

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНІ Енергетики
автоматики і енергозбереження
(назва кафедри)

_____ В.В. Каплун
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

к.т.н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**НА ТЕМУ "РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДІЛЯНКИ ПРОЦЕСУ СОКООЧИСТКИ ЦУКРОВОГО
ВИРОБНИЦТВА"**

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., проф. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Заєць Н.А.
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

К.Т.Н., доцент _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Захарченко А.Д.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Захарченку Антону Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Розробка системи автоматизації технологічної ділянки процесу сокоочистки цукрового виробництва",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2024 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "30" травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Технологія і промислове обладнання для розробки системи сокоочистки

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу сокоочистки.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

- 1.4 Система автоматизації керування рН в преддефекаторі. Функціональна схема автоматизації
- 3.4. Система автоматизації керування рН в преддефекаторі. Схема електрична принципова.
- 3.6. Система автоматизації керування рН в преддефекаторі. Схема електрична з'єднань.
- 3.7. Система автоматизації керування рН в преддефекаторі. Схема електрична підключень.
- 3.8. Система автоматизації керування рН в преддефекаторі. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "21" листопада 2024 року

**Керівник
кваліфікаційної
бакалаврської роботи**

(підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Захарченко А.Д.
(П.І.Б.)

АНОТАЦІЯ

Зараз на виробництві дуже важливо досягти стабільної якості цукру. Це прямо залежить не лише від сировини, а й від того, наскільки ефективно працює сам процес. Один із таких процесів — це преддефекація, тобто початкове очищення дифузійного соку. У цій роботі розглядається, як автоматизоване регулювання рівня рН у баку може покращити ситуацію.

Було розглянуто основні моменти схеми, де саме найчастіше виникають відхилення. рН змінюється досить динамічно під час взаємодії з кислотами й колоїдами, і це впливає на подальше очищення соку. Тому потрібно стабілізувати цей показник, щоби зменшити втрати.

Запропоновано рішення — зробити автоматизовану систему. Вона складається з рН-датчика, контролера, виконавчих пристроїв і SCADA. У роботі описано, як усе це між собою пов'язано і працює, з використанням ПІ-регулювання.

Результати показали, що така система дає змогу зменшити витрати реагентів, стабілізувати параметри та покращити якість очищення. Вона підійде як для модернізації старих заводів, так і для нових проєктів.

Ключові слова: преддефекація, автоматизація, ПЛК, рН-регуляція, SCADA.

ANOTATION

In today's production, achieving stable sugar quality is becoming more important, especially under stricter industrial demands. This paper focuses on one of the key stages — the pre-defecation of diffusion juice. The main goal was to explore how automated pH control in the process tank could help improve stability and reduce losses.

The study included a review of the process scheme to identify weak points where fluctuations often occur. Special attention was paid to pH behavior during acid neutralization and colloid aggregation, which strongly affect the final product quality.

Based on this, an automation solution was proposed. The system includes pH sensors, a programmable logic controller (PLC), control equipment (such as a dosing pump or valve), and a SCADA/HMI platform for visualization and control. The paper also describes how the system works and explains the control logic using a PI regulator.

According to the results, this approach helps reduce reagent consumption, maintain stable process conditions, and improve juice purification. The system can be used for both upgrading existing sugar plants and designing new ones.

Keywords: pre-defecation, pH control, automation, PLC, SCADA, diffusion juice.

ЗМІСТ

ANOTATION	4
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРЕДДЕФЕКАЦІЇ ДИФУЗІЙНОГО СОКУ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	8
1.1. Аналіз існуючих систем автоматизації. Вибір регульованих величин і каналів регулювання.....	8
1.1.2. Вибір контрольованих величин рН суспензії (ціль 10,9-11,1) - прямо входить до регламенту; визначає адсорбцію колоїдів і витрату реагентів.....	10
1.1.3. Вибір сигналізованих величин Таблиця 1.2 Вибір сигналізованих величин (межова та аварійна сигналізація).....	10
1.2. Розробка завдання на систему автоматизації.....	10
1.2.2. Вибір місця розташування технічних засобів	11
1.2.3 Таблиця вимог до системи автоматизації.....	12
РОЗДІЛ 2. ОПИС СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	13
2.1. Вибір технічних засобів. Функціональна схема та специфікація приладів.....	14
2.2. Технічні вимоги до трасування та монтажу елементів. Схема з’єднань	18
2.2.1 Вибір контролера та електроніки	22
Вибір виконуючих механізмів	36
2.3. Побудова та дослідження математичної моделі об’єкта керування	39
2.4. Обґрунтування та вибір алгоритму керування об’єктом	40
2.2. Моделювання динамічного режиму апарату попередньої очистки дифузійного соку.....	47
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	63
3.3.1. Загальна структура програми.....	68
3.3.2. Основні програмні блоки	68
3.3.3. ПІ-регулятор	69
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ	74

4.1 Економічні вигоди від впровадження автоматизації.....	74
4.2 Орієнтовні витрати на впровадження	75
ВИСНОВОК.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	79
ДОДАТКИ.....	80

ВСТУП

Мета дослідження полягає у створенні системи керування, яка автоматизує та оптимізує процес регулювання рівня рН у бак преддефекатора під час первинного очищення дифузійного соку, забезпечуючи стабільність технологічного режиму, підвищення ефективності очищення та покращення якості кінцевого продукту.

Актуальність теми. Преддефекація - перший критично важливий етап станції дефекації, у якому з дифузійного соку вилучається найбільша кількість колоїдів і мікроорганізмів. Ефективність цього етапу визначається точністю підтримання лужного рН. Ручне регулювання призводить до перевитрати вапна, коливань рН і зрештою - до нестабільної якості соку та зростання енерго-ресурсних витрат. Автоматизація дає змогу оперативно реагувати на збурення потоку, зменшити вплив людського чинника й підвищити економічну ефективність виробництва цукру.

Об'єкт дослідження - комп'ютерно-інтегрована система керування процесом регулювання рН у бак преддефекатора, реалізована на базі програмованого логічного контролера (ПЛК), сучасних рН-датчиків, виконавчих механізмів і SCADA/HMI-інтерфейсу.

Завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасні підходи до регулювання рН у процесах преддефекації.
- Створити математичну модель баку преддефекатора та обґрунтувати необхідність автоматизації.
- Розробити алгоритм автоматизованого регулювання з ПІ-контролем.
- Обґрунтувати вибір технічних засобів (рН-датчиків, ПЛК, дозувальних пристроїв відбору вапняного молока)
- Побудувати функціональну схему системи автоматизації.
- Розробити SCADA/HMI-інтерфейс для моніторингу та керування процесом.
- Провести техніко-економічну оцінку ефективності впровадження системи.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРЕДДЕФЕКАЦІЇ ДИФУЗІЙНОГО СОКУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Цукрова промисловість належить до базових галузей агропромислового комплексу України: щороку вона переробляє 8-10 млн т цукрового буряку й формує стратегічні запаси цукру для внутрішнього споживання та експорту. Економічна значущість галузі визначається високою часткою енергетичних витрат і тісним взаємозв'язком із суміжними секторами - вирощуванням буряку, виробництвом вапняку, логістикою та енергетикою. Ключове технологічне завдання кожного заводу - отримати максимальний вихід кристалічного цукру при мінімальних втратах сахарози, забезпечивши стабільну якість за показниками кольоровості, зольності та вмісту редуційних сполук.

Найвідповідальнішим етапом комплексу дефекосатурації є **преддефекація** - початкова лужна обробка дифузійного соку, під час якої нейтралізують агресивні кислоти, абсорбують білково-пектинові колоїди, агломерують нерозчинні кальцієві солі та частково видаляють мікроорганізми. Саме коректно проведена преддефекація задає хімічні й реологічні передумови для подальших фаз очищення (основної дефекації, I та II сатурації), визначаючи ступінь втрат сахарози й ефективність фільтрації.

1.1. Аналіз існуючих систем автоматизації. Вибір регульованих величин і каналів регулювання

У баках-преддефекаторах циркулює суміш дифузійного соку, повернутого соку I сатурації та вапняного молока. Визначальним параметром процесу є рівень рН, який повинен підтримуватися у вузькому інтервалі 10,8-11,2. Зниження рН (< 10,6) не забезпечує повного зв'язування органічних кислот і призводить до підвищеної кольоровості та в'язкості соку. Надмірне за-луження (> 11,4) спричиняє надлишкове споживання СаО, утворення гідроксикарбонатів кальцію, що веде до втрат сахарози й збільшення об'ємів дефекаційного шламу. За оцінками технологів, нестабільність рН у преддефекаторі може зумовлювати до 1 % втрат виходу цукру, що для середнього заводу становить десятки мільйонів гривень за сезон.

Таблиця 1.1 Типові рівні автоматизації

Рівень	Коротка характеристика	Недоліки
Ручний	Проба-контроль рН лабораторним потенціометром (10-15 хв), регулювання СаО та рециркуляційного соку «на очно»	інерційність > 5 хв; висока дисперсія рН; перевитрата СаО
Напівавтомат	Потенціометр-індикатор у потоці, ручне дозування СаО, автоматичний PID-контур температури	стабілізація Т, але рН коливається $\pm 0,2$; постійний обхід персоналу
Повністю автомат	2 \times занурні рН-електроди + РТ100; PLC з PI-контуром рН і PID-контуром Т; СаО-насос та клапан пари під керуванням 4-20 мА; рецептний SCADA-режим	потребує капітальних інвестицій і професійного сервісу

У класичній ручній схемі контролю рН оператор періодично — кожні 10–15 хвилин — відбирає пробу, вимірює її за допомогою лабораторного пробовідбірника, орієнтуючись на емпіричні таблиці, коригує подачу вапняного молока або соку першої сатурації. Попри поширеність, такий метод має низку істотних обмежень.

По-перше, затримка у зворотному зв'язку: весь ланцюг дій від моменту відбору проби до фактичної реакції оператора триває близько 6–7 хвилин. А тим часом концентрація СаО у баку здатна змінитися вже протягом першої хвилини після внесення корекцій. По-друге, просторова нерівномірність: рН у неоднорідному середовищі може коливатись у межах 0,3–0,4 одиниці, що робить поодинокі вимірювання ненадійним представником середнього значення. Нарешті, людський фактор — втома, неухважність чи недостатня підготовка — нерідко призводять до систематичних помилок у дозуванні реагентів.

Перехід до автоматизованої системи контролю та регулювання рН є логічним і своєчасним кроком у межах загальної цифрової трансформації виробництва. Такі системи базуються на комплексному підході, де всі етапи — від вимірювання до реакції — відбуваються безперервно та з високою точністю.

Зокрема, передбачено:

- використання занурювальних комбінованих електродів із вбудованою температурною компенсацією для постійного контролю рН у режимі реального часу;

- інтеграцію програмованого логічного контролера (ПЛК), який розраховує відхилення від заданого значення та генерує управляючий вплив відповідно до алгоритму ПІ-регулювання;
- застосування виконавчих механізмів: частотно-регульованого приводу для насоса-дозатора вапняного молока та регулюючого клапана в лінії повернення соку з першої сатурації;
- візуалізацію й діагностику процесів через SCADA/HMI-платформу, яка також відповідає за збереження історичних даних, налаштування параметрів і спостереження за станом сенсорів.

1.1.2. Вибір контрольованих величин

pH суспензії (ціль 10,9-11,1) - прямо входить до регламенту; визначає адсорбцію колоїдів і витрату реагентів.

- Температура соку ($50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ / $85 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) - забезпечує кінетику реакції CaO з органічними кислотами та в'язкість суспензії.

Додатково SCADA архівує рівень і витрати, але ці величини не входять до основного завдання регулювання.

1.1.3. Вибір сигналізованих величин

Таблиця 1.2 Вибір сигналізованих величин (межова та аварійна сигналізація)

Параметр	Верхня / нижня межа
pH > 11,4	Попередження + вимкнення подачі CaO
pH < 10,6	Попередження + подача Q CaO; при <10,4 - зупинка подачі соку
T > 90 °C	Сигнал «Висока T»
T < 45 °C	Сигнал «Низька T», блок запуску нагріву
Втрата сигналу з будь-якого pH-зонда	Перехід у ручний режим, звукова тривога
Рівень > 95 % V	Відкриття дренажу, блок подачі CaO і соку вимк

1.2. Розробка завдання на систему автоматизації

Мета завдання - визначити технічні, функціональні та експлуатаційні вимоги до автоматизованої системи керування (АСК) баком-преддефекатором, у якій основними регульованими параметрами є pH та температура суспензії.

Об'єкт автоматизації - вертикальний циліндричний преддефекатор із

механічною мішалкою й барботажним кільцем для CO₂. Автоматизованому контролю підлягають:

- рН суспензії; $10,6 < \text{pH} < 11,4$
- температура соку (50 ± 5 °С на холодній та 85-90 °С на гарячій стадії);

Очікувані результати впровадження автоматизації:

- зменшення витрат СаО на 5-8 %, що напряду скорочує собівартість;
- підвищення виходу цукру на 0,3-0,5 % маси буряку завдяки стабілізації рН;
- зниження споживання пари у випарно-кристалізаційному відділенні на 2-4 % через меншу кількість побічних сполук;
- скорочення обсягів дефекат-шламу на 6-10 % і, відповідно, екологічного навантаження;
- покращення умов праці, оскільки оператор переходить від «ручної хімії» до нагляду за цифровими показниками.

1.2.2. Вибір місця розташування технічних засобів

№	Засіб	Місце встановлення	Примітка
1	Датчик витрати дифузійного соку	На трубопроводі подачі дифузійного соку перед входом у преддефекатор	Формує сигнал про витрату соку для розрахунку співвідношення СаО/сік
2	Перетворювач витрати соку	Біля датчика витрати дифузійного соку	Перетворення аналогового сигналу в уніфікований 4-20 мА
3	Датчик витрати вапна	На лінії подачі вапняного молока після дозатора	Визначає фактичну витрату реагенту
4	Перетворювач витрати вапна	Біля датчика витрати вапна	Формує сигнал у контур регулятора співвідношення
5	Регулятор співвідношення	У ПЛК або окремий модуль	Керує виконавчим механізмом подачі вапна
6	Виконавчий механізм подачі вапна	Після перетворювача витрати вапна, на виході з насоса-дозатора	Зазвичай частотник або регулюючий клапан
7	витрати вапна	На виході преддефекатора, у технологічному штуцері	Основний контрольований параметр системи
8	Перетворювач	Біля датчика витрати вапна	Подає сигнал у SCADA-регулятор
9	SCADA-регулятор	Сервер або ПЛК із відповідним каналом	Зовнішній контур каскадної системи регулювання
10	Суматор	Програмна частина у ПЛК або SCADA	Підсумовує витрати зворотних потоків

11	Регулятор витрати поверненого соку	Керує поверненням соку з І сатурації	Стабілізує загальний гідравлічний баланс у системі
12	Температурний датчик	Вхід і вихід із преддефектора (не включений у контур керування в цій схемі)	Дані можуть використовуватися для архівації або візуального контролю

1.2.3 Таблиця вимог до системи автоматизації

Нижче наведено основні функціональні та технічні вимоги до автоматизованої системи керування процесом регулювання рН і температури в преддефекторі

№	Вимога	Пояснення / Призначення
1	Безперервне вимірювання рН	рН-електрод з температурною компенсацією, точність не гірша $\pm 0,05$ рН
2	Регулювання рН у межах 10,9-11,1	Алгоритм PI-регулятора формує сигнал на насос вапняного молока (4-20 мА)
3	Контроль і підтримання температури соку	РТ100 → PID-регулятор → регулюючий клапан пари
4	Автоматичне промивання електродів	СІР-система з HCl активується кожні 8 год або вручну
5	Подвійне резервування рН-каналу	Другий електрод як резервний або для обчислення середнього значення
6	Сигналізація критичних відхилень	рН < 10,6 або > 11,4; температура < 45 °С або > 90 °С - зупинка або аварія
7	Архівація технологічних даних	Запис трендів рН, Т, витрати реагентів кожні 1 с; збереження не менше 90 діб
8	Захист та стабільність живлення	Стабільність ± 10 %, заземлення < 4 Ом, наявність UPS для ПЛК та SCADA
9	Можливість ручного керування	3 НМІ-панелі - ручне керування насосом та клапаном для обслуговування
10	Сумісність з SCADA/НМІ	Візуалізація параметрів, журнал подій, доступ до уставок, блокувань
11	Швидкодія системи	Повна реакція на зміну рН або температури не більше 60 с

Регулювання температури в даній реалізації не передбачено, лише контроль з відображенням у SCADA/НМІ.

Ці вимоги визначають базовий функціонал та забезпечують стабільну, безпечну й енергоефективну роботу автоматизованої системи у процесі преддефекації

соку на цукровому виробництві.

РОЗДІЛ 2. ОПИС СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Автоматизована система регулювання рН і температури у баку преддефекатора призначена для стабілізації хімічних умов обробки дифузійного соку на ранньому етапі його очищення. Система забезпечує підтримання заданого рівня лужності та температури, що є критичними для ефективної нейтралізації органічних кислот, агрегації колоїдів і зменшення втрат сахарози.

Основними параметрами, що контролюються в системі, є:

- рівень рН суспензії в робочому діапазоні 10,9-11,1 одиниць;
- сигнали стану виконавчих механізмів, витрати вапняного молока та подачі пари (опціонально);

У структурному плані система складається з таких основних компонентів:

- вимірювальні прилади: два занурні рН-електроди з температурною компенсацією (PT100), встановлені у різних точках бака;
- виконавчі механізми: насос-дозатор вапняного молока з частотним приводом;
- контролер: ПЛК із підтримкою аналогових сигналів 4-20 мА, цифрових входів/виходів та протоколів обміну (наприклад, Modbus-TCP);
- операторський інтерфейс (НМІ): панель локального керування, розташована біля бака;
- SCADA-сервер: для моніторингу, архівації, формування звітів і налаштування системи.

Принцип дії системи полягає у наступному: значення рН та температури вимірюються в режимі реального часу і передаються до ПЛК. Алгоритми ПІ-та/або PID-регулювання аналізують відхилення від заданих уставок і формують керуючі сигнали: один - на частотний перетворювач насоса вапняного молока, інший - на регулюючий клапан подачі пари. Оператор має змогу контролювати стан об'єкта з НМІ, а у SCADA-середовищі відображаються графіки параметрів, спрацьовування сигналізацій, події, а також ведеться архівація технологічних даних.

Усі компоненти системи мають мати захист IP65 або вище, а ПЛК та НМІ розміщені у шафі керування із захистом IP53, установлених у сухому приміщенні. Електроживлення стабілізується через джерело безперебійного живлення (UPS), передбачене заземлення < 4 Ом. Система має ручний режим керування на випадок обслуговування або аварійної ситуації.

Завдяки впровадженню автоматизованої системи регулювання у преддефекаторі досягається зменшення коливань рН і температури, економія

вапняного молока, підвищення надійності процесу очищення та зменшення витрат енергії у наступних стадіях виробництва цукру.

