомогою трансформаторів, підвищуючи надійність.

- **Бар'єри із шунтуючим діодом (пасивні):** Обмежують струм і напругу за допомогою запобіжників та стабілітронів (діодів Зенера).

- **Вимога:** Необхідне суворе дотримання параметрів U_i, I_i, L_i, C_i зовнішнього обладнання і бар'єру.

6.4.2.3. Герметизація та введення кабелів

- Для збереження вибухозахисних властивостей оболонки (Ex d) обов'язково використовуються вибухозахищені кабельні вводи (сальники). Ці вводи повинні забезпечувати необхідний ступінь герметизації та перешкоджати проникненню вибухонебезпечної суміші всередину оболонки.
- Вводи, призначені для неброньованих кабелів, повинні мати спеціальний компаундний залив, який ущільнює жили та перешкоджає поширенню вибуху по кабелю.

6.4.3. Вентиляція та газовий контроль

Контроль за концентрацією вибухонебезпечних парів є ключовою функцією САК для запобігання катастрофам.

6.4.3.1. Вимоги до примусової вентиляції

- У виробничих приміщеннях з обігом етанолу повинна бути передбачена припливно-витяжна вентиляція з механічним спонуканням, що відповідає нормам повітрообміну.
- Аварійна вентиляція: САК повинна забезпечити автоматичне включення аварійної вентиляції у разі перевищення концентрації парів етанолу 20\% від НКМП.

6.4.3.2. Інтеграція газоаналізаторів у САК

- Моніторинг: Впровадження стаціонарних газоаналізаторів (газодетекторів) з вибухозахищеним виконанням у місцях можливого накопичення парів етанолу та вуглекислого газу (CO_2).
- Спрацювання аварійних заходів: САК повинна мати багаторівневу логіку реакції на сигнали газоаналізаторів:

- о Перший рівень (Попереджувальний): При досягненні 10 – 20\% НКМП – спрацювання звукової та світлової сигналізації на АРМ оператора, автоматичне включення аварійної вентиляції.
- о Другий рівень (Аварійний): При досягненні 50\% НКМП – автоматичне знеструмлення технологічного обладнання (за винятком вибухозахищеного освітлення та аварійної вентиляції), зупинка процесу та подача сигналу в пожежну службу.

6.5. Охорона праці при експлуатації САК

Ефективність системи автоматизованого керування (САК) у забезпеченні безпеки залежить не лише від технічних рішень, а й від правильної організації роботи та кваліфікації персоналу, що її обслуговує.

6.5.1. Технічні заходи, реалізовані в САК

САК повинна бути спроектована таким чином, щоб у критичних ситуаціях мінімізувати необхідність втручання оператора та автоматично переводити процес у безпечний стан.

6.5.1.1. Аварійні захисти та блокування

Програмне та апаратне забезпечення САК включає багаторівневу систему захисту [44]:

- Технологічні Блокування (Interlocks): Забороняють виконання небезпечних послідовностей дій. Наприклад, програмний блок САК повинен заборонити запуск насоса перекачування спирту, якщо не підтверджено відкриття приймальної запірної арматури або якщо рівень рідини у вихідній ємності є критично низьким (захист від сухого ходу).
- Аварійні Захисти (Safety Shutdowns): При перевищенні критичних

технологічних параметрів (наприклад, тиску в колоні, температури в теплообміннику, критичного рівня парів етанолу) САК повинна автоматично відключати відповідне обладнання та енергопостачання, що може бути джерелом небезпеки.

6.5.1.2. Кнопки Аварійної Зупинки ("E-STOP")

- Вимоги: На об'єкті обов'язково встановлюються кнопки "Аварійна зупинка" (E-STOP) з фіксацією, що мають пряме апаратне підключення до силових ланцюгів через реле безпеки (навіть незалежно від програмного забезпечення контролера).
- Розміщення: Вони повинні бути легкодоступні та розміщені у ключових точках виробництва: біля робочих місць операторів, на щитах керування, біля виходу з вибухонебезпечних зон та безпосередньо біля найбільш небезпечного обладнання (насоси, компресори).

6.5.1.3. Сигналізація та індикація

- Багаторівнева сигналізація: АРМ оператора повинна забезпечувати чітку візуальну та звукову індикацію аварійних та попереджувальних станів [45]. Система повинна розрізняти попереджувальні (висока/низька межа) та аварійні (критичні) сигнали.
- Архівація подій: САК повинна вести детальну історію (архів) подій, включаючи час спрацювання захистів, аварійних блокувань та дій оператора. Це необхідно для подальшого аналізу причин аварійних ситуацій.

6.5.2. Організаційні заходи

Організаційні заходи спрямовані на підготовку персоналу та чітке регламентування їхніх дій.