2.1. Вибір технічних засобів. Функціональна схема та специфікація приладів

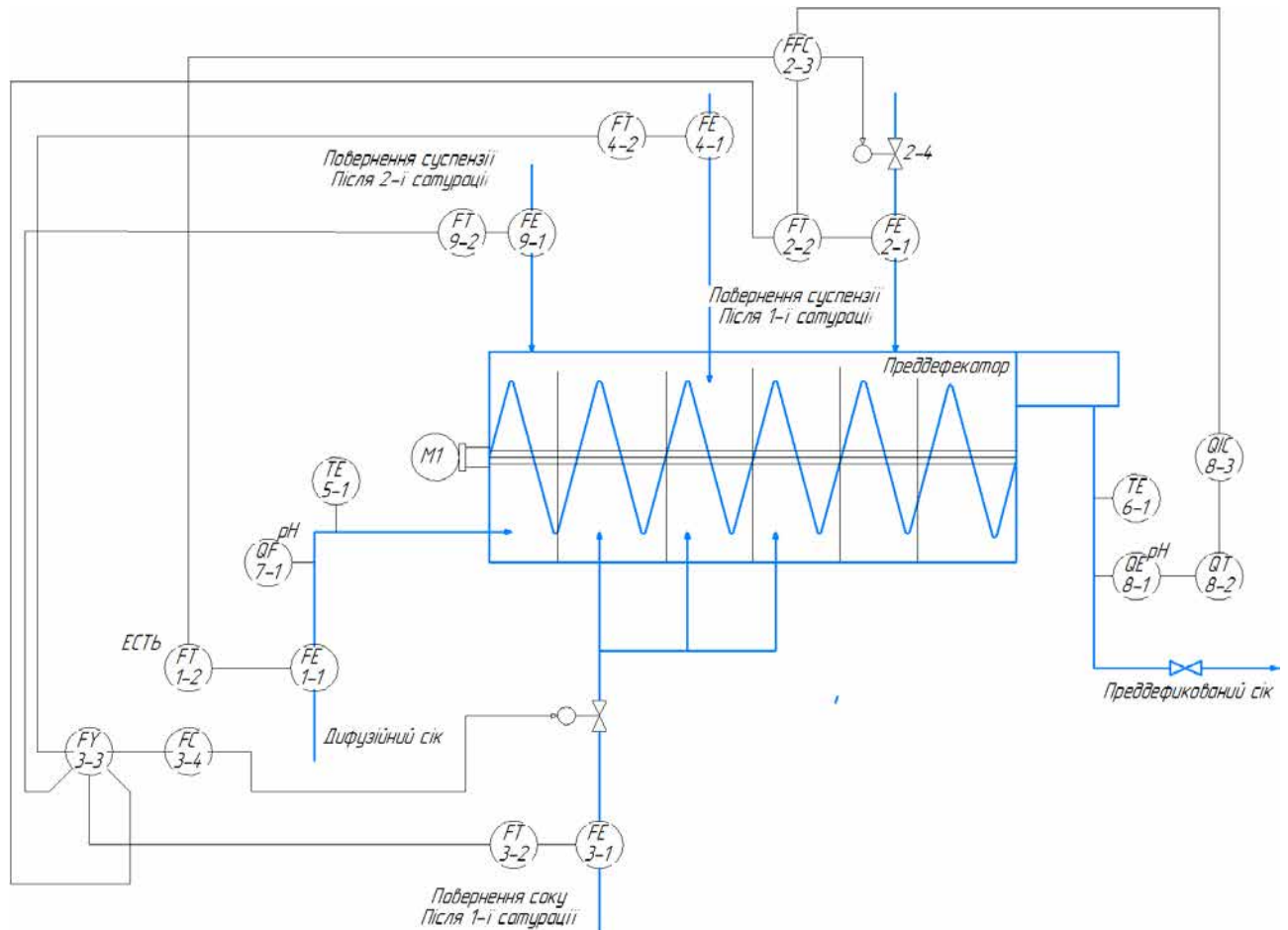


Рис. 2.1.- Функціональна схема автоматизації преддефектора

FE 1-1 - Датчик витрати дифузійного соку- встановлюється перед преддефектором, вимірює витрату соку для розрахунку дозування вапна.

FT 1-2 - Перетворювач витрати соку - формує аналоговий сигнал (4-20 мА) для контролера на основі даних з FE 1-1.

FE 2-1 - Датчик витрати вапняного молока - встановлюється після насоса-дозатора, вимірює реальну подачу реагенту.

FT 2-2 - Перетворювач витрати вапна - передає сигнал від витратоміра FE 2-1 до ПЛК, забезпечує сумісність із FT 1-2.

FFC 2-3 - Регулятор співвідношення - ПЛК порівнює співвідношення сік/вапно з уставкою від рН-регулятора, керує подачею вапна.

2-4 - Виконавчий механізм вапна - насос або клапан, що змінює подачу вапна згідно з сигналом управління.

QE 8-1 - Датчик рН - вимірює рН соку на виході з апарата, головний контрольований параметр.

QT 8-2 - Перетворювач рН - оброблює сигнал з електрода, враховує температуру та передає його в ПЛК.

QIC 8-3 - Регулятор рН (SCADA) - визначає відхилення рН і видає уставку на FFC 2-3 для адаптивного регулювання.

FY 3-3 - Суматор витрат - Обчислює загальну витрату через апарат з урахуванням зворотних потоків.

FC 3-4 - Регулятор повернення соку - керує витратою повернутого соку для стабілізації загального потоку.

TE 5-1 / TE 6-1 - Датчики температури встановлені на вході/виході бака; використовуються для моніторингу або сигналізації.

Опис функціональної схеми

Функціональна схема відображає каскадну систему регулювання рН у преддефекторі, побудовану за принципом внутрішнього та зовнішнього контурів.

Основний керований параметр - рН преддефектованого соку, який регулюється зміною співвідношення витрат соку і вапна. Система реалізована у вигляді двоконтурного каскаду:

- внутрішній контур стабілізує співвідношення витрат соку та вапняного молока,
- зовнішній контур регулює безпосередньо значення рН на виході апарата.

Внутрішній контур

- Датчик витрати соку (1-1) вимірює витрату дифузійного соку, що надходить у преддефектор.
- Датчик витрати вапна (2-1) вимірює подачу вапняного молока.

- Сигнали з обох витратомірів перетворюються (1-2 та 2-2) у стандартизовану форму (4-20 мА) та передаються в суматор-співвідношувач FY (3-3), де обчислюється фактичне співвідношення.
- Значення порівнюється із заданим уставковим співвідношенням у регуляторі FC (3-4), який керує виконавчим механізмом (2-4) - це може бути частотний перетворювач насоса або регулюючий клапан на лінії подачі вапна.

Таким чином, внутрішній контур підтримує сталу пропорцію вапна до соку, що вже забезпечує базову стабілізацію рН.

Зовнішній контур

- Датчик рН (8-1) встановлено на виході з преддефектора.
- Його сигнал обробляється перетворювачем (8-2) і надходить у регулятор рН (8-3).

Цей регулятор подає уставку співвідношення на внутрішній контур (на FC 3-4), тобто коригує співвідношення сік/вапно на основі реального значення рН.

Така каскадна структура дозволяє швидко й точно реагувати на збурення й запобігає перерегулюванню системи.

Додаткові потоки і компенсація

У схему включено потоки повернення соку після I сатурації (3-1 / 3-2), а також повернення суспензії після I та II сатурацій (4-1 / 4-2 та 9-1 / 9-2).

Для компенсації загального об'єму та підтримання балансу маси реалізовано суматор і регулятор (3-3 та 3-4), які впливають на витрату поверненого соку.

Це дозволяє точно стабілізувати навантаження на преддефектор незалежно від коливань у допоміжних потоках.

Температурний контроль

Температура соку контролюється датчиком TE (5-1) на вході та TE (6-1) на виході.

Значення температури може використовуватись для коригування уставок або як частина окремого PID-контру для регулювання подачі пари в теплообмінник.

Окремі вузли

M1 - двигун мішалки, працює автономно, не включений у контур регулювання.

QT 8-2 - сигнал про витрату або об'єм на виході преддефектора.

QIC 8-3 - SCADA-контролер або НМІ, що відображає значення рН та дозволяє вводити уставки.

2.2. Технічні вимоги до трасування та монтажу елементів. Схема з'єднань

Монтаж та трасування елементів автоматизованої системи регулювання рН у преддефекаторі повинні відповідати вимогам надійності, електробезпеки, захисту від впливу агресивного середовища та простоти обслуговування. Нижче наведено основні технічні вимоги до прокладання та встановлення обладнання:

Загальні вимоги до трасування

Сигнальні та силові кабелі прокладаються в окремих металевих лотках або трубах для уникнення перешкод та індуктивного навантаження.

Мінімальна відстань між силовими та низькострумовими кабелями - 200 мм, перехрещення тільки під кутом 90°.

Усі прокладки кабелів - над рівнем підлоги $\geq 2,5$ м або у спеціальних кабельних каналах із маркуванням.

Не допускається прокладання кабелів поблизу джерел тепла, пари або у вологих зонах без додаткової ізоляції або IP-захисту.

Монтаж датчиків та виконавчих механізмів

Всі рН-електроди монтуються у спеціальні захисні штуцери або ретракторні гільзи; обов'язкове заземлення корпусу датчика.

Температурні перетворювачі PT100 встановлюються у термогільзах з нержавіючої сталі AISI 316, що дозволяє демонтаж без зупинки процесу.

Витратоміри повинні мати прямолінійні ділянки (вхід/вихід) довжиною не менше $5 \times DN$ до/після приладу, змонтовані горизонтально, строго за стрілкою потоку.

Насос-дозатор вапна встановлюється на фундаменті або опорній рамі, з антивібраційними прокладками та легким доступом до вузлів обслуговування.

Регулюючий клапан повинен бути змонтований із обвідною лінією для можливості ремонту без зупинки процесу.

3. Вимоги до шафи керування

Шафа встановлюється у сухому, вентильованому приміщенні (операторська або електрощитова), з температурою $+10 \dots +35$ °C.

Мінімальний клас захисту - IP53, із окремим заземлюючим контуром.

Заборонено розміщення шафи поблизу пари, кислотних резервуарів або водяних джерел.

У середині шафи кабелі прокладаються по DIN-рейках з фіксованим маркуванням кожного каналу.

Заземлення та електроживлення

Питомий опір заземлення системи не повинен перевищувати 4 Ом.

Силове живлення шафи - $3 \times 400 \text{ В} \pm 10 \%$, 50 Гц, із обов'язковим захистом по фазі й нулю.

Усі слабкострумові прилади (датчики, електроди, НМІ) живляться від джерела 24 В DC, через стабілізований блок живлення з резервуванням (UPS).

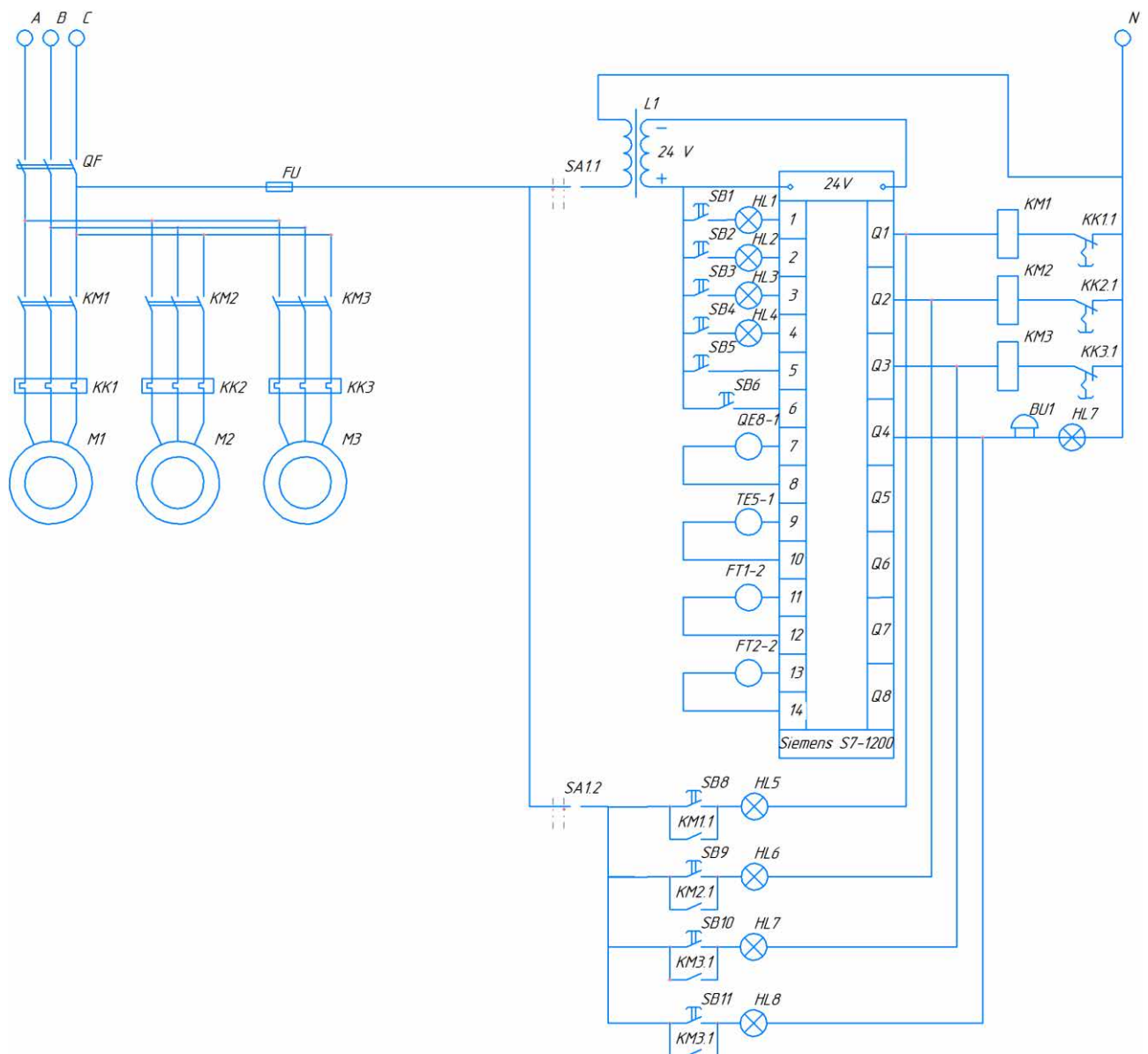


Рис 2.2. – Схема з'єднань для предфектора

Принципова електрична схема розроблена для забезпечення автоматичного та ручного керування виконавчими механізмами, які беруть участь у процесі регулювання рівня рН у баку преддефекації. В основі системи - програмований логічний контролер Siemens S7-1200, який керує електродвигунами насосів та мішалки, а також обробляє сигнали від датчиків рН, температури та витрати.

Живлення силової частини

Трифазне живлення 3×400 В (фази А, В, С) подається через автоматичний вимикач QF і додатковий захист FU, після чого надходить на силові контактори КМ1, КМ2, КМ3. Вони керують запуском виконавчих механізмів:

- М1 - насос-дозатор вапняного молока, основний вплив на рівень рН;
- М2 - мішалка у баку преддефекації для гомогенізації реагентів;
- М3 - насос повернення соку (рециркуляція після І сатурації).

Вихідні контакти КК1, КК2, КК3 комутують силову напругу на відповідні двигуни.

Живлення та логіка керування

Для живлення логічної частини та малопотужних елементів (ПЛК, кнопок, ламп) використовується джерело постійного струму 24 В (L1). Вмикання та вимикання логічного живлення здійснюється через тумблер SA11.

Програмований логічний контролер Siemens S7-1200 приймає сигнали від органів керування та датчиків через свої входи (I0-I14) та керує виконавчими механізмами через виходи (Q1-Q4).

Усі елементи логіки керування - лампи, кнопки, датчики - з'єднані через гальванічно розв'язані 24 В сигнальні лінії. Це забезпечує безпечну взаємодію логіки з силовою частиною.

Панель ручного керування

На панелі розташовано кнопки:

- SB1 / SB2 - пуск / стоп насоса-дозатора М1;
- SB3 / SB4 - пуск / стоп мішалки М2;
- SB5 - скидання аварій;
- SB6 - перемикач режиму роботи (AUTO / MAN), за логікою ПЛК.

Світлові індикатори:

- HL1 - робота насоса М1;

- HL2 - сигналізація про зниження рН;
- HL3 - сигналізація про перевищення рН;
- HL4 - аварійне повідомлення;
- HL7 - загальна аварія або сервісний режим;
- BU1 - зумер або аварійний звуковий сигнал.

Кнопки та індикатори підключено до цифрових входів/виходів ПЛК та живляться від 24 В джерела.

Режим автоматичного та ручного керування

Ключовий елемент - перемикач SA11, який дозволяє оператору обирати режим роботи:

- AUTO (SA11 увімкнено) - контроль здійснює ПЛК на основі сигналів з датчиків рН (QE8-1), температури (TE5-1), витратомірів (FT1-2, FT2-2) і регуляторів QIC, FFC.
- MANUAL (SA12 увімкнено) - активується контур ручного керування виконавчими механізмами. Тільки у цьому режимі оператор може керувати двигунами M1-M3 через кнопки SB1-SB4 напряму. Контактори KM1.1, KM2.1, KM3.1 при цьому спрацьовують незалежно від логіки ПЛК.

SA12 виконує функцію апаратного дозволу ручного режиму, тобто забезпечує безпечне та контрольоване переключення системи у стан прямого ручного втручання.

5. Датчики та зворотній зв'язок

До аналогових входів ПЛК підключені:

- QE8-1 / QT8-2 - вимірювання рН на виході з преддефектора;
- TE5-1 - температурний датчик у баку;
- FT1-2 - витратомір дифузійного соку;
- FT2-2 - витратомір вапняного молока.

Ці сигнали використовуються у каскадній структурі регулювання:

- внутрішній контур: співвідношення витрат сік/вапно (FFC);
- зовнішній контур: підтримка рН у заданому діапазоні (QIC).

2.2.1 Вибір контролера та електроніки

У структурі будь-якої автоматизованої системи шафа керування займає особливе місце — саме вона поєднує ключові елементи, що забезпечують узгоджену роботу обладнання. У її межах розміщено захисні пристрої, програмований логічний контролер (ПЛК), блоки живлення, реле, прохідні клеми й інші елементи, без яких процес керування був би просто неможливий.

Основні функції ПЛК зводяться до зчитування сигналів від датчиків, обробки отриманих даних та передачі керуючих імпульсів до виконавчих пристроїв. Для живлення контролера, а також усіх підключених елементів, передбачено відповідні блоки живлення. Ще один важливий компонент — панель оператора: вона дозволяє візуалізувати стан системи, вносити зміни в параметри та стежити за перебігом технологічного процесу.

У питанні електробезпеки шафа не обходиться без автоматичних вимикачів. Їхня присутність критично важлива для захисту мережі від перевантажень і коротких замикань. Для нашої системи оптимальним є застосування двох категорій вимикачів: потужні — для живлення двигунів або інших енергомістких навантажень, а також менш потужні — для живлення контролера та допоміжної електроніки.

Серед сучасних виробників варто виокремити Siemens — добре знаний бренд, чия продукція має високу надійність і відповідає актуальним стандартам галузі. У даному випадку доцільним рішенням є використання автоматичного вимикача моделі 3VA2 на 250А. Це обладнання забезпечує не лише базовий захист, а й дозволяє реалізувати селективне вимикання, що особливо важливо в складних електромережах.

Висока відключальна здатність (до 36 кА) дає змогу експлуатувати його у трифазних колах великої потужності. Завдяки чотириполюсній конструкції вимикач може знеструмити не лише фазні провідники, а й нейтральний, що підвищує загальний рівень безпеки.



Рис. 2.2.1 - Автоматичний вимикач Siemens 3VA2 250A 4P, 36kA

Таблиця 2.2.1

Технічні характеристики Siemens 3VA2 250A 4P

Характеристики	Значення
Кількість полюсів	4P
Нейтраль	Зліва
Номінальний струм	200 А
Номінальна робоча напруга	690 В



Рис. 2.2.2 - Автоматичний вимикач Siemens 5SY6216-7

Технічні характеристики Siemens 5SY6216-7

Характеристики	Значення
Кількість полюсів	2P
Тип мережі	Змінний струм
Номинальний струм	16 А
Крива відключення	C

Коли постає завдання створити систему автоматизації, перше, що доводиться вирішити — який саме контролер стане серцем усього проекту. Тут не варто недооцінювати важливість вибору: саме від нього залежить, наскільки гнучкою, надійною та масштабованою буде вся система. Компанія Siemens уже давно стала тим брендом, до якого звертаються не просто за приладом, а за впевненістю.

Не просто "виробник", а, радше, постачальник повного спектра інструментів — Siemens охоплює майже все: від простого керування локальними об'єктами до побудови складних SCADA-рішень. І от саме серія S7-1200 — вона, здається, особливо полюбилася тим, хто працює з типовими задачами. Універсальна, легка в налаштуванні, економна — вона дає змогу швидко запуснути щось, що просто працює.

Ці контролери — справжня знахідка для невеликих і середніх проектів. А ще, за потреби, все це легко розширюється модулями — як пазл.

Втім, якщо система складна, і хочеться чогось потужнішого — тоді S7-1500 буде до речі. Ця серія — вже інша ліга: вища швидкість обміну, і обробка аварій просунута, і навіть діагностика — така, як треба. Усе це — для задач, важливі дані, час і точність. Таблиця 5.3 Порівняльна таблиця ПЛК Siemens серії SIMATIC

Порівняльна таблиця контролерів для використання у дипломному проєкті

Модель ПЛК	S7-1200	S7-1500	S7-300 (legacy)
Призначення	Універсальний для невеликих систем	Складні системи, розширена функціональність	За потреби підтримки старої інфраструктури
Кількість вх/вих	до 64 вбуд., до 248 з модулями	до 4096	до 1024
Кількість аналог. вх/вих	до 8	до 128	до 64
Пам'ять	до 100 КБ програма, до 200 КБ дані	до 1 МБ / 5 МБ	до 64 КБ програма
Ціна	від 9000 грн	від 25000 грн	від 12000 грн

Вибір контролера

Для реалізації запропонованої системи автоматизації оптимальним рішенням є використання контролера Siemens S7-1200, який поєднує компактність, гнучкість конфігурації та розширений функціонал, необхідний для керування технологічним процесом у реальному часі.

Цей контролер підтримує вбудоване PID-регулювання, роботу з швидкими лічильниками, аналоговими модулями, а також має вмонтований Ethernet-інтерфейс, що забезпечує безпосередню інтеграцію з панелями оператора, SCADA-системами або іншими ПЛК у межах однієї мережі.

Зокрема, обрана модель CPU 1214C DC/DC/DC забезпечує необхідну кількість вбудованих цифрових входів/виходів, підтримує розширення через модулі сигналів та аналогові входи, а також реалізує обмін даними через протокол PROFINET — стандарт зв'язку в сучасних промислових мережах.

Контролер виконує логічні операції, ініціює запуск і зупинку обладнання, обробляє входні сигнали з датчиків рН та температури, формує керуючі команди для насосів і клапанів, а також забезпечує двосторонню взаємодію з НМІ-панеллю в режимі реального часу.

Ключовими перевагами використання S7-1200 є:

– Висока надійність у промислових умовах експлуатації;

– Повна інтеграція в середовище Siemens TIA Portal, що дозволяє виконувати проектування, налагодження та супровід системи в уніфікованому середовищі - від введення алгоритмів до моніторингу в реальному часі.

Таким чином, контролер Siemens S7-1200 не лише відповідає технічним вимогам проекту, а й створює потенціал для подальшого масштабування та модернізації системи, що особливо важливо в умовах динамічного виробничого середовища.



Рис. 2.2.3 - Програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C

Таблиця 2.2.3

Технічні характеристики Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC

Характеристика	Значення
Тип живлення	24 В пост. струм
Кількість цифрових входів	14
Кількість цифрових виходів	10 (транзисторні)
Кількість аналогових входів	2
Вихідна напруга/струм	24 В / до 0,5 А
Комунікаційні інтерфейси	1 × PROFINET (RJ-45)
Підтримувані протоколи	PROFINET, Modbus TCP, S7
Програмне забезпечення	TIA Portal

Контролер **S7-1200** повністю відповідає вимогам нашої автоматизованої системи керування та дозволяє реалізувати надійне, гнучке і масштабоване рішення на сучасній платформі Siemens.

Блок живлення

Надійність роботи будь-якої автоматизованої системи безпосередньо залежить від стабільності її електроживлення. Це особливо актуально під час проектування щитів керування, де необхідно забезпечити безперебійне енергозабезпечення всіх ключових компонентів - від програмованого логічного контролера (ПЛК) і сенсорів до виконавчих механізмів та індикаційних пристроїв.

Більшість сучасних цифрових засобів автоматизації працює при напрузі 24 В постійного струму, у той час як загальнопромислова електромережа видає 220 В змінного струму з частотою 50 Гц. Така різниця в електричних параметрах зумовлює необхідність використання перетворювального пристрою - імпульсного джерела живлення, який не лише адаптує напругу, а й стабілізує її, запобігаючи просіданням або стрибкам у мережі.

У межах цього проєкту було обрано блок живлення Siemens SITOP PSU100C 24V/2.5A - представника серії надійних і компактних джерел живлення SITOP, орієнтованих на промислове застосування. При своїх малих габаритах він забезпечує потужність до 60 Вт, демонструє високий ККД (до 90 %), а також має вбудовані механізми захисту від перевантажень, коротких замикань та перенапруг.

Додатковою перевагою є DIN-монтаж, що дозволяє легко інтегрувати пристрій у щит без потреби у додаткових кріпленнях, раціонально використовуючи внутрішній простір. У своїй цінній категорії SITOP PSU100C вирізняється винятковим поєднанням якості, функціональності та доступності, що робить його оптимальним вибором для компактних і бюджетно орієнтованих автоматизованих систем.



Рис. 2.2.4 - Блок живлення Siemens SITOP PSU100C 24V/2.5A

Таб. 2.2.4 Технічні характеристики Siemens SITOP PSU100C 24V/2.5A

Характеристика	Значення
Вхідна напруга	85-264 В AC (50/60 Гц)
Вихідна напруга	24 В DC
Номінальний вихідний струм	2.5 А
Потужність	60 Вт
ККД (коефіцієнт корисної дії)	до 90 %
Захисти	Коротке замикання, перевантаження, перенапруга
Робоча температура	-10...+70 °C
Спосіб встановлення	На DIN-рейку
Габарити	~90 × 100 × 55 мм (типово)

Використання блоку живлення Siemens SITOP PSU100C у нашій системі автоматизації дозволяє досягти стабільності роботи, надійного запуску всіх компонентів, а також захисту від критичних електричних збоїв. Завдяки широкому діапазону вхідної напруги та компактному розміру, цей пристрій є ідеальним рішенням для промислових умов експлуатації та тривалої безперебійної роботи системи.

Проміжне реле

На наступному етапі проектування щита керування необхідно обрати відповідні проміжні реле, які забезпечують надійну комутацію силових кіл за допомогою сигналів від програмованого логічного контролера (ПЛК). Реле є електромеханічним пристроєм, що містить котушку керування та групу

контактів. При подачі напруги на котушку створюється магнітне поле, яке притягує якір і замикає або розмикає відповідні контакти, тим самим вмикаючи або вимикаючи силовий ланцюг.

Таке рішення дозволяє ізолювати ПЛК від силових кіл і забезпечує безпечну та ефективну комутацію навантаження. Проміжне реле також відіграє роль буферного або проміжного пристрою, що забезпечує передачу сигналу керування без перевантаження виходів контролера.

Для реалізації задачі автоматизації в нашій системі найкращим варіантом є реле Siemens 3RH2122-1AP00, яке відноситься до серії SIRIUS - це надійне і компактне рішення, оптимальне для керування контакторами, клапанами, лампами, виконавчими механізмами тощо.

Рис. 2.2.5 - Проміжне реле Siemens 3RH2122-1AP00

Реле Siemens 3RH2122-1AP00 має дві групи нормально відкритих (NO) та дві нормально закритих (NC) контактів, що забезпечує гнучкість під час побудови логіки. Воно оснащено котушкою керування на 24 В DC, що повністю сумісна з напругою логіки ПЛК. Пристрій монтується на DIN-рейку та має можливість швидкої заміни.

Таб. 2.2.5

Технічні характеристики реле Siemens 3RH2122-1AP00**

Характеристика	Значення
Керуюча напруга котушки	24 В DC
Кількість контактів	2 NO + 2 NC
Номінальний струм контактів	10 А
Номінальна комутаційна напруга	до 250 В AC
Монтаж	На DIN-рейку
Тип корпусу	Модульний, 45 мм ширина
Температурний діапазон	-25...+60 °C
Ступінь захисту	IP20 (в корпусі)

Використання реле Siemens 3RH2122-1AP00 забезпечує безпечну, довговічну та зручну комутацію, а також підвищує гнучкість системи керування. Завдяки компактному виконанню та широким функціональним можливостям, реле легко інтегрується у щит і чудово працює в парі з іншими компонентами Siemens, зокрема ПЛК серії S7-1200.

Клемники

Коректний вибір клемників є критичним для надійності, безпеки та зручності обслуговування щита. Клеми забезпечують компактне та швидке з'єднання провідників, особливо в умовах промислової експлуатації.

У проєкті використовуються клемники Siemens серії 8WH, які монтуються на DIN-рейку 35 мм та мають високу якість контактів. Обрані три типи:

8WH2000-0AF00 - для сигнальних та низьковольтних кіл (до 2,5 мм²). Підключення ПЛК, датчиків, живлення 24 В.

8WH2000-0AG00 - для силових з'єднань (до 4 мм²). Застосовуються для двигунів та виконавчих механізмів.

8WH2000-0CF07 - клема заземлення. Має зелене маркування, підключає контур РЕ.

Таке рішення забезпечує якісний монтаж і просте технічне обслуговування.



Рис. 2.2.6 - Клеми Siemens серії 8WH (прохідні та заземлювальні)

Таб. 2.2.6 Типи та призначення клемників Siemens 8WH

Модель клемника	Тип	Макс. переріз проводу	Призначення
8WH2000-0AF00	Прохідна (2-провідна)	до 2,5 мм ²	Сигнальні та контрольні лінії
8WH2000-0AG00	Потужна прохідна	до 4 мм ²	Силові лінії живлення
8WH2000-0CF07	Заземлювальна клема	до 4 мм ²	З'єднання із захисним контуром РЕ

Панель оператора

Останнім елементом у комплектуванні нашого щита керування є панель оператора, яка відіграє ключову роль у забезпеченні взаємодії між людиною та автоматизованою системою. Панель надає оператору зручний інтерфейс для управління технологічним процесом, моніторингу параметрів та оперативного внесення коригувань у режимі реального часу.

Для нашого проекту оптимальним вибором є панель Siemens SIMATIC HMI KTP700 Basic, яка поєднує в собі надійність, ергономічність та функціональність, притаманні продукції Siemens. Ця модель належить до серії Basic Panels, які розроблені для типових задач візуалізації в складі системи автоматизації на базі S7-1200.



Рис. 2.2.7 - Панель оператора Siemens SIMATIC HMI KTP700 Basic

Панель KTP700 Basic має 7-дюймовий сенсорний TFT-дисплей з роздільною здатністю 800×480 пікселів та підтримує як сенсорне, так і кнопочке управління (10 функціональних клавіш), що забезпечує гнучкість при роботі навіть у складних промислових умовах.

Основні характеристики HMI KTP700 Basic:

- Розмір екрана: 7" TFT, кольоровий
- Роздільна здатність: 800×480 пікселів
- Тип керування: сенсор + 10 функціональних кнопок
- Комунікації: 1× Ethernet, 1× USB, 1× RS485 (через адаптер)
- Живлення: 24 В пост. струм
- Програмне забезпечення: налаштування через TIA Portal (WinCC Basic)

- Ступінь захисту передньої панелі: IP65

Панель KTR700 Basic повністю сумісна з ПЛК S7-1200, забезпечуючи швидку передачу даних по PROFINET та надійний обмін інформацією без затримок. Завдяки вбудованим функціям візуалізації оператор може відстежувати значення рН, температуру, стан насосів і виконавчих механізмів, а також переглядати аварійні повідомлення та змінювати уставки.

Окремо варто відзначити зручність програмування панелі через єдине середовище TIA Portal, яке дозволяє реалізувати логіку, графіку, тренди та архівацію подій у межах одного ПЗ, забезпечуючи повну інтеграцію всіх компонентів системи.

Вибір датчиків

Система керування неможлива без контрольно-вимірювальних пристроїв, які перетворюють фізичні величини на електричні сигнали. Для вимірювання температури в нашій системі обрано датчик Danfoss MBT 3279, що має широкий діапазон вимірювання та підходить для температур до 300°C. Цей датчик забезпечує надійність, точність і оптимальне співвідношення ціни та якості. Він легко інтегрується у промислові системи автоматизації та підтримує стандартні сигнали виходу. Технічні характеристики наведені в таблиці 5.7, а зовнішній вигляд представлено на рисунку 3.8.



Рис. 2.2.8 - Датчик температури MBT 3279

Таблиця 2.2.8

Характеристики датчика Danfoss MBT 3279

Характеристика	Значення
----------------	----------

Діапазон вимірювального середовища	температур	-50 °C - 300 °C
Максимальний зовнішній тиск		500 бар
Чутливий елемент		Pt 100
Похибка		EN 60751 клас В
Клас захисту корпусу		IP65 по IEC 60529

Для вимірювання тиску в системі доцільно використати датчик Danfoss MBS 1700, який відповідає всім вимогам проєкту. Він забезпечує точні вимірювання в робочому діапазоні та стабільну роботу в промислових умовах.

Цей датчик відзначається надійністю та довговічністю, що мінімізує технічне обслуговування та підвищує загальну ефективність системи керування.



Рис. 2.2.9- Danfoss MBS 1700

Таблиця 2.2.9

Характеристики давача Danfoss MBS 1700

Характеристика	Значення
Вид робочого середовища	рідина, газ
Тип вимірюваного тиску	Відносний
Діапазони вимірювань	0 - 8 бар

Діапазон допустимих температур робочого середовища	-35 - 75°C
Діапазон компенсованих температур	0 - 85°C
Час реакції	5 мс

Для контролю об'єму повітря в системі застосовується ротаметр - простий і надійний витратомір для газів і рідин. Він дозволяє точно відслідковувати витрату повітря, що критично для стабільної роботи компресора під час випробувань.

Зовнішній вигляд пристрою наведено на рисунку 2.2.10.



Рис. 2.2.10 - Витратомір віхровий KROHNE OPTISWIRL 4070

Технічні характеристики ротаметра наведено в таблиці 5.9. У ній вказано діапазон вимірювання, точність, допустимий тиск і температурний режим. Ці параметри підтверджують відповідність ротаметра вимогам системи автоматизації.

Таблиця 2.2.10

Характеристики давача Danfoss MBS 1700

Характеристика	Значення
Робоча температура	До 220 *С

Робочий тиск	до 90 бар
Похибка	2% на барі

Останнім важливим елементом системи автоматизації є датчик рівня. Для нашого проєкту обрано ультразвуковий тип, який найкраще відповідає умовам експлуатації.

Його переваги:

- Безконтактне вимірювання - не контактує з рідиною, що підвищує ресурс.
- Висока точність - стабільна робота навіть у складних умовах.
- Універсальність - підходить для різних рідин і матеріалів.
- Простота обслуговування - легкий монтаж, мінімальні витрати на підтримку.
- Стійкість до впливів - працює в широкому діапазоні температур і вологості.

Усе це робить ультразвуковий датчик рівня оптимальним рішенням для контролю рівня в нашій системі.



Рис. 2.2.11- Ультразвуковий рівнемір UM30 - 13113

Таблиця 2.2.11

Технічні характеристики ультразвукового датчика рівня UM30 - 13113

Характеристика	Значення
Діапазон спрацювання, мм	100 - 1980
Робоча частота, кГц	300

Вихідний сигнал, мА	4-15
Тип з'єднання	роз'єм М12, 5 пінний роз'єм
Швидкість спрацювання, мс	150
Захист	IP 65
Робоча температура, *С	-20...70

Вибір виконуючих механізмів

На етапі вибору виконавчих механізмів ключову роль відіграє електромагнітний клапан, який реалізує керуючі дії в контурі регулювання.

Для нашої системи обрано GAMA GFSS-50F DN 50 N.C. - клапан із фланцевим з'єднанням, виконаний із нержавіючої сталі. Його діаметр DN 50 відповідає необхідній пропускній здатності, а робочий тиск 0-10 бар охоплює всі можливі режими. Конструкція "нормально закритий" (N.C.) гарантує безпечну зупинку при знеструмленні. Цей клапан - оптимальне рішення для нашої системи з погляду надійності, довговічності та зручності обслуговування. Зовнішній вигляд представлено на рисунку 2.2.12.



Рис. 2.2.12- Електромагнітний клапан GAMA GFSS

Таблиця 2.2.12

Технічні характеристики клапана GAMA

Характеристика	Значення
Живлення	220В 50 Гц
Робочий тиск	0...8 Бар
Тип з'єднання	Фланець
Швидкість спрацювання, мс	200
Захист	IP 65
Робоча температура, *С	-10...85 *С

Центральним елементом виконавчої частини системи виступає електропривод потужністю 10 кВт, призначений для забезпечення обертання шнека та приводу вібромоторів подачі. Така конфігурація дозволяє ефективно передавати механічну енергію до навантаження навіть за умов підвищеної експлуатаційної складності.

У якості двигуна обрано асинхронний електродвигун типу АІР160М8 - добре зарекомендоване у промисловій сфері рішення, відоме своєю механічною надійністю, стабільністю роботи та високим коефіцієнтом корисної дії (ККД). Потужність 10 кВт забезпечує достатній крутний момент для стійкої та безперервної роботи технологічного обладнання, зберігаючи при цьому енергоефективність та знижуючи ризик перевантажень.

Таким чином, вибір саме цього типу двигуна є технічно обґрунтованим і повністю відповідає вимогам до продуктивності та довговічності виконавчого вузла системи.

Зовнішній вигляд двигуна показано на рисунку 2.2.13, а технічні характеристики наведено в таблиці 2.2.13. Вони підтверджують відповідність двигуна вимогам нашої системи автоматизації.



Параметри електродвигуна АІР 180М8

Характеристика	Значення
Живлення	380В 50 Гц
Частота обертання	720 об/хв
Крут. Момент	155 НМ
ном. Струм	25,6

2.3. Побудова та дослідження математичної моделі об'єкта керування

Об'єктом автоматизації у даному проєкті є апарат попередньої очистки (преддефекатор) типу Брігель-Мюллера - горизонтальний змішувач, в якому дифузійний сік змішується з вапняним молоком та поверненими потоками з I і II сатурації. Метою є осадження, коагуляція і нейтралізація кислотних та колоїдних домішок.

Процесом керують через регулювання рН і температури, що досягається контрольованим дозуванням вапна, а також подачею пари. Для опису роботи апарата використовується параметрична схема (рис. 2.1), на якій показано основні потоки:

$F_S, F_{RV}, F_{PSS}, F_{PS}, F_O$ - витрати дифузійного соку, вапна, повернутого соку, результату змішування та осаду відповідно;

$t_S, t_{RV}, t_{PSS}, t_{PS}, t_O$ - температури відповідних потоків;

$CS, CRV, CPSS, CPS, CO$ - теплоємності відповідних потоків.



Рис. 2.3.1. Параметрична схема апарату попередньої очистки дифузійного соку

2.4. Обґрунтування та вибір алгоритму керування об'єктом

Умови моделювання:

- При побудові математичної моделі враховано такі спрощення:
- Питома теплоємність усіх рідин вважається сталою.
- Осад розподіляється рівномірно по довжині переддефекатора.
- Температурний розподіл також вважається лінійним.
- Хімічна реакція осадження кислот відбувається за кінетикою першого порядку.

Ці допущення дозволяють створити спрощену, але робочу модель, яка дає змогу обґрунтовано розробити систему автоматичного регулювання. У таблиці 2.1 вказані основні параметри, які використовуються при моделюванні статичних і динамічних характеристик апарата.

Таблиця 2.4.1

Величини параметрів статичного режиму для апарату
попередньої очистки дифузійного соку

Назва параметру	Умове позначення	Числове значення	Розмірність
Температура соку цукрового буряку на вході	tS	328	град. К
Температура суміші на виході	tPS	335	град. К
Температура вапна	tRV	328	град. К
Температура соку повернення після насичення на вході	tPSS	328	град. К
Температура речовини з осадом на виході	tO	335	град. К
Витрата соку цукрового буряка на вході	FS	70	кг/с
Витрата вапна	FRV	2,1	кг/с
Витрата соку повернення після насичення на вході	FPSS	15	кг/с
Витрата речовини з осадом	FO	0,4	кг/с
Витрата суміші на виході	FPS	86,8	кг/с
Теплоємність соку цукрового Буряку	CS	3966	Дж/(кг·К)
Теплоємність вапна	CRV	3920	Дж/(кг·К)
Теплоємність соку повернення після насичення	CPSS	3990	Дж/(кг·К)

Таблиця 2.4.2

Величини параметрів статичного режиму для апарату попередньої очистки дифузійного соку (Продовження)

Назва параметру	Умовне позначення	Числове значення	Розмірність
Теплоємність речовини з осадом	CO	3724	Дж/(кг·К)
Теплоємність суміші на виході	CPS	3976	Дж/(кг·К)
Густина соку цукрового буряку	ρS	1071	кг/м ²
Об'єм речовини в апараті	Va	180	м ³
pH в апараті	pH	11	pH
Концентрація кислот на вході	X1	1.89	%
Концентрація кислот на виході	X2	1.27	%
Концентрація розчину вапна на Вході	Xv1	86	%
Концентрація розчину вапна на Виході	Xv2	74	%

Нижче, на рисунку 2.4.2 представлено розрахункову схему апарату попередньої очистки дифузійного соку з позначенням концентрацій кислот у технологічному потоці.