6.5.2.1. Навчання персоналу та інструктажі

- Кваліфікаційні групи: Персонал, який обслуговує електрообладнання САК, повинен мати відповідну групу з електробезпеки (відповідно до ПТЕЕП) та регулярно проходити перевірку знань.
- Спеціалізоване навчання: Оператори та обслуговуючий персонал повинні пройти спеціальне навчання з пожежно-технічного мінімуму, правил поводження з легкозаймистими рідинами та експлуатації вибухозахищеного обладнання.
- Інструкції: Розробка детальних інструкцій з охорони праці для кожного робочого місця, включаючи інструкції щодо дій в аварійних ситуаціях (пожежа, витік спирту, відсутність напруги).

6.5.2.2. Порядок проведення робіт

- Нарядно-допускова система: Ремонтні та налагоджувальні роботи на електрообладнанні та в потенційно вибухонебезпечних зонах САК повинні проводитися лише за Нарядом-допуском. Це забезпечує повне знеструмлення обладнання, перевірку відсутності напруги, встановлення заземлення та позначення робочої зони.
- Протипожежний режим: Суворе дотримання правил протипожежного режиму у вибухонебезпечних зонах. Заборона проведення вогневих робіт без спеціального дозволу та підготовки робочого місця.

6.5.2.3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Персонал має бути забезпечений необхідними ЗІЗ відповідно до типових галузевих норм:

- Електробезпека: Діелектричні рукавички, килимки, ізольований

інструмент.

- Хімічний захист: Захисні окуляри та респіратори (при роботі з хімічними реагентами), спецодяг, що виключає накопичення статичного заряду (для вибухонебезпечних зон).

ВИСНОВКИ

За результатами виконаної кваліфікаційної роботи магістра, присвяченої розробці та аналізу системи автоматичного контролю та регулювання (САКР) процесу виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи, зроблено такі загальні висновки:

1. Досягнення мети та актуальність: Підтверджено високу актуальність теми дослідження, зумовлену необхідністю підвищення енергетичної незалежності, екологізації виробництва та оптимізації ресурсоспоживання. Поставлену мету роботи — розробка та обґрунтування САКР для ключових технологічних етапів — було повністю досягнуто.

2. Системний аналіз та моделювання: Проведено детальний системний аналіз технологічного процесу, ідентифіковано основні об'єкти керування (ферментація, ректифікація) та критичні параметри. Створені математичні моделі об'єктів керування адекватно описують їх динамічні характеристики, що стало надійною основою для подальшого синтезу керуючих контурів.

3. Розробка САКР: Розроблено структурну схему Системи автоматичного контролю та регулювання, яка охоплює всі ключові етапи, забезпечуючи надійний контроль параметрів температури, рівня, тиску та концентрації. Обґрунтовано вибір ПІД-регуляторів як основних керуючих пристроїв завдяки їхній простоті, надійності та високій ефективності для даного класу об'єктів.

4. Моделювання та підтвердження ефективності: Виконано імітаційне моделювання розробленої САКР у програмному середовищі Matlab/Simulink. Результати моделювання підтвердили високу стійкість та задовільну якість регулювання системи: час регулювання є мінімальним, а статична похибка практично відсутня, що гарантує високу стабільність технологічного процесу.

5. Технічна реалізація: Обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматизації, включаючи високопродуктивний програмований контролер SIMATIC S7-1500 та відповідні вимірювальні прилади (датчики) і виконавчі механізми. Це забезпечує надійність, гнучкість та можливість інтеграції системи в загальну структуру АСУТП підприємства.

6. Економічний та екологічний ефект: Впровадження розробленої САКР дозволить оптимізувати виробничі цикли, скоротити тривалість ферментації, підвищити вихід кінцевого продукту (біоетанолу) та суттєво знизити енергоспоживання (особливо на етапі ректифікації), що матиме прямий позитивний вплив на економічні показники підприємства.

7. Охорона праці та безпека: Розроблено необхідні заходи безпеки, з особливою увагою до вимог електробезпеки та пожежо-вибухобезпеки, що є критично важливим для виробництва, пов'язаного з легкозаймистими речовинами.