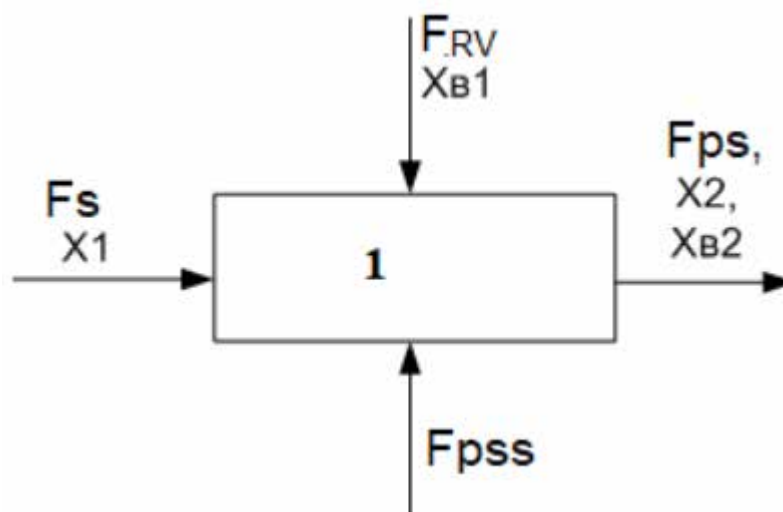


Рис. 2.4.2 Розрахункова схема апарату попередньої очистки дифузійного соку

На рис. 2.4.2 прийняті наступні позначення:

1 - апарат попередньої очистки соку цукрового буряку;

FS - витрата соку цукрового буряка при вході в апарат попередньої очистки дифузійного соку;

X1 - концентрація при вході у апарат кислоти, що необхідно усунути;

FRV - витрата вапна при вході в апарат попередньої очистки дифузійного соку;

Xv1 - концентрація вапна при вході в апарат попередньої очистки дифузійного соку;

FPSS - витрата повернень соків сатурації;

FPS - витрата результуючої суміші;

X2 - концентрація кислот при виході;

Xv2 - концентрації розчину вапна при виході з апарату попередньої очистки дифузійного соку.

Складаємо баланс по кислотному балансу:

Кількість кислоти, що прибуває у апарат попередньої очистки дифузійного соку:

$$F_S \cdot X_S;$$

Кількість кислоти, що виходить з апарату первинної очистки дифузійного соку:

$$(F_S \cdot (1-n) + F_{PS}) \cdot X_1;$$

Кількість кислоти, що пройшла реакцію, на розрахунок кількості прореагованого вапна:

$$K_1 \cdot (F_{RV} \cdot X_{V1} - (F_S \cdot (1-n) + F_{PS}) \cdot X_{V2});$$

Кількість кислоти, що знаходиться в апараті попередньої очистки дифузійного соку, врахувавши лінійний розподіл концентрації кислоти на всю довжину апарату попередньої очистки дифузійного соку:

$$V_A \cdot \rho_S \cdot \frac{d\left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right)}{dt}.$$

Матеріальний баланс апарату попередньої очистки дифузійного соку за загальними витратами речовин:

$$F_S + F_{PSS} + F_{RV} = F_{PS} + F_O, \quad (2.1.1)$$

по зважених частинках:

$$F_S \cdot X_S = F_{PS} \cdot X_{PS} + F_O \cdot X_O. \quad (2.1.2)$$

Де FS, FPS, FO - кількість сумішей що реагують: соку цукрового буряка, соку на виході, та осаду в соку, кг;

XS, XPS, XO - концентрація кислот в соці, що проходить реакцію, соку на виході і осаду.

Розрахуємо швидкість реакції:

$$\omega = K \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot \frac{(X_S + X_{PS})}{2}. \quad (2.1.3)$$

Припустимо, що при статичному режимі лінеаризована залежність лужності: pH = f(X). В такому випадку для потоку на виході з апарату попередньої очистки дифузійного соку:

$$pH = A - B \cdot X_{PS}, \quad (2.1.4)$$

де А і В - коефіцієнти, що відповідають величині pH в залежності від концентрації кислоти в переддефікованому соці XPS.

Експериментальні дані: А = 11,024 pH; В = $4 \frac{pH}{\%}$.

Тоді за виразом (2.1.4) маємо

$$X_{PS} = \frac{\frac{A}{B} - 1}{pH}. \quad (2.1.5)$$

Рівняння динаміки прийме вид:

$$\begin{aligned} -F_S \cdot X_1 + K \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS}}} \cdot \frac{(X_1 + X_2)}{2} \cdot V_A \cdot \rho_S - F_{PS} \cdot X_2 = \\ = V_A \cdot \rho_S \cdot \frac{d\left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right)}{dt} \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

де Va - об'єм сумішей в апараті попередньої очистки дифузійного соку;
ρS - густина суміші.

Із закону збереження маси виходить, що величина речовин, що надходить (FS+ FPSS+ FRV) буде рівнятись величині речовини (FO+FPS), що виходить.

Баланс по енергії у апараті попередньої очистки дифузійного соку [1]:

$$\sum Q = \sum Q_S + \sum Q_{PSS}$$

$\sum Q$ - загальна теплова енергія при виході;

$\sum Q_S$ - загальна теплова енергія при вході в апарат попередньої очистки дифузійного соку (сік цукрового буряка та вапно);

$\sum Q_{PSS}$ - загальна теплова енергія соку насичень, що надходять у апарат.

Кількість тепла, що надходить у апарат попередньої очистки дифузійного соку, визначається таким відношенням

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.1.7)$$

де Q_1 - кількість тепла, що надходить від соку цукрового буряка та вапна;

Q_2 - кількість тепла, що надходить ззовні - з поверненням соків насичення; Q_3 -

кількість тепла, що виділяється при різних фізичних і хімічних реакціях.

Баланс по теплу у апарату попередньої очистки дифузійного соку:

$$Q_S + Q_{PSS} + Q_{RV} - Q_{PS} + w_S \cdot \rho_S \cdot q = V \cdot \rho \cdot \frac{d\left(\frac{T_S + T_{PS}}{2}\right)}{dt} \quad (2.1.8)$$

Кількість тепла, яке надходить з вхідними речовинами, змінюється при хімічних реакціях, а також відходить, представляється в такому вигляді:

$$Q = F \cdot C \cdot t \quad (2.1.9)$$

де t , C , F - температура, теплоємність і витрата розчинів;

$Q_S = F_S \cdot t_S \cdot C_S$ - тепло, яке приходить з соком цукрового буряку;

$Q_{RV} = F_{RV} \cdot t_{RV} \cdot C_{RV}$ - тепло, яке приходить з вапном;

$Q_{PSS} = F_{PSS} \cdot t_{PSS} \cdot C_{PSS}$ - тепло, яке приходить з соком насичення;

$Q_{PS} = F_{PS} \cdot t_{PS} \cdot C_{PS}$ - тепло, яке виходить з результуючою сумішшю;

q - тепло, що утворюється як наслідок реакції кислот з вапном.

В процесі реакції, що проходить у апараті попередньої очистки дифузійного соку, температура на виході більше, ніж на вході приблизно на 50°C , тому необхідно знайти кількість тепла, що утворюється:

$$5 \cdot (F_S \cdot (1 - n) + F_{PSS}) \cdot C = q \quad (2.1.9)$$

Запишемо результуюче рівняння:

$$F_S \cdot t_S \cdot C_C + F_{PSS} \cdot t_{PSS} \cdot C_{PSS} + F_{RV} \cdot t_{RV} \cdot C_{RV} - F_{PS} \cdot t_{PS} \cdot C_{PS} + w_S \cdot V_A \cdot \rho_S \cdot q = 0$$

$$F_S \cdot t_S \cdot C_C + F_{PSS} \cdot t_{PSS} \cdot C_{PSS} + F_{RV} \cdot t_{RV} \cdot C_{RV} - F_{PS} \cdot t_{PS} \cdot C_{PS} + w_S \cdot V_A \cdot \rho_S \cdot q = \\ = V_A \cdot \rho_S \cdot \frac{d\left(\frac{T_S + T_{PS}}{2}\right)}{dt}.$$

$$\begin{cases} F_S \cdot X_1 + K \cdot \left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right) \cdot V_A \cdot \rho_S - F_{PS} \cdot X_2 = 0 \end{cases} \quad (2.1.10)$$

$$\begin{cases} F_S \cdot t_S \cdot C_C + F_{PSS} \cdot t_{PSS} \cdot C_{PSS} + F_{RV} \cdot t_{RV} \cdot C_{RV} - F_{PS} \cdot t_{PS} \cdot C_{PS} + \\ + K \cdot \left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right) \cdot V_A \cdot \rho_S = 0 \end{cases} \quad (2.1.11)$$

Виразимо з рівняння (2.1.11) витрату FPS:

$$F_{PS} = F_{RV} + F_{PSS} + F_S \cdot n \quad (2.1.12)$$

Підставимо вираз (2.1.12) в (2.1.10) рівняння:

$$F_{PS} \cdot X_1 - K \cdot \left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right) \cdot V_A \cdot \rho_S - (F_{RV} + F_{PSS} + F_S \cdot n) \cdot X_2 = 0 \quad (2.1.13)$$

Виразимо з одержаного рівняння кількість кислоти при виході:

$$X_2 = \frac{X_1 \cdot (2 \cdot F_S - K \cdot V_A \cdot \rho_S)}{2 \cdot (F_{RV} + F_{PSS} + F_S \cdot n) + K \cdot V_A \cdot \rho_S} \quad (2.1.14)$$

Статичні характеристики всіх каналів апарата попередньої очистки дифузійного соку для умов номінального навантаження були побудовані за допомогою математичного середовища MathCAD і наведені на рисунках 2.4.3-2.4.4.

Оскільки основною керованою величиною є концентрація кислот на виході з апарата (X_2), яка прямо залежить від витрати вапняного розчину (FRV), відповідна статична характеристика керовального каналу $FRV \rightarrow X_2$ зображена на рисунку 2.4.3.

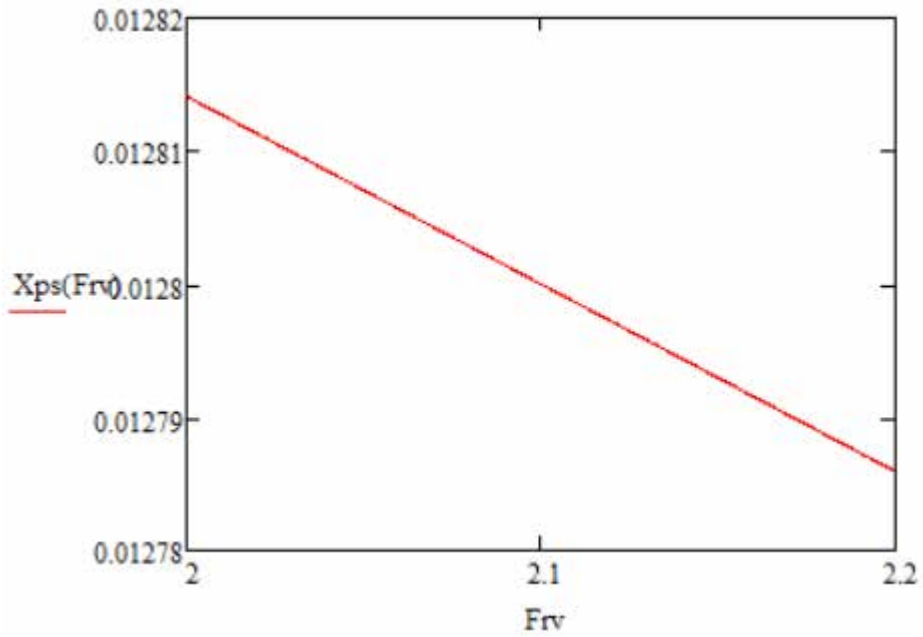


Рис. 2.4.3. Статична характеристика
для каналу керування $FRV \rightarrow X2$

За каналом збурення "витрати соку цукрового буряка - рівень рН", статична характеристика набуває вигляд (рис. 2.4.4).

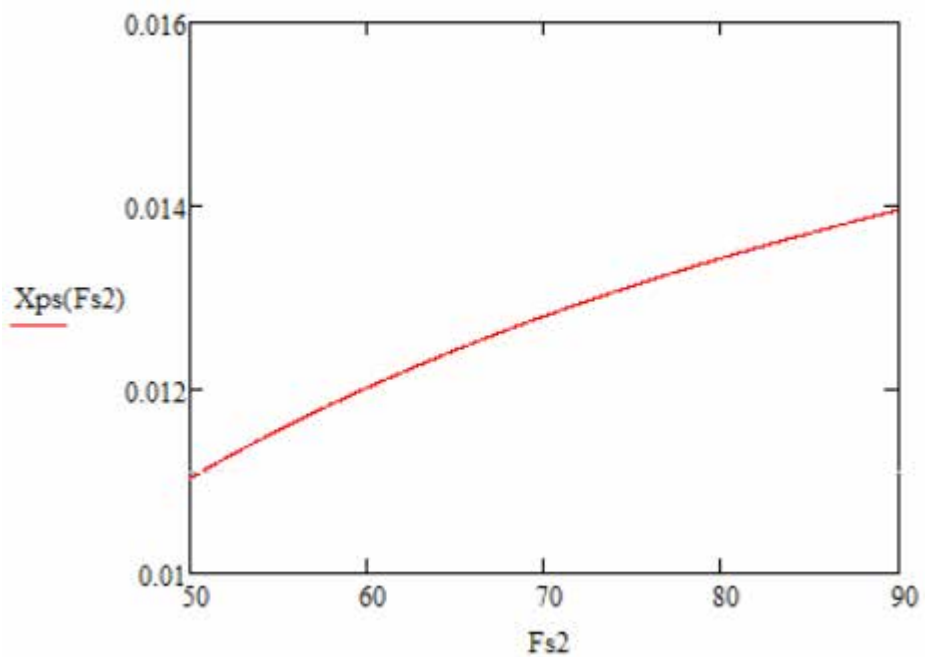


Рис. 2.4.4 Статична характеристика
каналу збурення $FS \rightarrow X2$

2.2. Моделювання динамічного режиму апарату попередньої очистки дифузійного соку

Параметрами є:

- регульована величина X_2 ;
- керуючий вплив FRV ;
- збурення на систему - зміна FS , X_1 .

Оскільки невелика кількість вапна, що надходить в апарат, не вступає в реакцію з соком цукрового буряку безпосередньо в апараті, і йде далі по технічній лінії з переддефектору, то необхідно записати рівняння для відповідності реагуючих концентрацій:

$$F_S \cdot X_1 - (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS}) \cdot X_2 = K_1 \cdot (F_{RV} \cdot X_{V1} - (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS}) \cdot X_{V2}) \quad (2.2.1)$$

X_1, X_2 - концентрації узагальнених кислот при вході та виході апарату;

X_{V1}, X_{V2} - концентрації вапна при вході та виході апарату.

Рівняння по балансу узагальнених кислот в апарат попередньої очистки дифузійного соку:

$$\begin{aligned} F_S \cdot X_1 + K \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS}}} \cdot \left(\frac{X_{V1} + X_{V2}}{2} \right) \cdot V_A \cdot \rho_S - (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS}) \cdot X_2 = \\ = V_A \cdot \rho_S \cdot \frac{d\left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right)}{dt} \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

Виразимо X_{V2} з 2.2.1:

$$X_{V2} = \frac{-F_S \cdot X_1 + (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS}) \cdot X_{PS} + K_1 \cdot F_{RV} \cdot X_{V1}}{K_1 \cdot (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS})}$$

Отже, маємо таке рівняння динаміки кислот в апараті попередньої очистки дифузійного соку:

$$\begin{aligned} F_S \cdot X_1 + K \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS}}} \cdot \left(X_{V1} + \frac{-F_S \cdot X_1 + (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS}) \cdot X_{PS} + K_1 \cdot F_{RV} \cdot X_{V1}}{K_1 \cdot (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS})} \right) * \\ * V_A \cdot \rho_S \cdot \frac{q}{2} - (F_S \cdot (1-n) + F_{PSS}) \cdot X_2 = V_A \cdot \rho_S \cdot \frac{d\left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right)}{dt} \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Опис апарату попередньої очистки соку цукрового буряка представимо у відхиленнях величин від головного статичного режиму, за індексом «0»:

$$X_1 = X_{10} + \Delta X_1;$$

$$X_2 = X_{20} + \Delta X_2;$$

$$FRV = FRV_0 + \Delta FRV;$$

$$FS = FS_0 + \Delta FS;$$

$$TPS = TPS_0 + \Delta TPS.$$

Лінеаризуємо рівняння динаміки апарату попереднього очищення соку цукрового буряку:

$$\begin{aligned} & \Delta F_S \cdot (X_{10} - (1-n) \cdot X_{20}) - \left(\frac{X_{10} \cdot F_{PS}}{K_1 \cdot (F_{S0} \cdot (1-n) + F_{PS})^2} + \frac{(1-n) \cdot F_{RV} \cdot X_{V1}}{F_{S0} \cdot (1-n) + F_{PS}} \right) * \\ & K \cdot \left(e^{-\frac{E}{T_{PS0}}} + \frac{E \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS0}}}}{R \cdot T_{PS0}^2} \cdot (\Delta T_{PS} - T_{PS0}) \right) \cdot V_A \cdot \rho_S \\ & * \frac{\quad}{2} + \\ & + \Delta X_1 \cdot \left(F_{S0} - \frac{F_{S0}}{K_1 \cdot (F_{S0} \cdot (1-n) + F_{PS})} \right) \cdot \frac{K \cdot \left(e^{-\frac{E}{T_{PS0}}} + \frac{E \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS0}}}}{R \cdot T_{PS0}^2} \cdot (\Delta T_{PS} - T_{PS0}) \right) \cdot V_A \cdot \rho_S}{2} + \\ & + \Delta X_2 \cdot \frac{K \cdot \left(e^{-\frac{E}{T_{PS0}}} + \frac{E \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS0}}}}{R \cdot T_{PS0}^2} \cdot (\Delta T_{PS} - T_{PS0}) \right) \cdot V_A \cdot \rho_S}{2 \cdot K_1} - (F_{S0} \cdot (1-n) + F_{PS}) + \\ & + \Delta F_{RV} \cdot \frac{K \cdot \left(e^{-\frac{E}{T_{PS0}}} + \frac{E \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS0}}}}{R \cdot T_{PS0}^2} \cdot (\Delta T_{PS} - T_{PS0}) \right) \cdot V_A \cdot \rho_S \cdot X_{V1}}{2 \cdot (F_{S0} \cdot (1-n) + F_{PS})} = \\ & = \frac{V_A \cdot \rho_S}{2} \cdot \left(\frac{d\Delta X_1}{dt} + \frac{d\Delta X_2}{dt} \right) \end{aligned} \tag{2.2.4}$$

Виразимо TPS з рівняння (2.2.4):

$$\begin{aligned}
& \left(e^{\frac{E}{T_{PS0}}} + \frac{E \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS0}}}}{R \cdot T_{PS0}^2} \cdot (\Delta T_{PS} - T_{PS0}) \right) * \\
& * (\Delta X_2 \cdot \frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S}{2 \cdot K_1} + \Delta F_{RV} \cdot \frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S \cdot X_{V1}}{2 \cdot (F_{S0} \cdot (1-n) + F_{PS})} - \\
& - \Delta F_S \left(\frac{X_{10} \cdot F_{PS}}{K_1 (F_{S0} (1-n) + F_{PS})^2} + \frac{(1-n) F_{RV} X_{V1}}{F_{S0} (1-n) + F_{PS}} \right) \cdot \frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S}{2} - \\
& - \Delta X_1 \left(\frac{F_{S0}}{K_1 (F_{S0} (1-n) + F_{PS})} \cdot \frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S}{2} \right) = \frac{V_A \cdot \rho_S}{2} \left(\frac{d\Delta X_1}{dt} + \frac{d\Delta X_2}{dt} \right) - \\
& - \Delta F_S \cdot (X_{10} - (1-n) \cdot X_{20}) - \Delta X_1 F_{S0} + \Delta X_2 (F_{S0} (1-n) + F_{PS})
\end{aligned} \tag{2.2.3}$$

Так як більшість коефіцієнтів відома, замінимо наступні вирази для спрощення ведення запису:

$$\frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S}{2 \cdot K_1} = A;$$

$$\frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S \cdot X_{V1}}{2 \cdot (F_{S0} \cdot (1-n) + F_{PS})} = B;$$

$$\left(\frac{X_{10} \cdot F_{PS}}{K_1 (F_{S0} (1-n) + F_{PS})^2} + \frac{(1-n) F_{RV} X_{V1}}{F_{S0} (1-n) + F_{PS}} \right) \cdot \frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S}{2} = C;$$

$$\frac{F_{S0}}{K_1 (F_{S0} (1-n) + F_{PS})} \cdot \frac{K \cdot V_A \cdot \rho_S}{2} = D;$$

$$e^{\frac{E}{T_{PS0}}} = E1;$$

$$\frac{E \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_{PS0}}}}{R \cdot T_{PS0}^2} = E2;$$

$$X_{10} - (1-n) \cdot X_{20} = G;$$

$$F_{S0} (1-n) + F_{PS} = H;$$

$$\frac{V_A \cdot \rho_S}{2} = K;$$

$$\begin{aligned}
& (E1 + E2 \cdot (\Delta T_{PS} - T_{PS0})) \cdot (A \cdot \Delta X_2 + B \cdot \Delta F_{RV} - C \cdot \Delta F_S - D \cdot \Delta X_1) = \\
& = K \frac{d\Delta X_1}{dt} + K \frac{d\Delta X_2}{dt} - G \cdot \Delta F_S - \Delta X_1 \cdot F_{S0} + H \cdot \Delta X_2;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& A \cdot X_{20} \cdot \Delta T_{PS} \cdot E2 + D \cdot F_{RV} \cdot \Delta T_{PS} \cdot E2 - C \cdot F_{S0} \cdot \Delta T_{PS} \cdot E2 - D \cdot X_{10} \cdot \Delta T_{PS} \cdot E2 = \\
& = K \frac{d\Delta X_1}{dt} + K \frac{d\Delta X_2}{dt} - \Delta F_S (G - C \cdot E1) - \Delta X_1 (F_{S0} - D \cdot E1) + \Delta X_2 \cdot (H - A \cdot E1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Delta T_{PS} \cdot (A \cdot X_{20} \cdot E2 + D \cdot F_{RV} \cdot E2 - C \cdot F_{S0} \cdot E2 - D \cdot X_{10} \cdot E2) = \\ & = K \frac{d\Delta X_1}{dt} + K \frac{d\Delta X_2}{dt} - \Delta F_S (G - C \cdot E1) - \Delta X_1 (F_{S0} - D \cdot E1) + \Delta X_2 \cdot (H - A \cdot E1); \end{aligned}$$

Нехай

$$(A \cdot X_{20} \cdot E2 + D \cdot F_{RV} \cdot E2 - C \cdot F_{S0} \cdot E2 - D \cdot X_{10} \cdot E2) = L;$$

$$\Delta T_{PS} = \frac{K}{L} \frac{d\Delta X_1}{dt} + \frac{K}{L} \frac{d\Delta X_2}{dt} - \Delta F_S \frac{(G - CE1)}{L} - \Delta X_1 \frac{(F_{S0} - DE1)}{L} + \Delta X_2 \frac{(H - AE1)}{L} \quad (2.2.5)$$

Отже, ми маємо виражену температуру суміші на виході, виражену через реакцію, що проходить у перед дефекаторі.

Перейдемо до рівняння динаміки теплового балансу апарату попередньої очистки дифузійного соку:

$$F_S t_S C_S + F_{PSS} t_S C_{PSS} + F_{RV} t_{RV} C_{RV} - F_{PS} T_{PS} C_{PS} + w s V_A \rho_S q = V \rho_S \frac{d\left(\frac{T_S + T_{PS}}{2}\right)}{dt} \quad (2.2.6)$$

Змінні величини та лінеаризація рівняння теплового балансу

У процесі моделювання динаміки системи попередньої очистки дифузійного соку доцільно ввести наступні змінні величини:

- TPS - регульована температура в апараті;
- FRV - керуючий вплив, що визначає подачу вапняного молока;
- FS, tS - збурення, які впливають на систему через зміну витрати та температури вхідного соку відповідно.

Далі, підставивши вираз для температури, отриманий на основі матеріального балансу, у рівняння теплового балансу, проводимо лінеаризацію моделі. Такий підхід дозволяє перетворити нелінійну систему рівнянь у зручну для аналізу лінійну модель, яка точніше описує поведінку об'єкта в околі робочої точки. Це, своєю чергою, дає змогу застосовувати класичні методи аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

:

$$\begin{aligned} & \Delta F_S t_S C_S + \Delta t_S (F_S C_S + F_{PSS} C_{PSS}) + \Delta F_{RV} t_{RV} C_{RV} - \\ & - \Delta T_{PS} (F_{PS} C_{PS} + K X_{PS} V_A \rho_S q) = V_A \rho_S \frac{d\left(\frac{T_S + T_{PS}}{2}\right)}{dt} \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

Нехай

$$t_S \cdot C_S = At;$$

$$FS \cdot CS + FPSS \cdot CPSS = Bt;$$

$$TRV \cdot CRV = Ct;$$

$$FPS \cdot CPS + K \cdot XPS \cdot VA \cdot \rho S \cdot q = Dt.$$

Прийmemo також, що вхiдна концентрацiя речовин - стала. Тодi рiвняння (2.2.7), також пiдставивши заміну з рiвняння (2.2.5) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} & \Delta F_S \cdot At + \Delta t_S \cdot Bt + \Delta F_{RV} \cdot Ct = \\ & = \frac{V \cdot \rho}{2} \cdot \frac{d \left(\frac{K}{L} \frac{d\Delta X_1}{dt} + \frac{K}{L} \frac{d\Delta X_2}{dt} - \Delta F_S \frac{G - CE1}{L} - \Delta X_1 \frac{F_{S0} - DE1}{L} + \Delta X_2 \frac{H - AE1}{L} \right)}{dt} + \\ & + \frac{V\rho}{2} \frac{d\Delta T_{PS}}{dt} + \left(\frac{K}{L} \frac{d\Delta X_1}{dt} + \frac{K}{L} \frac{d\Delta X_2}{dt} - \Delta F_S \frac{G - CE1}{L} - \Delta X_1 \frac{F_{S0} - DE1}{L} + \Delta X_2 \frac{H - AE1}{L} \right) Dt; \end{aligned}$$

Розділимо обидві частини рiвняння на Dt:

$$\begin{aligned} & \Delta F_S \cdot \frac{At}{Dt} + \Delta t_S \cdot \frac{Bt}{Dt} + \Delta F_{RV} \cdot \frac{Ct}{Dt} - \frac{V\rho}{2Dt} \frac{d\Delta T_S}{dt} = \\ & = \frac{V \cdot \rho}{2Dt} \cdot \frac{d \left(\frac{K}{L} \frac{d\Delta X_1}{dt} + \frac{K}{L} \frac{d\Delta X_2}{dt} - \Delta F_S \frac{G - CE1}{L} - \Delta X_1 \frac{F_{S0} - DE1}{L} + \Delta X_2 \frac{H - AE1}{L} \right)}{dt} + \\ & + \left(\frac{K}{L} \frac{d\Delta X_1}{dt} + \frac{K}{L} \frac{d\Delta X_2}{dt} - \Delta F_S \frac{G - CE1}{L} - \Delta X_1 \frac{F_{S0} - DE1}{L} + \Delta X_2 \frac{H - AE1}{L} \right); \end{aligned}$$

Прийmemo

$$\frac{V \cdot \rho}{2Dt} = T, \text{ тоді}$$

$$\begin{aligned} & \frac{T(G - CE1)}{L} \frac{d\Delta F_S}{dt} + \Delta F_S \left(\frac{At}{Dt} + \frac{2(G - CE1)}{L} \right) + \Delta t_S \frac{Bt}{Dt} + \Delta F_{RV} \frac{Ct}{Dt} - T \frac{K}{L} \frac{d^2\Delta X_1}{dt^2} + \\ & + \frac{d\Delta X_1}{dt} \left(T \left(\frac{F_{S0} - DE1}{L} \right) + \frac{K}{L} \right) + \Delta X_1 \left(\frac{F_{S0} - DE1}{L} \right) = \\ & = T \frac{K}{L} \frac{d^2\Delta X_2}{dt^2} + \frac{d\Delta X_2}{dt} \left(T \left(\frac{H - AE1}{L} \right) + \frac{K}{L} \right) + \Delta X_2 \left(\frac{H - AE1}{L} \right) \end{aligned}$$

Виконаємо заміни та перетворення за Лапласом:

$$\frac{T(G - CE1)}{L} = K_{1FS};$$

$$\frac{At}{Dt} + \frac{2(G - CE1)}{L} = K_{2FS};$$

$$\frac{Bt}{Dt} = K_{TS};$$

$$\frac{Ct}{Dt} = K_{FRV};$$

$$T \frac{K}{L} = K_1;$$

$$T \left(\frac{F_{S0} - DE1}{L} \right) + \frac{K}{L} = K_{2X1};$$

$$\frac{F_{S0} - DE1}{L} = K_{3X1};$$

$$T \left(\frac{H - AE1}{L} \right) + \frac{K}{L} = K_{2X2};$$

$$\frac{H - AE1}{L} = K_{3X2};$$

$$\begin{aligned} & K_{1FS} \frac{d\Delta F_S}{dt} + K_{2FS} \Delta F_S + K_{TS} \Delta t_S + \Delta F_{RV} K_{FRV} - K_1 \frac{d^2 \Delta X_1}{dt^2} + K_{2X1} \frac{d\Delta X_1}{dt} + K_{3X1} \Delta X_1 = \\ & = K_1 \frac{d^2 \Delta X_2}{dt^2} + K_{2X2} \frac{d\Delta X_2}{dt} + K_{3X2} \Delta X_2. \end{aligned}$$

Отже, маємо такий вид рівняння:

$$\begin{aligned} & F_S(p)(K_{1FS}p + K_{2FS}) + K_{TS}T_S(p) + K_{FRV}F_{FRV}(p) - X_1(p)(K_1p^2 + K_{2X1}p + K_{3X1}) = \\ & = X_2(p)(K_1p^2 + K_{2X2}p + K_{3X2}) \end{aligned} \quad (2.2.8)$$

Передатна функція для каналу керування FRV \rightarrow X2:

$$W_{KEP}(p) = \frac{K_{FRV}}{K_1p^2 + K_{2X2}p + K_{3X2}} \quad (2.2.9)$$

$$K_{FRV} = 2,869;$$

$$K_1 = 137,612;$$

$$K_{2X2} = 110,746;$$

$$K_{3X2} = 0,98.$$

$$W_{KEP}(p) = \frac{2,869}{137,612p^2 + 110,746p + 0,98} \quad (2.2.10)$$

Перехідна характеристика об'єкта за каналом керування FRV \rightarrow X2 знаходиться зворотнім перетворенням Лапласа і добутку передаточної функції за каналом $W(p)$ та перетвореного за Лапласом одиничного сигналу $1(t)$:

$$h_{obk}(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{p} * W_k(p)\right] \quad (2.2.11)$$

За допомогою математичного пакету MathCAD визначаємо

$$Hob(t) := \frac{Wob(p)}{p} \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, p} \\ \text{float, 2} \end{array} \right. \rightarrow 0.033 \cdot e^{-0.8 \cdot t} + -3.0 \cdot e^{-0.0089 \cdot t} + 2.9$$

Перехідна характеристика за каналом керування Hob(t), за формулою (2.2.11) наведена на рис. 2.5.

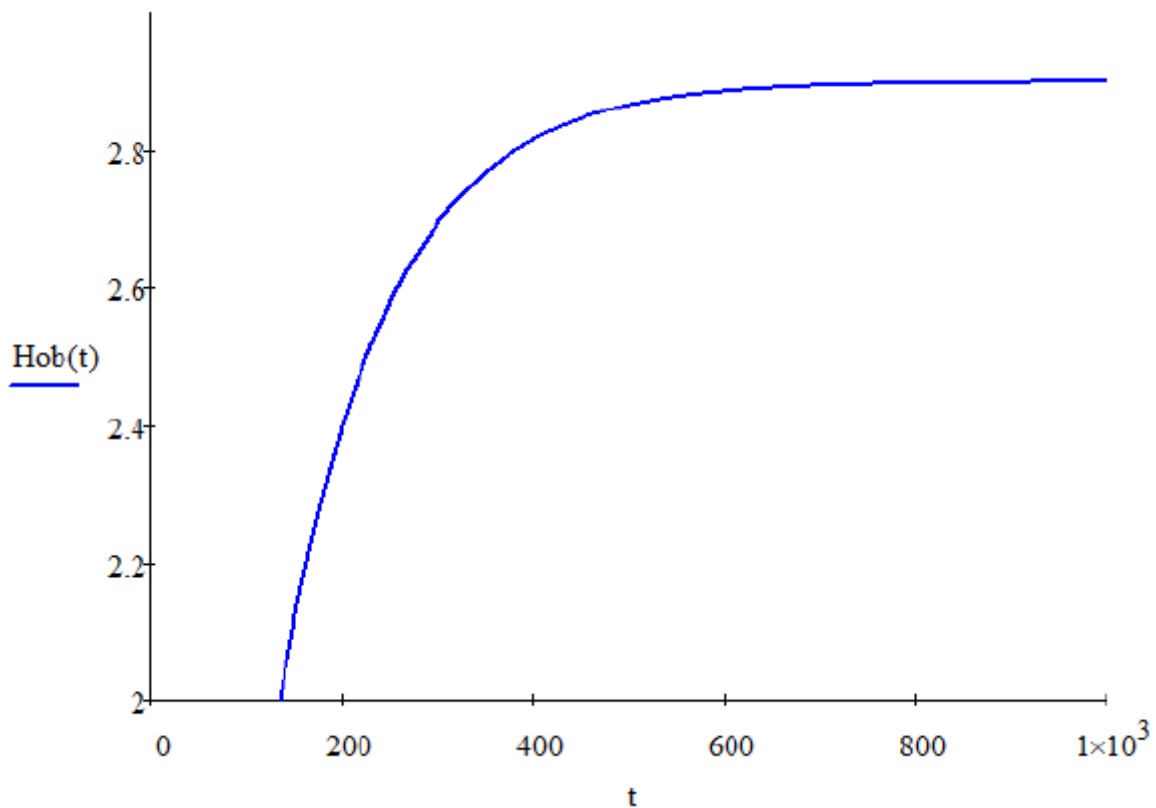


Рис. 2.4.5. Перехідна характеристика об'єкта управління для каналу керування FRV → X2

2.5. Дослідження системи на стійкість та якість

Згідно методу Ціглера-Нікольса, замкнену систему управління із П-регулятором виводять на границю стійкості, плавно збільшуючи коефіцієнт підсилення регулятора КР. З отриманого коливного режиму вираховують критичне значення коефіцієнта підсилення регулятора та критичний період коливань. За цими визначеними параметрами вираховують оптимальні параметри налаштування регулятора використовуючи такі залежності:

- П-регулятор: КОПТ = 0,55 ККР;
- ПІ-регулятор: КОПТ = 0,35 ККР;

Метод Ціглера-Нікольса простий для розрахунку, та дозволяє забезпечити у системі управління потрібний запас стійкості, але не може гарантувати екстремального значення інтегрального критерію якості.

$$KFRV = 2,869; K1 = 137,612; K2X2 = 110,746; K3X2 = 0,98.$$

$$W_{KEP}(p) = \frac{2,869}{137,612p^2 + 110,746p + 0,98}$$

$$\begin{aligned} WregNast &:= Kreg_nas \\ WzsNast(p) &:= \frac{Wob(p) \cdot WregNast}{1 + Wob(p) \cdot WregNast} \end{aligned}$$

$$Hnastr(t) := \frac{WzsNast(p)}{p} \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace , p} \\ \text{float , 1} \end{array} \right. \rightarrow -8.4 \cdot e^{-0.0045 \cdot t} + -0.9 \cdot \cos(4.0 \cdot t) + -0.001 \cdot \sin(4.0 \cdot t) + 8.4$$

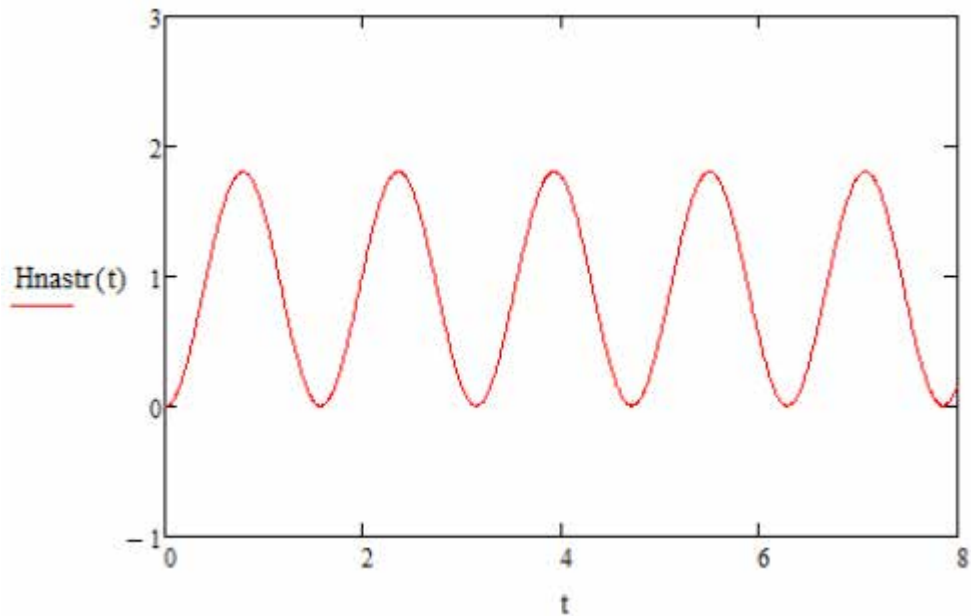


Рис. 2.5.1. Перехідна характеристика замкненої системи автоматичного керування каналу FRV → X2 із виведенням системи на границю стійкості для методу Ціглера-Нікольса

$$K_{reg_p} := 0.55 \cdot K_{reg_nas}$$

$$K_{reg_pi} := 0.35 K_{reg_nas}$$

$$W_{regP} := K_{reg_I} \quad W_{zsP}(p) := \frac{W_{ob}(p) \cdot W_{regP}}{1 + W_{ob}(p) \cdot W_{regP}}$$

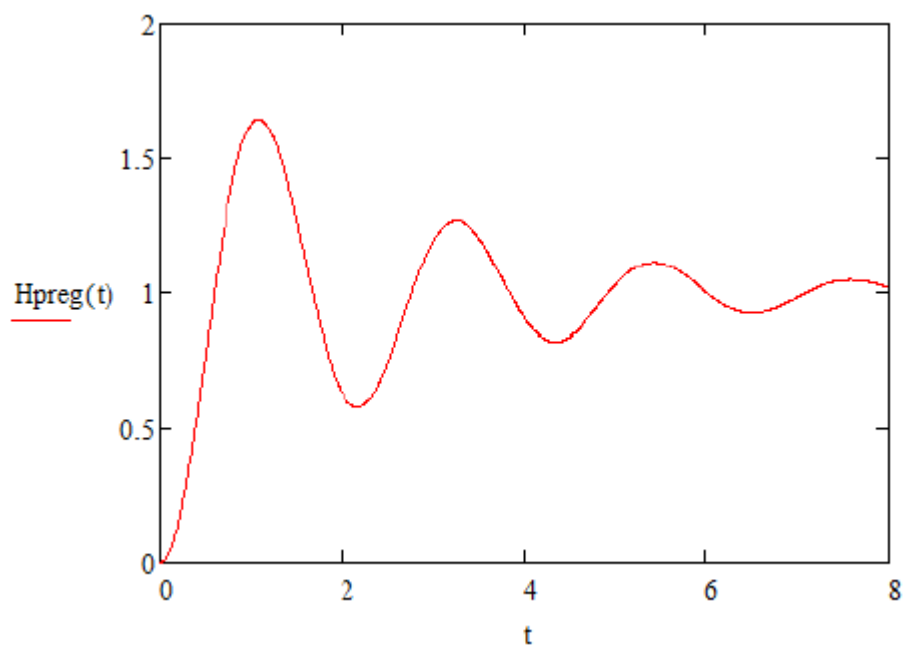


Рис. 2.5.2. Перехідний процес замкненої САК із П-регулятором

$$K_{reg_pi} := 0.35 K_{reg_nas}$$

$$T_{ikr} := 9000 \quad T_{i_opt} := 1.25 T_{ikr}$$

$$W_{regPI}(p) := K_{reg_pi} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i_opt} \cdot p} \right)$$

$$W_{zsPI}(p) := \frac{W_{ob}(p) \cdot W_{regPI}(p)}{1 + W_{ob}(p) \cdot W_{regPI}(p)}$$

$$HP_{lreg}(t) := \frac{W_{zsPI}(p)}{p} \quad \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, p} \\ \text{float, 1} \end{array} \right. \rightarrow$$

$$\rightarrow 0.001 \cdot e^{-0.00009 \cdot t} + 0.04 \cdot e^{-0.8 \cdot t} + -0.04 \cdot e^{-0.009 \cdot t} + -1.0 \cdot e^{-0.4 \cdot t} \cdot \cos(2.0 \cdot t) + -0.2 \cdot e^{-0.4 \cdot t} \cdot \sin(2.0 \cdot t) + 1.0$$

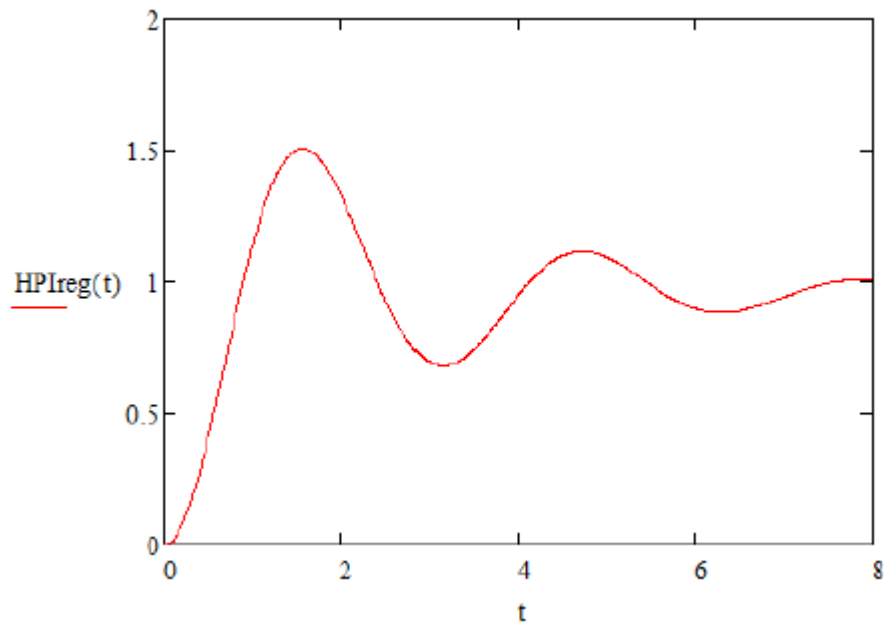


Рис. 2.5.3. Перехідний процес замкненої САК із ПІ-регулятором

Аналізуючи графіки перехідних процесів замкненої системи з використанням П- та ПІ-регуляторів, можна дійти до переконливого висновку: саме ПІ-регулятор, налаштований за методом Ціглера–Нікольса, демонструє кращі показники у контексті досліджуваної системи.