Таким чином, розроблена САКР є технічно обґрунтованою та економічно доцільною, а її впровадження забезпечить перехід виробництва біоетанолу на якісно новий, автоматизований та енергоефективний рівень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Renewable Fuels Association. Ethanol Industry Outlook www.ethanolrfa.org
2. Переваги та виклики виробництва біоетанолу в Україні / І. М. Жуков, Т. О. Левченко. // Журнал аграрної економіки. – 2021. – №5. – С. 34–40.
3. Nguyen, Q. A., & Saddler, J. N. (1991). "Ethanol Production from Biomass: Technology Overview".
4. Моделювання та автоматизація процесів виробництва біоетанолу / О. А. Мартиненко, Д. І. Смірнов. – Харків: ХНТУ, 2021. – 112 с.
5. U.S. Department of Energy. Biomass Energy Basics www.energy.gov
6. Astrom, K.J., & Murray, R.M. (2008). Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers.
7. Doran, P.M. (2013). Bioprocess Engineering Principles.
8. Біоетанол як екологічно чисте джерело енергії: економічні та технологічні аспекти / А. В. Сидоренко, М. П. Кравченко. // Науковий журнал "Енергетика". – 2020. – №3. – С. 15–22.
9. Глобальний ринок біоетанолу: аналітика та прогноз. – Інститут світової економіки. – 2022. – URL: <https://worldenergy.org>.
10. Siemens. Каталог "SIMATIC S7-1500. Технічні характеристики". - Мюнхен, 2021.
11. Програми розвитку біоетанолу в світі та в Україні. Аналітичний звіт / Міністерство енергетики України. – 2023. – URL: <https://mpe.gov.ua>.
12. Chen, J. & Huang, T. (2017). "Automation in Corn Ethanol Production: Challenges and Opportunities".
13. Біотехнологічні процеси виробництва біоетанолу / Л. А. Петрова, О. М. Коваленко. // Біотехнологія: досягнення та виклики. – К.: Наукова думка, 2019. – С. 78–90.

14. Sharma, S. (2020). Advanced Process Control in Industrial Applications.
15. ДБН В.2.5-28:2018. "Природоохоронні та протипожежні заходи"
16. Aris, R. (1969). Introduction to the Analysis of Chemical Reactors.
17. Bequette, B.W. (2003). Process Control: Modeling, Design, and Simulation.
18. Методичні рекомендації "Забезпечення безпеки на біопаливних виробництвах" / НААН. - Київ, 2020.
19. Doran, P.M. (2013). Bioprocess Engineering Principles.
20. Довідник "Промислова безпека хімічних та біотехнологічних виробництв". - Харків, 2019.
21. Jacques, K. A., Lyons, T. P., & Kelsall, D. R. (Eds.). (2003). The Alcohol Textbook: A Reference for the Beverage, Fuel, and Industrial Alcohol Industries.
22. Україна на шляху до енергетичної незалежності: роль біопалива / Збірник матеріалів конференції. – Київ, 2023. – С. 25–35.
23. Doran, P.M. (2013). Bioprocess Engineering Principles.
24. Звіт Державного агентства з енергоефективності "Біоенергетика України: стан та перспективи". - Київ, 2021.
25. Praj Industries. Innovative Technologies in Ethanol Production.
26. НПАОП 0.00-1.81-18. "Правила охорони праці під час експлуатації обладнання харчової промисловості"
27. Bailey, J.E., & Ollis, D.F. (1986). Biochemical Engineering Fundamentals.
28. Doran, P.M. (2013). Bioprocess Engineering Principles.
29. Seborg, D.E., Edgar, T.F., Mellichamp, D.A., & Doyle, F.J. (2010). Process Dynamics and Control.
30. Endress+Hauser. "Промислові датчики. Каталог обладнання". - Франкфурт, 2020.

31. Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*.
32. Деркач О. В. Система автоматичного керування процесом переробки зерна кукурудзи в біоетанол : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. А. В. Павлов. Суми : Сумський державний університет, 2024. 70 с.
33. Гандзюк М.П. "Основи охорони праці в технологічних системах". - Київ, 2020.
34. Chapra, S.C., & Canale, R.P. (2010). *Numerical Methods for Engineers*.
35. Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*.
36. Директива Європейського Союзу про відновлювану енергію (RED II). – URL: <https://energy.ec.europa.eu>.
37. Інститут біоенергетичних культур НААН. "Технологічні аспекти виробництва біоетанолу". - Київ, 2020.
38. Siemens AG. *Digital Solutions for Bioethanol Production*.
39. Liu, G. "Advanced Control Strategies for Bioethanol Fermentation" // *Biotechnology and Bioengineering*. - 2018. - Vol. 115(6). - P. 1425- 1440.
40. Siemens. "PROFINET Communication Protocols Handbook". - Frankfurt, 2021.
41. *Bioresource Technology*. - Elsevier, Recent volumes.
42. Demirbas, A. (2009). *Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs*.
43. Біоетанол: екологічні аспекти виробництва і використання / А. С. Коваленко, Ю. В. Черненко. // *Екологічна безпека та сталий розвиток*. – 2022. – №4. – С. 12–18.
44. Himmelblau, D.M. (1989). *Process Analysis by Statistical Methods*.
45. *Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach* / Editors: Henrik Lund. - Elsevier, 2019.