Зокрема, його застосування забезпечує високу якість регулювання, усуває статичну похибку, дозволяє досягати швидкого встановлення сталого режиму роботи й характеризується низькою чутливістю до зовнішніх збурень. Сукупність цих властивостей робить ПІ-регулятор оптимальним вибором у

даному технологічному середовищі, де важливо не лише реагувати, але й робити це точно, стабільно та своєчасно.

Визначення параметрів настройки регулятора за табличним методом

У практиці промислової автоматизації, де час на налаштування обмежений, а повноцінне моделювання складне або недоцільне, зазвичай застосовують наближені (евристичні) методи визначення параметрів регулятора. Такі методи дозволяють оперативно, без тривалих експериментів і математичних ускладнень, підібрати налаштування регулятора, спираючись на задані критерії якості керування та узагальнені властивості об'єкта.

Оцінка динамічних характеристик об'єкта здійснюється за допомогою спрощених моделей, як правило - у вигляді передатних функцій, які апроксимують поведінку реальної системи. Ці функції дають змогу математично описати реакцію об'єкта на зміну керуючої дії або збурення, що, у свою чергу, лягає в основу вибору типу та параметрів регулятора.

Серед широко застосовуваних евристичних методик у цьому контексті табличний метод є одним із найзручніших і найпоширеніших. Його суть полягає у визначенні параметрів налаштування регулятора на основі характеристик передатної функції об'єкта. Конкретні значення коефіцієнтів регулювання вибираються з узагальнених таблиць, які сформовані на основі моделювання типових об'єктів.

У нашому випадку передатну функцію об'єкта (див. рис. 2.5) представлено у формі інерційної ланки першого порядку, що дозволяє скористатися відповідними значеннями з таблиць для ПІ-регуляторів. Надалі буде виконано розрахунок параметрів на основі цієї моделі, що дозволить отримати достатньо точне і практично застосовне налаштування.

Якщо представити передатну функцію (рис. 2.5) у вигляді інерційної ланки 1-го порядку, то отримаємо

$$W_{KEP}(p) = \frac{2,869}{110 \cdot s + 1} \cdot e^{-130 \cdot s} \quad (2.1)$$

Відношення τ/T дорівнює $130/110 = 1,2$.

Вирахуємо параметри налаштування для випадку П-, ПІ- та ПІД-регуляторів за наступною таблицею 3.1:

Таблиця 2.1.

Визначення параметрів настройки різних типів регуляторів
при неперервному алгоритму керування

Закон регулювання	Параметри настройки	Відносне запізнювання ОК		
		$\frac{\tau_{об}}{T_{об}} < 0.2$	$0.2 < \frac{\tau_{об}}{T_{об}} < 1$	$\frac{\tau_{об}}{T_{об}} > 1$
II	K_p	$\frac{1}{K_{об} \tau_{об}}$	$\frac{\tau_{об}/T_{об} + 0.7}{2.6K_{об}(\tau_{об}/T_{об} - 0.08)}$	$\frac{1}{2K_{об}}$
	K_p	$\frac{1}{1.1K_{об} \tau_{об}}$	$\frac{\tau_{об}/T_{об} + 0.6}{2.6K_{об}(\tau_{об}/T_{об} - 0.08)}$	$\frac{1}{2K_{об}}$
III	T_I	$3.3\tau_{об}$	$\frac{0.8T_{об}}{\tau_{об}}$	$0.6\tau_{об}$
	K_p	$\frac{1}{0.8K_{об} \tau_{об}}$	$\frac{\tau_{об}/T_{об} + 1.5}{3.7K_{об}(\tau_{об}/T_{об} - 0.13)}$	$\frac{1}{1.7K_{об}}$
PID	T_I	$2.5\tau_{об}$	$T_{об}$	$0.7\tau_{об}$
	T_D^*	$0.15T_I$	$0.15T_I$	$0.15T_I$

P

$$K_{rp1} := \frac{1}{2 \cdot K} \quad K_{rp1} = 0.1727$$

PI

$$K_{rp1} := \frac{1}{2 \cdot K} \quad K_{rp1} = 0.1727$$

$$T_{p1} := 0.6 \cdot \tau_{об}$$

$$T_{p1} = 1200$$

PID

$$K_{pid1} := \frac{1}{1.7 \cdot K} \quad K_{pid1} = 0.2031$$

$$T_{pid1} := 0.7 \cdot \tau_{об} \quad T_{pid1} = 1400$$

$$T_{pid11} := 0.15 T_{pid1} \\ T_{pid11} = 210$$

Виразуємо параметри настройок різних регуляторів за таблицею 2.2.

Таблиця 2.2.

Оптимальні величини настройки регуляторів для ОК 1-го порядку із запізненням

Закон	Параметри	Оптимальний перехідний процес з двадцяти-відсотковим перерегулюванням
		Статичний об'єкт
I	Kp	$\frac{1}{1.7K_{об}T_{об}}$
II	Kp	$\frac{0.7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$
III	Kp	$\frac{0.7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$
	Ti	$0.7T_{об}$
PID	Kp	$\frac{1.2T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$
	Ti	$2\tau_{об}$
	Td	$0.4\tau_{об}$

P $K_{rp2} := \frac{0.7 \cdot T}{K \cdot \tau}$ $K_{rp2} = 0.0134$

PI $K_{rpi2} := \frac{0.7 \cdot T}{K \cdot \tau}$ $K_{rpi2} = 0.0134$

$T_{pi2} := 0.7 \cdot T$ $T_{pi2} = 77.5222$

PID $K_{rpid2} := \frac{1.2 \cdot T}{K \cdot \tau}$ $K_{rpid2} = 0.0229$

$T_{pid2} := 2 \cdot \tau$ $T_{pid2} = 4000$

$T_{pid2} := 0.4 \cdot \tau$ $T_{pid2} = 800$

$$K_{r1} := \begin{pmatrix} K_{rp1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{rpi1} & 0 \\ 0 & 0 & K_{rpid1} \end{pmatrix} \quad T_{i1} := \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{pi1}} \\ \frac{1}{T_{pid1}} \end{pmatrix} \quad T_{d1} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_{pid1} \end{pmatrix}$$

$$K_{r2} := \begin{pmatrix} K_{rp2} & 0 & 0 \\ 0 & K_{rpi2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{rpid2} \end{pmatrix} \quad T_{i2} := \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{pi2}} \\ \frac{1}{T_{pid2}} \end{pmatrix} \quad T_{d2} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_{pid2} \end{pmatrix}$$

$$W_{p1}(s) := K_{r1} \cdot \left(1 + \frac{T_{i1}}{s} + T_{d1} \cdot s \right) \quad W_{p2}(s) := K_{r2} \cdot \left(1 + \frac{T_{i2}}{s} + T_{d2} \cdot s \right)$$

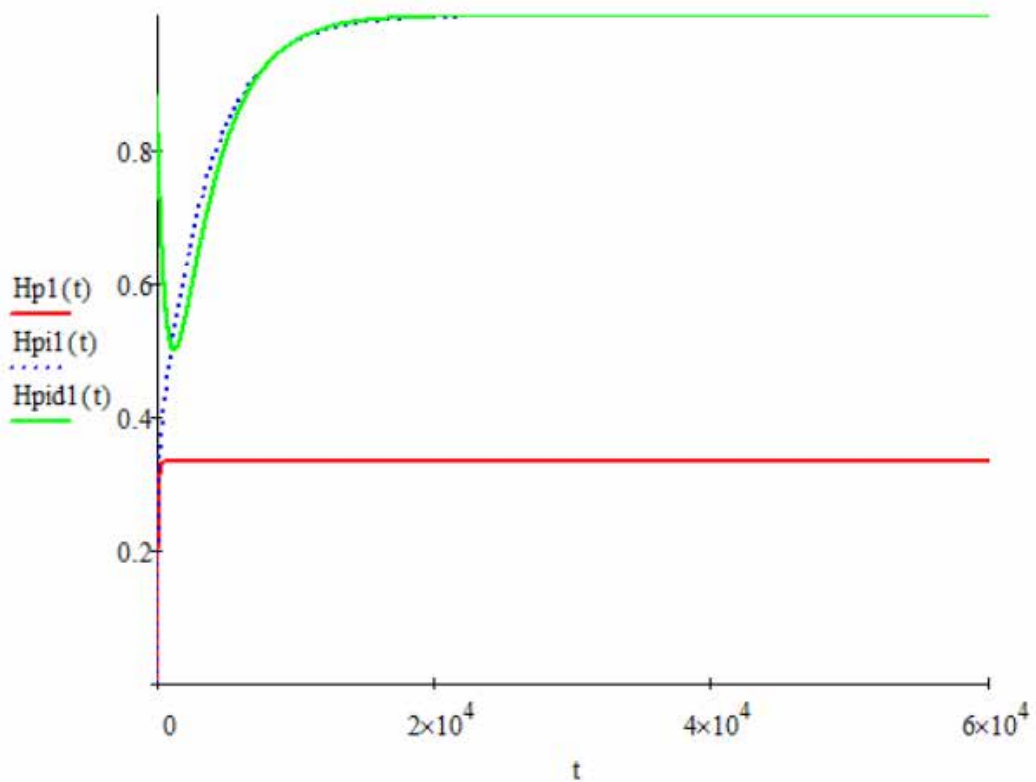


Рис. 2.4. Перехідні процеси у системі керування з передатною функцією та усіма регуляторами (за значеннями, вказаними у таблиці 3.1)

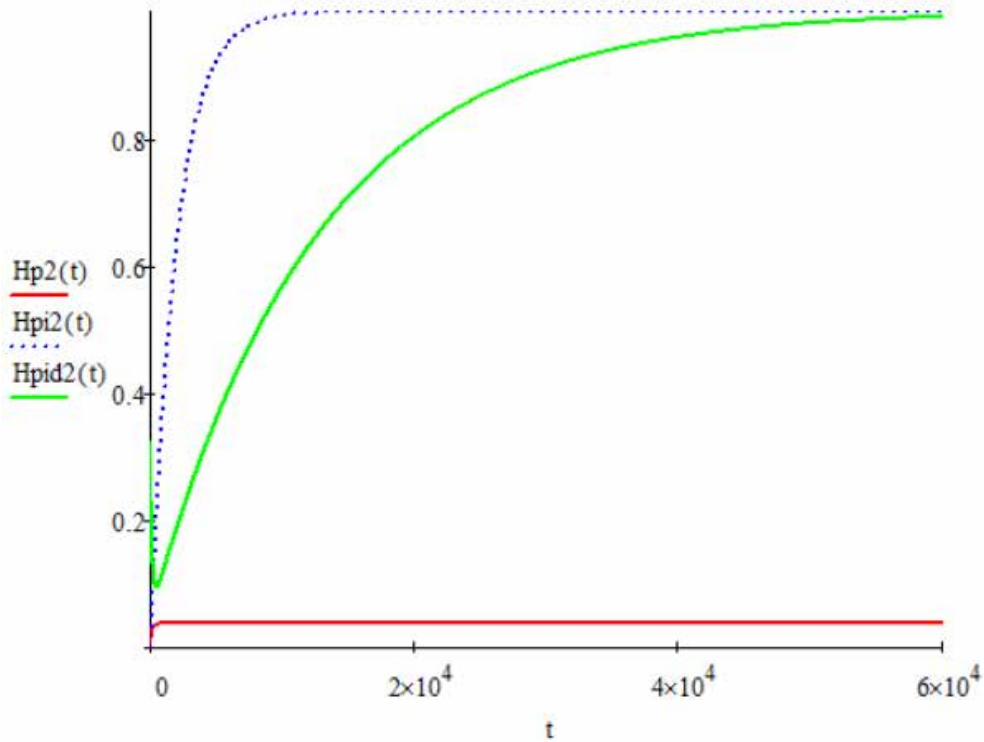


Рис. 2.5. Перехідні процеси в системі керування з передатною функцією та всіма типами регуляторів (згідно з параметрами, наведеними в таблиці 3.2).

Аналіз графіків, що ілюструють реакції системи на зміну вхідного сигналу, дозволяє глибше зрозуміти функціональну роль кожної складової ПІД-регулятора.

Пропорційна (П) складова генерує керуючий вплив, прямо пропорційний до поточного відхилення контрольованої величини від заданої мети. Саме завдяки цьому регулятор здатен миттєво відреагувати на зміну ситуації, утримуючи систему в рамках допустимого діапазону.

Інтегральна (І) частина - на відміну від пропорційної - діє накопичувально. Вона враховує історію відхилень, поступово компенсуючи навіть незначні, але довготривалі похибки. Таким чином, вона усуває статичну помилку, що є типовою проблемою для П-регуляторів.

Диференціальна (Д) складова, у свою чергу, виконує функцію передбачення. Вона реагує на темп зміни відхилення, тобто на його похідну. Завдяки цьому система встигає підлаштуватися ще до того, як відхилення стане значним, - саме так досягається висока швидкодія регулятора.

Щодо практичного порівняння способів налаштування, то як видно з рис. 3.6, між двома методами - Ціглера–Нікольса та табличним - спостерігається помітна різниця. Табличне налаштування демонструє кращу динамічну поведінку

системи: менше перерегулювання, коротший час стабілізації, плавніше входження у робочий режим. Такі характеристики особливо цінні у виробничих умовах, де важливі не лише точність, а й оперативність реакції на збурення, тому табличний підхід можна вважати більш придатним для реального впровадження.

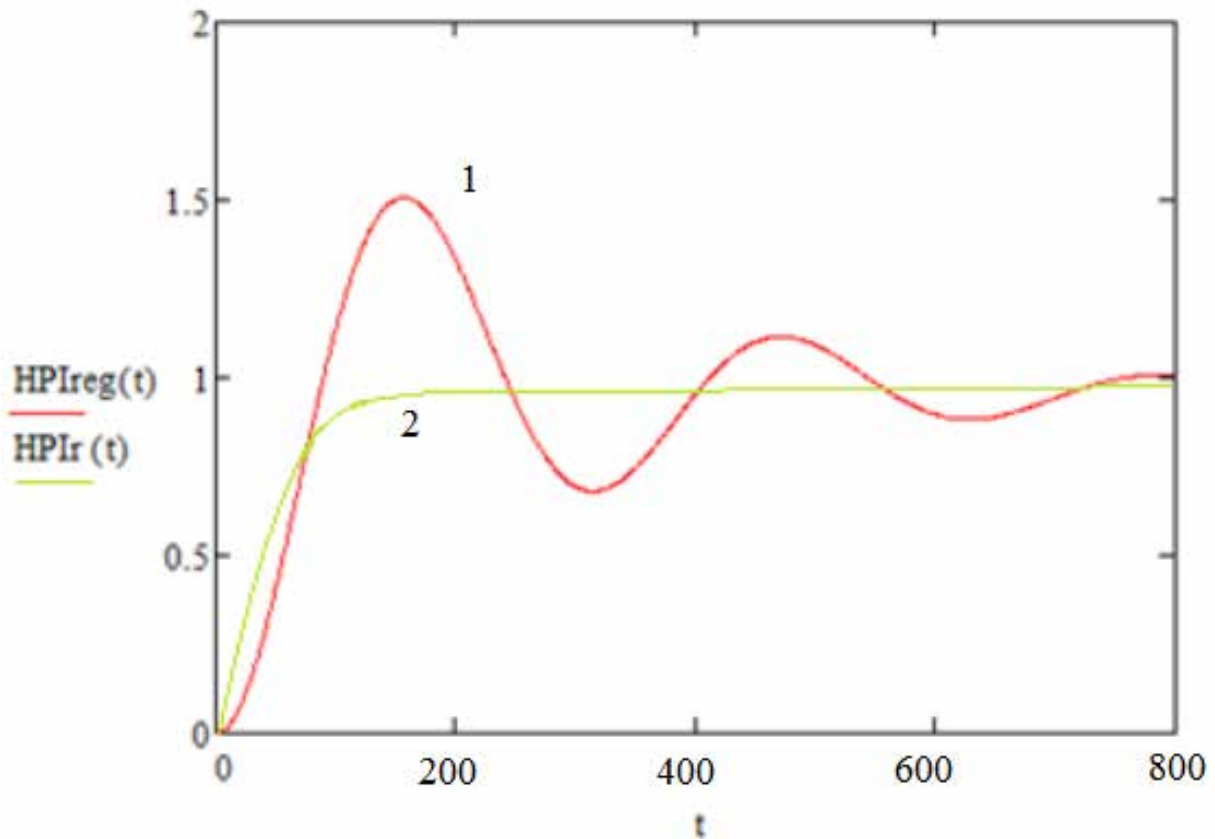


Рис. 2.5.6. Перехідні процеси у системі автоматичного керування із ПІ-регулятором, отримані за: методом Ціглера-Нікольса (1) та за табличним методом (2)

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Схеми підключення датчиків і виконавчих механізмів до ПЛК

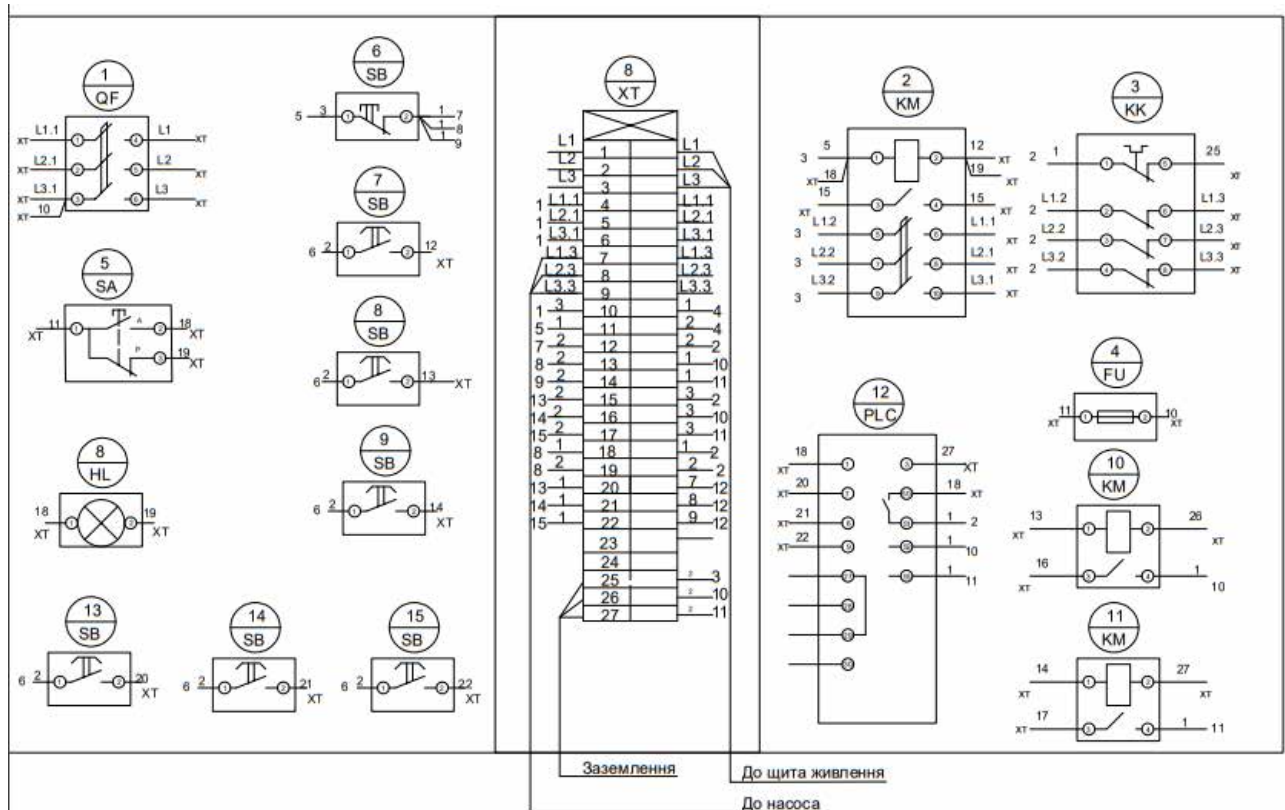


Рис 3.1.1 – Схема підключень для преддефектора

На даному кресленні представлено загальну схему підключення основних елементів системи автоматизації до клемника щита керування. Схема забезпечує інтеграцію силових, логічних і сигнальних елементів у єдину систему на базі ПЛК Siemens.

Схему умовно поділено на декілька функціональних блоків:

1. Живлення силових ланцюгів

У верхній частині схеми передбачено трифазне підключення живлення (L1, L2, L3) через автоматичний вимикач QF. Після нього встановлено запобіжник FU, який забезпечує захист силового кола.

2. Контактори та двигуни

Контактори KM1, KM2, KM3 керують виконавчими механізмами системи:

- M1 - насос-дозатор вапняного молока;

- M2 - мішалка в преддефекаторі;
- M3 - насос повернення соку.

Вони комутують трифазне живлення до двигунів через силові контакти КК1, КК2, КК3.

3. Органи керування

Кнопки SB та перемикачі SA реалізують локальне ручне керування обладнанням:

- Пуск/стоп кожного виконавчого механізму;
- Перемикання режимів «Автомат/Ручний»;
- Скидання аварійної ситуації.

Сигнальні лампи HL індикують основні режими роботи або аварійні стани.

4. Програмований логічний контролер

Контролер PLC (Siemens S7-1200) виконує збір і обробку сигналів з кнопок, датчиків та регулюючих пристроїв. Його входи підключено до клемних затискачів XT, а виходи керують котушками контакторів та індикаторами.

Підключення ПЛК до датчиків:

- QE - рН-датчик;
- TE - температурний перетворювач;
- FT1, FT2 - витратоміри соку та вапна.

5. Клемник (XT)

Клемний блок XT виступає як центральна точка з'єднання між польовими приладами, силовими виконавцями та контролером. Кожен провід має відповідне маркування, що дозволяє легко відстежувати сигнали.

У нижній частині схеми присутні позначки напрямку з'єднання:

- «До щита живлення» - надходження електроенергії;
- «До насоса» - вихід до двигунів;
- «Заземлення» - контур безпеки.

Висновок

Запропонована схема підключення дозволяє реалізувати надійне з'єднання усіх компонентів системи регулювання рН у преддефекаторі з програмованим

логічним контролером. Вона забезпечує зручність монтажу, обслуговування та модернізації обладнання.

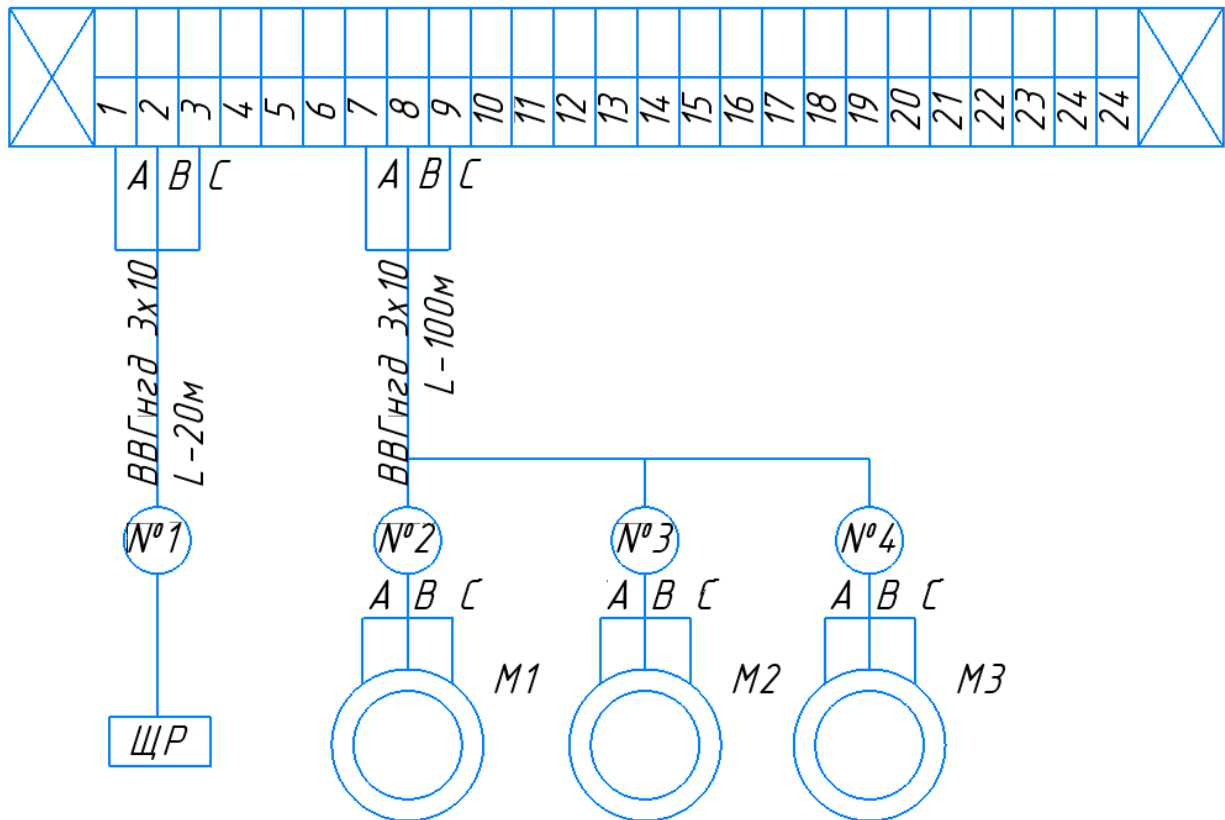


Рис 3.1.2 – Силове підключення силових елементів преддефекатора

Силове підключення двигунів виконується кабелем ВВГнг-LS 3×10 з клемника розподільного щита, із загальною довжиною прокладки до 100 м. Передбачене окреме підключення до кожного двигуна через клеми №2-4.

3.2. Схеми встановлення технічних засобів та монтажний розріз

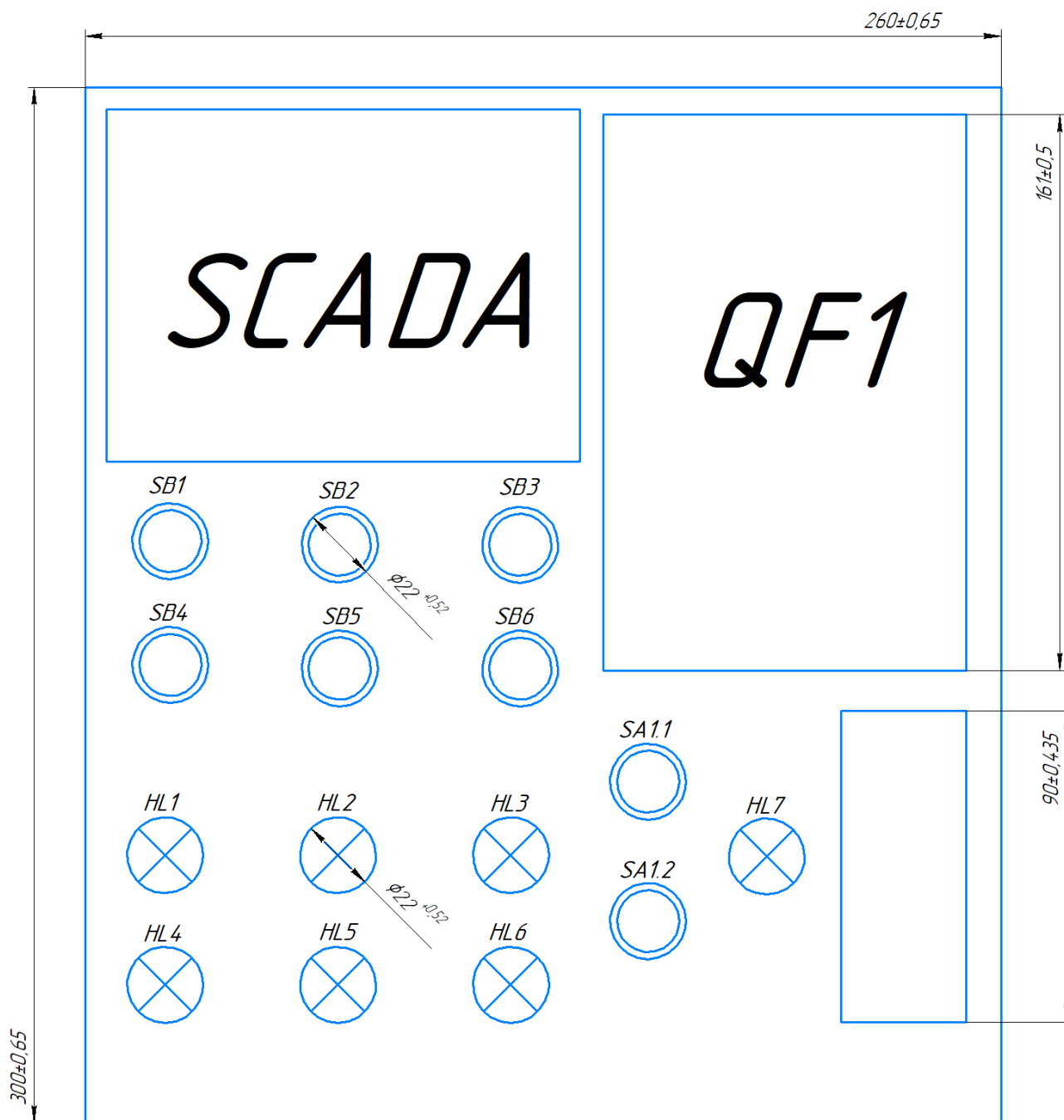


Рис 3.1.3 – Розміщення елементів передньої панелі щита керування

Опис елементів передньої панелі щита керування

Опис передньої панелі щита керування

Передня панель щита є основним інтерфейсом взаємодії оператора з системою регулювання рН у баку переддефекації. Вона сконструйована таким чином, щоб забезпечити інтуїтивно зрозумілий доступ до всіх основних функцій керування (як у ручному, так і в автоматизованому режимі). Керування відбувається компонентами на панелі (кнопки керування, сигнальні світлові індикатори,

апаратні перемикачі режимів та панель оператора (НМІ)).

Автоматичний вимикач (QF1)

У верхній правій частині панелі розміщено умовне позначення автоматичного вимикача QF1, що відповідає за подачу/відключення живлення до щита. (під ним розташований запобіжник)

Кнопки керування

SB1 - Пуск насоса-дозатора (M1): активує подачу вапняного молока до системи.

SB2 - Стоп насоса-дозатора (M1): припиняє роботу дозувального насоса.

SB3 - Пуск мішалки (M2): вмикає мішалку у баку для забезпечення рівномірного розподілу реагенту.

SB4 - Стоп мішалки (M2): зупиняє мішалку.

SB5 - Скидання аварії (Reset): використовується для очищення сигналу аварії після усунення її причин.

SB6 - Перемикання Auto/Manual: подає логічний сигнал до ПЛК для зміни режиму керування.

Світлові індикатори

HL1 (зелений): індикація активного стану насоса-дозатора.

HL2 (жовтий): сигналізує про зниження рівня рН нижче встановленої межі.

HL3 (жовтий): вказує на перевищення допустимого рівня рН.

HL4 (червоний): аварійний індикатор - фіксує критичні стани системи.

HL5, HL6 (резервні): передбачені для додаткових функцій, таких як індикація живлення або сервісних подій.

HL7 (синій): підтверджує активний ручний режим керування.

Апаратні перемикачі режимів

SA11 - AUTO/OFF: подає або знімає живлення з логічної частини системи (ПЛК, НМІ).

SA12 - AUTO/MANUAL: дозволяє перемикання між автоматичним і ручним режимами керування виконавчими механізмами.

Панель оператора (HMI)

На передній панелі передбачене прямокутне вікно, яке відповідає місцю встановлення панелі оператора Siemens KTP700 Basic. Через цей інтерфейс оператор здійснює більш детальне налаштування, моніторинг та взаємодію з системою.

Усі ці елементи розміщені відповідно до логіки технологічного процесу. Структура панелі забезпечує послідовність дій, швидкий візуальний контроль стану системи, а також ергономічність експлуатації в умовах виробництва.

3.3. Спеціальне програмне забезпечення ПЛК: алгоритм і програмні фрагменти

Для реалізації автоматизованого керування процесом регулювання рН у баку предфекації було розроблено програмне забезпечення, яке реалізується на базі програмованого логічного контролера Siemens S7-1200 за допомогою середовища **TIA Portal**. Структура програми побудована за модульним принципом, що дозволяє гнучко масштабувати систему, швидко виявляти помилки та виконувати обслуговування.

3.3.1. Загальна структура програми

Основні етапи програмної реалізації:

- Ініціалізація змінних (параметрів, уставок, флагів стану);
- Опрацювання сигналів від датчиків (рН, витрата соку, витрата вапна);
- Обробка сигналів від кнопок і перемикачів;
- Реалізація каскадної системи регулювання (контур витрата/витрата + рН);
- Видача команд на виконавчі механізми (насос, мішалка, клапани);
- Реалізація аварійної логіки та індикації;
- Обмін даними з панеллю оператора (HMI).

3.3.2. Основні програмні блоки

1. **OB1 – Main Cycle**

Основний організаційний блок, що циклічно виконує всі виклики функціональних блоків програми. У ньому зібрано виклики таких основних підпрограм:

2. **FB_pH_Control**

Функціональний блок реалізації алгоритму каскадного регулювання рН. Він отримує дані від перетворювачів витрати та рН і на основі ПІ-регулятора генерує сигнал керування для виконавчого механізму подачі вапна.

3. **FB_ManualMode**

Логіка ручного керування виконавчими механізмами за допомогою кнопок на передній панелі. Передбачено перемикання між ручним та автоматичним режимами через флаг або перемикач SA12.

4. **FB_Alarms**

Обробка аварійних ситуацій, таких як перевищення граничних значень рН, обрив або відмова датчика, аварія двигуна. При виявленні проблем активуються відповідні сигнали й відбувається запис події в НМІ.

5. **FB_Indicators**

Формування логічних сигналів для керування світлодіодними індикаторами HL1–HL7 на передній панелі.

6. **DBs (Data Blocks)**

Окремі блоки даних використовуються для зберігання:

- Уставок регуляторів;
- Поточних значень із датчиків;
- Аварійних прапорів;
- Тимчасових та лічильних значень.

3.3.3. ПІ-регулятор

Алгоритм регулювання реалізовано у вигляді ПІ-регулятора, параметри якого налаштовуються з панелі оператора. Регулятор обробляє сигнал рН та змінює уставку для витрати вапна через каскадний контур. Значення параметрів (K_p , T_i) розраховано методом Ціглера-Нікольса з подальшим ручним уточненням.

Програмне обслуговування SCADA

Усі теги змінних програми були пов'язані з відповідними полями у SCADA (WinCC RT Advanced) через тегову таблицю. Зокрема:

- Цифрові теги — для відображення стану двигунів, кнопок і аварій;
- Аналогові теги — для виведення значень рН, витрати та температури.

Підсистема СІР-промивання

Окремо реалізовано логіку ручної послідовності СІР-промивання зонду рН:

- Кнопки SB7–SB12 запускають окремі стадії промивання (вода / кислотний розчин / продувка);
- Активується відповідний контактор;
- Підтвердження роботи – через індикатори HL5–HL7.

3.3. Розробка людино-машинного інтерфейсу (SCADA/НМІ) та вимоги ISA-101

Для ефективного керування технологічним процесом регулювання рН у баку попередньої очистки соку у даному проекті розроблено інтерактивний графічний інтерфейс оператора – систему SCADA, реалізовану в середовищі WinCC RT Advanced, що входить до складу TIA Portal. Основна мета створення

HMI/SCADA – надати оператору зручний та інформативний засіб для моніторингу, управління і діагностики об’єкта автоматизації.

Структура HMI-проекту

Інтерфейс організовано у вигляді вкладок із тематичними екранами:

- «Преддефекатор» – відображення основного апарату та потоків реагентів;
- «Сатурація», «Фільтри», «Загальний вигляд» – навігаційні екрани для спрощеного огляду системи;
- «Графіки» – виведення тенденцій рН, витрати та інших параметрів;
- «Параметри» – для налаштування уставок, коефіцієнтів регулятора та допустимих меж аварій.

На кожному екрані реалізовано:

- Іконки виконавчих механізмів (насоси, клапани, двигуни);
- Текстові поля з поточними значеннями (рН, температура, витрата);
- Кольорову індикацію станів;
- Кнопки ручного керування та підтвердження тривоги.

Основні функції

Візуалізація технологічної схеми – оператор бачить реальний стан усіх елементів процесу.

- Інтерактивне керування – можливість запуску механізмів у ручному режимі.
- Моніторинг параметрів – онлайн-значення з датчиків рН, витрати, температури.
- Архівування даних – збереження історії вимірювань, уставок, подій.
- Тривожна сигналізація – попередження про відхилення, вказівка на причину аварії.
- Скидання аварій і режимне перемикання – для відновлення роботи або переходу між Auto/Manual.

Відповідність стандарту ISA-101

Стандарти ISA-101 визначають вимоги до дизайну інтерфейсів операторів в системах автоматизації. При розробці SCADA були враховані такі принципи:

Простота та ясність: мінімалістичний дизайн без зайвої інформації. На екрані лише те, що стосується конкретної ділянки.

Ієрархія навігації: структура «огляд - ділянка - елемент» спрощує орієнтацію в системі.

Стандарти кольорів:

Зелений – нормальний стан;

Жовтий – попередження (наприклад, низький рН);

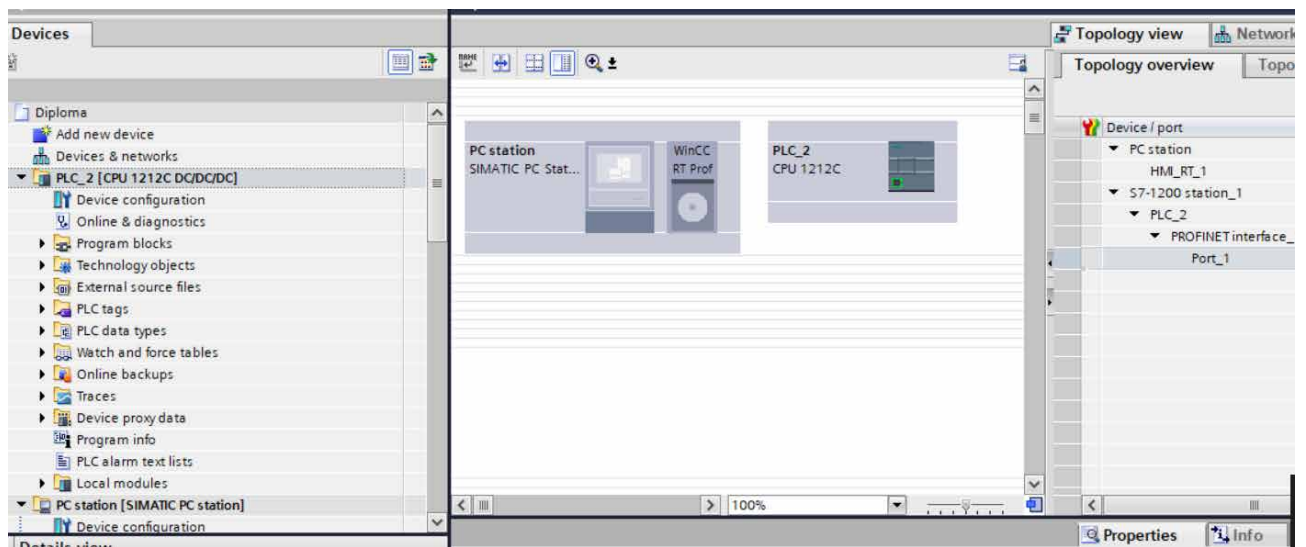
Червоний – аварія;

Сірий – неактивний елемент.

Зворотний зв'язок: усі дії оператора супроводжуються візуальним підтвердженням.

Можливість масштабування: кожен об'єкт має унікальний тег і може бути повторно використаний у шаблонах.

Рисунок 3.10 – Топологічне підключення пристроїв у середовищі TIA Portal (прив'язка портів PLC і HMI)

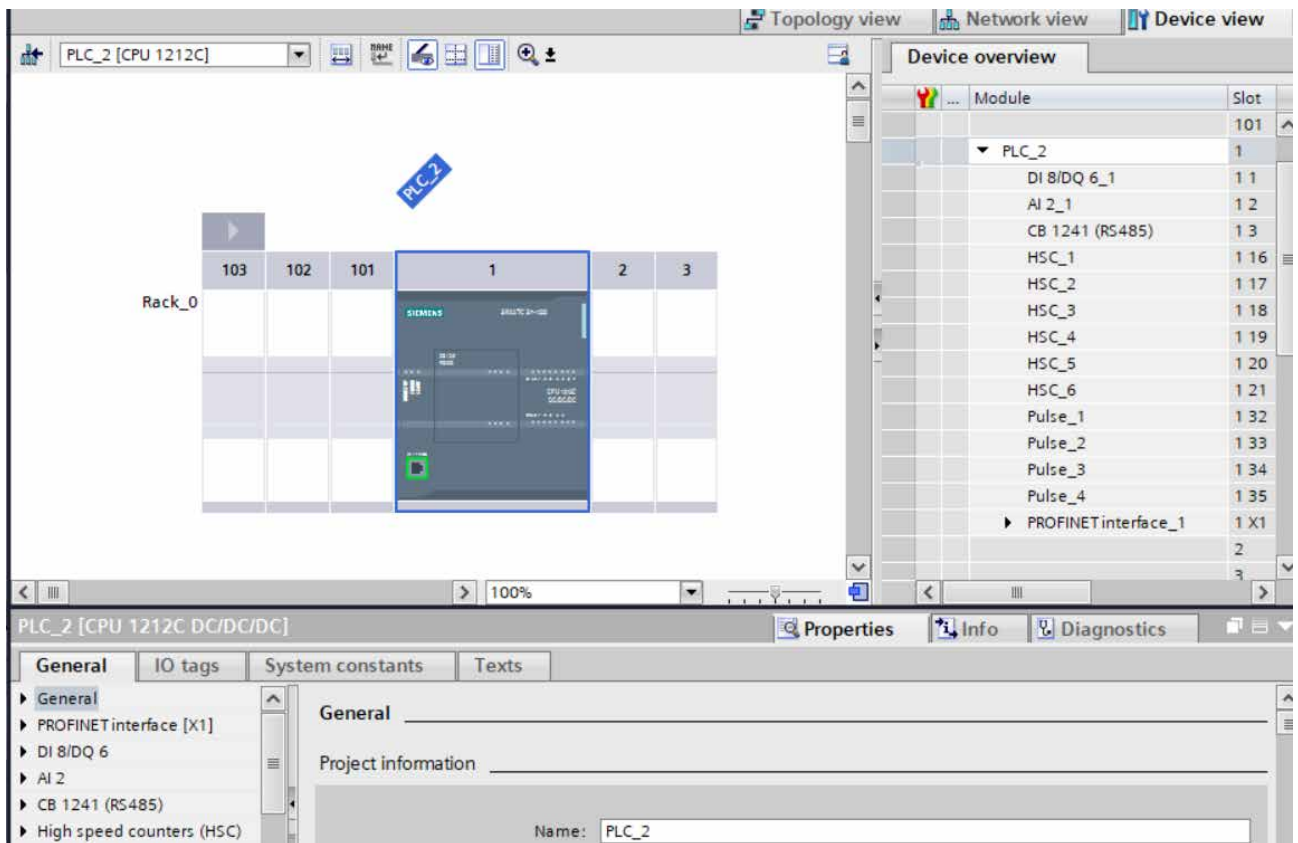


На даному зображенні представлено конфігурацію топології мережі в середовищі TIA Portal, яка виконується через вкладку Topology view. У проєкті показано два основних пристрої: SIMATIC PC station, що виконує роль SCADA-серверу (панель оператора), та контролер PLC_2 (CPU 1212C DC/DC/DC).

Прив'язка здійснюється через інтерфейс PROFINET interface X1, що дозволяє встановити пряме з'єднання між портом контролера (Port_1) та віртуальним HMI-пристроєм. Така схема зв'язку забезпечує надійну передачу даних між контролером і SCADA, а також дозволяє реалізувати функціонал людино-машинного інтерфейсу, моніторинг стану системи в реальному часі та керування технологічними процесами.

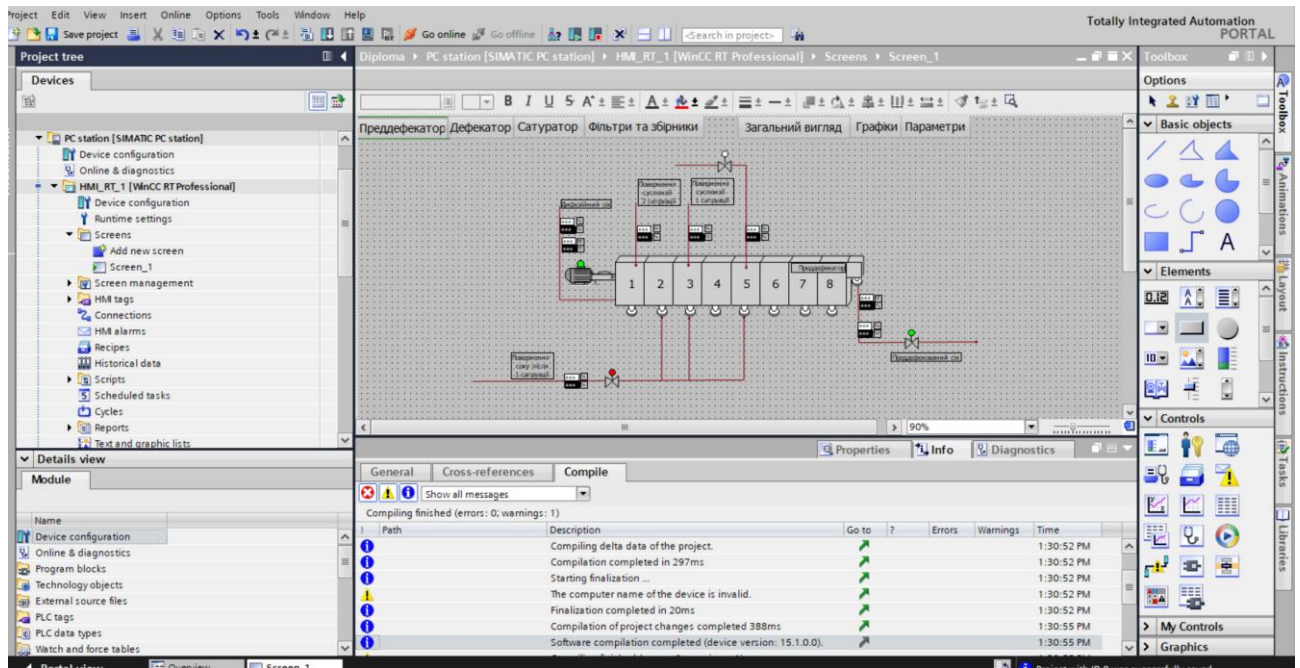
Цей етап проєктування дозволяє логічно ідентифікувати фізичні підключення, що важливо для точності роботи системи автоматизації та подальшої діагностики.

Рисунок 3.11 – Конфігурація апаратного середовища контролера



Дане зображення відображає вкладку «Device view», де виконано апаратну конфігурацію контролера S7-1200 у програмному середовищі TIA Portal. Контролер розташований у слоті 1 шафи Rack_0. У правій частині показано список модулів контролера, включно з цифровими входами/виходами (DI 8/DQ 6), аналоговими входами (AI 2_1), комунікаційним модулем CB1241 (RS-485), лічильниками високої швидкості (HSC) та імпульсними виходами (Pulse). У нижній панелі меню відкрито вкладку властивостей (Properties), де вказано ім'я пристрою PLC_2, що дозволяє здійснювати подальші налаштування й ідентифікацію пристрою в проєкті.

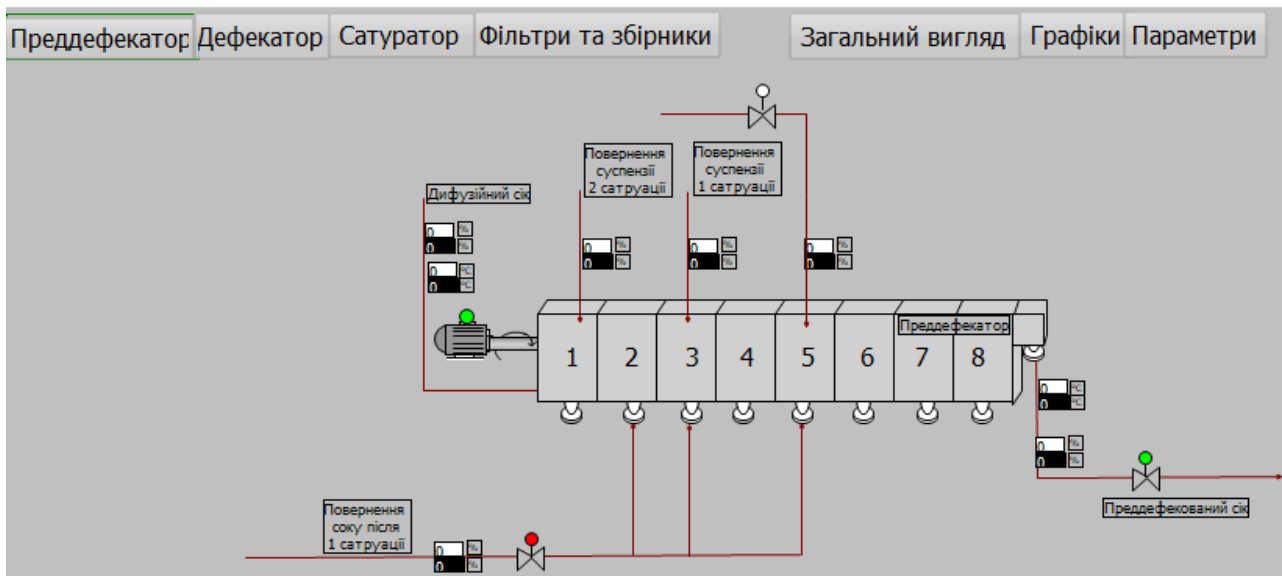
Рисунок 3.15 – Робоче середовище WinCC RT Professional при створенні екрана SCADA-системи



На зображенні представлено середовище розробки екрану в програмі WinCC RT Professional у складі TIA Portal. У правій частині зображення видно панель інструментів із базовими графічними об'єктами, кнопками керування, індикаторами та елементами візуалізації. У центральній частині екрана знаходиться робоче поле, де створюється графічне представлення технологічного процесу попередньої очистки дифузійного соку. Вгорі відображені вкладки, що відповідають різним технологічним зонам, зокрема: «Преддефектор», «Дефектор», «Сатуратор», «Фільтри та збірники» тощо.

Цей інтерфейс дозволяє оператору в режимі реального часу контролювати стан об'єктів, таких як насоси, клапани, витратоміри та інші датчики, що інтегровані в SCADA-систему. У нижній частині видно результати компіляції проєкту, яка завершилась успішно.

Рисунок 3.16 – Візуалізація технологічної ділянки “Преддефектор” у SCADA-системі



Це вікно демонструє створений графічний екран користувача, що відображає ключові компоненти апарата попередньої очистки (преддефекатора). Всі основні потоки (дифузійний сік, повернення суспензії, повернення соку) мають власні лінії з відповідними засувками та індикаторами. На діаграмі зображено секції преддефекатора та технологічні точки, в яких розміщені вимірювальні елементи – витратоміри, датчики температури, рН тощо.

У нижній частині екрана представлено ділянку виходу «преддефікованого соку» з підтвердженням відкритого стану відповідного клапана (зелений індикатор). Візуалізація реалізована у відповідності до рекомендацій стандарту ISA-101 – з чітким розділенням зон, інтуїтивною структурою та використанням кольорових позначень для швидкого аналізу стану процесу.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

В умовах зростаючої вартості енергоносіїв і жорсткої ринкової конкуренції потреба в раціоналізації виробничих процесів стає не просто актуальною - вона трансформується в критично необхідну передумову для ефективного функціонування підприємства. Серед таких кроків - застосування та впровадження автоматизованих систем управління на виробництві. У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянемо у парадигмі системи регулювання рівня рН у баку переддефекації дифузійного соку, яка здатна суттєво змінити підхід до технологічного контролю.

4.1 Економічні вигоди від впровадження автоматизації

Автоматизоване регулювання рН це не просто технологічне удосконалення. Це важіль, який впливає одразу на кілька ключових аспектів виробництва:

- Зниження витрат на реагенти. Завдяки точному дозуванню вапняного молока, яке здійснюється згідно з заданим алгоритмом у режимі реального часу, вдається скоротити його використання на 5–7%.
- Оптимізація енерговитрат. Зменшення перевитрати пари у подальших процесах - таких як сатурація та випарювання - безпосередньо знижує питомі витрати енергії, що позитивно позначається на собівартості продукції.
- Підвищення стабільності процесу. Керування рН у автоматичному режимі сприяє більш прогнозованому перебігу реакцій, що, у свою чергу, зменшує втрати сахарози - одного з головних цінних компонентів.
- Скорочення трудовитрат. Оператору більше не потрібно постійно втручатися у процес: контроль і регулювання відбуваються автоматично, звільняючи ресурси для вирішення інших технологічних задач.

4.2 Орієнтовні витрати на впровадження

Таб. 4.2.1 Орієнтовні витрати на впровадження

Компонент	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
ПЛК Siemens S7-1200 CPU1212C DC/DC/DC	1	8 700	8 700
Панель оператора КТР700 Basic	1	11 500	11 500
Блок живлення SITOP PSU100C 24V/2.5A	1	3 200	3 200
Реле Siemens 3RH2122-1AP00	3	620	1 860
рН-електроди з ретракторами	2	6 000	12 000
Датчик температури РТ100	1	1 800	1 800
Насос-дозатор (керований, мембранний)	1	12 000	12 000
Клапан паровий керований	1	9 500	9 500
Комплект клемників, кабелів, корпусів	-	-	5 000
Монтажні та пусконаладжувальні роботи	-	-	7 000

Розрахунок строку окупності

Перед тим як інвестувати у впровадження автоматизовації для будь якої системи, необхідно зважити не лише технічні переваги, а також чітко виділити економічну складову.

Саме тому було проведено орієнтовну оцінку сезонних втрат, які можуть виникнути при відсутності автоматизації регулювання рівня рН у баку переддефекації. Результати наступні:

- Надлишкова витрата вапняного молока внаслідок неточного ручного дозування - близько 20 000 грн за сезон
- Перевитрати енергоресурсів (пара, електроенергія), що виникають через нестабільність процесу - орієнтовно 15 000 грн за сезон
- Перевитрати на оплату праці додаткового оператора, яким постійно контролює й коригує рН вручну - приблизно 18 000 грн за весь сезон
- Втрати сахарози внаслідок не оптимального перебігу хімічних процесів - 25 000 грн за сезон

У сумі це дає можливості в економії до 78 000 грн за сезон, це дозволяє стверджувати: строк окупності проєкту не перевищує одного виробничого циклу, а в окремих випадках може бути навіть меншим.

ВИСНОВОК

Під час виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було не просто розглянуто окремий технічний аспект, а й також системно розроблено та обґрунтовано концепцію автоматизованого регулювання рівня рН у баку переддефекації - важливій ланці хімічного очищення дифузійного соку. Від її стабільності безпосередньо залежить ефективність наступних технологічних фаз (сатурації, фільтрації, зрештою, кристалізації, тощо.). Відповідно це, у свою чергу, формує якість кінцевого продукту та визначає економічні показники виробництва.

Спершу було проведено глибокий аналітичний огляд сучасного стану питання. Детально вивчено типові технологічні схеми дефекосатурації, методи ручного контролю рівня рН та ідентифіковано основні проблеми (повільність реакції оператора, нерівномірність розподілу реагентів, надмірне споживання реагентів, коливання параметрів, що призводять до втрати цінних ресурсів - зокрема сахарози)

У відповідь на ці проблеми та було запропоновано впровадити автоматизовану систему з використанням сучасних технічних засобів (ПЛК, комбінованих рН-електродів із температурною компенсацією, частотних насосів-дозаторів, регулюючих клапанів та панелі оператора НМІ). Основна увага приділялася структурі управління та її функціональній реалізації - із побудовою каскадної системи з зовнішнім і внутрішнім контурами регулювання.

У результаті виконаної роботи вдалося досягти наступного:

- Розроблено алгоритм ПІ-регулювання, що враховує як поточне значення рН, так і його динаміку після внесення реагенту;
- Проведено техніко-економічний аналіз, що засвідчив окупність проєкту менш ніж за один виробничий сезон;
- Побудовано архітектуру системи управління: від логіки до компонування елементів щита (модулі, живлення, інтерфейс, клеми);
- Запроектовано принципову електричну схему з передбаченим перемиканням режимів (ручний / автоматичний);
- Складено обґрунтовану специфікацію обладнання - з урахуванням критерію надійності, доступності й сумісності.

Впровадження системи відкриває значний спектр переваг:

- Високоточне стабілізування рН у діапазоні 9,2–9,5 з мінімальним відхиленням $\pm 0,07$ рН;
- Зниження витрат: до 7% - на вапно, до 5% - на пару;
- Підвищення виходу товарного цукру на 0,2–0,4% від маси буряків;
- Скорочення трудозатрат та мінімізація людського чинника;
- Менші обсяги осаду, а відтак - і витрат на його видалення.

Отже, запропонована система не лише вдосконалює хід технологічного процесу, а й формує реальний економічний ефект, роблячи цукрове виробництво більш гнучким, точним і конкурентоспроможним. Завдяки своїй модульності та універсальності розробка може бути адаптована до інших етапів очистки або застосована в аналогічних процесах харчової й хімічної промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Логвін В. І. Автоматизація технологічних процесів харчових виробництв [Електронний ресурс] / В. І. Логвін. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/> – Нац. ун-т харч. технологій, 2021.
2. Ладанюк А. П. Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості: навч. посіб. / А. П. Ладанюк. – К.: НУХТ, 2010. – 400 с. – Режим доступу: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=EC&P21DBN=EC&Z21ID=&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21STR=Ладанюк%20А
3. Автоматизація виробничого процесу одержання цукру [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7185107/>
4. Гаврилюк, В. В. Автоматизація технологічних процесів: підручник / В. В. Гаврилюк. — Київ: Ліра-К, 2020. — 368 с.
5. Боярчук, В. С. Основи проектування автоматизованих систем / В. С. Боярчук, О. В. Кравчук. — Львів: Львівська політехніка, 2019. — 256 с.
6. Siemens AG. SIMATIC S7-1200: System Manual. — Release 12/2019. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com>
7. Волкова, І. М. Промислова автоматизація: навч. посіб. / І. М. Волкова. — Харків: УкрДАЗТ, 2021. — 192 с.
8. ДСТУ EN 61131-3:2016 Програмовані логічні контролери. Частина 3. Мови програмування. — [Чинний від 2017-01-01]. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 132 с.
9. Кириленко, О. І. SCADA-системи: структура, функції, приклади реалізації / О. І. Кириленко. — Одеса: ОНАХТ, 2018. — 148 с.
10. Губар, О. В. Математичне моделювання динамічних систем: навч. посіб. / О. В. Губар, С. А. Сокол. — Дніпро: НМетАУ, 2017. — 220 с.
11. Ковальчук, С. О. Промислові контролери і системи автоматизації: навч. посіб. / С. О. Ковальчук. — Вінниця: ВНТУ, 2020. — 180 с.
12. Гнипа, Ю. М. Теорія автоматичного керування: навч. посіб. / Ю. М. Гнипа, Л. О. Вовк. — Тернопіль: ТНТУ, 2018. — 296 с.

ДОДАТКИ